

MIRJANA PERIŠIĆ | GORDANA JOVANOVIĆ | ANDREJA STOJIĆ

KOMPLEKSNOST ŽIVOTNE SREDINE

INTEGRALNI PRISTUP RAZUMEVANJU FENOMENA



UNIVERZITET SINGIDUNUM
ŽIVOTNA SREDINA I ODRŽIVI RAZVOJ

Mirjana D. Perišić
Gordana P. Jovanović
Andreja M. Stojić

KOMPLEKSNOST ŽIVOTNE SREDINE: integralni pristup razumevanju fenomena

Prvo izdanje

Beograd, 2024.

KOMPLEKSNOST ŽIVOTNE SREDINE: integralni pristup razumevanju fenomena

Autori:

dr Mirjana D. Perišić

dr Gordana P. Jovanović

dr Andreja M. Stojić

Recenzenti:

Milena Rikalović, vanredni profesor, Univerzitet Singidunum

Svetlana Stanišić, redovni profesor, Univerzitet Singidunum

Izdavač:

UNIVERZITET SINGIDUNUM

Beograd, Danijelova 32

www.singidunum.ac.rs

Za izdavača:

dr Milovan Stanišić

Priprema za štampu:

Miloš Višnjić

Dizajn korica:

Aleksandar Mihajlović, MA

Godina izdanja:

2024.

Tiraž:

300

Štamparija:

Caligraph, Beograd

ISBN: 978-86-7912-826-3

Copyright:

© 2024. Univerzitet Singidunum

Izdavač zadržava sva prava.

Reprodukcija pojedinih delova ili celine ove publikacije nije dozvoljena.

Sadržaj



Inspiracija	1
1. UVOD	7
2. ŽIVOTNA SREDINA: POJAM I DEFINICIJA	15
2.1. Osnovne karakteristike životne sredine	16
2.2. Podsystemi životne sredine	19
2.2.1. Litosfera	20
2.2.2. Zemljište	22
2.2.2.1. Nastanak zemljišta	22
2.2.2.2. Tipovi zemljišta	25
2.2.2.3. Mehanički sastav zemljišta	26
2.2.2.4. Hemijski sastav zemljišta	27
2.2.2.5. Značaj zemljišta	39
2.2.3. Hidrosfera	40
2.2.3.1. Hemijske reakcije u vodi	43
2.2.3.2. Kiseonik u vodi	46
2.2.3.3. Ugljen-dioksid karbonatna ravnoteža	47
2.2.4. Atmosfera	52
2.2.4.1. Fizika atmosfere	54
2.2.4.2. Atmosferska hemija	58
2.2.5. Biosfera	75
2.3. Osnovni procesi u životnoj sredini	78
2.3.1. Protok energije u prirodi	78
2.3.2. Kruženje azota	81
2.3.3. Kruženje ugljenika	83
2.3.4. Kruženje kiseonika	85
3. ZAGAĐENJE ŽIVOTNE SREDINE	58
3.1. Zagađujuće materije	93
3.2. Otpad u životnoj sredini	113
3.3. Buka u životnoj sredini	115
3.4. Zračenje u životnoj sredini	118
3.5. Zagađenje podsystema životne sredine	121
3.5.1. Zagađenje litosfere	121

3.5.2. Zagađenje zemljišta	124
3.5.3. Zagađenje hidrosfere	125
3.5.4. Zagađenje atmosfere	128
3.5.5. Zagađenje biosfere	129
3.6. Uticaj zagađenja na životnu sredinu	131
3.6.1. Ekološki rizik	132
3.6.2. Zdravstveni rizik	133
4. ANALITIČKI PRISTUP RAZUMEVANJU FENOMENA I REŠAVANJU PROBLEMA U ŽIVOTNOJ SREDINI	143
4.1. Konceptualizacija fenomena u životnoj sredini	146
4.2. Nauka o životnoj sredini	147
4.3. Hemija i analitička hemija životne sredine	148
4.4. Fizika životne sredine	150
4.5. Ekologija	152
4.6. Nauka o podacima	156
5. OSMATRANJE ŽIVOTNE SREDINE	161
5.1. Uzorkovanje i priprema uzoraka	163
5.1.1. Uzorkovanje zemljišta	164
5.1.2. Uzorkovanje vode	166
5.1.3. Uzorkovanje vazduha	168
5.2. Biomonitoring	171
5.3. Instrumentalne metode za analizu uzoraka iz životne sredine	172
5.3.1. Osnovni pojmovi u analitičkoj hemiji	174
5.3.2. Odabir i validacija metode	177
5.3.3. Razvijanje postupka i kontrola kvaliteta	181
5.3.4. Spektroskopske apsorpcione i emisione metode	186
5.3.5. Separacione metode i hromatografija	207
5.3.6. Masena spektrometrija	216
5.3.7. Elektroanalitičke metode	221
6. ANALIZA PODATAKA IZ OBLASTI ŽIVOTNE SREDINE	233
6.1. Okvir za razumevanje fenomena u oblasti životne sredine	234
6.2. Analiza fenomena	235
6.3. Primena nauke o podacima u oblasti životne sredine	240
6.4. Pretprocesiranje podataka	250
6.5. Statističke mere	257
6.6. Osnovne statističke metode	259
6.7. Statistička analiza vremenskih serija	276

6.8. Statistička karakterizacija izvora zagađenja	289
6.8.1. Karakterizacija dominantnih izvora zagađenja	289
6.8.2. Identifikacija lokalnih izvora zagađenja vazduha	296
6.8.3. Identifikacija udaljenih izvora zagađenja vazduha	300
6.8.3.1. Trajektorije cirkulacije vazduha	300
6.8.3.2. Hibridni receptorski modeli	307
6.8.4. Disperzija zagađujućih materija	316
6.9. Statistička analiza uticaja faktora životne sredine na zdravlje ljudi i mortalitet	324
6.9.1. Procena zdravstvenih rizika	325
6.9.2. Procena stope smrtnosti	326
6.10. Regresija	329
6.11. Veštačka inteligencija	333
6.11.1. Mašinsko učenje	334
6.11.1.1. Najbliži susedi	336
6.11.1.2. Stabla odlučivanja	337
6.11.1.3. Ansambli stabala odlučivanja	337
6.11.1.4. Klasterizacija	341
6.11.1.5. Neuronske mreže	342
6.11.2. Metaheuristike	344
6.11.3. Metode interpretacije modela mašinskog učenja	346
6.11.3.1. Model-agnostičke metode	348
6.11.3.2. Globalne model-agnostičke metode	349
6.11.3.3. Lokalne model-agnostičke metode	351
6.11.3.4. Kooperativna teorija igara i Šepļijeva vrednost	352
6.12. Vizuelizacija podataka i rezultata analiza	360
7. ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE	365
7.1. Tehnologije zaštite životne sredine	365
7.1.1. Prečišćavanje vazduha	366
7.1.2. Prečišćavanje voda	380
7.1.3. Remedijacija zemljišta	388
7.1.4. Integralni sistem upravljanja otpadom	391
7.1.5. Zaštita od buke u životnoj sredini	394
7.1.6. Zaštita od elektromagnetnog zračenja	396
7.2. Politika zaštite životne sredine	398
7.2.1. Međunarodne konvencije i sporazumi	398
7.2.2. Nacionalna politika zaštite životne sredine	401
7.3. Monitoring životne sredine	406

7.3.1. Opšti principi monitoringa	408
7.3.2. Postupak monitoringa životne sredine	411
7.3.3. Monitoring zemljišta	414
7.3.4. Monitoring vode	420
7.3.5. Monitoring vazduha	429
7.3.6. Monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini	437
7.3.7. Monitoring nejonizujućeg zračenja	439
7.3.8. Monitoring buke	441
7.3.9. Monitoring otpada	443
Rezime	446
Literatura	448
Izvor slika	458
Biografije autora	470

Inspiracija



Rezultat modernog načina života i odluka koje donosimo na ličnom i civilizacijskom planu nepovratno narušava stanje životne sredine, uzrokujući prevremenu smrt više od 9 miliona ljudi godišnje. To je kao da svake godine sa lica Zemlje nestane država veća od Srbije. Svakog sata, više od 1000 ljudi, a svake četiri sekunde jedan čovek.

Prema poslednjem izveštaju Svetske zdravstvene organizacije, 99% stanovništva udiše vazduh lošeg kvaliteta. Degradirano je blizu 30% zemljišta što utiče na kvalitet života svakog trećeg čoveka na planeti, dok problem sa pijaćom vodom ima svaki četvrti čovek.

Šta govore ovi brojevi? Očigledno je da savremeno društvo većinski ne razume ozbiljnost i kompleksnost problema, ne doživljava da ga se tiču, niti shvata šta je neophodno učiniti kako bi se trenutno stanje unapredilo.

Zamislimo situaciju u kojoj lečenje nije u rukama lekara? Suprotno potrebi, ispostavlja se da na celokupno stanje životne sredine dominantno utiču kapital i donosioci odluka. Novac. Stručnost, sposobnost i angažovanje. Zakoni, regulative, primene i kontrola. Organizacija, interakcija, komunikacija i saradnja. Ponašanje, etika, odgovornost i svest. Savest. Sve ovo dovodi do aktivnosti koje direktno određuju celokupno stanje životne sredine i zdravlje svih ljudi.

Rame uz rame sa donosiocima odluka nalaze se naučnici.

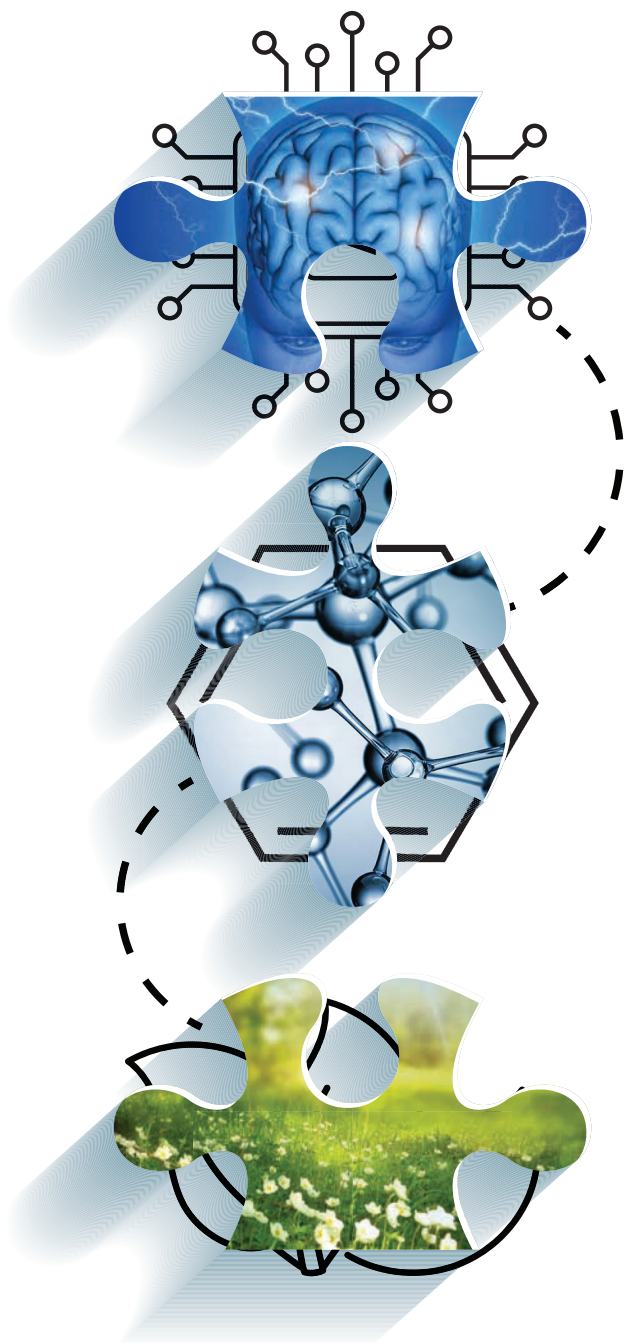
Decenijama unazad istraživanja dokazuju prisustvo hiljadu puta više toksičnih, mutagenih i kancerogenih jedinjenja od broja zagađujućih materija navedenih u regulativama. Prepoznaje se i nužnost široke kontekstualizacije fenomena iz oblasti životne sredine, uključivanjem velikog broja parametara ili primene najsofisticiranijih koncepata analize podataka adekvatnih za analizu kompleksnih sistema. Međutim, najveći broj naučnika iz ove oblasti bavi se neadekvatnim, minornim segmentima realnih problema, ali i sticanjem naučnih privilegija kroz zvanja, citate, putovanja, pozicije ili puko kvantitativno uvećanje biografija.

Pored svega, društvo u kome živimo ne razume ni moć solidarnosti i saradnje. Važno je izgraditi lanac i mehanizme saradnje, kao i efikasnu razmenu informacija između aktera u procesu zaštite životne sredine, od naučnika, donosilaca odluka, institucija, kompanija, do građana.

Gde se u tom lancu nalaze studenti? Pitanje koje bi možda trebalo da postave sebi, ne bi li utvrdili svoje mesto, je u kojoj meri se mire sa činjenicom da svake godine aktuelno stanje životne sredine odnese više od 9 miliona života.

Ova knjiga je pokušaj autora da skiciraju koncept i trasu puta dolaska do znanja utemeljenog u podacima u oblasti životne sredine. Kako podatke pretvoriti u činjenice, činjenice u znanje, znanje u uvid i na kraju uvid u mudrost koja će pomoći u razumevanju sveta u kome živimo, ali i donošenju boljih odluka, odluka u skladu sa civilizacijskim trenutkom u kom se nalazimo.

Autori



UVOD

1. UVOD

Ekološki prihvatljiv društveno-ekonomski razvoj trebalo bi da bude imperativ savremenog društva. To podrazumeva održivo korišćenje i upravljanje prirodnim resursima, unapređenje zakonodavnih okvira, i nastojanje da se što bolje razumeju složeni procesi koji dovode do zagađenja životne sredine. Poslednjih decenija nagli rast ljudske populacije i intenzivni tehnološki i privredni razvoj društva usloveli su prekomernu eksploataciju prirodnih dobara u svim delovima sveta, a urbanizacija i koncentrisanje velikog broja ljudi i njihovih aktivnosti na malom prostoru, dodatno su narušili ekološku ravnotežu na Zemlji.

U savremenim uslovima života dovedeni su u pitanje kvalitet vazduha, vode i zemljišta ne samo na lokalnim, već i na globalnom nivou. Osim što doprinosi lošem kvalitetu života, zagađenje se smatra i jednim od značajnih faktora koji utiču na dužinu životnog veka. Prema procenama Svetske zdravstvene organizacije (*WHO, 2023*) samo usled zagađenja vazduha 4,2 miliona ljudi u svetu prerano umre svake godine, pretežno od akutnih i hroničnih respiratornih, kardio-vaskularnih i neuroloških oboljenja. U odnosu na propisane standarde Svetske zdravstvene organizacije, čak 99% svetske populacije udiše vazduh lošeg kvaliteta¹. Takođe, dostupnost čiste vode je postala globalni problem koji utiče na značajan deo populacije. U ovom trenutku procenjuje se da više od milijardu ljudi nema dovoljno vode za piće, a svaki treći čovek na planeti pije vodu koja nije ispravna i bezbedna². Nedostatak čiste vode za piće i odgovarajućih sanitarnih uslova doprinosi širokom spektru zdravstvenih problema, naročito bolesti koje se prenose vodom kao što su kolera, tifus i dizenterija. Zagađenje i prekomerna upotreba vodnih resursa, promena režima padavina, poplave i suše, koje prate klimatske promene, osim posledica na kvalitet života i zdravlje ljudi, imaju štetne efekte na brojne ekosisteme, uključujući i njihovu trajnu degradaciju. Prema izveštajima Ujedinjenih Nacija značajno globalno ekološko pitanje je i degradacija zemljišta, koja podrazumeva eroziju tla, dezertifikaciju, zaslanjivanje i zagađenje, što utiče na sigurnost hrane, biodiverzitet, a samim tim i na živote i zdravlje ljudi. Ovaj oblik devastacije životne sredine pogađa četvrtinu površine Zemlje i preko 1,3 milijarde ljudi širom sveta, a najranjiviji regioni uključuju sušne oblasti u Africi, Aziji i Australiji.

1 https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2

2 <https://www.who.int/news/item/18-06-2019-1-in-3-people-globally-do-not-have-access-to-safe-drinking-water-unicef-who>

Širok spektar antropogenih aktivnosti, a prvenstveno sagorevanje fosilnih goriva, prekomerna urbanizacija i devastacija biljnog pokrivača, kao posledicu imaju porast koncentracija gasova staklene bašte u atmosferi. Brojni su dokazi kojima se efekat staklene bašte može povezati sa porastom globalne temperature na Zemlji, i posledičnim promenama u klimatskom sistemu koje uzrokuju otopljanje velikih ledenih površina, povećanje nivoa mora i okeana, ali i sve češću pojavu suša, poplava i drugih vremenskih nepogoda.

Pored širenja svesti o značaju zaštite vazduha, vode i zemljišta od prekomernog zagađenja, opstanka ekosistema planete, brige o ljudskom životu i zdravlju, kod ljudi raste i zabrinutost zbog neracionalnog korišćenja prirodnih resursa. Svetske rezerve nafte, fosilnog goriva od koga se dobija trećina energije na globalnom nivou³, se iscrpljuju velikom brzinom, i procenjeni period eksploatacije iznosi nekoliko desetina narednih godina⁴. S tim u vezi, pristupa se traženju alternativnih, obnovljivih izvora energije i očuvanju zaliha stvaranih milionima godina. Takođe, značajan uticaj na stanje u životnoj sredini ima aktuelno „potrošačko društvo“ i prateća ekonomska politika, gde se kao cilj nameće intenzivna i što jeftinija proizvodnja, bez osvrta na primenjene tehnologije i štetne posledice koje one mogu imati. Svaki vid racionalizacije trošenja prirodnih dobara i uvođenja mera zaštite životne sredine u krajnjoj liniji dovodi do ograničenja i poskupljenja proizvodnje, odnosno umanjenja profita, što je suprotno interesima proizvođača.

Kompleksni uslovi u životnoj sredini u velikoj meri oblikuju zagađenje i doprinose njegovom transportu kroz sve podsisteme, a u krajnjoj instanci najveća je briga za zdravlje i život ljudi. Epidemiološke studije, kojima se istražuju i procenjuju dugoročni štetni uticaji zagađenja, vremenski su zahtevne i traju po nekoliko desetina godina. Neretko u takvim istraživanjima, usled bržeg industrijskog i tehnološkog razvoja, dolazi do kašnjenja u sagledavanju ozbiljnosti i posledica najznačajnijih uticaja na životnu sredinu. S druge strane, promenljivost u životnoj sredini, odnosno prostorna i vremenska varijabilnost ekoloških uslova, u velikoj meri otežavaju praćenje funkcionalnosti, usmeravanje aktivnosti i kontrolu. Savremeni trenutak u oblasti nauke o životnoj sredini odlikuje nedovoljna pokrivenost kvalitetnim istraživanjima koja bi se sistematski bavila analizom aktuelnog stanja i otkrivanjem procesa koji dovode do emisije, transmisije i održavanja visokih nivoa zagađujućih materija u svim medijumima.

3 <https://www.visualcapitalist.com/ranking-the-countries-with-the-largest-proven-global-oil-reserves-in-the-world/>

4 <https://www.worldometers.info/oil/>

Iz činjenice da životna sredina, prirodni i socijalni uslovi predstavljaju jedinstveni kompleks kako na strukturnom nivou tako i na nivou međusobnih uticaja njenih elemenata, u analizi je neophodan multidisciplinarni pristup, kao i sveobuhvatno, globalno istraživanje.

U cilju rešavanja nagomilanih problema u oblasti brige o životnoj sredini, kreirane su i brojne međunarodne i nacionalne strategije, zakoni i podzakonska akta kojima se teži realnom sagledavanju aktuelnog stanja, smanjenju negativnih uticaja na životnu sredinu i usmeravanju ekonomije i privrede ka održivom razvoju. Razvijene zemlje se trude da što efikasnije sprovedu zakonom propisane mere i poštuju norme u oblasti zaštite životne sredine, dok je u nerazvijenim, i zemljama u razvoju, pored nepostojanja adekvatnih zakonskih okvira, veliki problem i njihova nedosledna primena. Takođe, u pojedinim nedovoljno razvijenim društvima primetno je i odsustvo svesti i kulture o značaju zagađenja i potrebi da se ono spreči, a nastale posledice saniraju.



"Mi nismo zemlju nasledili od svojih predaka, mi smo je pozajmili od svojih potomaka!" Seattle – indijanski poglavica plemena Duwamish, 1854. godine

Zagađenje životne sredine je jedan od najvećih problema današnjice, i da bi se obezbedio uspešan napredak društva, briga o životnoj sredini na globalnom nivou trebalo bi da predstavlja jedan od prioritarnih zadataka. To podrazumeva temeljnu promenu odnosa čoveka prema prirodi, a u tom smislu značajnu ulogu ima obrazovanje usmereno ka zaštiti životne sredine. Vaspitno-obrazovni proces od najranijih uzrasta, usmeren ka podizanju svesti o racionalnom korišćenju raspoloživih prirodnih resursa i maksimalnoj kontroli unošenja zagađujućih materija u životnu sredinu, treba da traje ceo život i da formira osećaj odgovornosti, od pojedinaca do najviših struktura svakog društva.

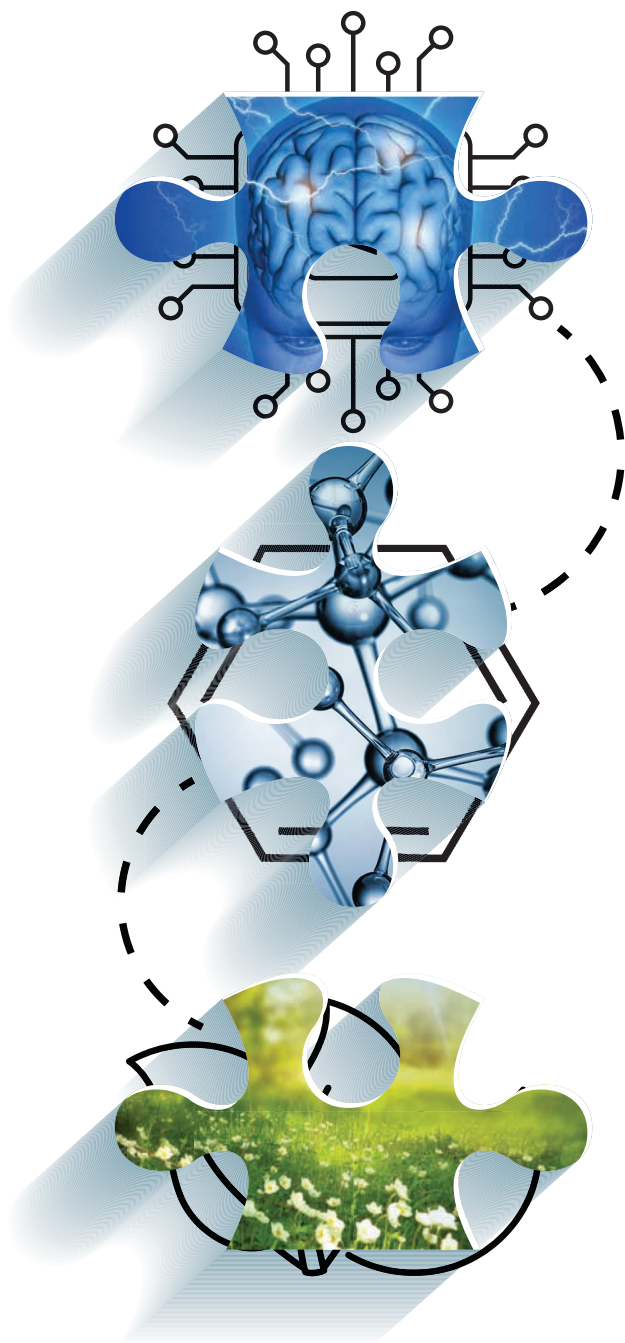
Ova knjiga predstavlja sveobuhvatan pristup proučavanju kompleksnih fenomena u oblasti životne sredine, analizirajući međusobno povezane komponente prirodnih i antropogenih sistema. Počevši od definicije i osnovnih karakteristika životne sredine, autori razmatraju glavne podsisteme poput litosfere, hidrosfere, atmosfere i biosfere, detaljno objašnjavajući njihove strukture i funkcije. Posebna pažnja posvećena je proučavanju zemljišta, vode i vazduha, sa akcentom na hemijske i fizičke procese koji se u njima odvijaju.

Centralni deo knjige bavi se zagađenjem životne sredine, gde se analiziraju zagađujuće materije poput suspendovanih čestica, neorganskih gasova i isparljivih organskih jedinjenja. Opisuju se različiti tipovi emisija, transport i disperzija zagađujućih materija, kao i njihov uticaj na različite sfere životne sredine. Posebno su razrađeni problemi zagađenja litosfere, hidrosfere, atmosfere i biosfere, uz prikaz metodologija za njihovo praćenje i kontrolu.

Knjiga takođe uvodi analitičke pristupe za razumevanje i rešavanje ekoloških problema, uključujući osmatranje životne sredine, uzorkovanje i instrumentalne metode za analizu podataka. Autori ističu važnost statističke obrade podataka, modeliranja i nauke o podacima, posebno u kontekstu identifikacije lokalnih i udaljenih izvora zagađenja. Korišćenjem naprednih metoda poput hibridnih receptorskih modela i regresione analize, čitalac stiče uvid u složene mehanizme kojima se zagađujuće materije šire u životnoj sredini.

U završnim poglavljima, autori nude integralni pogled na zaštitu životne sredine, analizirajući različite tehnologije za prečišćavanje vazduha, voda i zemljišta, kao i politike i regulative koje se odnose na ovu oblast. Knjiga se bavi i savremenim izazovima, uključujući upotrebu veštačke inteligencije i mašinskog učenja u analizi podataka iz životne sredine.

Kroz detaljnu i interdisciplinarnu analizu, knjiga ima za cilj da pruži čitaocu uvid u složenost ekoloških problema i alate za njihovo razumevanje i rešavanje, pri čemu naglašava potrebu za naučnom saradnjom, etikom i odgovornošću svih aktera u procesu očuvanja životne sredine.



ŽIVOTNA SREDINA: POJAM I DEFINICIJA

2. ŽIVOTNA SREDINA: POJAM I DEFINICIJA

Životna sredina je deo prostora na Zemlji u kome koegzistiraju organizmi koji pripadaju različitim vrstama. Živa bića naseljavaju predele različitih karakteristika, sa drugačijim resursima kao što su hrana, voda i energija, stupajući pri tom u raznovrsne međusobne interakcije. Često se pod pojmom životne sredine misli na životnu sredinu ljudi, i ona po tom tumačenju predstavlja kompleksan ambijent u kome čovek živi i stvara. Razvoj savremene civilizacije (tehnologije, trgovine i različitih oblika komunikacije) uticao je da čovečanstvo naseli veliki deo planete, oblikuje ambijent u kome živi. Dodatno, antropogene aktivnosti imaju značajan uticaj na sve delove životne sredine.



Životna sredina je skup prirodnih i stvorenih vrednosti čiji kompleksni međusobni odnosi čine okruženje, odnosno prostor i uslove života⁵

Osim prirodnih, geoloških i bioloških vrednosti, u koje ubrajamo: vodu, vazduh, zemljište, biljni i životinjski svet, klimu i zračenje, životnu sredinu čine i otvorene vrednosti koje čovek stvara: zajednice, naselja, objekti, infrastruktura i druga dobra za opštu upotrebu. Najjednostavnija definicija životne sredine koja bi objedinila obe navedene komponente, bila bi da je to sredina u kojoj ljudi imaju sve što im je potrebno za odvijanje kvalitetnog života, koji podrazumeva njihov razvoj, razmnožavanje i opstanak. Prirodna sredina predstavlja relativno ograničen podsystem nastao mnogo pre postanka čoveka i koji postoji bez njegovih direktnih uticaja, dok s druge strane ljudska populacija i njene

5 Republika Srbija, Zakon o zaštiti životne sredine Republike Srbije („Službeni glasnik RS”, br. 36/2009, 72/2009)

tekovine predstavljaju dinamičan element, koji stalno raste, menja se i utiče na prirodu. Prirodni procesi, vulkanske erupcije, zemljotresi, erozije, oluje, poplave, povremeno dovode do narušavanja ravnoteže u kompleksnom sistemu životne sredine, ali su prisutni od nastanka života i uključeni u evolutivne tokove. S druge strane, društvo je savremenog čoveka, koji predstavlja deo prirode, oblikovalo kao socijalno i društveno biće zanemarujući njegov uticaj na prirodu, kao i uticaj prirode na njega. U želji da zadovolji svoje potrebe ljudsko društvo tokom svog razvoja pomera granice, prilagođava i u sve većoj meri menja svoje životno okruženje. Priroda ovih promena je takva da one do izvesne mere mogu biti apsorbovane, ali neretko dovode do narušavanja uspostavljene dinamičke ravnoteže na Zemlji, trajnih posledica i nepovratnih gubitaka.

2.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE ŽIVOTNE SREDINE

Etimološki, sintagma životna sredina je srpski prevod engleske reči *environment*, koja poreklo ima u francuskom izrazu *environ* – okrenuti, okružiti, a u prevodu opisuje interakciju između živih bića, uključujući ljude, i njihovog okruženja, ili uopšteno interakciju živih i neživih aspekata prirode. Usled delovanja velikog i promenljivog skupa različitih faktora, kao osnovne osobine životne sredine najčešće se navode: kompleksnost, varijabilnost, dinamičnost i heterogenost.

Kompleksnost se ogleda u brojnim složenim interakcijama različitih elemenata i podsistema. To uključuje žive organizme, njihove međusobne odnose, kao i dominantne uticaje čoveka na životnu sredinu, uz prirodne klimatske, geološke, vegetacijske i druge faktore. Na primer, kada isparljiva organska jedinjenja (VOC) dospeju u vazduh, mogu se rastvoriti u atmosferskoj vodi. Proces njihovog ispiranja je složen i zavisi od niza faktora. Prema dostupnoj literaturi, raspodela VOC u sistemu voda-vazduh zavisi od Henrijeve konstante, temperature, efekta „isoljavanja“ rastvorenih soli, organskih materijala i kiselina. Takođe, VOC učestvuju u fotohemijским reakcijama, formiranju aerosola u prisustvu suspendovanih čestica, i interakcijama na granici gas-voda (vodonične veze, površinska adsorpcija i van der Valsove sile).

Kada je reč o **varijabilnosti**, najpre treba imati u vidu genetičku varijabilnost kojom se kroz mutacije i rekombinacije gena postiže izuzetna raznovrsnost živog sveta, ali je evidentna promenljivost i drugih elemenata životne sredine (klime, reljefa, sastava zemljišta, vazduha i dr.), i to na različitim vremenskim i prostornim skalama. Zagađenje zemljišta je rezultat prirodnih i antropogenih procesa koji se odvijaju na različitim prostornim skalama (prostorna varijabilnost zagađenja).

Neki od štetnih uticaja se uočavaju na lokaciji zagađivača ili na manjim udaljenostima (npr. navodnjavanje zagađenom vodom, primena agrohemijских mera), dok se uticaji vremenskih prilika ili emisija poreklom iz saobraćaja i industrije, usled transporta zagađujućih materija, mogu primetiti i na mnogo većim rastojanjima.

Dinamičnost odlikuje većinu procesa na Zemlji, pa se tako u vremenu i prostoru uočavaju promene u različitim intervalima (smene dana i noći, godišnjih doba, solarni ciklusi, klimatski pojasevi i dr.). Na primeru zagađenja vazduha, dinamičnost se ogleda u disperziji i razblaživanju zagađujućih materija pod uticajem meteoroloških parametara (temperatura, vlažnost vazduha, visina planetarnog graničnog sloja), urbane mikroklimе i lokalne topografije (raspored i visina stambenih objekata i geometrija ulica).

Sve navedeno doprinosi **heterogenosti** na različitim nivoima, koja sa jedne strane oblikuje raznolikosti i bogatstvo životnih uslova na Zemlji, ali sa druge strane u velikoj meri otežava ljudsku želju i potrebu da životnu sredinu u potpunosti istraži i razume. Ovo posebno dolazi do izražaja u situacijama kada postoji težnja čoveka da ponovo uspostavi normalne tokove funkcionisanja životne sredine, i pokuša da ograniči svoje aktivnosti koje na nju imaju negativan uticaj.

Proučavanjem životne sredine bavi se relativno mlada naučna disciplina nauka o životnoj sredini (*environmental science*), koja svoje uporište ima podjednako u polju prirodnih i društvenih nauka. Priroda ovih istraživanja je međudisciplinarna ili interdisciplinarna i uključuje metodologiju, iskustvo i znanja iz prirodnih (biologija, fizika, hemija, geografija), tehničkih, biotehničkih i društvenih nauka (pravo, sociologija, etika). Razvoj ove nauke pokazuje da se životna sredina i svi njeni elementi moraju sagledavati iz različitih uglova, i da je osim objašnjavajućeg pristupa prirodnih nauka, potrebno i neophodno da se problematikom istim intenzitetom bave i društvene i tehničke nauke.

Kada bi stručnjaci koji se bave životnom sredinom trebalo da izdvoje ključne karakteristike i aspekte Zemlje koji je razlikuju od drugih planeta u Sunčevom sistemu, verovatno bi dali različite odgovore u skladu sa svojim istraživačkim oblastima. Međutim, nijedna pojedinačna karakteristika se ne može izdvojiti kao značajnija od ostalih jer svaka ima vitalnu ulogu u njihovom zbirnom delovanju u funkcionisanju i održivosti Zemljinog sistema. Svaki pokušaj karakterizacije životne sredine kroz strukturiranje i podele na komponente dovodi do pojednostavljenja koje osiromašuju složenost i bogatstvo međusobnih odnosa žive i nežive prirode u njoj. Međutim, u cilju postizanja sistematičnosti istraživanja pojava, procesa i zakonitosti koje su zastupljene i važe u životnoj sredini, najčešće se analizira pet osnovnih podsistema: litosfera, zemljište, hidrosfera, atmosfera i biosfera. Svaki od navedenih podsistema ima specifične karakteristike, sastav i

processe koji se odigravaju unutar njega, i o kojima će biti reči u nastavku teksta. Pored toga, nikako se ne sme izgubiti iz vida povezanost, prožimanje i dinamička ravnoteža koja vlada među navedenim podsistemima, i čini ih nerazdvojnim delovima jedinstvenog sistema životne sredine.

Poslednjih godina kroz različite biološke teorije uvodi se i koncept antroposfere ili tehnosfere, definisan kao skup dostignuća naučnog i tehnološkog napretka (od praistorijskog oruđa do svemirskih letilica). Smatra se da tehnosfera prožima biosferu, unoseći značajne izmene prvenstveno u pogledu narušavanja prirodnih ciklusa kruženja materije i protoka energije u prirodi. Kraj prošlog veka obeležilo je donošenje i usvajanje niza međunarodnih dokumenata koji su razvoj društva stavili na put održivog razvoja. Zaštita i briga za životnu sredinu su postavljeni kao važan cilj ljudske vrste – faktora koji se najbrže menja u evoluciji biosfere.

Mnoge situacije jasno pokazuju međusobnu povezanost podsistema životne sredine i kako procesi u jednoj sferi mogu značajno uticati na druge. Na primer, kada se vazduh u atmosferi zasiti vodom, dolazi do padavina (kiša, sneg) koje povezuju hidrosferu i litosferu, izazivajući eroziju, spiranje i površinske procese koji postepeno razlažu velike stene na manje delove. Tokom vremena, erozija i spiranje pretvaraju velike stene u sedimente poput peska ili blata. Slično tome, kada vulkan iz litosfere izbaci lavu i pepeo u atmosferu, oslobađaju se gasovi i čestice koje mogu značajno uticati na kvalitet vazduha i klimu, kao i na fotosintetičke procese u biosferi. Pepeo može pasti u okeane, unoseći minerale u hidrosferu, što može promeniti hemijski sastav vode i uticati na morski ekosistem. Aktivnosti u antroposferi, kao što je urbanizacija, mogu izazvati promene u biosferi kroz krčenje šuma i zagađenje zemljišta, voda i vazduha. Ove promene zauzvrat utiču na atmosferske procese, doprinose klimatskim promenama i menjaju obrasce padavina, što opet dalje utiče na sve ostale sfere.

Fizička, hemijska ili biološka promena u nekom od podsistema životne sredine, odražava se manje ili više na sve ostale podsisteme

2.2. PODSISTEMI ŽIVOTNE SREDINE

Da bismo bolje razumeli kompleksnost koja karakteriše planetu Zemlju, važno je sagledati ključne podsisteme ili sfere koje zajedno oblikuju životnu sredinu. Svaka od ovih komponenti igra vitalnu ulogu u održavanju ravnoteže na Zemlji, iako deluju različito i pokrivaju specifične aspekte životne sredine. **Voda** je suštinski deo svih živih sistema i pokriva oko 70% Zemljine površine. Prisustvo vode proteže se kroz sve sfere životne sredine – od okeana, gde se nalazi kao rezervoar slane vode, preko površinskih voda u jezerima i rekama, do podzemnih voda, atmosferske vodene pare, polarnih ledenih kapa, pa čak i mnogih delova antroposfere. **Atmosfera**, zaštitni omotač Zemlje, igra ključnu ulogu u hidrološkom ciklusu, prenoseći vodu iz okeana na kopno. Ona apsorbuje štetno ultraljubičasto (*ultraviolet*, UV) zračenje i stabilizuje temperaturu Zemlje, čineći planetu pogodnom za život. Nauke kao što su meteorologija, fizika i hemija bave se proučavanjem kretanja vazdušnih masa, toplotnim bilansom i hemijskim reakcijama unutar atmosfere. **Litosfera**, ili čvrsta Zemlja, predstavlja osnovu na kojoj živimo i iz koje crpimo resurse poput hrane, minerala i goriva. Ovaj deo Zemlje obuhvata spoljašnji omotač i koru, gde se odvijaju važni geološki procesi. Geologija, nauka o litosferi, proučava čvrste mineralne delove Zemljine kore, ali i interakcije sa vodom koja utiče na raspadanje stena i stvaranje novih mineralnih formacija. Važna komponenta, bez koje se ne bi mogao zamisliti život na Zemlji je **zemljište** ili pedosfera, koje se sastoji od mineralnih čestica, organskih materija, vode, vazduha i mikroorganizama. Zemljište je dinamičan sistem, koji se neprestano menja pod uticajem klimatskih faktora, bioloških procesa i ljudskih aktivnosti, a igra vitalnu ulogu u transformaciji organskih i neorganskih materija, kruženju hranljivih materija i vode, kao i u regulaciji klime. **Biosfera** predstavlja globalni sistem koji obuhvata sve ekosisteme na Zemlji, uključujući sve žive organizme i njihove interakcije s abiotskim komponentama okoline. Ona je ključna za održavanje životnih procesa i ravnoteže u životnoj sredini. Proučavanje biosfere omogućava dublje razumevanje složenih interakcija između ljudi i drugih sfera Zemlje, kao i uticaja toksičnih supstanci na ekosisteme i biodiverzitet na globalnom nivou. Antroposfera, ili **tehnosfera**, je deo životne sredine koji ljudi stvaraju ili modifikuju za svoje potrebe. Iako je najmlađa od svih sfera, njen uticaj na Zemlju i njene podsisteme je ogroman. Antroposfera obuhvata sve od transportnih sistema, rudnika i poljoprivrednih aktivnosti, do kompjuterskih sistema i nuklearnih postrojenja. U savremenom svetu, veliki izazov je uskladiti napredak i razvoj tehnologije sa pitanjima zaštite životne sredine kako bi one zajedno radile u službi održivog razvoja.

Karakteristike svakoga od pomenutih podsistema biće detaljno razmotrene u narednim poglavljima.

2.2.1. Litosfera

Litosfera (*litos* – kamen, *sfera* – lopta) je deo spoljašnjeg, čvrstog omotača Zemlje. Osnova za stvaranje litosfere bila je jedinstvena, užarena masa stopljena gravitacionim i nuklearnim silama, čijim hlađenjem su nastali jezgro, omotač i kora Zemlje. Pretpostavlja se da je i pre 4,5 milijardi godina Zemljina kora bila u čvrstom stanju. Međutim, u fizičko-hemijskim procesima transformacije primarnog stenskog materijala veliku ulogu su odigrale atmosfera i hidrosfera, pa se tek nakon njihovog nastanka može smatrati da je započela evolucija litosfere. Veliki deo litosfere koju danas zatičemo nastao je pre manje od 100 miliona godina.

Na samoj površini čvrsti omotač nije kompaktna celina, već se sastoji od više uklopljenih tektonskih ploča, čije pomeranje uzrokuje nastanak zemljotresa, vulkanskih erupcija, formiranja planina i rovova u okeanima. Istraživanja su pokazala da litosferu čini sedam velikih, primarnih i nekoliko manjih tektonskih ploča okeanskog ili kontinentalnog tipa. Okeanske ploče imaju debljinu oko 10 km, a kopnene oko 75 km. U dubljim slojevima zemljine kore, ispod litosfere, nalazi se **astenosfera** (*asthenes* – slab, plastičan), koja predstavlja unutrašnji deo čvrstog omotača, i ima osobine zagrejane, ekstremno viskozne tečnosti, što omogućava kretanje tektonskih ploča. Ukupna debljina litosfere i astenosfere je do 250 km, ali je granica između ova dva sloja različita, i u najvećoj meri određena hemijskim sastavom stena i fizičkim svojstvima kao što su temperatura i pritisak na tom mestu na Zemlji.

U građi današnje litosfere učestvuju tri osnovne klase stena – **magmatske**, **sedimentne** i **metamorfne**, kao i rastresiti pokrivač, nastao njihovim raspadanjem. Veliki značaj u formiranju litosfere imale su hidrosfera i atmosfera, menjajući hemijski sastav prvobitnih stena nastalih hlađenjem i kristalizacijom vulkanske lave. Primarne magmatske stene odlikuje različit mineralni sastav, u zavisnosti od uslova temperature i pritiska tokom njihovog nastajanja. Osnovu njihove građe čine oksidi i sulfidi hemijskih elemenata, i ove stene se smatraju nosiocima teških metala sa negativnim uticajem u životnoj sredini. Zahvaljujući hidrosferi, u procesima hlađenja i taloženja neorganskih materija iz vode, formirali su se prvi sedimenti. Egzogeni procesi sedimentacije odvijaju se dvojako, u vidu fizičke mobilizacije sedimentnih materijala vodenim tokovima, ili hemijskim rastvaranjem komponenti koje se tokom sedimentacije izdvajaju iz rastvora (evaporati, karbonati i sl.). U sedimentnim stenama mogu se naći brojni mikroelementi uglavnom vezani za karbonate, ili adsorbovani na okside gvožđa, mangana ili gline koje, osim hemijskih, utiču i na fizičke osobine i izgled ove klase stena (slika 2.1). Tokom dugih geoloških perioda, litosfera je bila izložena

ekstremnim uslovima (tektonski pokreti, vulkanske erupcije, visoki pritisci i temperatura), koji su pogodovali hemijskim reakcijama transformacije magmatskih i sedimentnih stena u novu klasu metamorfnih stena. Metamorfozom dolazi do promene hemijskog sastava, kao u slučaju vodenog ispiranja određenih elemenata iz magmatskih stena, ali i do promene fizičkih karakteristika što se dešava transformacijom krečnjaka u mermer kod sedimentnih stena. Raspodela tipova stena uglavnom izgleda tako što se u površinskom sloju litosfere (prvih 15 m) nalaze sedimentne stene (mezozojske, tercijarne i kvartarne starost), dok su u dubljim slojevima pretežno magmatske stene, u čijem sastavu dominira silicijum dioksid (graniti, granodioriti i dr.). U osnovi Zemljine kore je najmlađi bazaltni sloj magmatskih stena, koji još uvek nastaje naročito u zonama okeanskih grebena, gde se vrši stalno razmicanje očvrslog dna, izlivanje magme i njeno naglo hlađenje i kristalizacija u kontaktu sa vodom.

Hemijski sastav Zemljine kore je kompleksan, i u njemu učestvuje preko sto elemenata i hiljade jedinjenja. Raspodela elemenata i jedinjenja u litosferi nije ravnomerna, i zavisi od brojnih faktora, ali u njenom sastavu dominiraju O_2 (hemijski vezan u oksidima), Si, Al, Mg i Fe, sa ukupnim udelom preko 90%. Od ostalih elemenata, sa značajno manjim udelom (<3%), najviše ima Ni, S, K, Ca i Ti. Seizmološka i geomehanička istraživanja pokazala su da u površinskom sloju dubine 25 km dominiraju jedinjenja Si i Al, dok su u dubljim slojevima (25–35 km) najviše zastupljeni Si i Mg. Osim hemijskog sastava sa promenom dubine menjaju se i fizičke osobine litosfere, pri čemu raste temperatura, od ekstremnih $-90^{\circ}C$ na površini Zemlje, do $2100^{\circ}C$ na dubini od 35 km, pritisak dostiže 20 000 bar na dubini od 35 km, a gustina stenskog materijala manje varira, od $2,7\text{ g cm}^{-3}$ na površini do prosečnih $2,9\text{ g cm}^{-3}$ na 35 km.

Usled delovanja velikog broja fizičko-hemijskih procesa, možemo reći da litosferu karakteriše prostorna i vremenska varijabilnost. Pored promena koje se dešavaju na dugačkoj vremenskoj skali (tokom milijardi godina), i o kojima sudimo na osnovu geoloških dokaza, postoje promene u litosferi koje se dešavaju u vremenu u kome živimo. Neke od najznačajnijih su kristalizacija minerala, fizička i hemijska degradacija stena, erozija, formiranje zemljišnog pokrivača, vulkanske erupcije, tektonski pokreti, radioaktivno raspadanje elemenata, promene magnetnog polja, kao i promene koje nastaju pod uticajem biogenih i antropogenih faktora.

Procesi kojima elementi iz stena dospevaju u životnu sredinu (zemljište, vodu, vazduh, biosferu) su fizička i hemijska degradacija, mobilizacija i transport. Osim ovih prirodnih procesa, značajan je i uticaj antropogenih aktivnosti, kao što je npr. otvaranja rudnika i eksploatacija sirovina iz Zemljine kore, čime se ubrzava i proces degradacije stena.

Slika 2.1 Neporemećene horizontalne strukture sedimentnih stena



2.2.2. Zemljište

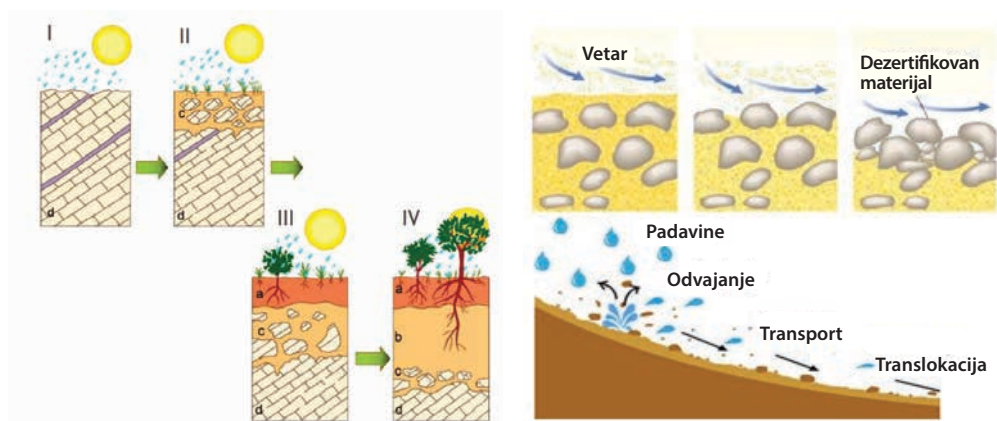
Površinski sloj litosfere u interakciji sa hidrosferom, atmosferom i biosferom prolazi kroz različite procese fizičke i hemijske transformacije, pri čemu nastaje specifičan podsistem životne sredine pedosfera ili **zemljište**. Zemljište predstavlja sastavni deo litosfere, ali se zbog jedinstvenih karakteristika i ekološkog značaja u životnoj sredini, izučava kao poseban podsistem. Često se kaže da je zemljište dinamički spoj žive i nežive prirode gde se putem niza fizičkih, hemijskih i biološki procesa obavlja razmena materije i energije u prirodi.

2.2.2.1. Nastanak zemljišta

Zemljište nastaje sporim prirodnim procesima degradacije litosfere, pri čemu je za formiranje sloja zemljišta debljine 2-3 cm potrebno više stotina godina. Debljina zemljišta zavisi od niza faktora, i može biti od nekoliko desetina cm u subpolarnim oblastima, do čak 30 m u vlažnim tropskim predelima.

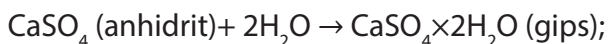
Najznačajniji faktor u nastanku zemljišta su stene prekursori, koje u najvećoj mjeri određuju hemijski i mineraloški sastav zemljišta. Površinskim raspadanjem (erozijom), kretanjem i degradacijom (pucanje/komadanje) stenskog materijala započinje proces nastanka zemljišta (slika 2.2). U drugoj fazi, klimatski faktori poput temperature, vetra i padavina, zajedno sa delovanjem živih organizama, igraju ključnu ulogu u razgradnji stenskog materijala. Ovi procesi doprinose formiranju slojeva tla (horizonta), što omogućava razvoj vegetacije. Zemljište prolazi kroz hemijsko i biološko raspadanje pod uticajem pomenutih faktora, što dovodi do taloženja materijala, kako lokalnog (autohtonog) tako i donetog (alohtonog) porekla.

Slika 2.2. Faze nastanka zemljišta

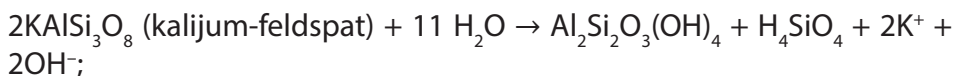


Primeri reakcija hemijske transformacije zemljišta su:

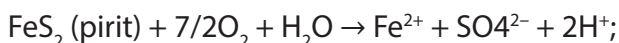
- hidratacija/dehidratacija



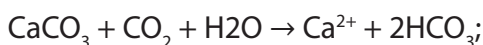
- hidroliza



- oksidacija



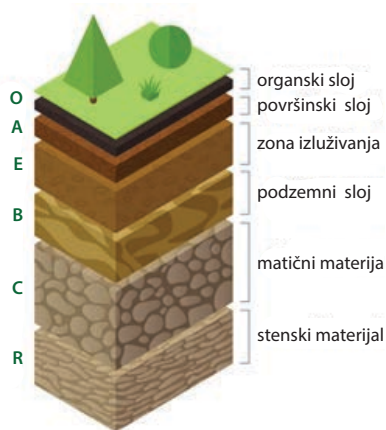
- razaranje karbonata



- ugradnja i spiranje jona alkalnih i zemnoalkalnih metala;
- dekarboksilacija;
- silifikacija (izdvajanje SiO_2) i silikacija (ugradnja SiO_2);
- oksido-redukcijske reakcije, itd.

Proces nastanka zemljišta može se pratiti na osnovu izgleda vertikalnog pedološkog profila, na kome se uočavaju horizonti različitih položaja, strukture i hemijskog sastava (slika 2.3), čija raspodela zavisi od podneblja i načina formiranja zemljišta.

Slika 2.3. Osnovni horizonti (levo) i primer vertikalnog profila zemljišta (desno)



Zemljišni horizonti se obeležavaju velikim slovima latinice, i u detaljnim klasifikacijama se definiše njih 12, ali se kao najzastupljeniji opisuju: O, A, B, C i R. Neretko se u opisu pedološkog profila mogu naći i kombinacije dva susedna horizonta (npr. AB, BC i sl.), kao i pothorizonti (A_0 , A_1 , i sl.).

Sloj najbliži površini Zemlje naziva se O horizont, i to je humusni sloj koji sadrži najveću količinu organskih materija. Debljina ovog sloja može varirati u zavisnosti od geoloških, klimatskih i drugih faktora. Ispod njega je A horizont, u kome je veći udeo mineralnih materija, pomešanih sa razloženim organskim ostacima. Ovaj sloj je karakterističan po delimičnom spiranju/izluživanju. Neki elementi se ispiraju u vidu jona (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), a drugi se transportuju u vidu koloida (Fe/Al(OH)_3). Snižena pH vrednost doprinosi raspadu minerala i transportu metala koji su adsorbovani na mineralima glina, hidroksidima i organskoj materiji.

Nakon A horizonta, nalazi se E horizont koji izostaje u suvim klimama i mladim zemljištima. U njemu se nalazi malo organske materije i izluživanje/ispiranje je intenzivno. Na većoj dubini je horizont B, koji se nekada naziva podzemlje, u kome dolazi do koncentrisanja mineralnih materija i drugih jedinjenja, kao posledica ispiranja iz gornjih slojeva. U B horizontu se mogu naći rastvorene koloidne vrste i najviše koncentracije toksičnih metala kao što su Pb, Cd, Hg, Co, Ni i Cs. Ova oblast je vidljivo drugačija po izgledu od drugih slojeva; na primer, crvena boja ukazuje na prisustvo Fe-oksida.

U horizontu C prisutni su krupniji fragmenti stena, i po hemijskom sastavu ovaj sloj je najbližiji stenskom materijalu. Stena, matični supstrat, od koga je započeo proces formiranja zemljišta, se u pojedinim klasifikacijama označava kao R (*rock*) horizont. Prilikom uzorkovanja i analize zemljišta, važno je razlikovanje pojedinih horizonata.

2.2.2.2. Tipovi zemljišta

Složenost i varijabilnost pedogenetskih faktora uslovljava postojanje različitih tipova zemljišta na Zemlji, kao i mnoštvo kriterijuma za njihovu klasifikaciju. To je verovatno i jedan od osnovnih razloga nepostojanja jedinstvenog, opšteprihvaćenog, međunarodnog sistema klasifikacije zemljišta. Uglavnom se kao osnovni kriterijumi podele zemljišta uzimaju geneza, granulometrijski sastav, lokalne karakteristike zemljišta, stepen razvijenosti pedoloških procesa, produktivnost i sl.

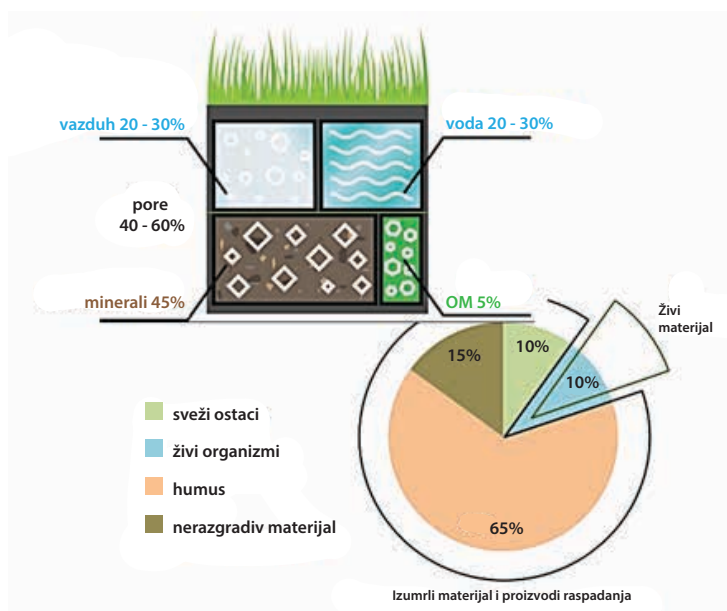
Prema jednoj od tipologija, a na osnovu karakteristika horizonta i podhorizonta, i procesa koji se u njima odvijaju, kao tri tipa zemljišta izdvajaju se zonalna, azonalna i intrazonalna. **Zonalna** zemljišta su ona koja su formirana pod uticajem klime, vegetacije i topografije karakteristične za određeno geografsko područje (zonu). Uglavnom se javljaju u oblastima sa umerenom klimom, u kojima su procesi pedogeneze sporiji, a podloge relativno stabilne. Ovi tipovi zemljišta su najzastupljeniji na planeti i obuhvataju širok spektar različitih vrsta, kao što su crnica ili černoziem (u oblastima stepske i kontinentalne klime), smeđa šumska zemljišta (u umereno toploj i vlažnoj klimi), crvenica (u suvim, suptropskim, krečnjačkim predelima), pustinsko zemljište (u veoma suvim i toplim oblastima) i mnoga druga. **Azonalna** zemljišta se javljaju u područjima koja ne pripadaju određenoj zoni, a karakterišu se visokom dinamikom procesa pedogeneze. U ove tipove zemljišta spadaju glečerska, plitka planinska, aluvijalna, zemljišta nastala na vulkanskom pepelu itd. **Intrazonalna** zemljišta se formiraju pod uticajem specifičnih lokalnih faktora, kao što su geološka struktura, hidrologija i antropogeni uticaji. U ove tipove zemljišta najčešće se ubrajaju močvarna,

zasoljena, kamenita i rudna zemljišta. Važno je napomenuti da ova klasifikacija nije jedina, ni apsolutna, i da se različiti tipovi zemljišta mogu javljati u istoj zoni, kao i da se često mogu javiti prelazni tipovi zemljišta između navedenih grupa.

2.2.2.3. Mehanički sastav zemljišta

Zemljište se često definiše kao multifazni sistem, koga čini materija u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju (slika 2.4). Udeo čvrste faze varira od 40 do 60%, i u njoj neorganske i organske materije čine skelet. U tečnoj fazi, koja se naziva i rastvor zemljišta, dominira voda sa rastvorenim materijama koja u vidu filma obavija čvrstu materiju u ispunjava pore. Gasovita faza je, bez obzira na najmanji udeo, veoma bitna u razmeni gasova među podsistemima životne sredine, a čine je uglavnom vazduh i vodena para.

Slika 2.4. Zemljište kao multifazni sistem



Čvrsta faza zemljišta sastoji se od čestica koje po veličini, mogu biti grupisane u više frakcija. **Mehanički ili granulometrijski sastav zemljišta** je kvantitativni odnos pojedinih frakcija čvrste faze zemljišta (izražen u %), i predstavlja bitnu osobinu na osnovu koje se definišu poroznost, mogućnost zadržavanja vode i druge fizičke i hemijske karakteristike.

Međunarodna klasifikacija granulometrijskog sastava zemljišta (po Atterberg-u) definiše dve osnovne frakcije – skelet i sitnu zemlju. U okviru skeleta javljaju se šljunak i kamen (sa česticama prečnika od 2 do 20 mm, odnosno većeg od 20 mm), dok sitna zemlja može imati u sastavu krupni pesak (čestice prečnika od 0,2 do 2 mm), sitni pesak (čestice prečnika od 0,02 do 0,2 mm), prah (čestice prečnika od 0,002 do 0,2 mm) i glinu (čestice prečnika manjeg od 0,002 mm). Šljunak i pesak dominiraju u šumskim, brdsko-planinskim zemljištima i aluvijalnim nanosima, dok su najsitnije frakcije prah i glina zastupljeni u ilovastim zemljištima. Smanjenjem dimenzija čestica u zemljištu smanjuje se i mogućnost propuštanja vode, zemljište postaje lepljivo, plastično i povećava se njegova aktivnost u vidu supstitucije i adicije jona, reverzibilnog vezivanja vode i sl. Prema sadržaju pojedinih frakcija zemljišta se obeležavaju različitim teksturnim oznakama, na primer pesak, ilovasti pesak, ilovača, ilovasta glina, teška glina (slika 2.5), koje upućuju na njegove fizičke i hemijske karakteristike.

Slika 2.5. Triangularni dijagram za određivanje tekture zemljišta u zavisnosti od procentnog udela pojedinih frakcija sitne zemlje



2.2.2.4. Hemijski sastav zemljišta

Hemijski sastav zemljišta obuhvata i organske i neorganske materije. Neorganski deo čine primarni i sekundarni minerali, voda, gasovi, soli i koloidi, dok organski deo uglavnom uključuje huminske i fulvo kiseline. Na mineralni sastav zemljišta, uz niz pedogenetskih faktora poput klime, reljefa, biljnog pokrivača, u najvećoj meri utiče hemijski sastav stenskog materijala od koga je zemljište nastalo (tabela 2.1).

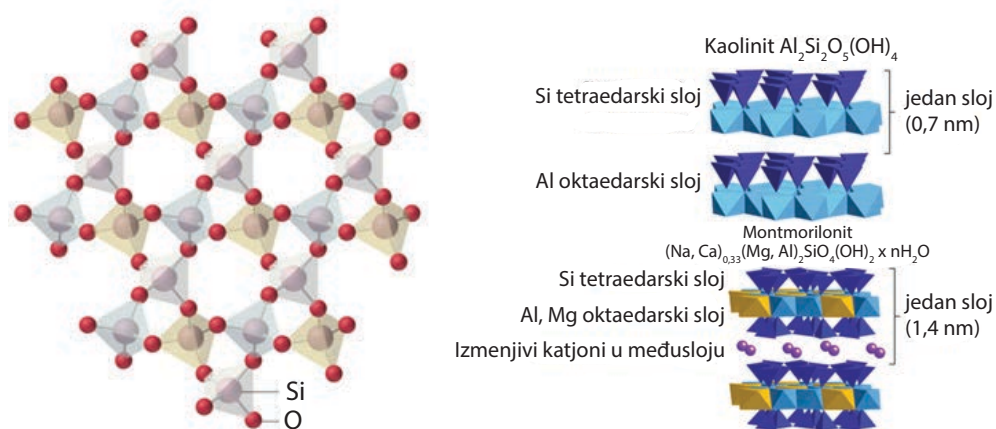
Tabela 2.1. Udeo pojedinih hemijskih elemenata [%] u površinskim slojevima litosfere i zemljišta (do 16 km)

<i>Elementi</i>	<i>Litosfera</i>	<i>Zemljište</i>	<i>Elementi</i>	<i>Litosfera</i>	<i>Zemljište</i>	<i>Elementi</i>	<i>Litosfera</i>	<i>Zemljište</i>
O	46,46	49	N	0,01	0,1	K	2,75	1,4
Si	27,61	33	P	0,13	0,08	Mg	2,58	0,6
Al	8,07	7,3	C	0,09	2	Ti	0,62	-
Fe	5,06	3,8	Mn	0,09	0,085	Zn	0,005	0,005
Ca	3,46	1,4	S	0,06	0,085	Co	0,003	0,0008
Na	2,07	0,6	Cu	0,01	0,002	Mo	0,0003	0,0003

Za razliku od stena, minerali su homogeni, sastavljeni su od jednog ili više elemenata i poseduju karakteristična fizička svojstva. **Primarni minerali** su u hemijski nepromenjenom obliku u odnosu na matični supstrat (usitnjeni su pod uticajem hemijskih, fizičkih i bioloških činilaca), dok **sekundarni minerali** predstavljaju nove tvorevine, nastale nakon hemijskih transformacija razlaganja, resinteze i kristalizacije primarnih minerala. Pored toga, hemijski sastav se menja i zahvaljujući osobini pojedinih elemenata da se koncentrišu u zemljištu, ili da vezuju niz drugih elemenata, pa je u takvim situacijama zemljište bogatije ovim elementima od stene prekursora.

Najzastupljeniji primarni mineral u zemljištu je **kvarc** (SiO_2), i u zavisnosti od tipa zemljišta njegov udeo je od 50 do 90%. Primeri primarnih Si minerala su anhidridni silikati: feldspati, pirokseni i amfiboli, koji osim Si mogu da sadrže i K, Na, Mg, Cr, Al, Fe i Mn (opšta formula: $(\text{K}, \text{Na})\text{Si}_3\text{O}_8$, $(\text{K}, \text{Na}, \text{Mg})(\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$). Postoje i primarni silikati sa konstitucionalnom vodom kao što su liskuni $(\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2)$. Sekundarni hidratizani silikati uključuju minerale gline kao što su kaoliniti i montmoriloniti (slika 2.6). Ovi minerali ne vezuju znatne količine katjona toksičnih elemenata u kiseloj sredini, ali u alkalnoj sredini pokazuju veći jonoizmenjivački kapacitet.

Slika 2.6. Prikaz Si tetraedarske strukture (levo) i primeri silikatnih minerala u zemljištu (desno)



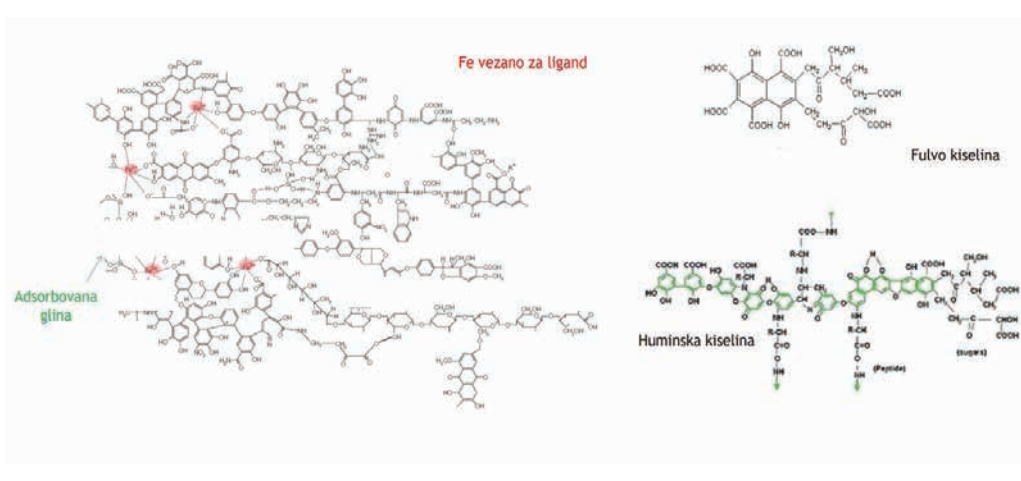
Osim navedenih Si minerala, sa značajno manjim udelom u mineralnom sastavu zemljišta učestvuju korund (Al_2O_3), magnetit ($\text{FeO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4), hematit ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), a od sekundarnih minerala kalcijum-karbonat (CaCO_3), magnezijum-karbonat (MgCO_3) i dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Ostala neorganska jedinjenja koja ulaze u sastav zemljišta su hidroksidi (boksit, opal), sulfati (gips), sulfidi (pirit, galenit), fosfati (apatit), i neorganske kiseline (azotna, sumporna).

Organska jedinjenja u zemljištu zastupljena su u živim organizmima i zemljišnoj organskoj materiji. Tokom razgradnje živih organizama nastaju biogeni elementi, CO_2 , voda i drugi, ali dolazi i do sinteze novih visokomolekulskih organskih jedinjenja koloidne prirode koja ulaze u sastav humusa. Osnovna podela zemljišne organske materije izvršena je na nehuminska jedinjenja, kojima pripadaju poznate klase organskih jedinjenja kao što su aminokiseline, ugljeni hidrati, masti, voskovi, smole i organske kiseline, i tzv. huminske materije u koje spadaju huminske kiseline, fulvo kiseline i humini.

Humifikacija podrazumeva stvaranje huminskih supstanci (slika 2.7) degradacijom proteina, ugljenih-hidrata i lipida biljnog i životinjskog porekla pod dejstvom mikroorganizama i ponovnim spajanjem prostijih jedinjenja reakcijama kondezacije, oksidacije i polimerizacije. **Fulvo kiseline** su žuto obojene, rastvaraju se u vodi, kiselinama, i bazama. Potpunom hidrolizom daju supstituisane propenolfenole, aminokiseline i ugljene-hidrate. **Huminske kiseline** su nerastvorne u kiselinama i polarnim organskim rastvaračima, dobro se rastvaraju u bazama, grade soli-humate. One su voskaste supstance mrke boje (humus).

Za njih se katjoni lako vezuju (grade komplekse-ligande) i mogu da vrše jonsku izmenu. Huminske kiseline su pogodni supstrati za niskomolekulska toksična jedinjenja. Nerastvorni deo huminske supstance naziva se **humina**. Poređenjem huminskih supstanci, od fulvo kiselina preko huminskih kiselina do humina, opaža se porast inteziteta boje, stepena polimerizacije i molekulske mase, a samim tim i smanjivanje sadržaja kiseonika, izmenjive kislosti i rastvorljivost.

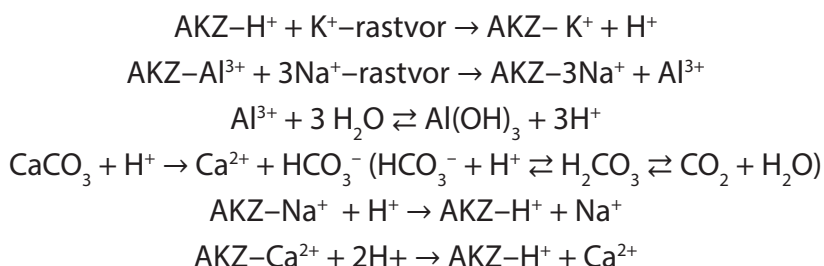
Slika 2.7. Primeri organskih jedinjenja u zemljištu



Zemljišni rastvor predstavlja ukupan sadržaj vode sa rastvorenim mineralnim i organskim jedinjenjima. Deo vode isparava iz zemljišta, a deo se gravitacionim silama sliva u dublje slojeve. Količina vode koja se zadržava zavisi od granulometrijskog sastava i količine organske supstance. Minerali tipa glina i koloidne čestice humusnih supstanci zadržavaju veće količine vode koja je nedostupna biljkama dok je u prisustvu krupnijih čestica, voda dostupnija biljkama. U tečnoj fazi zemljišta, razlikuju se:

- **gravitaciona voda** koja zauzima oko 30% krupnih pora (30-60 μm) u zemljištu i koja može da dospe do podzemnih voda ili nepropustivih horizonata, i ukoliko se zadrži u porama duži vremenski period, može da istisne vazduh;
- **openo kapilarna voda**, vezana kapilarnim silama ili adsorbovana na koloidnim česticama;
- **higroskopna vlaga**, deo kapilarne vode (30%) čija debljina opni ne iznosi više od 15 do 20 molekula vode koja se nalazi u jako malim porama, manjim od 0,2 μm (sušenjem uzoraka zemljišta na 105°C, ova voda isparava);
- **hemijski vezana voda** koja se nalazi u hidratizanim mineralima zemljišta, pre svega glinama, hidratizanim oksidima gvožđa i aluminijuma.

Vrlo važna osobina koja utiče na mobilnost i raspodelu zagađujućih materija u zemljištu, a zavisi od njegovog sastava je **kiselost zemljišta**. Prisustvo nekih jona poput H^+ , Al^{3+} i Fe^{3+} povećava kiselost zemljišta (smanjuje pH vrednost) dok prisustvo Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} smanjuje kiselost zemljišta (povećava pH vrednost). Kiselost se može definisati kao aktivna i potencijalna. **Aktivna kiselost** podrazumeva prisustvo H^+ u zemljišnom rastvoru jona i zavisi od sadržaja mineralnih i organskih kiselina, kao i sadržaja soli koje usled hidrolize reaguju kiselo. **Potencijalnu kiselost** čini prisustvo H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} jona u čvrstoj fazi odnosno u adsorptivnom kompleksu zemljišta (AKZ). Izmena jona između AKZ i zemljišnog rastvora se može predstaviti sledećim reakcijama:

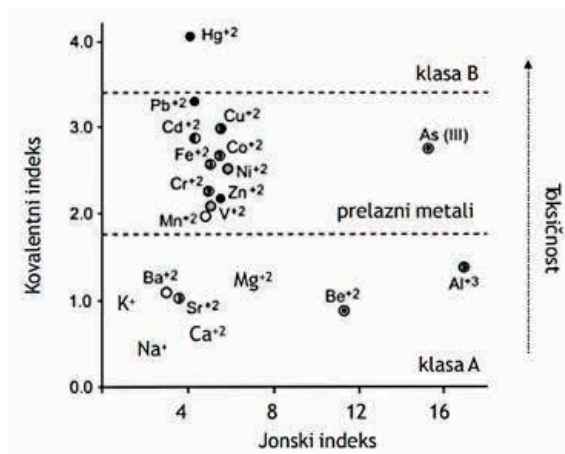


Specijacija i mobilnost neorganskih elemenata u zemljištu

Jedna od najvažnijih uloga zemljišta je obezbeđivanje esencijalnih hranljivih materija za biljke, koje se dele na **makronutrijente** i **mikronutrijente**. Makronutrijenti su elementi prisutni u većim količinama u biljkama, dok su mikronutrijenti potrebni u vrlo malim koncentracijama i igraju ključnu ulogu u funkciji enzima. Elementi koji se prepoznaju kao makronutrijenti za biljke su: ugljenik, vodonik, kiseonik, azot, fosfor, kalijum, kalcijum, magnezijum i sumpor. Ugljenik, vodonik i kiseonik do zemljišta dospevaju iz atmosfere dok se azot, fosfor i kalijum najčešće dodaju zemljištu kao đubrivo. Mikronutrijentima se smatraju: bor, hlor, bakar, gvožđe, mangan, molibden (za N-fiksaciju) i cink. Mikroelementi su potrebni biljkama samo u veoma niskim koncentracijama, a kada su prisutni u povišenim koncentracijama u zemljištu, često su toksični za biljke i druge žive organizme.

Elementi se u zemljištu mogu javiti kao komponente matičnih stena, ili mogu dospeti putem atmosferskih procesa suve ili mokre depozicije. Na primer, gvožđe i mangan se nalaze u velikom broju minerala u zemljištu. Natrijum i hlor (kao hlorid) se prirodno javljaju u zemljištu i transportuju se atmosferskim putem nakon isparavanja sa morskih površina. Mangan, gvožđe, hlor i cink mogu biti uključen u fotosintezu. Bor, bakar, vanadijum i cink mogu izomorfno zameniti ili biti koprecipitirani sa drugim elementima u feldspatima, amfibolima, olivinama, piroksenima i liskunima.

Slika 2.8. Ekološki oblik elemenata u zemljištu



Sa aspekta zagađenja i zaštite zemljišta, važne osobine neorganskih elementa, bilo da se posmatraju kao makroelementi, mikroelementi, mikronutrijenti ili toksični ("teški") metali, su oblik u zemljištu i mogućnost i stepen mobilnosti. Elementi mogu biti prisutni u zemljištu:

- kao komponente zemljišnih minerala (karbonati, Fe i Mn oksidi, sulfidi) ili organske materije (kompleksi);
- sorbovani na površini minerala ili vezani za izmenjivačka mesta;
- u zemljišnom rastvoru (joni, neorganski i organski kompleksi).

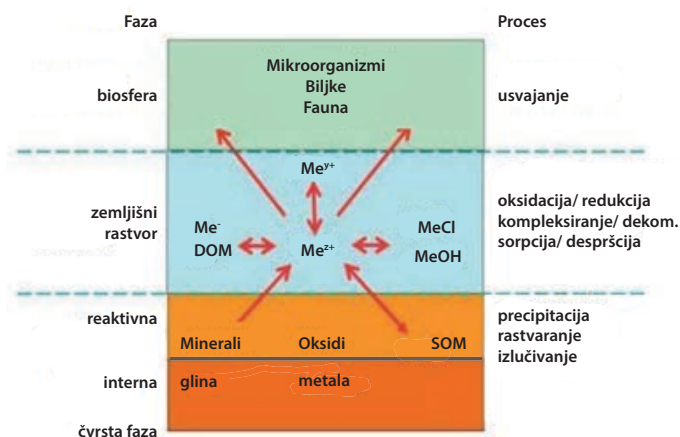
Poseban termin koji se uvodi kada se razmatra ponašanje elemenata u zemljištu je **ekološki oblik elementa**. Na osnovu kovalentnog (sposobnost metala da primi elektrone od donor liganda – anjon, katjon ili neutralni molekul koji se vezuje za centralni metalni atom ili jon) i jonskog indeksa (mera mogućnosti građenja jonske veze), elementi se dele na: klasu A, klasu B i prelazne elemente (slika 2.8).

Klasi A pripadaju elementi koji poseduju elektronsku konfiguraciju plemenitog gasa i to su makronutrijenti mikroorganizama, biljaka i životinja, koji se pri rastvaranju u vodi i kompleksiranju vezuju za kiseonične donore elektrona. Prelazni metali obuhvataju prelazne elemente sa nepopunjenim d- orbitalama kao što su mikronutrijenti, koji grade stabilne komplekse sa kiseoničnim, azotnim i sumpornim donorima. **Klasu B** čine metalni joni sa popunjenim d- orbitalama, uglavnom vrlo toksična jedinjenja poput žive.

Proces identifikacije i kvantifikacije različitih oblika/faza elementa najčešće u uzorku zemljišta naziva se **specijacija**. Specijacijom se može odrediti oksidaciono stanja elementa ili organometalnih jedinjenja, oblik u kom su prisutni (biološki dostupan, mobilan, vezan), kao i količine jedinjenja u postojećem obliku/fazi. Oblik elementa utiče na njegove fizičko-hemijske osobine kao što su: isparljivost, rastvorljivost, podložnost fotolizi, i učešće u reakcijama kiselina i baza, polimerizacije, kompleksiranja, oksido-redukcije, taloženja i mikrobiološke transformacije. Od ovih osobina, zavisi raspodela elemenata u zemljištu odnosno njihova pokretljivost, otpornost, toksičnost, biodostupnost i bioakumulacija (slika 2.9).

Specijacija se često sastoji iz tri uzastopna koraka. U prvom odvaja se frakcija elemenata koji su lako dostupni biljkama. U drugom koraku, odvajaju se frakcije elemenata koji su rastvorni u vodi ili kiselinama, kao i reducibilne, oksidujuće, i rezidualne frakcije. Reducibilne, oksidujuće i rezidualne frakcije obuhvataju elemente koji se vezuju za Fe i Mn hidrokside, sulfide, silikatnu fazu i organsku materiju u zemljištu. U trećem koraku vrši se identifikacija tačnog oblika elementa.

Slika 2.9. Mogući procesi raspodele elemenata u zemljištu



Specijacija elemenata je značajna i da bi se dobili relevantni rezultati o zdravstvenim rizicima, posebno imajući u vidu da neki metali i metaloidi mogu biti toksični i kancerogeni, i mogu ući u lance ishrane različitim putevima. Na primer, organska jedinjenja žive, kao što je metil živa (CH_3Hg^+), su mnogo toksičniji od neorganskih oblika žive (Hg^{2+}). Hrom u obliku Cr^{3+} se u nekim slučajevima smatra mikronutrijentom, dok je njegov oblik Cr^{6+} klasifikovan kao kancerogen. Slično važi i za antimon i arsen; jedinjenja u kojima su antimon i arsen prisutni kao Sb^{3+} i As^{3+} su toksičnija od onih gde se javljaju kao Sb^{5+} i As^{5+} .

Oblik u kom je element prisutan određuje njegovu mobilnost u zemljištu. **Mobilnost elementa** zavisi od oksidacionog stanja i pH vrednosti zemljišta. U kiselijim zemljištima (pH=3-4) joni kao što su Fe^{3+} , Al^{3+} , Cd^{2+} i Co^{2+} su umereno do visoko mobilni dok se u baznim zemljištima (pH>7) Al i Fe javljaju u obliku nemobilnih hidroksida. Na mobilnost utiče i sklonost elementa ka građenju kompleksa. Na primer, Fe^{2+} može vezivati sledeće jone: Ti^{3+} , Ti^{4+} , V^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Co^{2+} , Pb^{2+} , U^{4+} , a Fe^{3+} jone: Ti^{4+} , V^{4+} , Cr^{6+} , Mn^{4+} , Co^{2+} , Pb^{2+} , Pb^{4+} , U^{6+} . Afinitet ka kiseoniku pokazuju: Cs^+ , Ba^{2+} , Li^+ , Sr^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , a afinitet ka sumporu i azotu: Mn^{2+} , Cu^+ , Sb^{3+} , As^{3+} , Au^+ i Ag^+ .

Još jedna osobina zemljišta koja je značajna za mobilnost je Eh vrednost (mera oksidujuće odnosno redukcionne moći nekog hemijskog sistema. Na Eh utiču: pH vrednost zemljišta, veličina čestica, prisustvo kompleksirajućih jona, vode u porama i mikroorganizama (koriste kiseonik). Pri Eh vrednostima od -220 mV do 0 mV u zemljištu preovladavaju anaerobni procesi, organska materija je očuvana, proizvodi se CH_4 i O_2 i dolazi do redukcije sulfata. Takođe, u redukcionim uslovima rastvaraju se mnogi oksidi i hidroksidi, a metali i metaloidi se mogu desorbovati. U uslovima od 100 mV do 400 mV karakteriše redukcija Fe^{3+} i Mn^{4+} , a pri Eh vrednostima od 300 mV do 600 mV, dominantni su aerobni procesi i razgradnja organske materije.

Ukoliko se posmatraju kombinovani uticaji pH i Eh vrednosti zemljišta na mobilnost elemenata, mogu se navesti primeri nekoliko ambijenata:

- oksidaciona i kisela sredina (pH=3) u kojoj su jako mobilni: Cd, Co, Cu, Ni i Zn, a umereno mobilni: Hg, Mn, Re i V;
- oksidaciona sredina, zemljište siromašno Fe-česticama, (pH=5) u kojoj su jako mobilni Cd i Zn, a umereno mobilni: Mo, Re, Se, Sr, Te i V;
- oksidaciona sredina, zemljište bogato Fe-česticama (pH=5); u ovoj sredini retko koji element je jako mobilan, a kao umereno se izdvajaju Cd i Zn;
- redukciona sredina, odsustvo vodonik-sulfida (pH=5) u kojoj su umereno mobilni: Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Sr i Zn;
- redukciona sredina, prisutan vodonik-sulfid (pH=5) u kojoj su umereno mobilni Mn i Sr.

Tabela 2.2. Uticaj sastava zemljišta na mobilnost elemenata

<i>Komponenta zemljišta</i>	<i>Način vezivanja</i>	<i>Način oslobađanja</i>	<i>Stepen mobilnosti</i>
<i>Taložna jedinjenja</i>			
<i>karbonati</i>	<i>Fizička i hemijska sorpcija, koprecipitacija, kompleksi</i>	<i>Rastvaranje u slabim kiselinama; oksidacija S; redukcija Fe i Mn; snižavanje pH</i>	<i>Srednji</i>
<i>sulfidi</i>			<i>Jako varira</i>
<i>Fe, Mn hidroksidi</i>			<i>Srednji</i>
<i>organska kis. jedinjenja</i>			<i>Srednji/Visok</i>
<i>Organska jedinjenja</i>	<i>Fizička i hemijska sorpcija, kompleksi</i>	<i>Razaranje, ligandi</i>	<i>Srednji/Visok</i>
<i>Ostaci matičnih stena</i>	<i>Kristalna rešetka</i>	<i>Razaranje</i>	<i>Nizak</i>

Adsorpcija jonskih oblika elemenata zavisi od sastava zemljišta, ali i tipa veze koju se može ostvariti između jedinjenja, kao što su van der Valsove sile, jon-dipol interakcije, vodonične veze, kompleksi, magnetno vezivanje i jonska izmena. Na primer, organska materija zemljišta jako veže: Cr^{3+} , Fe^{3+} , Pb i Hg; umereno sledeće elemente: Cd, Ni i Co; a slabo Mn i Zn. Za minerale glina se elementi uglavnom veoma slabu vezuju, a izuzetak su Fe^{3+} , Cd, Co i Ni. Većina elemenata pokazuje najveći afinitet ka oksidima u zemljištu, a izuzetno jaka veza se može postići između oksida i Cr^{3+} , Hg i Pb. Dok je jonska izmena kao proces malo zastupljena, najčešće zbog niske koncentracije toksičnih metala u odnosu na glavne jone, adsorpcija raste od 0% do 100% kada se pH poveća za 1 do 2 pH jedinice. Način vezivanja elemenata i nivo njihovog stepen mobilnosti u zavisnosti od komponenti zemljišta prikazan je u tabeli 2.2. U tabeli je dat i potencijalni način odvajanja elemenata od zemljišnog matriksa.



Mobilnost elemenata zavisi od fizičko-hemijskih osobina elemenata i zemljišta (pH vrednost, Eh vrednost, sastav zemljišta).

Organske supstance u zemljištu

Veliki broj zagađujućih materija pripada organskim jedinjenjima, a najčešće grupe čija se hemodinamika proučava u zemljištu obuhvataju: pesticide (insekticidi, herbicidi, fungicidi, rodenticidi), policiklične aromatične ugljovodonike (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*, PAHs), polihlorovane bifenile (*PolyChlorinated Biphenyls*, PCBs), dioksine, furane, naftu i naftne derivate i isparljiva organska jedinjenja (*Volatile Organic Compounds*, VOCs). Pregled osobina, izvora i najznačajnijih predstavnika navedenih grupa organskih polutanata dat je u poglavlju Zagađenje životne sredine, a u nastavku je diskutovana njihova raspodela u zemljištu.

Hemodinamika organskih supstanci u zemljištu zavisi od fizičko-hemijskih osobina zagađujućih materija i zemljišta, meteoroloških i klimatskih uslova. Organska jedinjenja su podložna degradaciji pod uticajem abiotičkih i biotičkih faktora pri kojoj dolazi do potpune promene molekulske strukture i raspada molekula ili formiranja stabilnih štetnijih metabolita. Osobine zemljišta od značaja za raspodelu organskih jedinjenja su: sastav, sadržaj organske materije, količina vode, pH vrednost i redoks potencijal dok su adsorpcija i desorpcija tipovi reakcija koje imaju značajan uticaj na otpornost, transformaciju i bioakumulaciju organskih jedinjenja u zemljištu.

Kada jednom dospeju u zemljište, organska jedinjenja se mogu emitovati u atmosferu putem resuspenzije i/ili isparavanja. Isparavanje zavisi od raspodele između faza gas–čvrsto, a promena temperature, brzine i pravca vetra, i količina padavina su neki od meteoroloških parametara koji utiču na fluktuacije organskih jedinjenja u zemljištu tj. na njihov transport na lokalnom, regionalnom i globalnom nivou. Takođe, procesi spiranja i oticanja kroz zemljište mogu imati uticaj na kvalitet podzemnih voda.

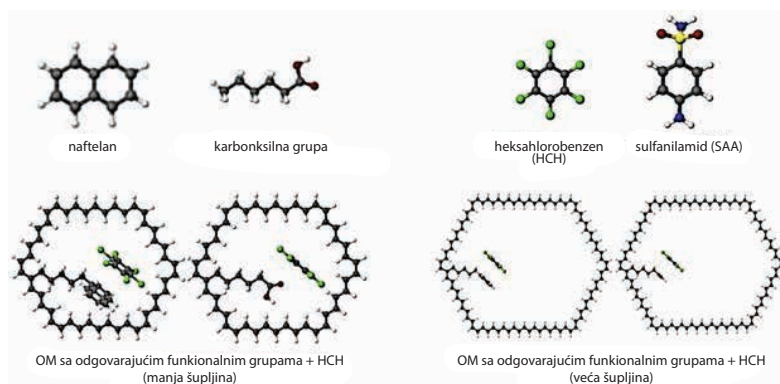
Mikroorganizmi prisutni u zemljištu mogu da razgrađuju organske zagađujuće supstance. Primer je transformacija najpoznatijeg organohlornog pesticida dihlorodifeniltrihloroetana (DDT) u dihlorodifenildihloroeten (DDE) u aerobnim uslovima i dihlorodifenildihloroetan (DDD) u anaerobnim uslovima i uz enzim dehidrohlorinazu. Reakcije mikroorganizama na prisustvo organskih jedinjenja su različite i zavise od dužine izlaganja i nivoa polutanata. **Aditivni efekti** se razmatraju kada svako pojedinačno jedinjenje u smeši doprinosi ukupnoj toksičnosti na osnovu svoje relativne potentnosti i koncentracije. Aditivne efekte mogu izazvati organska jedinjenja koja sadrže metale do potpuno organskih struktura proizvedenih za različitu namenu. Ukoliko se u smeši nađe dovoljno veliki broj organskih jedinjenja, oni kao smeša mogu uticati na toksičnost smeše iako su jedinjenja prisutna u koncentracijama koje pojedinačno ne utiču negativno.

Sinergijski efekti podrazumevaju zajedničko delovanje supstanci koje je jače nego što se procenjuje za aditivnost na bazi toksičnosti pojedinačnih supstanci dok se **inhibitorni efekti** odnose na sprečen rast i razvoj mikroorganizama.

Translokacija organskih jedinjenja iz zemljišta do izdanaka biljaka je efikasan proces samo za jedinjenja umerene polarnosti (vrednosti particionog koeficijenta oktanol-voda, $\log_{K_{OW}}$, ovih jedinjenja je u intervalu od -1 do 5). Maksimalne koncentracije se translociraju kod jedinjenja sa $\log_{K_{OW}} = \sim 1,8$. Organska jedinjenja mogu da se sorbuju na ćelijskim membranama u korenu i migriraju dalje do ksilema prolazeći kroz membrane. Veoma lipofilna jedinjenja ($\log_{K_{OW}} > 3$) se mogu jako vezati za korenov sistem, pa ne migriraju dalje (npr. polutanti poreklom iz dizel goriva). Polarna jedinjenja koja se rastvaraju u vodi ($\log_{K_{OW}} < 0,5$) se ne sorbuju u dovoljnim količinama za koren, pa se ne mogu aktivno ni transportovati do ostalih delova biljke. Isparljiva jedinjenja, npr. benzen, toluen, etilbenzen i ksileni (BTEX) imaju $\log_{K_{OW}}$ između 2 i 3, pa se mogu transportovati kroz biljke. Slično se ponašaju i alifatični ugljovodonici kraćih lanaca (C5–C10) čiji je $\log_{K_{OW}} = 3,5$ do 6. Vrlo brzo prodiru do ksilema, pa ne stignu da se razgrade u zemljištu. U ksilemu se zadržavaju od par sati do 2 dana, pa se procesom transpiracije oslobađaju iz biljaka.

Interakcija između organskih jedinjenja i čestica zemljišta se može ostvariti sorpcijom, formiranjem kompleksa i taloženjem. Fizička sorpcija se ostvaruje privlačnim silama između različito naelektrisanih čestica organskih jedinjenja iz zemljišnog rastvora i sastojaka zemljišta dok hemijska sorpcija podrazumeva vezivanje hemijskim vezama. Sorpcija se opisuje particionim (distibucionim) koeficijentom (K_D). Ovaj koeficijent se može predstaviti formulom $K_D = f_{OC} \times K_{OC}$, gde je f_{OC} frakcija organskog ugljenika, a K_{OC} koeficijent raspodele između vode i organskog ugljenika u zemljištu.

Slika 2.10. Uticaj strukture molekula organske materije u zemljištu na vezivanje organskih zagađujućih supstanci

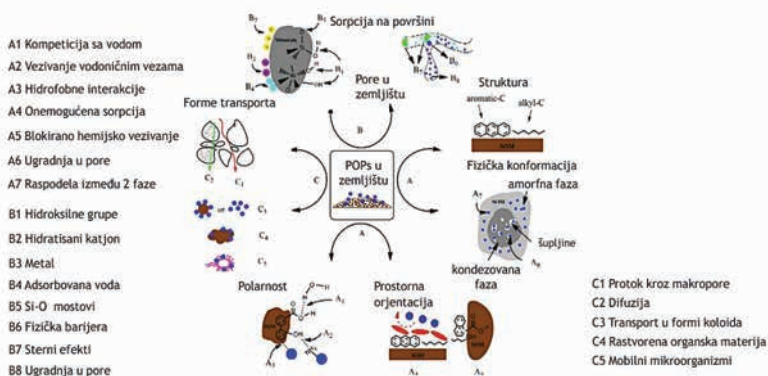


Glavni mehanizmi transporta rastvorljivih organskih jedinjenja kroz porozno zemljište su: advekcija, difuzija i disperzija. **Advekcija** predstavlja proces kretanja rastvorenih i/ili nereaktivnih supstanci u istom smeru i istom prosečnom brzinom kojom se kreće čista podzemna voda. **Difuzija** je prostiranje zagađujućih supstanci koje nastaje kao rezultat koncentracionog gradijenta od mesta veće ka mestu manje koncentracije. Kada se organske supstance kreću neravnomerno kroz pore zemljišta, rastvor nailazi na čestice zemlje koje menjaju smer kretanja rastvora (tok se „razbija“ na više struja, efekat turbulencije), pa se ovaj tip kretanja naziva **disperzija**.

Organska jedinjenja (nafta, naftni derivati, PCBs, PAHs) koja su nemešljiva sa vodom (*Non-Aqueous Phase Liquids*, NAPL) na mestu zagađenja čine četvrtu fazu multikomponentne smeše. Transport ovih jedinjenja zavisi od: 1) veličine NAPL i površine koju zauzima; 2) sastava, polarnosti, hidrofnosti, rastvorljivosti i isparljivosti NAPL; 3) osobina zemljišta, i 4) ambijentalnih uslova (temperatura, depozicija). Deo NAPL koji hemijski reaguje sa komponentama zemljišta ili je fizički zarobljen u porama naziva se rezidualna frakcija. NAPL kao što su rastvorljiviji ugljovodonici (BTEX i ostali sa nižom molekulskom masom) se rastvaraju i sa vodom u porama spiraju do podzemnih voda, pri čemu se najčešće pretpostavlja da su tok vode i poroznost zemljišta homogeni. Važno je napomenuti da su drugačiji pristupi neophodni sa aspekta proučavanja zagađenja. Tokom vremena, osobine NAPL se menjaju (gustina, sastav, hidrofnost) usled neravnotežnog prenosa između čvrstih supstanci (zemljište), tečnosti (NAPL), gasova i adsorbovane frakcije. Bio- i hemijska degradacija imaju veliki uticaj na sudbinu NAPL.

Slika 2.11. Prikaz moguće raspodele organskih zagađujućih supstanci u zemljištu; POPs – dugotrajna organska jedinjenja (Persistent Organic Pollutants)

Hemodinamika OP (rezime)



Organska materija i ugljenik (*black carbon*) kao konstituenti zemljišta imaju dominantan uticaj na raspodelu, taloženje i opstanak organskih jedinjenja u zemljištu. Huminske supstance pospešuju rastvaranje hidrofobnih, nejonskih organskih supstanci kao što su PAHs, PCBs i n-alkani; katalizuju (pozitivno ili negativno) abiotičku hidrolizu nekih pesticida; deluju kao aktivatori fotoreakcija u kojima učestvuju organska jedinjenja (npr. atrazin); i vezuju sorpcijom određene količine polutanata. Osim sastava, struktura molekula organske materije zemljišta je jako važna, čak više od količine. Na primer, aromatični oblici kao delovi organske materije koji sadrže nepolarne delove kao što je naftalen jako vezuju pesticide i heksahlorobenzen (HCH) jedinjenja (slika 2.10). Vezivanje između organske materije i organskih jedinjenja se može odvijati simultano ili uzastopno putem vodoničnih, kovalentnih i jonskih veza, van der Walsovih sila (Londonove, dipol-dipol, dipol-indukovani dipol). Na hidrofobna aktivna mesta huminskih supstanci se adsorbuju alifatična jedinjenja i aromatične nejonske, nepolarne strukture (PAHs and PCBs). Tip veze koja se ostvaraju utiče na mobilnost organskih jedinjenja. Zbirni prikaz mogućih veza dat je na slici 2.11.

2.2.2.5. Značaj zemljišta

Uloga zemljišta u životnoj sredini je višestruka, a najčešće se ističe njegov geološki, ekološki, ekonomski i društveni značaj. Kako predstavlja površinski sloj litosfere, zemljište ima zaštitnu ulogu jer reguliše uticaj i dejstvo spoljašnjih faktora, kao i brzinu i intenzitet denudacije (ogoljavanja i spiranja) kopna.

Zemljište je smeša vode, gasova, neorganske i organske materije, koji se nalaze u stanju dinamičke ravnoteže. Za razliku od stenskog materijala, odlikuje ga plodnost, najznačajnija osobina zemljišta koja se ogleda u fiziološkoj dostupnosti vode i mineralnih materija biljkama. Sadržaj humusa utiče na termalne i apsorpcione karakteristike, mogućnost zadržavanja vode u delovima gde je dostupna biljkama, održanje pH vrednosti, dostupnost mikronutrijenata i biogenih elemenata, i mnoge druge karakteristike koje doprinose biološkoj aktivnosti zemljišta.

Ekološka funkcija zemljišta je veoma značajna jer predstavlja sponu žive i nežive prirode, obezbeđuje uslove za život živim bićima, reguliše biogeohemijske cikluse, kao i sastav atmosfere i hidrosfere. Zemljište mehanički filtrira organske, neorganske i radioaktivne komponente, adsorbuje, taloži, razlaže i transformiše supstance i na taj način utiče da one ne dospeju u podzemne vode i/ili u lanac ishrane. Na ovaj način, zemljište održava stanje prirodne ravnoteže koja se kontinuirano narušava prisustvom zagađujućih materija.

Uticaj zemljišta važan je i kod održanja biološke raznovrsnosti, a tokom razvoja ljudske civilizacije predstavljalo je osnov za razvoj poljoprivrede i naseljavanje. Zemljište je imalo važnu i specifičnu funkciju u razvoju ljudskog društva, i u većini država postoje zakonski okviri koji definišu specifične tipove zemljišta (poljoprivredno, šumsko, građevinsko i sl.), regulišu vlasništvo, upravljanje i njegovo korišćenje u skladu sa tim.



U ovom trenutku zemljište obezbeđuje 90% hrane za čovečanstvo i predstavlja jedan od najznačajnijih uslova opstanka živog sveta na Zemlji.

2.2.3. Hidrosfera

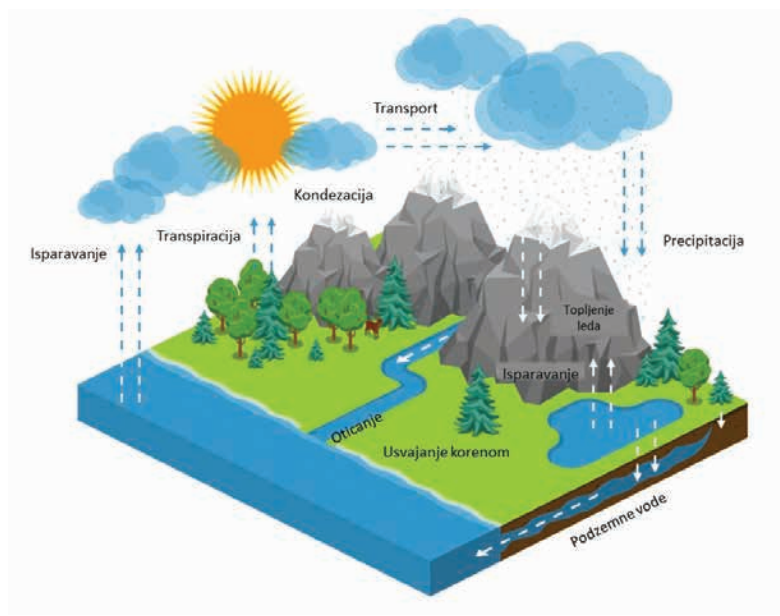
Hidrosferu čini sva voda na Zemlji, okeani, mora, jezerske i rečne površine, kao i relativno plitki deo Zemljine kore natopljen podzemnom vodom. Osim toga, jedan deo vode nalazi se u atmosferi, u stalnom procesu kruženja u prirodi koji je od velikog značaja za očuvanje i razvoj živog sveta na Zemlji. Može se reći da je hidrosfera u stalnoj interakciji sa ostalim podsistemima životne sredine, i da prožima atmosferu do 15 km visine i litosferu do 1 km dubine.

Tabela 2.3. Raspodela ukupne vode na Zemlji

Raspodela vode na Zemlji [% ukupne zapremine]			
Okeani i mora	96,5	Površinske vode – reke i potoci	0,001
Polarni led i sneg	1,74	Vlažnost zemljišta	0,001
Podzemne vode	1,722	Atmosfera	0,001
Jezera i močvare	0,035	Biološka voda	0,0001

Najveći udeo vode na Zemlji nalazi se u okeanima i morima, a značajno manji pripada polarnom ledu, podzemnim vodama, akumulacijama, rekama i plitkim površinskim vodama (tabela 2.3). Usled procesa hemijskog rastvaranja i spiranja stena i rastvaranja sadržaja gasovitih isparenja podvodnih vulkana, voda u morima i okeanima sadrži značajnu koncentraciju soli. Morsku so dominantno čine hlor i natrijum (87 %), i sa znatno manjim učešćem silicijum, magnezijum i kalcijum. Salinitet vode, ili učešće soli (razloženih jona nekoliko elemenata) u ukupnoj zapremini u okeanima iznosi u proseku 34 g L^{-1} , a varijacije su uslovljene različitom količinom padavina, prisustvom vegetacije, razlikom u stepenu isparavanja, prisustvom vodenih tokova, kao i apsorbovanjem pojedinih elemenata u glinovitim sedimentima mora i okeana.

Hidrološki ciklus opisuje kruženje vode u prirodi. U atmosferi se u obliku pare nalazi oko $13\,000 \text{ km}^3$ vode, 0,0001% od ukupne količine vode koja učestvuje u hidrološkom ciklusu. Ova količina vode ne bi mogla da obezbedi postojeće padavine na planeti (kiša, sneg, grad, magla), pa kruženje vode počinje isparavanjem sa vodenih površina i sa zemlje. Mora i okeani, koji pokrivaju 71 % Zemljine površine, imaju značajnu ulogu u hidrološkom ciklusu, održavaju balans hidrosfere, ali i utiču na klimu.



Hidrološki ciklus

Godišnje ispari oko 516 000 km³ vode, najvećim delom sa morskih površina (445 000 km³). Ova voda se u atmosferi kondezujе, i vraća u obliku padavina, opet najvećim delom na morske površine. Takođe, kondezovana voda u oblacima, nošena vazдушnim strujanjem dospeva i do kopna na koje pada u obliku kiše, snega i grada. Voda koja dospe na Zemlju u vidu padavina može da: isparava i vraća se u atmosferu (evaporacija); otiče u površinske slojeve zemlje iz kojih se vezuje u biljkama i zatim takođe isparava procesima metabolizma tj. sinteze i razgradnje (transpiracija); se sliva u površinske vode (reke, jezera, vodene akumulacije); i prodire u dubinu zemlje do vodonosnih slojeva obrazujući podzemne vodene akumulacije (akvafere). Iz podzemnih slojeva voda se može eksploatisati (bunari, arterski bunari) ili sama dospeva na površinu u obliku vrela i izvora, odakle se takođe eksploatiše.

Vazдушnim strujanjima i cirkulacijom vode obezbeđena je adekvatna distribucija toplotne energije i cirkulacija kiseonika širom planete, a istovremeno su sprečeni pregrevanje i preterano rashlađivanje cele njene površine. Usled nejednakog zagrevanja delova planete, izmenjena su i kretanja vodenih i vazдушnih masa, koja predstavljaju jedinstven globalni, interaktivni proces, što dovodi do različitih poremećaja (topljenje leda na polovima, povećan nivo mora, pojava poplava).

Mada po zastupljenosti predstavljaju mali deo hidrosfere, može se reći da su reke i jezera značajno doprineli razvoju ljudskog društva. Od prvobitnih ljudskih naselja, koja su se formirala u neposrednoj blizini velikih reka, preko poljoprivrednih aktivnosti za koje je voda neophodna i raznih vidova transporta rečnim putevima, do interesa za vodom kao energetske izvorom, ljudska civilizacija je tokom svog razvoja bila upućena na velike rečne tokove. Dugo su i morski putevi bili najbrži vid prevoza i transporta u svetu, a značaj podzemnih voda meri se činjenicom da u mnogim krajevima sveta predstavljaju jedan od najznačajnijih ili jedini izvor snabdevanja naselja čistom pijaćom vodom. Kroz sve faze razvoja društva voda je predstavljala i predstavlja nezaobilaznu komponentu biološkog, ekonomskog i socijalnog napretka.

Ekološki značaj vode prevashodno je u funkciji nastanka, evolucije i održanja života na Zemlji. Osim toga, vodu karakteriše velika pokretljivost, mogućnost prenosa materije i energije, kao i transformacije izgleda površine Zemlje.



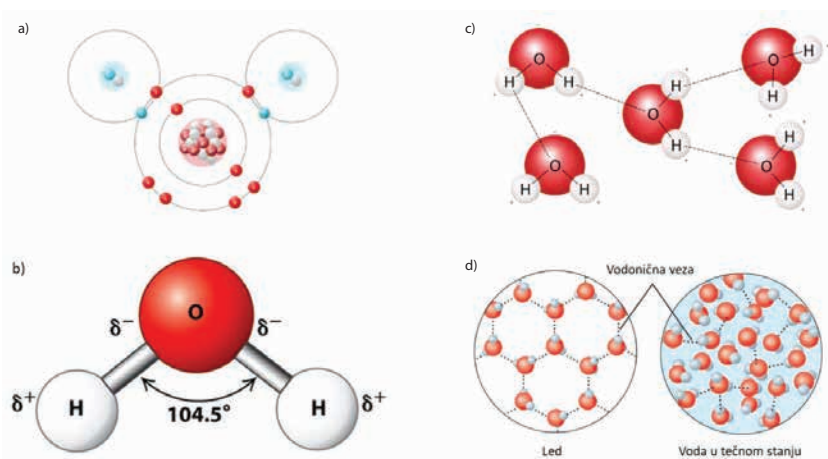
Današnji svet se ne može zamisliti bez vode - potrošnja u pojedinim delovima sveta je dostigla 200 litara dnevno po stanovniku

2.2.3.1. Hemijske reakcije u vodi

Voda je vrlo jednostavan molekul koji obezbeđuje život na Zemlji. Molekul vode se sastoji od jednog atoma kiseonika koji je vezan za dva različita atoma vodonika (slika 2.13). Zbog veće elektronegativnosti atoma kiseonika, **veze su polarne kovalentne**. Atom kiseonika privlači zajedničke elektrone u znatno većoj meri nego atomi vodonika. Kao rezultat, atom kiseonika poseduje delimično negativno naelektrisanje dok su atomi vodonika, svaki pojedinačno, delimično pozitivno naelektrisani. **Molekul vode karakteriše savijena struktura** zbog dva usamljena para elektrona na atomu kiseonika. Ugao između dve H–O veze je oko $104,5^\circ$ (slika 2.13) što je nešto manje od idealnih 109° , koji formiraju sp^3 hibridizovane atomske orbitale. Molekul kao celina je polaran, naelektrisanje između O–H veza se ne poništava.

Zbog polarnosti, svaki molekul vode privlači druge molekule vode jer suprotno naelektrisani krajevi molekula privlače jedni druge. Na ovaj način se ostvaruje slabo privlačenje između pozitivnog kraja vodonika iz jednog molekula i negativnog kraja kiseonika drugog molekula, a ovaj tip interakcija se naziva **vodonična veza**. Postojanje vodonične veze doprinosi jedinstvenim svojstvima vode.

Slika 2.13. Prikaz molekula vode: a) kovalenta veza; b) dipolni momenat; c) vodonična veza; i d) struktura leda i vode u tečnom stanju



Voda je dobar rastvarač. Molekuli vode raspoređeni na specifičan način (atomi vodonika oko negativno naelektrisanih čestica, a atomi kiseonika oko pozitivno naelektrisanih čestica) okružuju čestice rastvorenih supstanci i ovaj proces se naziva **hidratacija**. Hidratacija pomaže da se stabilizuju vodeni rastvori sprečavajući da se pozitivni i negativni joni ponovo spoje i formiraju talog.

Voda postoji u prirodi kao čvrsta supstanca, tečnost i gas, a **gustina leda je manja od gustine tečne vode**. Vodonične veze u tečnoj vodi se stalno kidaju i ponovo ostvaruju u zavisnosti od bizine molekula. Hlađenjem, kretanje molekula se usporava i oni se postepeno približavaju jedan drugom. Kod većine tečnosti, gustina se povećava kako se njena temperatura smanjuje, pa je čvrsto stanje očekivano gušće od tečnog. Međutim, voda se ponaša drugačije i najveću gustinu dostiže na oko 4°C. Između 4°C i 0°C gustina se postepeno smanjuje kako vodonične veze počinju da formiraju mrežu koju karakteriše heksagonalna struktura sa otvorenim prostorima u sredini šestouglova. Led je manje gust od tečne vode i zato pluta. Ova osobina vode je važna, jer se zimi sloj leda formira na površini stajaćih voda, ali ne tone kao što bi da voda nema ovu jedinstvenu strukturu koju diktiraju njen oblik, polarnost i vodonična veza. Zbog ovoga, ribe i drugi organizmi u jezerima mogu da prežive zimu.

Voda ima najveći specifični toplotni kapacitet od bilo koje tečnosti. Specifična toplota se definiše kao količina toplote koju jedan gram supstance mora da apsorbuje ili izgubi da bi promenio svoju temperaturu za 1°C. Različite supstance na različite načine reaguju na toplotu. Ako se metal ostavi na jakom suncu tokom

vrelog dana, može postati prilično vruć na dodir dok jednaka masa vode na istoj temperaturi neće postati ni približno toliko vruća. Voda u jezerima ili okeanima apsorbira toplotu iz vazduha tokom vrućih dana, vraća je u vazduh u hladnim danima, a specifični toplotni kapacitet vode je oko pet puta veći od peska. Ovo objašnjava zašto se kopno hladi brže od mora ili kako je zbog prisustva okeana i mora priobalna klima mnogo umerenija od kontinentalne.

Voda ima visoku toplotu isparavanja odnosno u svom tečnom obliku ključa na visokoj temperaturi (oko 100°C). Kao rezultat mreže vodoničnih veza prisutne između molekula vode, potrebna je velika količina energije (toplote isparavanja) da se jedan gram tečne vode pretvori u vodenu paru. Kada se voda u tečnom stanju zagreva, vodonična veza otežava odvajanje molekula vode jednog od drugog, a samim tim i prelazak molekula u gasovitu fazu. Kao rezultat, voda deluje kao hladnjak ili rezervoar toplote i zahteva mnogo više toplote da proključa nego tečnost kao što je etanol, čija je vodonična veza sa drugim molekulima etanola slabija od vodonične veze vode. Kako voda isparava, proces preuzima energiju, a okolina u kojoj se isparavanje odvija se hladi. U mnogim živim organizmima, uključujući ljude, isparavanje znoja, koji sadrži 90 % vode, omogućava organizmu da se ohladi kako bi se mogla održati homeostaza telesne temperature.

Da bi se razumelo kako se zagađujuće materije ponašaju u vodi, neophodno je razumeti hemijske reakcije koje se odvijaju u vodenim sistemima kada su u stanju prirodne ravnoteže. U vodi je moguć veliki broj reakcija (kiselinsko-bazne, kompleksiranje, oksido-redukcija), a u ovom delu će biti razmatrane dominantne reakcije rastvaranja gasova i njihov uticaj na kiselost vode. Iako se većina hemijskih fenomena u vodi razmatra sa termodinamičkog (ravnotežnog) gledišta, važno je napomenuti da su hemijska kinetika, brzine reakcija i broj koraka u kojima se one odvijaju veoma značajne u hemiji vode. Takođe, uloga bioloških procesa nije zanemarljiva; na primer, fotosintetske alge mogu podići pH vode uklanjanjem vodenog CO_2 , čime se ravnoteža pomera u smeru disocijacije HCO_3^- jona do CO_3^{2-} , a samim tim i do njegovog taloženja u obliku CaCO_3 .

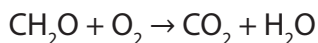
Iako se često govori o stabilnom vodenom sistemu, treba imati u vidu da su vode otvoreni dinamički sistemi, da imaju promenljive ulaze i izlaze energije i mase i da sadrže mineralne i gasne faze, kao i žive organizme. Modeli i reakcije koje opisuju stanje u vodenim sistemima često su pojednostavljeni, ali uz pomoć parametara kao što su kiselo-bazne i ravnotežne konstante, rastvorljivost, konstante ravnoteže kompleksiranja, redoks potencijal i pH mogu pomoći u razumevanju uslova koji određuju raspodelu hemijskih vrsta i njihovih reakcija u vodi.

2.2.3.2. Kiseonik u vodi

Rastvoreni gasovi, su ključni za dobrobit živih vrsta u vodi, O_2 za ribe i CO_2 za alge, ali i za fizičko-hemijske osobine vodenog sistema. **Rastvorljivost** gasova u vodi se opisuje **Henrijevim zakonom** prema kom je rastvorljivost gasa u tečnosti proporcionalna parcijalnom pritisku tog gasa u kontaktu sa tečnošću.

Bez značajnog nivoa rastvorenog O_2 , mnoge vrste vodenih organizama ne bi opstale u vodi. Međutim, rastvoreni O_2 se troši razgradnjom organske materije u vodi, pa mnogi pomori riba nisu uzrokovani direktnom toksičnošću zagađujućih supstanci već zbog nedostatka O_2 usled njegove potrošnje u biorazgradnji organske materije. Većina elementarnog O_2 dolazi iz atmosfere, koja sadrži 20,95 % O_2 , a njegova rastvorljivost u vodi zavisi od temperature vode, parcijalnog pritiska kiseonika u atmosferi i sadržaja soli u vodi.

Koncentracija O_2 u vodi na 25°C u ravnoteži sa vazduhom na atmosferskom pritisku je samo 8,32 mg l⁻¹ što upućuje na to da voda u ravnoteži sa vazduhom ne može sadržati visok nivo rastvorenog O_2 u poređenju sa mnogim drugim rastvorenim hemijskim vrstama. Ako se u vodi dešavaju procesi koji troše O_2 , nivo rastvorenog O_2 može brzo da se približi nuli. Ako se organska materija biološkog porekla predstavi formulom CH_2O , reakcija potrošnja kiseonika u vodi razgradnjom organske materije bi bila:



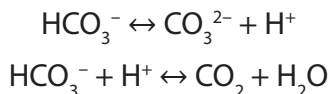
Na osnovu stehiometrijskog izračunavanja, težina organskog materijala potrebna da se potroši 8,32 mg O_2 u litri vode koja je u ravnoteži sa atmosferom na 25°C bi bila 7,8 mg CH_2O . Ovo znači da prisustvo samo 7 ili 8 mg organskog materijala uz mikroorganizme može potpuno potroši kiseonik u jednom litru, pa se kao važan parametar kvaliteta voda određuje **biološka potrošnja kiseonika**.

Uticaj temperature na rastvorljivost gasova u vodi posebno je važan u slučaju O_2 . Rastvorljivost O_2 u vodi opada sa 14,74 mg l⁻¹ na 0°C do 7,03 mg l⁻¹ na 35°C. Na višim temperaturama, smanjena rastvorljivost O_2 u kombinaciji sa povećanom stopom disanja vodenih organizama, često dovodi do ozbiljnog iscrpljivanja O_2 .

Biološka potrošnja kiseonika (BPK) predstavlja količinu kiseonika koja je potrebna za oksidaciju koju vrše aerobni mikroorganizmi i proporcionalna je količini organskih materija (H i C).

2.2.3.3. Ugljen-dioksid karbonatna ravnoteža

Kiselinsko-bazne reakcije u vodi uključuju gubitak i prihvatanje H^+ jona. Mnoge vrste deluju kao kiseline u vodi oslobađajući H^+ jon dok druge deluju kao baze prihvatajući H^+ jon, a sam molekul vode i kao baza i kao kiselina. Važan jon u kiselinsko-baznoj hemiji vode je bikarbonatni jon, HCO_3^- , koji može delovati ili kao kiselina dajući karbonatni jon, CO_3^{2-} , ili kao baza proizvodeći karbonatnu kiselinu, H_2CO_3 :

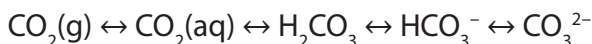


Aciditet vode

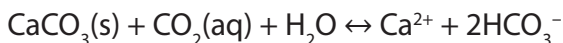
Aciditet (kiselost) prirodne ili otpadne vode je kapacitet vode da neutrališe OH^- jone; analogno, alkalitet je sposobnost vode da neutrališe H^+ jone, o čemu je diskutovano u nastavku teksta. Osim u slučaju ozbiljnog zagađenja (vode iz rudnika sa značajnom količinom H_2SO_4 i HCl), kiselost vode je uglavnom posledica prisustva slabih kiselina, posebno H_2CO_3 , ali i H_2PO_4 , H_2S , proteina, masnih kiselina i kiselih metalnih jona (Fe^{3+}). Aciditet vode, odnosno prisustvo jakih i slabih kiselina se može odrediti titracijom uz fenolftalein ili metil-oranž kao indikator.

Najvažnija slaba kiselina u vodi je H_2CO_3 . Zbog prisustva CO_2 u vazduhu i njegovog nastanka mikrobnim raspadanjem organske materije, rastvoreni CO_2 je prisutan u gotovo svim prirodnim vodama i otpadnim vodama. Čak su i padavine iz nezagađene atmosfere blago kisele zbog prisustva rastvorenog CO_2 . Ugljen-dioksid, i proizvodi njegove jonizacije, HCO_3^- i CO_3^{2-} , imaju izuzetno važan uticaj na hemiju vode i njenu pH vrednost odnosno puferski kapacitet.

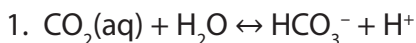
Ugljen-dioksid čini samo oko 0,037 % zapremine normalnog suvog vazduha i u dodiru sa vodom dolazi do njegovog rastvaranja. U vodi nastala H_2CO_3 disosuje u dva stepena:



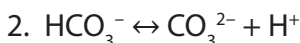
Veliki udeo CO_2 koji se nalazi u vodi je proizvod razgradnje organske materije bakterijama. Čak i alge, koje koriste CO_2 u fotosintezi, proizvode ga svojim metaboličkim procesima u odsustvu svetlosti. Kako voda curi kroz slojeve raspadajuće organske materije dok se infiltrira u zemlju, može da rastvori veliki deo CO_2 koji nastaje disanjem organizama u zemljištu. Kasnije, dok voda prolazi kroz krečnjačke formacije, dolazi do rastvaranja kalcijum-karbonata zbog povećanog prisustva rastvorenog CO_2 i Le Šatelleveog principa primenjenog na reakciju:



Ravnoteža u sistemu $\text{CO}_2(\text{aq}) - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ se naziva **ugljen-dioksid karbo-natna ravnoteža** u vodi i može se opisati sledećim reakcijama i konstantama:

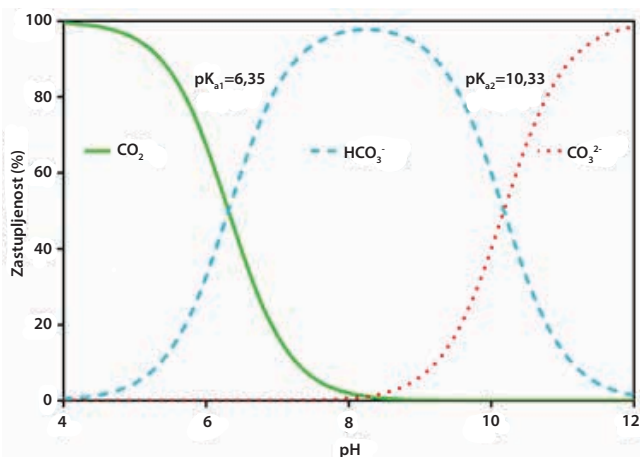


$$K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} = 4,47 \times 10^{-7}; \text{p}K_{a1} = 6,35$$



$$K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4,69 \times 10^{-11}; \text{p}K_{a2} = 10,33$$

Slika 2.14. Raspodela vrsta u sistemu $\text{CO}_2(\text{aq}) - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ u vodi u zavisnosti od pH vrednosti



Vrednost $\text{p}K_a$ je dobijena na osnovu jednačine $\text{p}K_a = -\log K_a$. Koje vrste će nastati od CO_2 rastvorenog u vodi zavisi od pH vrednosti. Na slici 2.14 je prikazan dijagram distribucije vrsta u rastvoru u funkciji od pH.

Na osnovu teorije elektrolitičke disocijacije, stepen disocijacije (α) odnosno frakcija (zastupljenost) svakog od jona u razmtranom rastvoru se može predstaviti kao odnos između broja disosovanih molekula i ukupnog broja molekula unetih u rastvor. Stepenn disocijacije ima vrednost od 0 do 1 odnosno izraženo u procentima od 0 do 100 %. Kada se ovo primeni na sistem $\text{CO}_2(\text{aq}) - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ dobija se:

$$a_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]}$$

$$a_{\text{HCO}_3} = \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]}$$

$$a_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]}$$

Zamena izraza za K_{a1} i K_{a2} u izraze za frakcije jona daje zastupljenost jona u funkciji konstanti disocijacije kiseline i koncentracije H^+ jona:

$$a_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{H}^+]^2 + K_{a1}[\text{H}^+] + K_{a1}K_{a2}}$$

$$a_{\text{HCO}_3} = \frac{K_{a1}[\text{H}^+]}{[\text{H}^+]^2 + K_{a1}[\text{H}^+] + K_{a1}K_{a2}}$$

$$a_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{K_{a1}K_{a2}}{[\text{H}^+]^2 + K_{a1}[\text{H}^+] + K_{a1}K_{a2}}$$

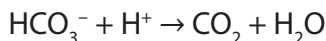
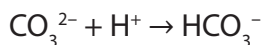
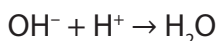
Proračuni iz ovih izraza pokazuju sledeće (slika 2.14):

- kada je pH značajno ispod $\text{p}K_{a1}$, frakcija CO_2 je jednaka 1;
- kada je $\text{pH} = \text{p}K_{a1}$, frakcije CO_2 i bikarbonatnog jona su jednake;
- kada je $\text{pH} = 1/2 (\text{p}K_{a1} + \text{p}K_{a2})$, frakcija HCO_3^- dostiže maksimalnu vrednost;
- kada je $\text{pH} = \text{p}K_{a2}$, frakcije bikarbonatnog i karbonatnog jona su jednake;
- za pH značajno iznad $\text{p}K_{a2}$, frakcija CO_3^{2-} je jednaka 1.

Dijagram distribucije vrsta pokazuje da je HCO_3^- dominantno prisutan u pH opsegu većine prirodnih voda, a CO_2 prevladava u kiselijim vodama. Ako je vazduh koji uobičajeno sadrži 350 ppm ($1,146 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$) CO_2 u dodiru sa vodom, na osnovu jednačina za ugljen-dioksid karbonatnu ravnotežu (izraz za K_{a1}) procenjuje se da je kiselost vode 5,65. Otuda potiče i generalno objašnjenje da je čista voda koja je u ravnoteži sa nezagađenim vazduhom blago kisela, sa pH nešto manjim od 7.

Alkalitet vode

Alkalitet vode se definiše kao kapacitet vode da prihvati H^+ jone. Vode sa visokim alkalitetom imaju visok pH i generalno sadrže povišene nivoe rastvorenih čvrstih materija. Povišen alkalitet se može smatrati štetnom karakteristikom ukoliko se voda koristi u preradi hrane i komunalnim vodovodnim sistemima. Joni odgovorni za alkalnost u vodi su bikarbonatni joni, karbonatni joni i hidroksidni joni:



Prisustvo amonijaka i konjugovanih baza fosforne, silicijumske, borne i organskih kiselina mogu u manjoj meri uticati na alkalitet vode.

Alkalitet:



Pri pH vrednostima ispod 7, odnosno u kiselim vodama, prisustvo H^+ u vodi značajno umanjuje alkalnost, pa se koncentracije ovih jona moraju uzeti u obzir pri izračunavanju ukupne alkalnosti. Ako uzmemo u obzir jone koji dominantno utiču na alkalitet, on se može prikazati kao:

$$\text{Alkalitet} = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] - [H^+]$$

Alkalitet se određuje titracijom kiselinom uz fenolftalein kao indikator. U inženjerskim terminima, alkalitet se često izražava u jedinicama $mg\ L^{-1}\ CaCO_3$, na osnovu sledeće reakcije neutralizacije:



Ekvivalentna težina $CaCO_3$ je polovina njegove formule.

Prirodna voda obično ima alkalitet koji je jednak 0,001 ekvivalent po litru ($eq\ L^{-1}$), što znači da će alkalni rastvori u 1 L vode neutralisati 0,001 mol kiseline. Doprinos različitih jona ukupnom alkalitetu zavisi od pH vrednosti. Na primer, u vodi čija je pH vrednost 7, doprinos koncentracije OH^- jona je zanemarljiv. Na osnovu slike 2.14, pri $pH=7$ koncentracija HCO_3^- je značajno veća od koncentracije CO_3^{2-} , pa se pretpostavlja da alkalitet vode potiče samo od HCO_3^- i da je $[HCO_3^-]=0,001\ mol\ dm^3$. U vodi istog alkaliteta ($0,001\ eq\ L^{-1}$), ali sa pH vrednosti 10, OH^- i CO_3^{2-} su dominantno prisutni u odnosu na HCO_3^- . Koncentracije ovih jona se računaju na osnovu izraza za jonski porizvod vode i izraza za disocijaciju HCO_3^- jona:

$$[OH^-] = \frac{K_w}{[H^+]}$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{K_{a2} [HCO_3^-]}{[H^+]}$$

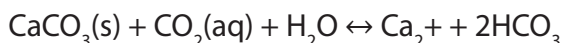
Tvrdoća vode

U većini slatkovodnih sistema, Ca predstavlja najdominantniji katjon. Kalcijum je ključni element u mnogim geochemijskim procesima, a primarni izvori Ca u vodama su minerali: gips ($CaSO_4 \times 2H_2O$), anhidrit ($CaSO_4$), dolomit ($CaMg(CO_3)_2$), kao i kalcit i aragonit (različiti oblici $CaCO_3$).

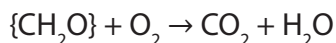
Kalcijumove soli, zajedno sa solima Mg i Fe(II) čine **tvrdocu vode**. Najčešća manifestacija tvrdoće vode je pojava kamenca na sanitarijama ili posuđu tokom kuvanja vode. **Prolazna tvrdoća** vode podrazumeva prisustvo $Ca(HCO_3)_2$ u vodi i može se eliminisati ključanjem vode što je opisano reakcijom:



Povećana temperatura pomera ravnotežu reakcije udesno i dolazi do formiranja gasovitog CO_2 , i belog taloga kalcijum karbonata ($CaCO_3$). Voda koja sadrži visok nivo rastvorenog CO_2 lako rastvara Ca iz karbonatnih minerala:



Ukoliko se CO_2 gubi iz vode, ravnoteža reakcije se pomera udesno u smeru nastanka $CaCO_3$. Koncentracija CO_2 u vodi određuje stepen rastvaranja $CaCO_3$. Ugljen-dioksid koji voda može da dobije ravnotežom sa atmosferom nije dovoljan da kompenzuje nivo Ca^{2+} u prirodnim vodama, posebno u podzemnim. Veliku količinu CO_2 i HCO_3^{3-} obezbeđuju mikroorganizmi koji razgrađuju organsku materiju u vodi, sedimentima i zemljištu:

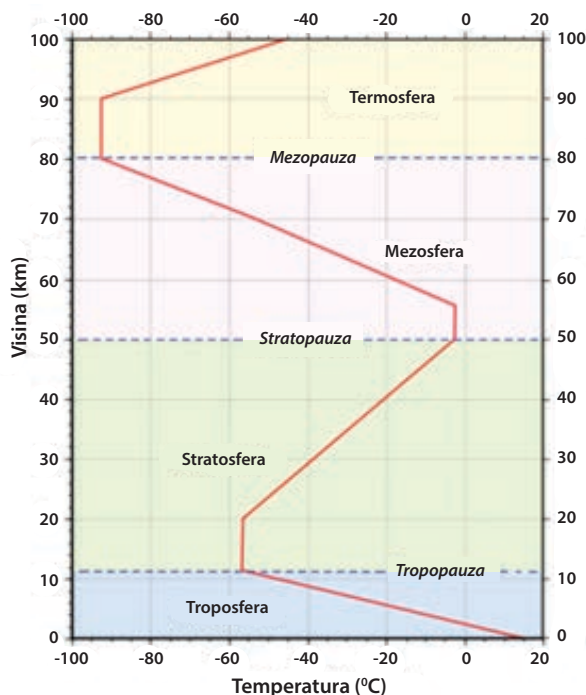


Nekarbonatnu tvrdocu vode čine sulfati, hloridi i nitrati kalcijuma i magnezijuma. Zbir karbonatne i nekarbonatne tvrdoće predstavlja **ukupnu tvrdocu vode**.

2.2.4. Atmosfera

Atmosfera je gasoviti omotač planete Zemlje i jedan od ključnih podsistema životne sredine, složen po svom sastavu i procesima koji se u njoj odvijaju. Osnovni i stalno prisutni gasovi u atmosferi, koji se nazivaju **stalne komponente**, su kiseonik (21 %) i azot (78 %), dok manji udeo čine vodonik, plemeniti gasovi (<1 %), kao i ugljen-dioksid, metan, azot-suboksid i vodena para. Udeo ostalih gasova varira u zavisnosti od geografskog položaja i klimatskih uslova. Pored ovih gasova, atmosfera sadrži i **promenljive komponente**, kao što su jedinjenja sa sumporom, halogenim elementima, metali u tragovima, tečni i čvrsti aerosoli, koje se razlikuju po vremenu boravka u atmosferi. Nasuprot kiseoniku, azotu i plemenitim gasovima, koji su vrlo stabilna jedinjenja i čije se vreme života u atmosferi meri hiljadama godina, pojedine supstance, kao što su neorganski gasoviti oksidi i organska jedinjenja, u atmosferi opstaju samo nekoliko dana. S obzirom na činjenicu da je zastupljenost pojedinih supstanci u atmosferi prilično nepromenljiva (stalna), može se reći da dinamička ravnoteža njihovog nestajanja i ponovnog nastajanja održava prirodni sastav atmosfere konstantnim.

Slika 2.15. Stratifikacija atmosfere



Struktura atmosfere, i njene fizičke karakteristike se najčešće opisuju na osnovu vertikalnog profila (**stratifikacija atmosfere**), u kome se uočava pet oblasti: troposfera, stratosfera, mezosfera, termosfera i egzosfera (slika 2.15). Svaki od navedenih slojeva karakteriše određena visina, gustina i gradijent promene pritiska i temperature.

Troposfera je sloj najbliži tlu, i obuhvata oko 80% ukupne mase atmosfere. Zagreva se posredno odavanjem toplote iz tla, koje direktno apsorbuje Sunčevu energiju. Temperatura u ovom sloju opada do tropopauze uniformno, i to $6,5^{\circ}\text{C}$ po kilometru. Deo atmosfere u prizemnom sloju se naziva **vazduh**, i to je prostor u kome se odvija najveći broj vitalnih fizičkih i hemijskih procesa. Za razumevanja atmosferskih reakcija, značaj sloj je i **stratosfera**. U stratosferi se beleže niske koncentracije kiseonika i vodene pare, i najveće koncentracije „dobrog“ ozona (**ozonski omotač**) na oko 25 do 30 km. Takođe, značajno je spomenuti nastanak i prisustvo jona i jonizovanih atoma, kao i širenje radio-talasa u **jonosferi** koja se prostire na visini od 80 do 800 km.

Značajna osobina atmosfere je njena pokretljivost. Veća zagrejanost na ekvatoru uslovljava kretanje vazdušnih masa ka polovima, dok veća zagrejanost Zemljine površine u odnosu na vazduh utiče na vertikalna strujanja. Vrlo važan oblik kretanja u atmosferi su **termalne i mehaničke turbulencije**, koje dovode do difuzije i ujednačavanja prirodnih i komponenti vazduha koje su antropogenog porekla.

Ekološki značaj atmosfera je veliki i ogleda se prvenstveno u uticaju koji ima na razvoj mnogih pojava i procesa koji se dešavaju u ostalim podsystemima životne sredine, litosferi, hidrosferi i biosferi. U hemijskom sastavu atmosfere su O_2 i CO_2 , gasovi neophodni za funkcionisanje živih organizama. Proces kruženje vode u prirodi kojim se vrši obnova kopnenih voda, kao i raznovrsnih oblika života, delimično se odvija kroz atmosferu. Atmosfera zadržava toplotu Sunčevog zračenja i štiti Zemljinu površinu od velikih temperaturnih kolebanja i posledica do kojih bi to dovelo. Istovremeno, u atmosferi dolazi do slabljenja štetnih kosmičkih i UV zraka, kao i sagorevanja velikog broja meteora koji uleću u nju.

2.2.4.1. Fizika atmosfere

Atmosfera se sastoji od slojeva koji se razlikuju po temperaturi, pritisku i sastavu, i u svakom od ovih slojeva odvijaju se specifični fizički procesi. Na primer, u troposferi, koja je najbliža Zemljinoj površini, glavni procesi uključuju konvekciju, isparavanje i padavine, koji su direktno povezani sa vremenskim uslovima. Stratosfera, koja se nalazi iznad troposfere, sadrži ozonski omotač koji apsorbira UV zračenje Sunca, što dovodi do specifičnih temperaturnih profila i dinamike vetrova. Istraživačko pitanje u okviru fizike atmosfere je i kako energija Sunca, koja je glavni pokretač atmosferskih procesa, utiče na promene meteoroloških parametara i klime. Prenos energije kroz atmosferu, putem zračenja, provodljivosti i konvekcije, određuje temperaturne profile i stabilnost atmosfere, što dalje utiče na formiranje oblaka, padavine i vetrove. Ovi procesi nisu samo lokalni, već i globalni, i igraju ključnu ulogu u formiranju klimatskih obrazaca i njihovim promenama kroz vreme.

Savremena istraživanja u fizici atmosfere uključuju upotrebu naprednih tehnologija kao što su sateliti i meteorološki radari u praćenju, a kompjuterski modeli u analizi atmosferskih procesa. Razumevanje fizike atmosfere nije samo akademski izazov, već ima i praktične implikacije, od preciznijih vremenskih prognoza do boljeg upravljanja prirodnim resursima i zaštite životne sredine.

Sunčevo zračenje u sistemu Zemlja – atmosfera

Kako geotermalni fluks, kao mera toplote koja iz unutrašnjosti Zemlje prelazi ka njenoj površini, čini samo 0,027% ukupne energije koja utiče na interakcije između Zemljine površine i atmosfere može se reći da gotovo sva energija potiče od Sunca. Energetski tokovi na lokalnom i globalnom nivou zavise od različitih faktora kao što su hemijski sastav atmosfere (koncentracije aerosola i gasova staklene bašte), albedo, oblačnost, prisustvo vegetacije, kao i veličina i raspored urbanih oblasti. Najzastupljeniji gasovi u atmosferi, azot i kiseonik, propuštaju sunčevo i toplotno zračenje koje napušta atmosferu, dok vodena para, ugljen-dioksid i metan apsorbiraju infracrveno (*infrared*, IR) zračenje emitovano sa Zemljine površine, što dovodi do povećanja prosečnih temperatura i efekta staklene bašte. Od ukupno 340 W m^{-2} sunčevog zračenja, oblaci i atmosfera reflektuju nazad u svemir oko 77 W m^{-2} , površina Zemlje 23 W m^{-2} , dok se 240 W m^{-2} apsorbira.

Podaci ukazuju na promene klime, uključujući promenu sastava atmosfere, porast globalne temperature vazduha i okeana, smanjenje površina pod ledom, podizanje nivoa mora, povećanje učestalosti i intenziteta uragana, i smanjenje broja hladnih dana i noći. Ova energetska ravnoteža menja se usled prirodnih

fenomena, kao što su promene u intenzitetu sunčevog zračenja, varijacije oblika Zemljine orbite i ose rotacije (Milankovićeve ciklusi), te vulkanske erupcije, ali su u poslednje vreme promene značajno ubrzane pod uticajem antropogenih aktivnosti. Još 1896. godine, Arenijus je proračunao globalno zagrevanje povezano sa emisijama ugljen-dioksida, predviđajući značajan uticaj tek za nekoliko hiljada godina, ali je tom prilikom prevideo dramatičan industrijski razvoj koji je usledio.

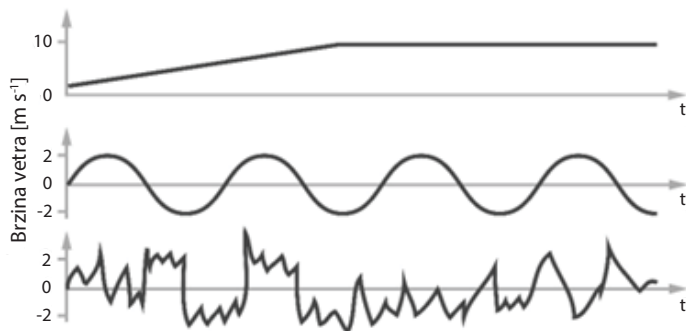
Ljudski uticaji se posebno ogledaju u povećanim koncentracijama aerosola koji apsorbuju i reflektuju zračenje, kao i u povećanju nivoa CO₂ i drugih gasova staklene bašte koji smanjuju intenzitet zračenja koje Zemlja emituje u svemir. Na primer, koncentracije CO₂ i metana su 2005. godine bile znatno veće nego u prethodnih 650 hiljada godina. Radijativno opterećenje, koje meri uticaj određenog faktora na energetske balans između dolazne i odlazne energije u sistemu Zemlja – atmosfera, pokazuje da ljudske aktivnosti doprinose povećanju radijativnog opterećenja sa 1,6 W m⁻², što dovodi do globalnog zagrevanja.

Planetarni granični sloj mešanja

Apsorbovana sunčeva energija pokreće niz procesa u atmosferi, uključujući isparavanje, konvekciju, padavine i stvaranje vetra. Kretanje vazdušnih masa u blizini tla direktno je povezano sa prenosom toplote, površinskim trenjem, isparavanjem i transpiracijom, emisijama zagađujućih materija, kao i morfologijom terena. Ovi faktori utiču na promene u planetarnom graničnom sloju, koje se mogu desiti i u veoma kratkim vremenskim intervalima. Na primer, dnevne varijacije temperature na površini tla često nisu uočljive na većim visinama, jer nisu rezultat direktnog sunčevog uticaja, već emisije IR zračenja sa Zemljine površine.

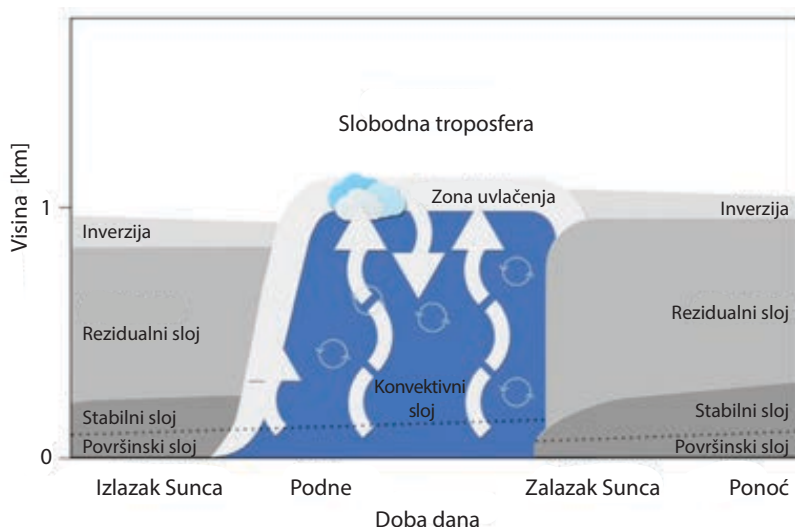
Kretanje vazdušnih masa, koje nazivamo vetrom, može se grubo podeliti u tri kategorije: srednji vetar, turbulencija i talasi (slika 2.16). Srednji vetar je ključan za horizontalni transport vlage, toplote, impulsa ili zagađujućih materija (advekcija), dok turbulencija omogućava vertikalni transport (konvekcija). Talasi, koji se često javljaju noću, ne doprinose značajno transportu toplote, vlage ili zagađujućih materija, ali su veoma efikasni u prenosu impulsa i energije. Talasi nastaju kao posledica ukrštanja tokova srednjeg vetra ili zbog prisustva prepreka na terenu.

Slika 2.16. Komponente vetra: srednji vetar (gore), talas (sredina) i turbulencija (dole)



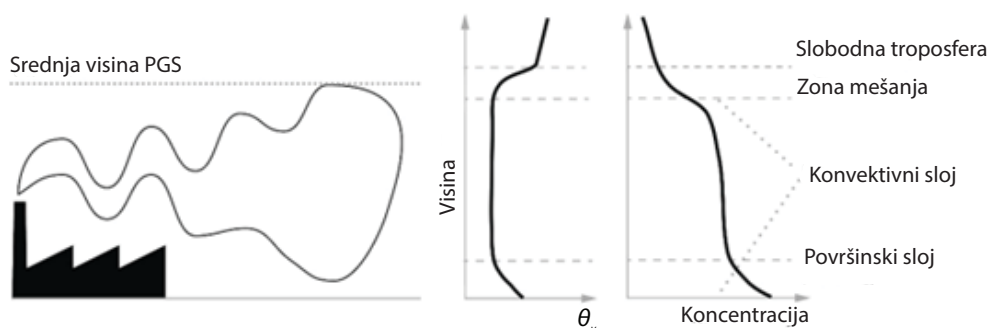
Turbulencija je zbir nepravilnih vrtloga različite snage, a njena pojava u blizini tla jedna je od glavnih karakteristika planetarnog graničnog sloja (PGS), koji se razlikuje od drugih delova atmosfere. PGS je slojevit i obuhvata površinski sloj, sloj mešanja, rezidualni sloj i stabilni granični sloj, a može sadržati i sloj oblaka. Površinski sloj, koji je najbliži tlu, karakteriše intenzivna turbulencija koja može dostići do 10% svog opsega. U najnižem delu ovog sloja, poznatom kao mikro-sloj, molekularni transport dominira, što je ključno za prenos energije i materijala u tlo.

Slika 2.17. Evolucija planetarnog graničnog sloja u toku dana iznad kopna u polju visokog pritiska



Kada Sunce izlazi, dolazi do zagrevanja tla i sloja vazduha blizu površine, što uzrokuje pojavu termika, tj. uskih i brzih struja toplog vazduha koje transportuju toplotu, vlagu i zagađujuće materije ka višim slojevima atmosfere. Ovaj sloj u kome dominira turbulencija uzrokovana potiskom naziva se konvektivni sloj. Sa gornje strane ovog sloja, vazduh iz slobodne troposfere se spušta u širim, sporijim strujama, dok vazduh iz nižih slojeva raste uvis. Zona između najviših vrhova termika i najdubljih delova spuštajućeg vazduha iz slobodne troposfere naziva se zona uvlačenja. U ovom sloju brzine vetra su ispod geostrofske, a vetar obično prelazi izobare pod malim uglom prema polju niskog pritiska, što rezultira konstantnim kretanjem u jednom pravcu. Na slici 2.17 prikazana je evolucija PGS iznad kopna u toku jednog dana pri uslovima visokog pritiska.

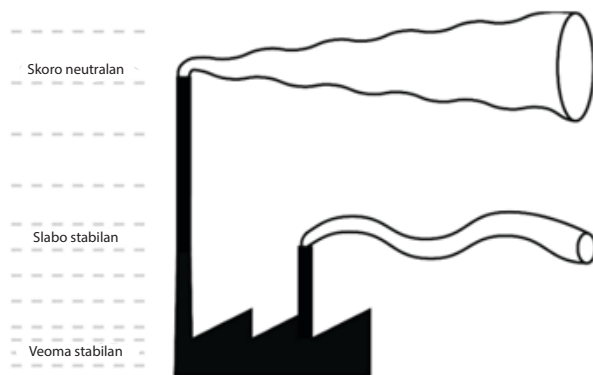
Slika 2.18. Disperzija zagađujućih materija (levo) i profili potencijalne temperature i koncentracije (desno)



Oblačnost može značajno smanjiti rast PGS, a u nekim slučajevima može čak i eliminisati turbulenciju u njemu. Većina izvora emisije zagađujućih materija koji mogu dovesti do visokih koncentracija u sloju mešanja nalazi se na Zemljinoj površini. U isto vreme, koncentracije zagađujućih materija u slobodnoj troposferi mogu ostati niske. Zagađujuće materije se prenose termičkim strujama, ali samo do stabilnog sloja inverzije, kroz koji ne mogu proći, što može dovesti do veoma visokih koncentracija zagađenja. Horizontalna, uzlazna i silazna kretanja koja izazivaju karakterističnu disperziju zagađenja prikazana su na slici 2.18.

Pred kraj dana, kada Sunce zalazi i gubitak toplote usporava, primarni izvor turbulentne kinetičke energije nestaje, pa se formira rezidualni sloj, koji predstavlja ostatak dnevnog konvektivnog sloja. U ovom sloju, turbulencija je približno istog intenziteta u svim pravcima, pa zagađujuće materije formiraju oblik kupe (slika 2.19).

Slika 2.19. Disperzija zagađujućih materija u rezidualnom sloju (isprekidane linije – ekvipotencijalne površi virtualne potencijalne temperature)



Tokom noći, u međusobnim reakcijama zagađujućih materija, formiraju se nove hemijske vrste, a s izlaskom Sunca fotohemijske reakcije dodatno obogaćuju sastav troposfere. Kada se sledećeg dana sloj mešanja proširi do rezidualnog sloja, dolazi do brzog rasta PGS. Noću, radijativno hlađenje i površinsko trenje stabilizuju najniži deo rezidualnog sloja, koji se transformiše u stabilni noćni granični sloj. Ovaj sloj karakteriše slabija turbulencija, a njegov vrh nije jasno definisan, postepeno prelazeći u rezidualni sloj. Vertikalna disperzija zagađujućih materija je minimalna, dok horizontalna može biti značajna.

Na izlasku Sunca, novi sloj mešanja počinje da se širi, a zagađujuće materije iz prethodne noći se uvlače u atmosferu i šire putem turbulencije. Ovaj proces može dovesti do širenja zagađenja na velike udaljenosti od izvora, posebno tokom stabilnih noćnih uslova kada je turbulencija slaba.

2.2.4.2. Atmosferska hemija

Hemijske reakcije koje se odvijaju u atmosferi su vrlo kompleksne i jako je teško izvršiti verodostojnu simulaciju u laboratorijskim uslovima da bi se bolje razumele. Reakcije se mogu odvijati u nezagađenoj ili zagađenoj atmosferi, ali se najčešće dešavaju u atmosferi u kojoj postoji gradacija zagađenja. Najčešće gasovite atmosferske hemijske vrste se mogu klasifikovati kao:

- neorganski oksidi: CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 ;
- oksidacioni agensi: O_3 , H_2O_2 , $\text{HO}\cdot$ radikal, $\text{HO}_2\cdot$ radikal, $\text{ROO}\cdot$ radikali;
- redukcionni agensi: CO , SO_2 , H_2S ;

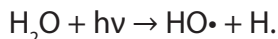
- organski redukcionni agensi: CH_4 u nezagađenoj atmosferi, i alkani, alkeni i aril jedinjenja u zagađenoj atmosferi;
- oksidovana organska jedinjenja: karbonili, organski nitrati;
- fotohemijski aktivne vrste: NO_2 ;
- kiseline, baze, i soli.

Osim navedenih jedinjenja, važnu ulogu u atmosferskim reakcijama imaju čvrste i tečne čestice u atmosferskim aerosolima i oblacima jer predstavljaju mesta za površinske reakcije ili reakcije raspodele između dve faze (gas–tečnost; čvrsto–tečnost). Glavne komponente atmosfere, bez kojih bi hemijske reakcije bile gotovo nemoguće su elektromagnetno zračenje sa Sunca i hidroksil radikal ($\text{HO}\cdot$).

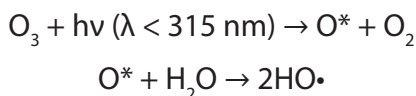
Slobodni radikali su atomi ili grupe atoma sa nesparenim elektronima što ih čini veoma reaktivnim sa vremenom poluraspada od nekoliko sekundi u donjim slojevima atmosfere. Nespareni elektroni se predstavljaju simbolom $\cdot$ koji se piše uz atom elementa koji sadrži nesparene elektrone. U slojevima na većim visinama, atmosfera je ređa, pa radikali mogu imati vreme poluraspada od nekoliko minuta, ili čak i duže. Radikali najčešće učestvuju u lančanim reakcijama, u kojima svaka pojedinačna reakcija kao jedan od proizvoda daje slobodan radikal. Lančane reakcije radikala se završavaju kada jedan radikal reaguje sa drugim. Iako su vrlo reaktivni, potpuno izolovani slobodni radikali bi bili prilično stabilni.

Slobodni radikali predstavljaju vrlo reaktivne hemijske vrste sa nesparenim elektronima ($\text{HO}\cdot$, $\text{HOO}\cdot$, $\text{RO}\cdot$).

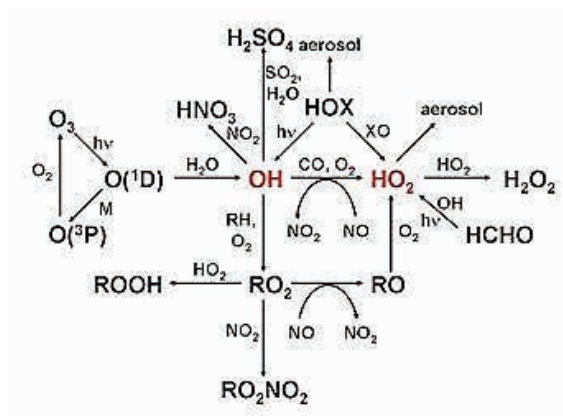
Hidroksil radikal ($\text{HO}\cdot$) predstavlja najvažniju reaktivnu intermedijarnu vrstu u atmosferskim hemijskim reakcijama (slika 2.20). Najvažnijim reakcijama se mogu smatrati reakcije radikala sa CO_2 , SO_2 , H_2S , NO_x i organskim jedinjenjima u fotohemijskom ciklusu. Na većim visinama, $\text{HO}\cdot$ nastaje fotolizom vode:



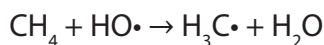
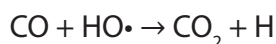
a u relativno nezagađenoj troposferi, $\text{HO}\cdot$ nastaje kao rezultat fotolize ozona, u reakciji pobuđenog kiseonika i vode:



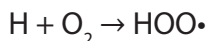
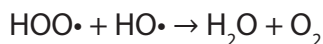
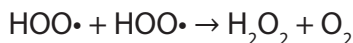
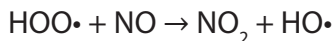
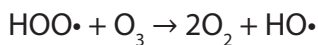
Slika 2.20. Ciklus hidroksil radikala ($\text{HO}\cdot$) u atmosferi



Hidroksil radikal se najčešće uklanja iz troposfere reakcijom sa metanom ili ugljen monoksidom:



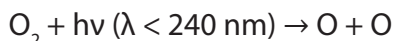
Atom vodonika proizveden u prethodnoj reakciji, reaguje sa O_2 i daje još jednu vrlo reaktivnu vrstu hidroperoksil radikal ($\text{HOO}\cdot$) koji učestvuje u mnogim lančanim reakcijama:



Hidroperoksilni radikal sporije reaguje sa drugim vrstama nego $\text{HO}\cdot$ radikal. Kinetika i mehanizmi reakcija hidroperoksi radikala su teški za proučavanje jer je teško zadržati ove radikale bez hidroksilnih radikala u atmosferi. U prisustvu organskih jedinjenja, kao i $\text{HO}\cdot$, $\text{HOO}\cdot$ učestvuje u formiranju fotohemijskog smoga (detaljnije u nastavku teksta).

Oštećenja ozonskog omotača

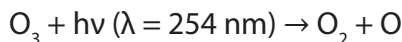
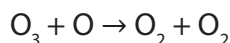
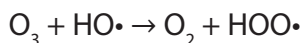
Ozon (O_3) prisutan u stratosferi u sloju poznatom kao **ozonski omotač** ima zaštitnu funkciju, jer apsorbira štetno UV zračenje (220–330 nm) štiteći žive organizme na zemlji od dejstva prevelikih doza jonizujućeg zračenja. Nastanak ozona počinje fotohemijskom reakcijom molekula kiseonika u kojoj nastaju dva atoma kiseonika:



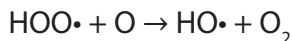
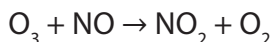
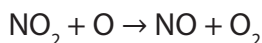
a zatim se reakcija odvija dalje uz prisustvo molekula O_2 ili N_2 (M) koji apsorbira višak oslobođene energije:



Oblast maksimalne koncentracije ozona u stratosferi se nalazi na visini od 25 do 30 km i može dostići do 10 ppm. Ozon je nestabilan, a njegovo raspadanje u stratosferi je katalizovano brojnim hemijskim vrstama (NO , NO_2 , H , $HO\cdot$, $HOO\cdot$, ClO , Cl , Br i BrO) koje potiču iz prirodnih i antropogenih izvora. Prirodno, O_3 se može razgraditi pod uticajem UV zračenja, ali i u reakcijama sa atomskim kiseonikom, $HO\cdot$ i NO :

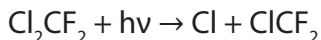


Hidroksilni radikal i NO potrošeni za razgradnju O_3 se regenerišu u sledećim reakcijama:

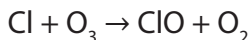


Oštećenja ozonskog omotača izazvana antropogenim aktivnostima uglavnom se dešavaju usled isparenja **hlorofluorouglenika** (*ChloroFluoroCarbons*, *CFCs*) koji su bili u širokoj upotrebi u proizvodnji čvrstih pena i tečnosti za hlađenje i klimatizaciju. Ova jedinjenja se još nazivaju i **freoni** i građeni su od ugljenika i halogena (Cl i F). Najpoznatiji predstavnici su: CCl_3F (CFC-11), CCl_2F_2 (CFC-12), $C_2Cl_3F_3$ (CFC-113), $C_2Cl_2F_4$ (CFC-114) i C_2ClF_5 (CFC-115). **Haloni** su jedinjenja slična CFCs koja sadrže brom i koriste se u sistemima za gašenje požara. Glavni komercijalni haloni su: $CBrClF_2$ (Halon-1211), $CBrF_3$ (Halon-1301) i $C_2Br_2F_4$ (Halon-2402).

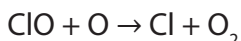
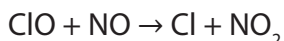
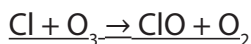
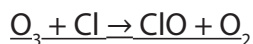
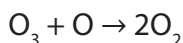
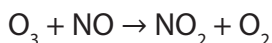
Iako su prilično inertni u donjim slojevima atmosfere, CFCs podležu reakcijama fotorazgradnje u stratosferi pod uticaj UV zračenja koje dovodi do raskidanja jakih C–Cl veza (slika 2.21):



Atomi Cl nastali u reakcijama kao što je prethodna su veoma reaktivne vrste koje reaguju sa ozonom i na taj način ga razgrađuju:

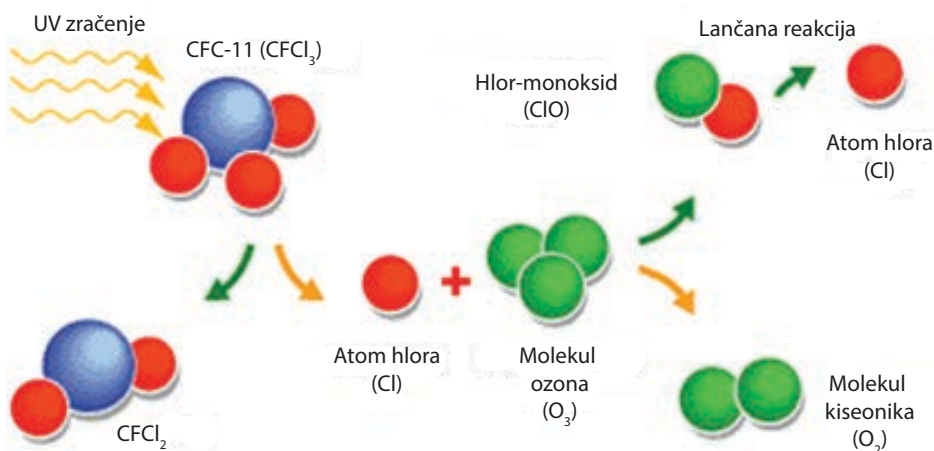


Novonastali ClO može reagovati sa O ili NO što dovodi do ponovnog stvaranja atoma Cl, i lančanih reakcija koje utiču na smanjenje debljine ozonskog omotača:



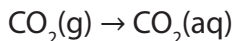
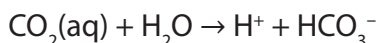
U skladu sa Montrealskim protokolom, proizvodnja supstanci koje oštećuju ozonski omotač je ograničena, a zamena za CFCs su hlorofluorouglenjenci koji sadrže vodonik (HCFC)

Slika 2.21. Razgradnja ozonskog omotača pod uticajem CFC

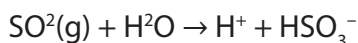


Kisele kiše

Odvijanje kiselinsko-baznih reakcija u nezagađenoj atmosferi nije neuobičajena pojava. U kapljicama atmosferske vode rastvara se CO_2 koji je prisutan u atmosferi u niskim koncentracijama:



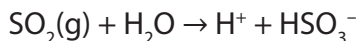
Nešto jaču kiselinu stvara SO_2 kada se rastvori u vodi:



Sa aspekta zagađenja i narušavanja prirodne ravnoteže, važno je razumevanje nastanka jakih kiselina, kao što su HNO_3 i H_2SO_4 , u atmosferi. Padavine koje sadrže ove kiseline se obično nazivaju kisele kiše, a termin se odnosi na sve vrste kiselih vodenih padavinama (magla, rosa, sneg i susnežica). U najopštijem smislu, kisela depozicija podrazumeva i depoziciju kiselina rastvorenih u vodi, kiselih gasova i kiselih soli (npr. NH_4HSO_4). Uobičajena pH vrednost kiše iznosi oko 5,6 odnosno kiša je blago kisela usled rastvaranja CO_2 u vodi dok je pH vrednost kiselih kiša između 4,2 i 4,4.

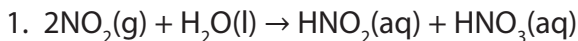
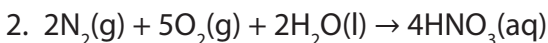
Kisele kiše: bilo koji oblik precipitacije koji sadrži kisele komponente (npr. HNO_3 i H_2SO_4) čije prisustvo snižava uobičajenu pH vrednost padavina.

Iako je CO_2 prisutan u većim količinama u atmosferi, SO_2 više doprinosi kiselosti padavina iz dva razloga. Prvo, rastvorljivost SO_2 u vodi je veća od rastvorljivosti CO_2 što se zaključuje na osnovu Henrijeve konstante ovih gasova. Drugo, konstanta ravnoteže reakcije rastvaranja SO_2 je za 4 reda veličine veća od konstante ravnoteže rastvaranja CO_2 :

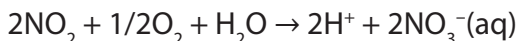


$$K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HSO}_3^-]}{[\text{SO}_2]}$$

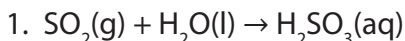
Kisele kiše mogu nastati direktnom emisijom jakih kiselina, kao što su HCl(g) ili H_2SO_4 u vidu magle, većina kiselih kiša se smatra sekundarnom zagađujućom supstancom jer nastaju reakcijom oksidacije SO_2 i NO_x koji formiraju kiseline u atmosferi (slika 2.22). Nastanak kiselih kiša rastvaranjem azotovih oksida se može prikazati sledećim reakcijama:



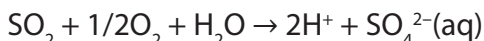
Ili zbirnom reakcijom:



Slično, rastvaranje SO_2 u vodi se može predstaviti sledećim reakcijama:



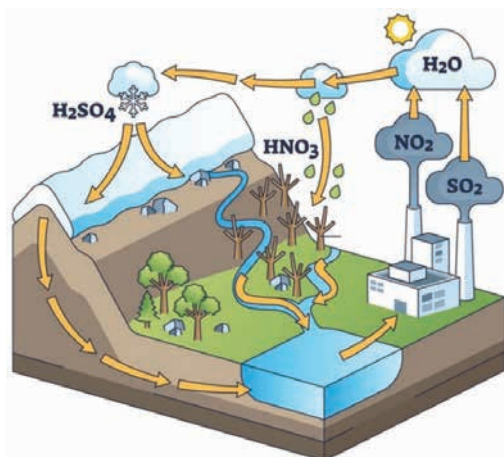
Ili zbirnom reakcijom:



Hemijske reakcije poput ovih igraju dominantnu ulogu u određivanju prirode, transporta, i sudbine kiselih padavina. Iako su emisije iz industrijskih postrojenja i sagorevanje fosilnih goriva glavni izvori SO_2 i NO_x , kisele kiše su zabeležene i u oblastima koje su udaljene od direktnih izvora emisije. Gasoviti oksidi mogu opstati u vazduhu nekoliko dana pre nego što podlegnu reakcijama rastvaranja u atmosferskoj vodi i za to vreme mogu biti nošeni vazдушnim masama i na udaljenosti do nekoliko hiljada km. Ovo klasifikuje kisele kiše kao regionalni problem zagađenja vazduha. Štetni efekti koje kisele kiše imaju su brojni, a neki od primera uključuju:

- direktnu fitotoksičnost na biljke usled prekomerne koncentracije kiselina;
- indirektnu fitotoksičnost, npr. oslobađanje Al^{3+} u zemljištu u kiselim uslovima (u normalnim uslovima, Al je prisutan kao nerastvorni $\text{Al}(\text{OH})_3$);
- zakišeljavanje šuma i uništavanje vegetacije;
- zakišeljavanje jezera sa toksičnim efektima na jezersku floru i faunu; i
- koroziju spomenika.

Slika 2.22. Ilustrativni prikaz nastanka kiselih kiša rastvaranjem SO_2 i NO_2 u atmosferskoj vodi



Fotohemijske reakcije

Fotohemijske reakcije su sve one reakcije koje se dešavaju apsorpcijom svetlosti, uglavnom iz UV dela spektra Sunčevog zračenja. Poznavanje mogućih mehanizama fotohemijskih reakcija je vrlo važne sa aspekta zagađenja vazduha, i praćenja i razumevanja sudbine zagađujućih materija u atmosferi. Apsorpcijom zračenja (kvanta svetlosti, $h\nu$) iz UV ili vidljivog dela spektra, molekuli postaju pobuđeni, najčešće do najnižih energetske nivoa. Većina molekula sadrži paran broj elektrona u orbitalama. Najviše dva elektrona suprotnih spinova zauzimaju istu orbitalu, a prilikom apsorpcije zračenja jedan od ovih elektrona prelazi u praznu orbitalu veće energije zadržavajući svoj spin ili menjajući ga. Pobuđeni molekuli su obično reaktivnijih od istih molekula u osnovnom stanju. Jedna od fotohemijski najaktivnijih vrsta je azot-dioksid (NO_2) koji ima značajnu ulogu u formiranju fotohemijskog smoga.

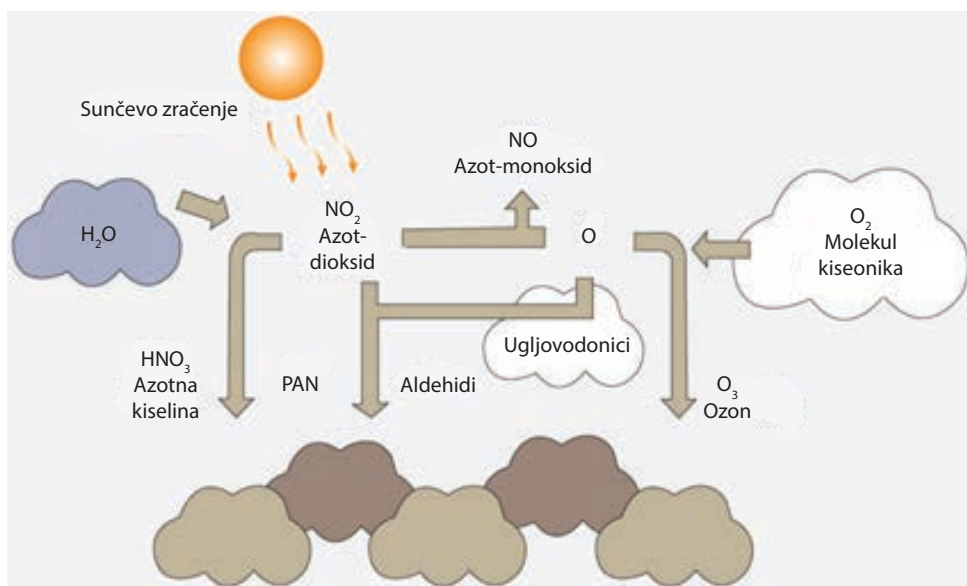
Fotohemijski smog predstavlja kombinaciju dima (eng. *smoke*) i magle (eng. *fog*) sastavljenih od različitih hemijskih vrsta koja narušava vidljivost u vazduhu, i mnogo značajnije, zdravlje ljudi. Smog koji se javlja zimi i potiče od sagorevanja fosilnih goriva za potrebe grejanja, najčešće uglja, je poznat kao londonski odnosno „zimski smog“. Gusti fotohemijski smog koji nastaje u reakcijama izduvnih gasova poreklom iz saobraćaja i organskih jedinjenja se često naziva „letnji smog“ i povezuje se sa basenom Los Anđelesa. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem koji se koriste u putničkim i teretnim vozilima emituju različite reaktivne gasove, kao što su stotine ugljovodonika i NO_x . Uz intenzivnu Sunčevu svetlost, odsustvo

vetra/mešanja vazdušnih masa, ova jedinjenja predstavljaju ključne komponente koje u nizu reakcija uključujući oksidaciju proizvode smog (slika 2.23). Primarno oksidaciono sredstvo u atmosferi je O_3 , a drugi atmosferski oksidansi obuhvataju: vodonik-peroksid (H_2O_2), organske perokside ($ROOR'$), organske hidroperokside ($ROOH$), i peroksiacil nitrata kao što je peroksiacetil nitrat (PAN).

Fotohemijski smog: smeša dima i magle nastala oksidacijom različitih hemijskih vrsta uz intenzivno prisustvo Sunčeve svetlosti i slobodnih radikala.

Koncentracije NO , NO_2 , ugljovodonika, aldehida i oksidacionih jedinjenja variraju tokom dana u zavisnosti od inteziteta emisije i meteoroloških uslova, pa i pojava smoga pokazuje dnevnu varijabilnost. Ujutru, nakon izlaska sunca, koncentracije NO_2 dostižu maksimum, koncentracije NO padaju, a nivoi aldehida i oksidanata postaju relativno visoki. U ovom ciklusu, povećanje koncentracije NO_2 i smanjenje koncentracije NO je neočekivano ako se ima u vidu da uslovi pod kojima se ove reakcije odvijaju dovode do fotodisocijacije NO_2 na O i NO . Takođe, pad koncentracija ugljovodonika je mnogo brži nego što se može objasniti njihovom sporom razgradnjom u reakcijama sa O_3 i O . Ove anomalije se danas objašnjavaju lančanim reakcijama koje uključuju međusobnu konverziju NO i NO_2 , oksidaciju ugljovodonika, i stvaranje reaktivnih intermedijera, kao što su hidroksil radikali ($HO\cdot$). Pojednostavljen prikaz ovih reakcija je dat u nastavku.

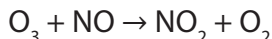
Slika 2.23. Ilustrativni prikaz nastanka fotohemijskog smoga



Primarna fotohemijska reakcija koja se odvija je razgradnja NO_2 i nastanak atoma kiseonika:

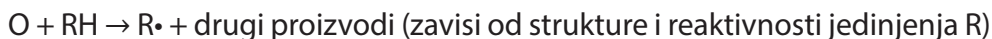


Takođe, odvijaju se i reakcije koje uključuju različite oblike O_2 , molekul, atom i ozon; M u reakcijama predstavlja treću vrstu koja apsorbuje energiju:

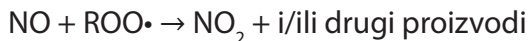


Poslednja reakcija je brza, pa koncentracija O_3 ostaje niska sve dok koncentracije NO ne budu niske.

Iz emitovanih ugljovodonika, proizvode se organski slobodni radikali ($\text{R}\cdot$) koji mogu, ali i ne moraju da sadrže kiseonik:

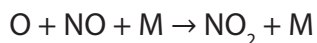
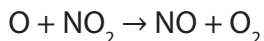
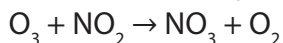
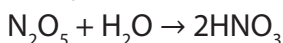


Na kraju, dolazi do propagacije lanca i završetka ciklusa različitim reakcijama kao što su na primer reakcije NO_x i slobodnih radikala:

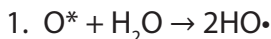
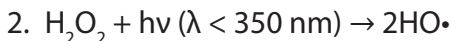
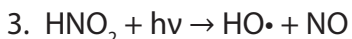


Lančane reakcije mogu da se završe reakcijom slobodnih radikala sa NO, reakcijom dva $\text{R}\cdot$ radikala, sorpcijom radikala na površini čestica, ali je najčešći primer prekida prikazana reakcija NO_2 i $\text{R}\cdot$ jer je NO_2 uglavnom prisutan u visokim koncentracijama.

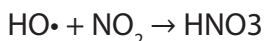
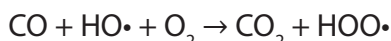
Osim primera iznad, formiranje atomskog kiseonika primarnom fotohemijskom reakcijom je okidač za nekoliko reakcija koje uključuju vrste kiseonika i NO_x , kao i međusobne reakcije azotovih oksida bez i uz prisustvo vode:



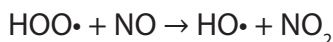
Međutim, ovo nisu jedine reakcije koje se mogu očekivati u zagađenoj atmosferi u toku formiranja smoga. Veoma reaktivni HO• radikali mogu nastati: 1) reakcijom pobuđenog atomskog kiseonika sa vodom, 2) fotodisocijacijom vodonik-peroksida, i 3) fotolizom azotaste kiseline:



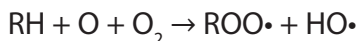
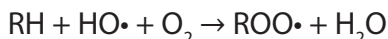
Nastali hidroksilni radikal reaguje sa neorganskim oksidima, NO₂, NO i CO:



Poslednja reakcija je značajna zato što se njenim odigravanjem smanjuju koncentracije CO u atmosferi i nastaje hidroperoksilni radikal (HOO•) u čijem prisustvu se oksiduje NO:

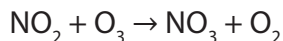


Osim reakcija neorganskih jedinjenja, brojne su reakcije alifatičnih (RH) i aromatičnih ugljovodonika (Ar-H) i aldehida sa O, O₃ ili HO• radikalom u kojima nastaju reaktivni organski radikali (ROO•):



Značajni predstavnici aromatičnih ugljovodonika koji učestvuju u navedenim reakcijama su benzen i toluen. Proizvod reakcije benzena sa HO• je fenol (aromatični alkohol), dok kod toluena alkil grupa učestvuje u reakcijama koje su slične onima koje pokazuju alkani.

Pored navedenih, kao vrlo važna hemijska vrsta u reakcijama koje se odvijaju noću, javlja se nitratni radikal NO₃•, koji nastaje u reakciji NO₂ i O₃:



Nitratni radikal je u ravnoteži sa NO₂ što se može prikazati reakcijom:

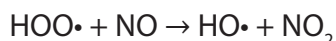
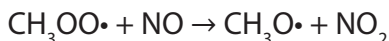
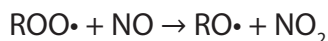


Tokom dana, nivoi NO_3 ostaju niski, sa vremenom pouraspada oko 5 s uz prisustvo intenzivnog zračenja (na primer, u podne), zbog reakcija disocijacije:

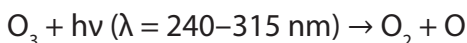
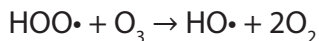
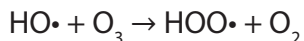
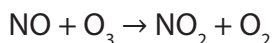


Noću, nivoi NO_3 mogu dostići vrednosti i do 8×10^7 po cm^{-3} u poređenju sa 1×10^6 po cm^{-3} za $\text{HO}\cdot$, pa iako $\text{HO}\cdot$ reaguje 10 do 1000 puta brže od NO_3 , mnogo veća koncentracija poslednjeg ga čini odgovornim za veliki deo atmosferske hemije tokom noći.

Među svim iznad navedenim reakcijama se mogu izdvojiti one koje opisuju stvaranje tzv. **troposfernog („lošeg“) ozona**. U reakcijama NO sa peroksi, organskim ili acetatnim radikalima nastaje NO_2 koji fotoizuje do NO i nascentnog kiseonika:



Nastali O_3 može dalje da se razgradi u prisustvu zračenja, ali i u reakcijama sa hidroksi i peroksi radikalima i NO:



Formiranje sekundarnih organskih aerosola

Zagađujuće materije koje dospevaju u atmosferu podležu mnogobrojnim transformacijama putem fizičko-hemijskih reakcija. Organska jedinjenja čine značajan deo atmosferskih finih čestica, doprinoseći sa 20 do 90% masi aerosola u donjoj troposferi. U vazduhu, organska jedinjenja kao VOCs vrlo često učestvuju u reakcijama oksidacije. Proizvodi nastali u ovim reakcijama se talože na česticama već postojećeg aerosola u atmosferi, učestvuju u reakcijama na granicama faza ili formiraju nove čestice, stvarajući zagađujuće čestice definisane kao **sekundarni organski aerosol** (*Secondary Organic Aerosol*, SOA). Karakteristike VOCs značajne za razumevanje reakcija oksidacije i nastanak SOA su: niska tačka ključanja, visok napon pare i visoka isparljivost. Među različitim VOCs kao glavni prekursori SOA identifikovani su: monoaromatični ugljovodoni (benzen, toluen, i ksileni), monoterpeni, seskviterpeni, fenoli i furani, ali ne treba zanemariti i učešće PAHs u nastanku organskog aerosola. Prisustvo SOA u vazduhu može da izazove smanjenje vidljivosti, promenu jezgra kondenzacije oblaka, rasejanje i apsorpciju Sunčevog zračenja. Takođe, brojna toksikološka i epidemiološka istraživanja dovode u vezu pojavu astme, bronhitisa i karcinoma sa dugotrajnom izloženošću SOA.

Sekundari organski aerosol: oksidacijom VOCs u prisustvu slobodnih radikala nastaju proizvodi niže isparljivosti koji kasnije prelaze u kondenzovanu fazu.

Razumevanje mehanizma nastanka, svojstava i uticaja SOA na klimu, kvalitet vazduha i zdravlje ljudi, predstavlja veliki izazov i zahteva vrlo detaljan pristup imajući u vidu da je SOA složena mešavina organskih vrsta sa različitim izvorima i fizičko-hemijskim svojstvima (sastav, funkcionalne grupe, isparljivost, higroskopnost, fazno stanje itd.). Osnovu za razumevanje hemije nastanka SOA predstavljaju laboratorijske studije izvedene pod pažljivo kontrolisanim uslovima, ali važna saznanja u ovoj oblasti su rezultat i ambijentalnih merenja i simulacija procesa modelima.

Najčešće proučavan mehanizam formiranja SOA je oksidacija VOCs u prisustvu slobodnih radikala, HO• ili O₃, u toku koje nastaju proizvodi niže isparljivosti koji kasnije prelaze u kondenzovanu fazu tj. smešu čvrstih čestica i tečnosti. Međutim, u vazduhu već prisutne manje isparljive organske vrste koje se prvobitno emituju u kondenzovanoj fazi mogu dovesti do stvaranja SOA. Potrebno je naglasiti da pojam manje isparljive organske vrste uključuje jedinjenja koja su u potpunosti prisutna u kondenzovanoj fazi (neisparljive organske materije), kao i ona koja mogu biti prisutna u značajnim količinama i u gasnoj i u fazi čestica (poluisparljive organske materije) što obuhvata prilično veliki deo atmosferskih organskih polutanata.

Takođe, dok su HO• i O₃ ključni atmosferski oksidanti tokom dana, nitratni radikal (NO₃) je glavno oksidaciono sredstvo tokom noći pa ne treba zanemariti proučavanje reakcije VOC i NO₃. Reakcije „noćne“ hemije su značajne naročito u toku zime, kada noć traje duže od dana i kada su aktivni različiti izvori zagađenja u odnosu na leto.

Nastanak SOA i raspodela poluisparljivih zagađujućih supstanci nastalih oksidacijom VOCs između dve faze se objašnjava teorijom apsorpcije na osnovu koeficijenta raspodele, K_p . Uprošćena jednačina koja leži u osnovi ove teorije se može predstaviti kao:

$$K_p = \frac{P}{GM}$$

U jednačini, G je masena koncentracija (masa po zapremini vazduha, npr. mg m⁻³) poluisparljivih vrsta u gasnoj fazi, P je masena koncentracija (mg m⁻³) poluisparljivih vrsta u čestičnoj frakciji, a M je ukupna masena koncentracija (mg m⁻³) apsorbujućih čestica. Apsorbujuće čestice predstavljaju deo aerosola odnosno fazu koja učestvuje u raspodeli/razdvajanju VOC i obuhvata organski aerosol u koji se apsorbuju poluisparljiva jedinjenja i vodeni aerosol u slučaju da su prisutne organske vrste koje su visoko rastvorljive u vodi.

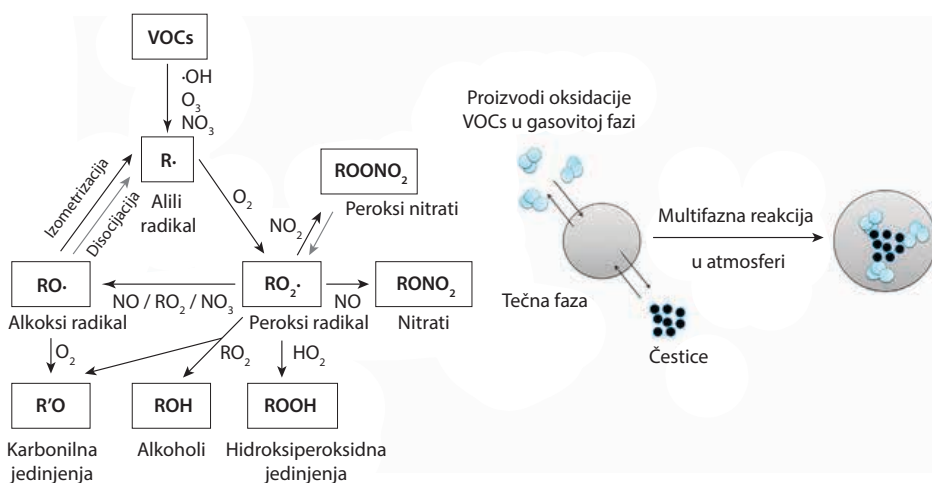
Prema jednačini za koeficijent raspodele, sve dok postoji bilo kakva apsorbujuća masa, neka frakcija poluisparljivog jedinjenja može da dospe u tu fazu, čak iako je njena koncentracija u gasnoj fazi vrlo niska. Sa porastom količine apsorbujućeg materijala, jedinjenja veće isparljivosti i nižim K_p će se sve više deliti u kondenzovanu fazu. Međutim, treba naglasiti da prinos SOA iz datog prekursora nije stehiometrijska veličina i da zavisi od ukupnog opterećenja vazduha organskim česticama.

Osim uprošćene jednačine raspodele čestica u sistemu gas–kondenzovana faza (čvrsto-tečni aerosol), reakcije koje određuju isparljivost, a time i potencijal organskih jedinjenja za formiranje SOA u atmosferi obuhvataju:

1. oksidaciju organskih vrsta u gasnoj fazi, čija isparljivost može da se smanjuje dodavanjem različitih funkcionalnih grupa ili da se poveća raskidanjem veza ugljenik–ugljenik; i
2. reakcije u čestičnoj (kondenzovanoj) fazi, koje mogu promeniti isparljivost vrsta bilo oksidacijom ili formiranjem visokomolekularnih vrsta.

Oksidacija u gasnoj fazi je primarni proces koji utiče na isparljivost organskih vrsta u atmosferi. Oksidacija VOC započinje reakcijom sa vrstama kao što su $\text{HO}\cdot$, NO_3 radikal i O_3 . Mehanizmi atmosferske oksidacije za širok spektar VOC su pojednostavljeno prikazani na slici 2.24. Razlikuju se tri ključne tačke grananja koje utiču na isparljivost proizvoda oksidacije: 1) početni napad oksidansa i nastanak alkil radikala ($\text{R}\cdot$); 2) reakcije organskog peroksi radikala ($\text{RO}_2\cdot$); i 3) reakcije alkoksi radikala ($\text{RO}\cdot$).

Slika 2.24. Potencijalne reakcije oksidacije VOC u atmosferi (levo) i formiranje sekundarnog organskog aerosola (desno)



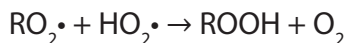
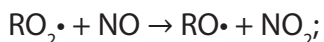
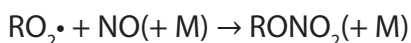
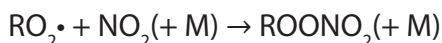
Proučavanje odnosa između isparljivosti proizvoda i pojedinačnih koraka u reakcijama oksidacije VOC omogućava razumevanje specifičnih reakcionih uslova koji upravljaju nastankom SOA. Oksidacijom nastaju vrste sa dovoljno niskim naponom pare koji im omogućava da pređu u kondenzovanu fazu. Takođe, oksidacijom se mogu formirati i proizvodi veće isparljivosti od matičnog VOC, npr. CO_2 ili CH_2O .

Početni napad oksidansa ($\text{HO}\cdot$, O_3 , NO_3) ima značajnu ulogu jer pokreće degradaciju VOC i utiče na to koji proizvodi će nastati i u kojoj količini. Degradacija se dešava najčešće na dva načina: odvajanjem atoma vodonika iz VOC prekursora ili dodavanjem atoma i cepanjem dvostruke $\text{C}=\text{C}$ veze. U prvom slučaju, vrsta radikala kojim započinje reakcija ne utiče mnogo na osobine proizvoda dok u reakcijama adicije osobine proizvoda zavise od dodatih funkcionalnih grupa. Napon pare molekula u velikoj meri zavisi od njegove polarnosti i veličine.

Na primer, dodatak polarnih hidroksilnih, hidroperoksilnih, nitratnih ili karboksilnih grupa može smanjiti pritisak pare za više od dva reda veličine po dodatnoj grupi. Dodatak bilo koje funkcionalne grupe koja sadrži kiseonik više utiče na napon pare nego povećanje veličine ugljeničnog skeleta za jedan atom ugljenika. Međutim, ova promena je umerena za aldehide i ketone, koji su relativno nepolarni.

Oksidacija VOCs molekulom O_3 (ozonoliza) se odvija na fundamentalno drugačiji način od oksidacije izazvane radikalima. Na prime, adicijom O_3 na alken dolazi do cepanja dvostruke veze i nastanka ozonida poznatog kao *Criegee* intermedijer, koji dalje razgrađuje u karbonilna jedinjenja. Kod alifatičnih (acikličnih) jedinjenja ova reakcija dovodi do smanjenja veličine ugljeničnog niza što može umanjiti uticaj dodatka funkcionalnih grupa na smanjenje isparljivosti.

Reakcije organskog peroksi radikala ($RO_2\cdot$) su značajne kada se posmatraju proizvodi niske isparljivosti (slika 2.24). U zavisnosti od toga da li su u vazduhu prisutni $HO\cdot$ ili NO_x nastaju različiti proizvodi. Kompetitivne reakcije koje se odvijaju uprošćeno se mogu predstaviti kao:



U prvoj reakciji nastaje vodonik-peroksid koji ima nisku isparljivost i često se nalazi kao glavna komponenta SOA. Organski peroksidi nastali od vodonik-peroksida i organskih jedinjenja mogu formirati teško isparljive peroksihemiacetale koje su deo čestične faze SOA. U reakcijama $RO_2\cdot$ sa NO , dominantan proizvod je alkoksi radikal ($RO\cdot$) dok su organski nitrati ($RONO_2$) slabije zastupljeni. Takođe, peroksi nitrati ($ROONO_2$) nastali od $RO_2\cdot$ i NO_2 su vrlo nestabilni u vazduhu i imaju vreme poluživota kraće od 1s, ali mogu manjem delom biti apsorbovani u čestičnoj fazi SOA.

Reakcije alkoksi radikala ($RO\cdot$) uključuju: 1) disocijaciju C–C veze pored alkoksi ugljenika na karbonil i alkil radikal; 2) izomerizaciju odnosno pomeranje vodonika i elektronskog para za četiri mesta; i 3) reakcije sa O_2 pri čemu nastaju karbonilna jedinjenja i $HO_2\cdot$. Brzina disocijacije zavisi od nivoa supstitucije nastalog alkil radikala i nastanak više supstituisanih radikala je favorizovan što znači da će razgranata jedinjenja biti podložnija disocijaciji od linearnih. Brzina izomerizacije raste sa nivoom supstitucije ugljenika sa kojeg se pomera H atom, a ovaj efekat je pojačan ukoliko je za taj ugljenik vezana OH grupa. Reakcije sa O_2 se odvijaju veoma sporo i uglavnom do njih ne dolazi ukoliko se odvijaju disocijacija i/ili izomerizacija.

Mehanizmi navedenih reakcija su slabo potkrepljeni eksperimentalnim podacima, a potrebno je naglasiti i da su predložene reakcije ispitivane kada su oksidansi prisutni pojedinačno, a ne u smeši. Takođe, jedan od važnih faktora koji treba uzeti u obzir prilikom stvaranja SOA i oksidacije VOCs je zavisnost prinosa i sastava SOA od koncentracije NOx. Nivo NOx utiče na početak oksidacije, kontrolišući odnose HO•, NO₃ i O₃, kao i sudbinu RO₂•. Na ovaj način se menja količina proizvedenog SOA, a zavisnost prinosa SOA od NOx primećena je čak i kada je samo jedan oksidant dominantan. Na primer, nakon oksidacije kratkih ugljovodonika sa 10 ugljenikovih atoma ili manje, uključujući izopren, monoterpene i jednostavna aromatična jedinjenja formiranje SOA se smanjuje kada se koncentracija NOx povećava. Treba napomenuti da je zavisnost formiranja SOA od NOx veoma kompleksna i da nije nužno da se reakcije odvijaju prema predloženim mehanizmima, kao i da je pojava izuzetaka vrlo moguća. Rezultati nekih studija pokazuju da se prinosi SOA povećavaju kada su nivoi OH veoma visoki čak i u prisustvu NOx.

Reakcije u čestičnoj fazi su značajne ako se odvijaju u vremenskom okviru koji je kraći od životnog veka (od 4 do 7 dana) čestica u troposferi. Ove reakcije su heterogone i višefazne, a u njima može doći do promene oksidacionog stanja ugljenika ili ono može ostati nepromenjeno. Reakcije ovog tipa značajne za nastanak SOA su stvaranje oligomernih jedinjenja i drugih organskih vrsta velike molekulske mase pri čemu se pri dodatku svaka dva ugljenikova atoma napon pare jedinjenja smanjuje za red veličine. Takođe, moguće je i stvaranje adukta asocijacijom koji se vezuju kovalentim ili nekovalentnim vezama. Primeri reakcija u kondezovanoj fazi obuhvataju: adiciju hidroperoksida na aldehid kojom nastaju peroksi hemiacetali; adiciju alkohola na aldehid kojom nastaju hemiacetali; aldolnu kondezaciju (spajanje dva karbonilna jedinjenja); i nastanak estara u reakciji alkohola i organskih ili neorganskih kiselina. Neretko se u čestičnoj fazi odvija i oksidacija organskih jedinjenja atmosferskim oksidantima što se naziva „**starenje aerosola**“ (*aerosol aging*). Mehanizmi oksidacije ovog tipa su slični onima kojim se opisuje oksidacija u gasovitoj fazi, pri čemu su ključni faktori koji određuju isparljivost nastalih jedinjenja cepanje C–C veze i dodatak polarnih funkcionalnih grupa. Nakon što se reakcija oksidacije u gasovitoj ili čestičnoj fazi završi i/ili se formira SOA, organski proizvodi nastavljaju da se razvijaju hemijski i da učestvuju u različitim reakcijama. Takve promene se nastavljaju sve dok se SOA ne ukloni iz atmosfere vlažnom ili suvom depozicijom.

2.2.5. Biosfera

Biosfera je prvobitno definisana kao omotač Zemlje u kome se odvija život, ali kako se organizmi nalaze u neprekidnoj interakciji sa svojom životnom sredinom (atmosfera, hidrosfera i zemljište), za biosferu se može reći da je jedinstven biološki organizacioni sistem koji predstavlja sponu između žive i nežive prirode. Gornja granica biosfere nalazi se u troposferi, na visini od 10 do 12 km. U ekstremnim slučajevima spore gljiva i pojedine bakterije se mogu naći i na visini većoj od 20 km iznad površine Zemlje. Najdublje u kopnu je stanište anaerobnih bakterija u slojevima nafte na 2 do 3 km ispod površine tla, a u okeanima postoje živi organizmi koji nastanjuju dubine i do nekoliko kilometara ispod površine vode. Ipak, najveći broj biljnih i životinjskih vrsta naseljava prostor od nekoliko stotina metara ispod i iznad Zemljine površine.



Biosfera je živi omotač planete, gde milijarde organizama zajedno stvaraju dinamičnu mrežu života koja održava Zemlju u ravnoteži.

Biološku raznovrsnost u prirodi prati pojava udruživanja jedinki u zajednice, a sistematičnost u istraživanjima ogleda se u uvođenju **ekoloških kategorija**. Najniža kategorija, **populacija**, predstavlja skup jedinki jedne vrste koje žive na istom prostoru. Svaku populaciju, bilo koje vrste organizama odlikuje veličina (gustina), prostorni raspored, dinamičnost, natalitet, mortalitet, uzrasna struktura i rast. Sledeća organizaciona jedinica je **biocenoza**, životna zajednica svih biljnih i životinjskih vrsta koje žive na jednom prostoru. Prostor koji nastanjuju, tj. njihovo stanište naziva se **biotop**. Za biocenozu se može reći i da predstavlja visoko integrisani skup populacija biljaka i životinja na određenom staništu, čiji zajednički život počiva na vrlo složenim uzajamnim odnosima i koji su nastali kao rezultat dugotrajnog procesa uzajamnog prilagođavanja i međusobne konkurencije, kao i prilagođavanja spoljašnjoj sredini.

Prostorno-vremenski određen, otvoren sistem živih organizama (biocenoza) i spoljašnje sredine (biotop) naziva se **ekosistem**. Osnovne karakteristike ekosistema su funkcionalno jedinstvo životne zajednice i njenog staništa, odnosno žive i nežive prirode u određenom prostoru i prirodna ravnoteža koja može biti narušena spoljašnjim delovanjem ili intenzivnim unutrašnjim aktivnostima. Proučavanjem različitih ekosistema i njihovih međusobnih odnosa i uticaja, došlo se do pojma globalnog ekosistema ili biosfere, koja predstavlja životnu sredinu svih živih bića. Kaže se i da je **biosfera ekosistem planete Zemlje**, gde su prirodni uslovi postojanja usko povezani sa svim oblicima života.

Struktura i funkcije biosfere

Biosfera, kao globalni ekosistem, obuhvata sve žive organizme na Zemlji i njihove interakcije sa abiotskim (neživim) delovima okoline. U njenoj osnovi nalaze se ključni ekološki principi poput protoka energije i kruženja materije, koji se odvijaju kroz složene biogeohemijske cikluse i trofičke odnose. Ovi procesi omogućavaju održavanje života na planeti kroz neprekidnu razmenu energije i materije između organizama i njihove okoline, čineći biosferu dinamičnim i vitalnim sistemom.

Jedna od najvažnijih karakteristika biosfere je njena **biološka raznovrsnost**. Ova raznovrsnost podrazumeva veliki broj različitih vrsta biljaka, životinja, gljiva i mikroorganizama, koje zajedno čine stabilan i otporan ekosistem. Svaka vrsta obavlja specifične funkcije koje doprinose održavanju ekološke ravnoteže – na primer, određene biljke obogaćuju tlo azotom, dok gljive razlažu mrtvu organsku materiju, omogućavajući kruženje hranljivih materija.

Biosfera je **hijerarhijski organizovana**, počevši od najmanjih jedinki koje se grupišu u populacije, zatim zajednice, a na kraju u ekosisteme. Svaki nivo ove hijerarhije igra specifičnu ulogu u održavanju ekoloških procesa. Interakcije između populacija unutar zajednice oblikuju dinamiku hranljivih mreža, dok ekosistemi regulišu širi protok energije i materije.

Ključna osobina biosfere je njena **adaptabilnost**. Organizmi se konstantno prilagođavaju promenama u svojoj okolini, bilo kroz fiziološke promene, promene u ponašanju ili genetske modifikacije tokom vremena. Ova sposobnost prilagođavanja omogućava biosferi da se razvija i opstaje kroz različite ekološke izazove, uključujući klimatske promene, promene staništa i ljudske aktivnosti.

Pored toga, biosfera je **dinamičan sistem** u kojem promene neprestano nastaju. Sukcesija, proces kojim se ekosistemi razvijaju i menjaju tokom vremena, ilustruje ovu dinamičnost. Na primer, nakon požara, područje može proći kroz

niz sukcesionih stadijuma, počevši od pionirskih vrsta koje kolonizuju goli teren, do razvoja stabilne šumske zajednice. Ovi procesi su ključni za obnavljanje ekosistema i održavanje biološke raznovrsnosti.

Autotrofni organizmi, poput biljaka, algi i nekih bakterija, igraju ključnu ulogu u biosferi jer akumuliraju solarnu energiju tokom fotosinteze i pretvaraju je u hemijsku energiju u obliku organske materije. Ova energija se zatim redistribuira kroz hranljive mreže, hraneći heterotrofne organizme – biljojede, mesojede i razlagače – čije preživljavanje zavisi od organske materije. Tokovi energije u biosferi su jednosmerni: energija se prenosi sa jednog trofičkog nivoa na sledeći, pri čemu dolazi do gubitka energije u obliku toplote. Ovaj gubitak energije zahteva da organizmi višeg trofičkog nivoa konzumiraju veće količine hrane sa nižih trofičkih nivoa, što oblikuje strukturu i dinamiku ekosistema.

Biosfera takođe igra ključnu ulogu u održanju dinamike gasova u atmosferi, poput kiseonika, ugljen-dioksida i metana. Fotosintetički organizmi oslobađaju kiseonik i apsorbuju ugljen-dioksid, dok respiracija, razgradnja organskih materija i ljudske aktivnosti vraćaju ugljen-dioksid nazad u atmosferu. Ovaj ciklus gasova je ključan za održanje stabilne atmosfere pogodne za život.

Koncentracija nutrijenata, poput azota, fosfora i kalijuma, u živim organizmima održava se kroz složene cikluse u biosferi. Ovi nutrijenti su esencijalni za rast i razvoj organizama, a njihova "reciklaža" kroz ekosisteme omogućava trajnu produktivnost biosfere. Još jedna vitalna funkcija biosfere je razgradnja mrtvih organizama i transformacija organske materije u neorganske oblike koji mogu biti ponovo iskorišćeni u ekosistemima. Razlagači, poput bakterija i gljiva, razbijaju složene organske molekule na jednostavnije vraćajući hranljive materijale nazad u tlo, vodu i atmosferu, omogućavajući nastavak života.

Sve ove funkcije čine biosferu vitalnom komponentom Zemljinog ekosistema, koja omogućava održavanje života u svim njegovim oblicima i kompleksnostima. Razumevanje ovih procesa je ključno za proučavanje ekologije i zaštitu životne sredine, jer nam omogućava da identifikujemo kako ljudske aktivnosti mogu narušiti prirodnu ravnotežu, ali i ukazati na načine kako se ona može obnoviti..

2.3.OSNOVNI PROCESI U ŽIVOTNOJ SREDINI

Procesi u životnoj sredini obuhvataju niz složenih i međusobno povezanih aktivnosti koje se odvijaju u prirodnim ekosistemima i igraju ključnu ulogu u održavanju stabilnosti i zdravlja planete. Ovi procesi uključuju kruženje hranljivih materija, poput azota, fosfora i ugljenika, koje su neophodne za rast i održavanje života. Pored toga, protok energije kroz različite trofičke nivoe – od proizvođača do potrošača i razlagača – omogućava funkcionisanje ekosistema.

Hemijski procesi u atmosferi, vodi i zemljištu, kao što su fotosinteza, disanje, razgradnja organskih materija, kao i formiranje i kretanje zagađujućih materija, direktno utiču na kvalitet životne sredine. Ovi procesi su često dinamični i zavise od brojnih faktora kao što su temperatura, vlaga, prisustvo određenih hemikalija, ali i ljudske aktivnosti koje mogu značajno promeniti prirodni tok ovih procesa.

U savremenom svetu, razumevanje procesa u životnoj sredini postaje sve važnije, s obzirom na izazove poput klimatskih promena, zagađenja, gubitka biodiverziteta i degradacije ekosistema.

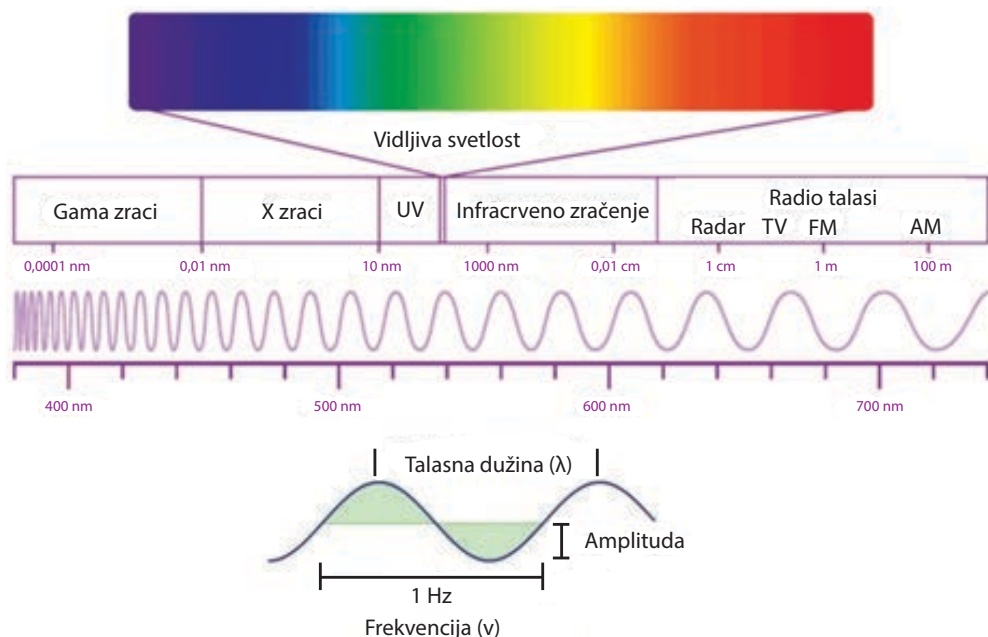
2.3.1. Protok energije u prirodi

Osnovni principi koji važe u životnoj sredini su protok energije i kruženje materije. Najznačajniji izvor energije na Zemlji je Sunčevo zračenje, koje prolazi kroz atmosferu, odbija se od površine Zemlje i delimično ostaje „zarobljeno“ u vidu toplotne energije u nižim slojevima. Energija se sa Sunca prenosi na Zemlju u vidu elektromagnetnog zračenja sa maksimalnim protokom energije na talasnoj dužini oko 500 nm, što pripada vidljivom delu spektra. Procenjuje se da oko 50% energije apsorbuje Zemljina površina, a oko 20% atmosfera. Refleksije od oblaka i atmosfere čine oko 26%, dok se samo oko 4% energije reflektuje od tla, i zagreva niže slojeve atmosfere. Izuzev neposrednog zračenja koje greje Zemljinu površinu i atmosferu, Sunčevo zračenje je važno i za mnoge druge procese, kao što su fotosinteza, obnavljanje energije vetra, morskih struja, talasa, vodnih tokova i termalnog gradijenta u okeanima.

S obzirom na to da je elektromagnetno zračenje, posebno svetlost, veoma važno za protok energije u ekološkim sistemima, potrebno je navesti njegove osnovne osobine. Elektromagnetno zračenje poseduje karakteristike talasa. Talasi se opisuju talasnom dužinom (λ), amplitudom i frekvencijom (ν) kao što je ilustrovano na slici 2.25. Talasna dužina predstavlja najmanju udaljenost između dve tačke iste faze jednog talasa (m) dok je frekvencija učestanost talasnih dužina

u jedinici vremena (Hz ili $1 \text{ ciklus} \times \text{s}^{-1}$). Veličina koja je srodna i proporcionalna frekvenciji je talasni broj ($\tilde{\nu}$) izražava se recipročnim $1/\text{cm}$ ili cm^{-1} . Elektromagnetno zračenje se kreće kroz vakuum brzinom svetlosti ($c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$).

Slika 2.25. Elektromagnetni spektar i karakteristike talasa



Frekvencija i talasna dužina su povezane preko brzine svetlosti:

$$c = v \times \lambda$$

Osim što se ponaša kao talas, elektromagnetno zračenje ima karakteristike čestica. Dualna talas/čestica priroda elektromagnetnog zračenja je osnova za kvantnu teoriju koja kaže da se energija zračenja može apsorbovati ili emitovati samo u diskretnim paketima tzv. kvanti ili fotoni. Energija (E) svakog fotona se može predstaviti kao proizvod Plankove konstante ($h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$) i frekvencije:

$$E = h \times v$$

$$E = h \times c / \lambda$$

Iz prethodne jednačine proizilazi da energija zračenja raste sa porastom frekvencije i smanjenjem talasne dužine. Na osnovu različitih talasnih dužina i frekvencija, u elektromagnetnom spektru se razlikuju: gama i rendgenski (X) zruci, UV zračenje, vidljiva svetlost (VIS), IR zračenje, mikro i radio talasi (slika 2.25).

Uz spoljašnju toplotnu i svetlosnu energiju, korišćenjem hrane živi organizmi obezbeđuju/poseduju unutrašnju energiju. Autotrofni organizmi imaju osobinu stvaranja hrane transformacijom neorganske u organsku materiju. Ovom tipu organizama pripadaju eukariote (biljke), neke bakterije i modrozelenne alge. Generalno, za Sunčevu energiju su vezana dva biohemijsko-fiziološka procesa kod živih organizama – fotosinteza i disanje. Tokom fotosinteze energija se deponuje u organskim jedinjenjima (hemijska), a zatim se kataboličkim mehanizmima (disanje) koristi za održavanje vitalnih funkcija u organizmima i ekosistemu. Organska materija, stvorena tokom procesa fotosinteze se dalje prenosi kroz trofičke nivoe (različiti oblici ishrane), a unutrašnja energija se u procesima ćelijskog disanja troši na toplotnu i mehaničku, koje su neophodne za životne aktivnosti, rast, razvoj, razmnožavanje i dr. Nakon prestanka životnih funkcija, posebna grupa heterotrofnih organizama – saprofite razgrađuju iz zemljišta ostatke živih organizama do oblika koji je ponovo dostupan proizvođačima – autotrofima.

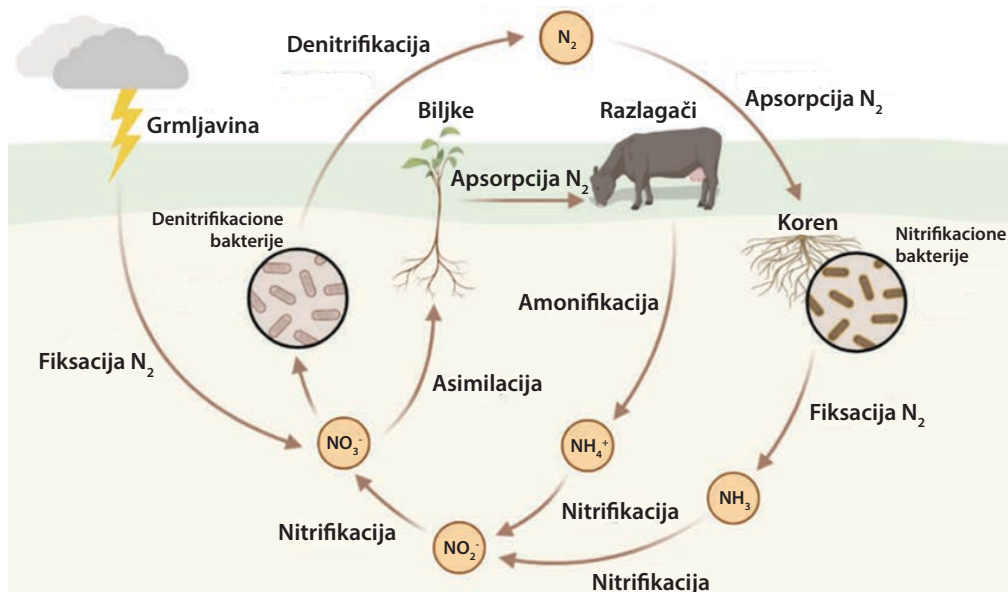
Za razliku od energije koja neprekidno dolazi sa Sunca, količina materije na Zemlji je ograničena, pa je u prirodi prisutan mehanizam obnove u vidu **biogeohemijskih ciklusa** – kruženje materije u prirodi. Najznačajniji od svih biogeohemijskih ciklusa su kruženje vode (hidrološki ciklus), kiseonika, ugljenika i azota u prirodi. Oni su međusobno povezani, konstantno se odvijaju u prirodi i zaslužni su za održanje ekološke ravnoteže na Zemlji. Kruženje azota, ugljenika i kiseonika je opisano u narednim poglavljima dok je hidrološki ciklus prikazan u poglavlju Hidrosfera.

2.3.2. Kruženje azota

Azot je važna komponenta svih živih organizama jer ulazi u sastav nukleinskih kiselina, proteina i drugih organskih molekula. Iako azot čini oko 78% atmosfere (vazduha), biljke i fitoplankton nisu umogući da ga inkorporiraju u obliku gasovitog N_2 u kom su dva atoma azota vezana trostrukom vezom ($N \equiv N$). Azot ulazi u živi svet **fiksacijom azota**, procesom pretvaranja gasovitog azota u amonijak (NH_3), koji spontano prelazi u amonijum jon (NH_4^+); amonijum jon se prirodno nalazi u vodama i zemljištu.

Tri procesa su odgovorna za većinu fiksacije azota u biosferi (slika 2.26). U prvom, u toku električnog pražnjenja munjama u atmosferi se oslobađa ogromna količina energija koja dovodi do raskidanja trostruke veze između atoma azota. Novonastali atomi azota reaguju sa kiseonikom formirajući azotove okside, koji reaguju sa vodom (kišom) dajući nitrata (NO_3^-) i azotnu kiselinu (HNO_3), koji putem depozicije dospevaju na površinu zemlje. **Atmosferska fiksacija** azota čini oko 5 do 8% ukupne fiksacije. U atmosferi se odvija i niz reakcija u kojima učestvuju azotovi oksidi o čemu je detaljno diskutovano u poglavlju Atmosferska hemija: primeri reakcija. Drugi proces je **industrijska fiksacija** tokom koje nastaje NH_3 u reakciji atmosferskog azota i kiseonika pod visokim pritiskom i temperaturom uz upotrebu katalizatora (Haber-Bošov postupak). Amonijak se može koristiti direktno kao đubrivo, ali većina se dalje prerađuje u ureu i amonijum-nitrat (NH_4NO_3). Treći proces je **biološka fiksacija** u koju su uključene bakterije, koje ugrađuju azot u svoje makromolekule. Cijanobakterije i bakterije iz roda *Azotobacter* i *Rhizobium* su važni fiksatori azota. Neke bakterije koje fiksiraju azot formiraju simbiotski odnos sa biljkama iz porodice mahunarki ili sa životinjama. Prvi stabilan proizvod ovog procesa je NH_3 . Azot u organskim jedinjenjima je posebno važan za proučavanje dinamike ekosistema jer su mnogi procesi koji se odvijaju u ekosistemu, kao što su primarna proizvodnja i razgradnja, ograničeni raspoloživim zalihama azota. Biljke i drugi proizvođači direktno koriste NH_4^+ i NO_3^- za stvaranje organskih molekula kroz proces asimilacije (slika 2.26). Ovaj azot je sada dostupan potrošačima, koji izlučuju organska jedinjenja azota nazad u životnu sredinu. Takođe, mrtvi organizmi na svakom trofičkom nivou sadrže organski azot.

Slika 2.26. Kruženje azota



Azot koji ulazi u žive sisteme fiksacijom azota na kraju se pretvara iz organskog azota nazad u gasoviti azot pomoću bakterija. Ovaj proces se dešava u tri koraka u ekosistemima na zemlji: amonifikacija, nitrifikacija i denitrifikacija. U procesu **amonifikacije** ili mineralizacije azota bakterije i gljivice pretvaraju azotni otpad iz živih organizama ili ostataka mrtvih organizama u NH_4^+ . Ovako nastao NH_4^+ nitrifikujuće bakterije (*Nitrosomonas* ili *Nitrobacter*) pretvaraju u nitrite (NO_2^-), a zatim u nitrate (NO_3^-) kroz proces **nitrifikacije**. Osim bakterija, u zemljištu i okeanima se nalaze arhealni mikrobi koji pretvaraju NH_3 u NO_2^- . Kao i NH_4^+ , NO_2^- i NO_3^- se nalaze u vodi i zemljištu. Na kraju, tokom **denitrifikacije**, bakterije, kao što su *Pseudomonas* i *Clostridium*, koriste NO_3^- kada razlažu organsku materiju u odsustvu kiseonika. U procesu denitrifikacije formira se nekoliko intermedijera koji mogu biti ispušteni u atmosferu uključujući NO i N_2O . U anaerobnim uslovima u morskim i slatkovodnim sistemima druge vrste bakterija mogu da oksiduju NH_3 sa NO_2^- formirajući gasoviti azot. U morskim ekosistemima, jedinjenja azota stvorena od strane bakterija, ili kroz razlaganje, skupljaju se u sedimentima okeanskog dna. U anaerobnim uslovima u morskim i slatkovodnim sistemima druge vrste bakterija su u stanju da oksiduju NH_3 sa NO_2^- formirajući gasoviti azot u procesu koji se zove anamoks (anaerobna amonijumska oksidacija).

Ljudskim aktivnostima azot se oslobađa u životnu sredinu na dva načina: sagorevanjem fosilnih goriva, pri čemu se oslobađaju različiti oksidi azota, i upotrebom veštačkih đubriva koja sadrže jedinjenja azota i fosfora u poljoprivredi, koja se zatim ispiraju u jezera, potoke i reke površinskim oticanjem. Atmosferski azot, osim N_2 , je povezan sa nekoliko negativnih pojava (kisele kiše, efekat staklene bašte, fotohemijski smog) koje imaju štetne efekte na ekosisteme, vazduh i klimu. Usled povećane koncentracije NO_3^- zbog spiranja đubriva površinskim oticanjem, u jezerima, potocima i rekama može doći do eutrofikacije odnosno prekomernog rasta algi, nedostatka kiseonika i umiranja vodenih organizama.

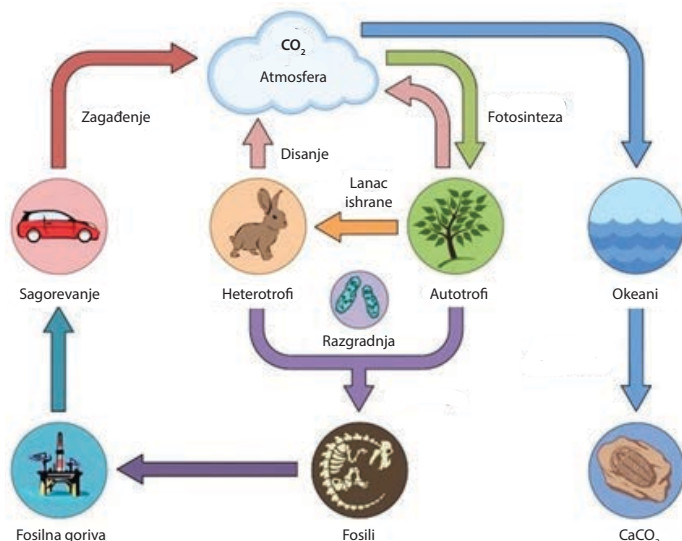
2.3.3. Kruženje ugljenika

Ugljenik je drugi najzastupljeniji element u živim organizmima i prisutan je u svim organskim molekulima. Njegova uloga u strukturi makromolekula je od primarnog značaja za žive organizme. Najzastupljeniji oblici ugljenika u prirodi su: ugljen-dioksid (CO_2) u atmosferi, bikarbonati (HCO_3^-) u vodi i vezani karbonati (CO_3^{2-}) u stenama litosfere. Više je procesa od značaja za opisivanje ciklusa ugljenika, ali se kruženje ugljenika najjednostavnije objašnjava kroz dva međusobno povezana podciklusa: 1) biloški koji se bavi brzom razmenom ugljenika među živim organizmima, i 2) biogeohemijski koji se bavi dugoročnim kruženjem ugljenika kroz geološke procese.

Biološki ciklus ugljenika podrazumeva razmenu ugljenika između autotrofnih i heterotrofnih organizama. Većina autotrofa u procesu **fotosinteze**, uz Sunčevu svetlost, koristi CO_2 iz vazduha kao osnovni gradivni blok za stvaranje visokoenergetskih jedinjenja sa više ugljenika, kao što su šećeri (npr. glukoza). Ovi organizmi koriste Sunčevu energiju za formiranje kovalentnih veza koje povezuju atome ugljenika u molekulima šećera. Energija je na ovaj način sačuvana u hemijskim vezama i koristi se kasnije u procesu disanja. Dok kopneni autotrofi dobijaju CO_2 direktno iz atmosfere, morski autotrofi koriste CO_2 u rastvorenom obliku (H_2CO_3). Uz šećere, u procesu fotosinteze se oslobađa kiseonik, pa se smatra da su fotosintetski organizmi odgovorni za oko 21% sadržaja kiseonika u atmosferi.

Heterotrofni organizmi konzumiraju autotrofe i na taj način dobijaju visokoenergetska jedinjenja ugljenika koja razgrađuju da bi dobili ćelijsku energiju u vidu ATP molekula. Ovaj proces se može nazvati **tranzicija ugljenika** kroz različite trofičke nivoe odnosno lanac ishrane. U toku **aerobnog disanja**, heterotrofi koriste kiseonik iz atmosfere ili rastvoren u vodi, koji se vezuje sa organskim jedinjenjima dajući CO_2 koji se vraća nazad u atmosferu. Razmena gasova kroz atmosferu i vodu je jedan od načina na koji ciklus ugljenika povezuje sve žive organizme na Zemlji.

Slika 2.27. Kruženje ugljenika



Biogeohemijski ciklus uključuje složeno kretanje ugljenika kroz zemljište, vodu i vazduh i u mnogim slučajevima se odvija mnogo sporije od biološkog ciklusa ugljenika. Ugljenik se dugo skladišti u rezervoarima ugljenika koju obuhvataju: atmosferu, vode (uglavnom okeane), zemljište, okeanske i kopnene sedimente, uključujući fosilna goriva, i unutrašnjost Zemlje. Atmosfera je glavni rezervoar ugljenika u obliku CO_2 , koji je neophodan za proces fotosinteze. Na nivo CO_2 u atmosferi veliki uticaj ima rezervoar ugljenika u okeanima; CO_2 iz atmosfere se rastvara u vodi dajući ugljenu kiselinu koja disosuje u karbonatne i bikarbonatne jone što je detaljno opisano u poglavlju Ugljen-dioksid karbonatna ravnoteža. Više od 90% ugljenika u okeanu nalazi se u obliku bikarbonatnih jona koji sa kalcijumom u morskoj vodi grade kalcijum-karbonat (CaCO_3), glavnu komponentu školjki i drugih morskih organizama. Ovi organizmi na kraju formiraju sedimente na dnu okeana, a kasnije tokom geološkog vremena, CaCO_3 formira krečnjak, koji predstavlja najveći rezervoar ugljenika na zemlji.

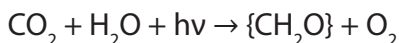
Na kopnu, ugljenik se skladišti u zemljištu kao rezultat raspadanja živih organizama ili raspadanja/„trošenja“ stena i minerala. Ovaj ugljenik procesima spiranja i površinskog oticanja dospeva u vode. Dublje pod zemljom, na kopnu i na dnu mora i okeana, taloženjem i fosilizacijom biljnih i životinjskih ostataka formiraju se fosilna goriva koja se smatraju neobnovljivim resursom jer njihova upotreba daleko premašuje njihovu stopu nastajanja. Drugi način da ugljenik sa kopna dospe u atmosferu su erupcije vulkana i drugih geotermalnih sistema. Takođe,

veliki broj kopnenih životinja uzgajanih za ishranu rastuće populacije na Zemlji dovodi do povećanja nivoa CO_2 u atmosferi zbog procesa disanja. Eksploatacija (sagorevanje) fosilnih goriva i poljoprivredne aktivnosti su primeri kako ljudske aktivnosti značajno utiču na biogeohemijski ciklus ugljenika.

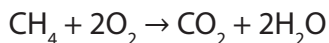
Na slici 2.27 prikazan je ciklus ugljenika u prirodi, uključujući različite procese koji doprinose kretanju ugljen-dioksida (CO_2) između atmosfere, biosfere, hidrosfere i litosfere.

2.3.4. Kruženje kiseonika

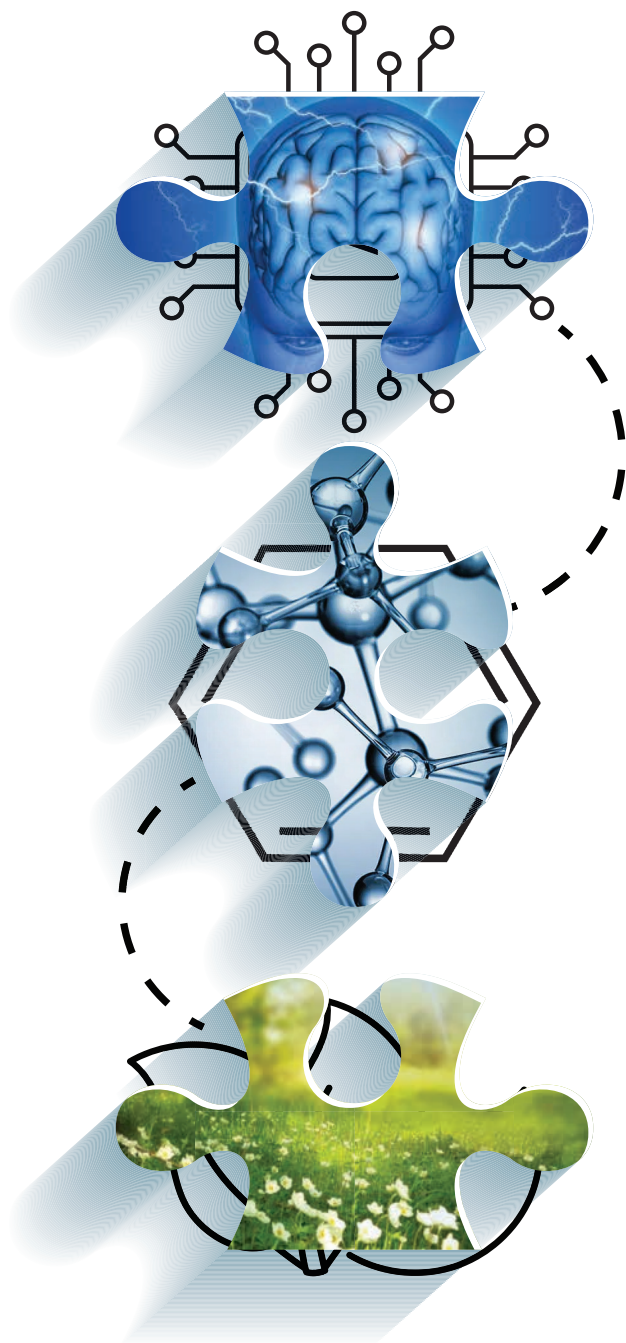
Razmena kiseonika u životnoj sredini je od ključne važnosti u hemiji atmosfere, odvijanju životnih procesa i geohemijskim transformacijama. Kruženje kiseonika je povezano sa drugim elementarnim ciklusima, posebno kruženjem ugljenika. Ciklus kiseonika uključuje razmenu kiseonika između elementarnog oblika, gasovitog O_2 , koji je sadržan u ogromnom rezervoaru, atmosferi, i hemijski vezanog O u CO_2 , vodi i organskoj materiji. Elementarni kiseonik postaje hemijski vezan različitim procesima stvaranja energije, posebno sagorevanjem i metaboličkim procesima u organizmima. Najveći deo kiseonika u atmosferi proizvode fotosintetski organizmi u procesu fotosinteze:



U nižim slojevima atmosfere, živi organizmi koriste kiseonik za ćelijsko disanje i razgradnju organskog materijala. Pored toga, kiseonik učestvuje u nekim reakcijama oksidacije kao što je na primer reakcija sa gvožđem u mineralima i sagorevanje fosilnih goriva:



U troposferi kiseonik učestvuje u različitim fotohemijskim reakcijama, o čemu je detaljnije napisano u poglavlju Fotohemijske reakcije, dok u stratosferi u svom alotropskom obliku ozona formira zaštitni ozonski omotač (više detalja o oštećenju ozonskog omotača u poglavlju Atmosferska hemija: primeri reakcija). Molekulski kiseonik postoji u dvoatomskom obliku sa dvostrukom vezom i dva nesparena elektrona (tripletno stanje), a u gornjoj atmosferi postoji u velikoj meri u atomskom (O) i pobuđenom obliku (O^*). Atomi kiseonika su stabilni prvenstveno u termosferi, koja je vrlo razređena pa retko dolazi do sudara neophodnih za reakcije atomskog kiseonika. Zbog fotohemijske disocijacije, O_2 praktično ne postoji na veoma velikim visinama i manje od 10% kiseonika je prisutno u molekulskom obliku u atmosferi na visinama većim od približno 400 km. Ciklus kiseonika se završava vraćanjem elementarnog O_2 u atmosferu putem fotosinteze.



ZAGAĐENJE ŽIVOTNE SREDINE

3. ZAGAĐENJE ŽIVOTNE SREDINE

Nepovoljni antropogeni uticaji u životnoj sredini ogledaju se prvenstveno u prekomernoj potrošnji prirodnih resursa, kao i u unošenju velike količine zagađujućih materija i energije u sve podsisteme životne sredine. Zagađenje predstavlja neželjenu promenu fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika životne sredine, koje mogu nepovoljno uticati na živa bića ili narušiti strukturu njihovih ekosistema. **Supstanca (materija) i energija postaju zagađujuće** kada se nađu u nekom prostoru, u dužem vremenskom periodu i/ili u povećanim količinama u odnosu na prirodnu ravnotežu uspostavljenu na tom mestu. Promenom sastava vode, vazduha i zemljišta narušava se prirodna ravnoteža koja se ogleda u poremećaju svih faktora životne sredine, poremećaju biogeohemijskih ciklusa i nemogućnosti prirodne razmene materija i protoka energije. U nekim slučajevima zagađenje je jasan fenomen (pojava smoga), dok u drugim zavisi od subjektivnih opažanja (zagađenje bukom).

Sve zagađujuće materije potiču iz **izvora**, a identifikacija izvora je posebno važna jer je to prvo mesto na kom se deluje u cilju smanjenja zagađenja. Nakon što je zagađujuća supstanca emitovana iz izvora, može delovati na **receptor**, koji se definiše kao sve ono što je pod uticajem zagađujućih materija. Receptorom se mogu smatrati voda, vazduh, zemljište, ali i ljudi koji udišu zagađen vazduh, ribe u zagađenom jezeru/moru, organizmi u lancu ishrane u kom je jedna od karika pod uticajem zagađujuće supstance, itd. Sintetske supstance ne ispoljavaju povoljan učinak na organizam, a pri višim koncentracijama su izrazito nepovoljne, dok kod prirodnih jedinjenja postoji povoljna koncentracija. Međutim, vrlo niske ili vrlo visoke koncentracije prirodnih jedinjenja manje povoljno deluju na organizme i mogu biti smrtonosne. Sve supstance koje se unose u organizam, a prema svom sastavu ili količini su mu strane, kao i sve supstance kojima se koncentracija drastično promeni za kratko vreme i time onemogućuje organizmu da se prilagodi nazivaju se **ksenobitici**. Doza ksenobiotika koja ubija 50% eksperimentalnih životinja se definiše kao letalna doza (LD_{50}) dok efektivna doza (ED_{50}) predstavlja dozu koja kod 50% životinja uzrokuje vidljive znakove trovanja.

Zagađujuća materija je ona materija koja je prisutna u koncentraciji većoj od prirodne u nekom okruženju i ima štetan efekat na okruženje ili organizme u njemu.

Za bolje razumevanje procesa koji dovode do povećanog zagađenja u životnoj sredini, koriste se različite klasifikacije zagađenja i zagađujućih materija. Jedna od najosnovnijih podela odnosi se na podsisteme (sfere) životne sredine, pri čemu se zagađenje može klasifikovati kao zagađenje litosfere, zemljišta, vode ili vazduha. Kao što je i na početku naglašeno, jedna od najvažnijih osobina životne sredine je kompleksnost i međusobna povezanost njenih podsistema, i zato je važno kod ovih podela uzeti u obzir neprestane interakcije između atmosfere, biosfere, hidrosfere i litosfere, kao i procese transformacije, transporta i razmene zagađujućih materija.

Na primer, gasovi poput sumpor-dioksida (SO_2) i azotnih oksida (NO_x), koji se emituju u atmosferu, mogu hemijskim reakcijama sa atmosferskom vodom stvoriti jake kiseline. Ove kiseline se zatim vraćaju na površinu Zemlje u obliku kiselih kiša, što može poremetiti pH ravnotežu vode i zemljišta. Takođe, nepravilno odbačen opasni otpad može procuriti u podzemne vode, koje se kasnije ulivaju u reke i potoke kao zagađene vode, uzrokujući dalju degradaciju ekosistema. Razumevanje ovih međusobno povezanih procesa ključno je za procenu i upravljanje zagađenjem u cilju zaštite i očuvanja životne sredine.

Prema tipu zagađenja u životnoj sredini, razlikuje se: zagađenje hemijskim supstancama (materijama), zagađenje energijom, zračenjem i bukom. **Prema hemijskim osobinama zagađujućih supstanci**, podela se vrši na organsko, neorgansko ili kombinovano zagađenje, a kada se razmatraju **fizičke karakteristike**, životna sredina može biti pod uticajem gasovitih, tečnih ili čvrstih supstanci. Osim prema fizičko-hemijskim osobinama, zagađujuće materije se mogu klasifikovati **prema poreklu** na prirodne, poreklom iz izvora kao što su šumski požari, vulkanske erupcije, grmljavina, hemijske transformacije, vlažna i suva depozicija, emisije sa površine okeana, ili antropogene, čije izvore je tokom razvoja ljudske vrste generisao čovek (saobraćaj, različiti tipovi industrije, sagrađivanje fosilnih goriva, poljoprivredne aktivnosti).

Prema načinu prenošenja zagađenje može biti direktno ili indirektno, u organizam može dospeti oralno, dermalno ili inhalacijom, a **na osnovu efekta** koje imaju **na zdravlje ljudi** razlikujemo kancerogene, teratogene, mutagene, alergogene i toksični supstance. Ako se posmatra **vreme raspada**, tj. **boravka zagađujućih materija u životnoj sredini**, razlikuju se dva osnovna tipa supstanci: **nerazgrađujuće**, koje se u prirodnoj sredini ne razgrađuju u potpunosti, ili taj proces traje veoma dugo, i **biorazgrađujuće**, koje karakteriše mogućnost potpune razgradnje u određenim biološkim procesima.

Neretko se podela vrši na fizičke, hemijske i biološke polutante u životnoj sredini. U tom slučaju, energija, zračenje i buka se klasifikuju kao fizički; gasovi, pesticidi, kiseline, teški metali i drugi kao hemijski, a pod biološkim se podrazumeva izumrla organska materija i patogeni mikroorganizmi. U životnoj sredini se kao izvor zagađenja najčešće javljaju toplotna i hemijska energija, dok su prisutni gotovo svi oblici zračenja, bilo da su prirodnog ili antropogenog porekla (jonizujuće i nejonizujuće elektromagnetno zračenje). Buka i zagađenje bukom su posebno uvedeni kao jedan od oblika zagađenja, i to prevashodno u urbanim sredinama i okruženju industrijskih postrojenja.



“Značajni problemi sa kojima se suočavamo ne mogu se rešavati na istom nivou razmišljanja na kojem smo bili kada smo ih napravili.” Albert Ajnštajn

Tipovi emisija zagađujućih materija u životnoj sredini

Emisija zagađujućih materija u životnu sredinu odnosi se na proces oslobađanja štetnih supstanci u različite podsysteme, uključujući atmosferu, hidrosferu i litosferu, odnosno zemljište. Ove supstance potiču iz različitih izvora, kao što su industrijske aktivnosti, transport, poljoprivreda, otpadne vode i kućna ložišta, i mogu ozbiljno narušiti ekološku ravnotežu i ugroziti zdravlje živih organizama. Tipovi emisija zagađujućih materija obično se klasifikuju prema poreklu, fizičkom stanju, vrsti zagađujućih materija i dinamici emisije.

Prema poreklu emisije se mogu podeliti na prirodne i antropogene. **Prirodne** emisije nastaju bez ljudskog uticaja i uključuju procese kao što su vulkanske erupcije, požari, erozija tla, isparavanje iz okeana i emisije gasova iz biosfere. Iako su prirodne, ove emisije mogu značajno uticati na lokalne i globalne ekološke procese, kao što su klimatske promene i kvalitet vazduha. **Antropogene** emisije

rezultat su ljudskih aktivnosti. Ove emisije dolaze iz industrijskih pogona, saobraćaja, termoelektrana, poljoprivrednih aktivnosti i spaljivanja fosilnih goriva. Antropogene emisije često sadrže supstance poput sumpor-dioksida (SO_2), azotnih oksida (NO_x), ugljen-dioksida (CO_2), metana (CH_4), čestica prašine i teških metala, koje direktno utiču na zagađenje vazduha, vode i zemljišta.

Prema fizičkom stanju zagađujuće materije se mogu emitovati u različitim oblicima. **Gasovite** emisije uključuju oslobađanje zagađujućih gasova poput ugljen-dioksida, sumpor-dioksida, azotnih oksida, amonijaka i drugih, koji se šire u atmosferi i doprinose efektu staklene bašte, kiselim kišama i zagađenju vazduha. **Tečne** emisije najčešće dolaze iz industrijskih otpadnih voda, poljoprivrednih hemikalija ili otpadnih voda iz domaćinstava. Tečni zagađivači mogu dospeti u reke, jezera i okeane, čime ugrožavaju kvalitet vode i vodene ekosisteme. **Čvrste** emisije obuhvataju čestice prašine, pepeo, otpad i teške metale, koji se talože na tlu i površinskim vodama, često uzrokujući kontaminaciju zemljišta i pogoršanje kvaliteta životne sredine.

Prema vrsti emitovanih zagađujućih materija podela može biti izvršena na osnovu njihovog hemijskog sastava i vrste materijala koji emituju. **Organske** materije uključuju jedinjenja poput ugljovodonika, organskih rastvarača i pesticida. Ove materije mogu biti toksične i izazvati teška oštećenja u ekosistemima, bioakumulaciju u organizmima i dugoročne efekte na zdravlje. **Neorganske** materije obuhvataju gasove poput sumpor-dioksida, ugljen-dioksida, azotnih oksida i čvrste materijale poput teških metala, čestica prašine i drugih toksičnih materijala. Neorganske materije često imaju dugotrajan efekat na životnu sredinu, utičući na kvalitet zemljišta, vode i vazduha.

Prema dinamici emisije mogu se klasifikovati prema vremenskom trajanju i intenzitetu. U okviru ove podele jedan tip su **kontinuirane emisije** koje karakteriše stalno ispuštanje zagađujućih materija, obično iz industrijskih postrojenja, termoelektrana ili saobraćaja. Ove emisije imaju stalni uticaj na životnu sredinu i često dovode do akumulacije zagađujućih materija. **Povremene emisije** javljaju se u određenim vremenskim intervalima ili pod specifičnim okolnostima, kao što su emisije tokom obrade materijala, sagorevanja goriva u sezoni grejanja ili poljoprivrednih aktivnosti, dok **iznenadne emisije** nastaju kao rezultat havarija ili prirodnih katastrofa, kao što su eksplozije, izlivanje nafte ili industrijski incidenti. Ove emisije imaju veliki trenutni uticaj na životnu sredinu i često zahtevaju hitne mere sanacije.

Pored navedenog, prema načinu na koji zagađujuće materije dospevaju u životnu sredinu emisije se često karakterišu i kao: **tačkasta** (iz dimnjaka, odvodnih cevi, i sl.), **difuzna** (otvoreni kanali, autoputevi, i dr.), **kontrolisana** (emisija putem organizovanih ispusta), **fugitivna** (nekontrolisana emisija - ona koja nije ispuštene putem organizovanih i kontrolisanih ispusta), **ukupna emisija** (zbir fugitivnih i kontrolisanih emisija), **predvidiva** (tokom remonta, popravke) i nepredvidiva (havarije).

Razumevanje različitih tipova emisija zagađujućih materija ključno je za efikasno upravljanje zagađenjem i očuvanje životne sredine. Različiti tipovi emisija imaju različite uticaje na ekosisteme i ljudsko zdravlje, te je neophodno razvijati strategije za smanjenje emisija, unapređenje tehnologija za kontrolu zagađenja i promovisanje održivih praksi.

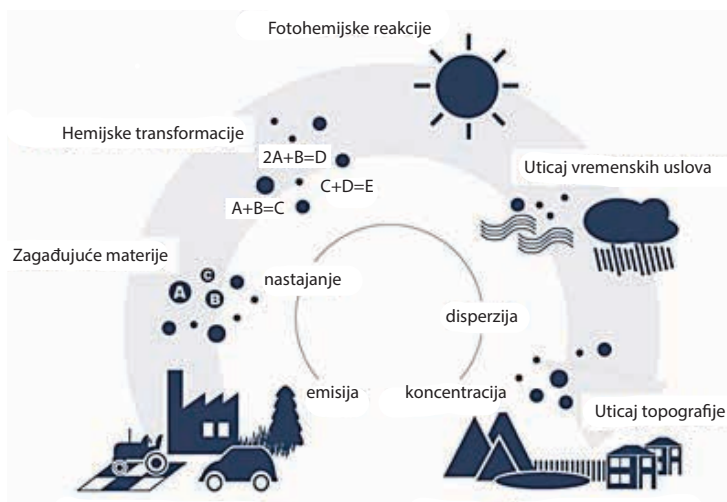
3.1. ZAGAĐUJUĆE MATERIJE

Prema podacima Svetske Zdravstvene Organizacije i baze Američkog hemijskog društva (*Chemical Abstracts Service*) poznato je preko 160 miliona hemijskih supstanci. Oko 40 000 do 60 000 njih se može naći u komercijalnoj upotrebi, a 6 000 njih čini više od 99% ukupne količine hemikalija u upotrebi širom sveta. U ovoj knjizi, biće dat osvrt na fizičko-hemijske osobine i reakcije zagađujućih supstanci koje se smatraju najčešćim zagađivačima vode, vazduha i zemljišta i čije su maksimalno dozvoljene koncentracije i granične vrednosti u uzorcima iz životne sredine propisane domaćim i stranim regulativama.

Sve hemijske supstance, organske i neorganske, prirodnog i antropogenog porekla, prolaze kroz specifične procese nastajanja, disperzije, transporta i transformacije u životnoj sredini (slika 3.1). One supstance koje su direktno emitovane i opstaju u izvornom obliku u životnoj sredini se nazivaju **primarnim zagađujućim supstancama** (neorganski elementi i gasovi). Njihovom transformacijom ili reakcijama sa drugim konstituentima nastaju **sekundarne zagađujuće supstance** (joni, sekundarni organski aerosol). Ponašanje i sudbina hemikalija u životnoj sredini odnosno **hemodinamika** zagađujućih supstanci određena je osobinama delova životne sredine i fizičko-hemijskim karakteristikama hemikalija.

Hemodinamika: specifični procesi nastajanja, disperzije, transporta i transformacije supstanci u životnoj sredini.

Slika 3.1. Hemodinamika zagađujućih supstanci u vazduhu



Neke od važnih osobina koje utiču na hemodinamiku su: rastvorljivost koja je različita kod gasovitih i tečnih supstanci (nastanak kiselih kiša, pojava stratifikacije jezera), napon pare, koeficijent raspodele između dve faze (koncentracije lipofilnih jedinjenja u masnim tkivima živih organizama), i učestvovanje u fizičkoj i hemijskoj adsorpciji. Zajedno, ova svojstva određuju kako hemikalije prolaze kroz dva osnovna tipa reakcija u životnoj sredini: **transformaciju** koja predstavlja preraspodelu, gubitak ili dodavanje funkcionalnih grupa i uzrokuje promenu molekulske strukture i **degradaciju** odnosno podelu (fragmentaciju) na manje molekule ili funkcionalne grupe. Primeri uključuju: oksidaciju uz O_2 , hidrolizu uz H_2O , fototransformaciju apsorpcijom zračenja iz UV, VIS i IR dela spektra, i mikrobiološke transformacije uz prisustvo enzima. Specifične reakcije nekih od jedinjenja predstavljenih ispod su diskutovane u poglavljima gde su opisivane hemijske reakcije u pojedinim podsistemima životne sredine.

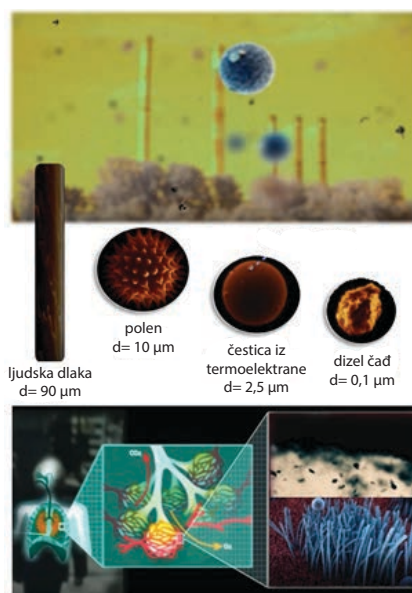
Imajući u vidu zdravlje ljudi, razumevanje hemodinamike zagađujućih supstanci je značajno da bi odgovorili na nekoliko pitanja:

- koliko se koncentracije koje izmerimo na određenom mestu razlikuju od onih koje se emituju direktno iz izvora?
- pod kojim uslovima zagađujuće supstance potencijalno dolaze u kontakt sa živim organizmima i na koji način?
- da li se zagađujuća supstanca pretvara u manje ili više štetne oblike?
- kolika je individualna, a kolika opšta izloženost?

Suspendovane čestice

Materijal u čvrstom agregatnom stanju koji se može naći kao zamućenje u vodi ili u vidu slabo vidljivih ili nevidljivih čestica u vazduhu predstavlja čestično zagađenje. U ovom delu, detaljno će se razmatrati osobine čestičnog zagađenja u vazduhu (atmosfera) zbog brojnih negativnih efekata na zdravlje ljudi, životnu sredinu i klimu. Najočigledniji efekat je smanjenje i narušavanje vidljivosti u atmosferi, jer čestice poseduju optička svojstva koja doprinose apsorpciji ili rasejanju svetlosti čime se narušava bilans ukupnog zračenja na Zemlji. Takođe, čestice u vazduhu obezbeđuju aktivne površine i nukleacione centre na kojima može doći do heterogenih atmosferskih hemijskih reakcija i kondenzacije vodene pare, što može imati značajan uticaj na vremenske prilike i zagađenje vazduha. Atmosferske čestice se udišu kroz respiratorni trakt i mogu dospeti do krvnog i limfnog sistema izazivajući različita oštećenja i bolesti; pronađena je jaka korelacija između povećanja dnevne stope mortaliteta i zagađenja vazduha česticama.

Slika 3.2. Primeri različitih suspendovanih čestica u vazduhu i njihovo dospevanje u pluća



U atmosferi, **suspendovane čestice** (*Particulate Matter*, PM) predstavljaju kompleksnu smešu čvrstih partikula (čestica) i tečnih kapljica. Termin suspendovane čestice obuhvata različite pojmove i pojave kao što su: **aerosol**–atmosfera čestice veličine koloida; **kondenzacioni aerosol**–čestice nastale kondenzacijom para ili reakcijama gasova; **disperzioni aerosol**–nastaje usitnjavanjem čvrstih

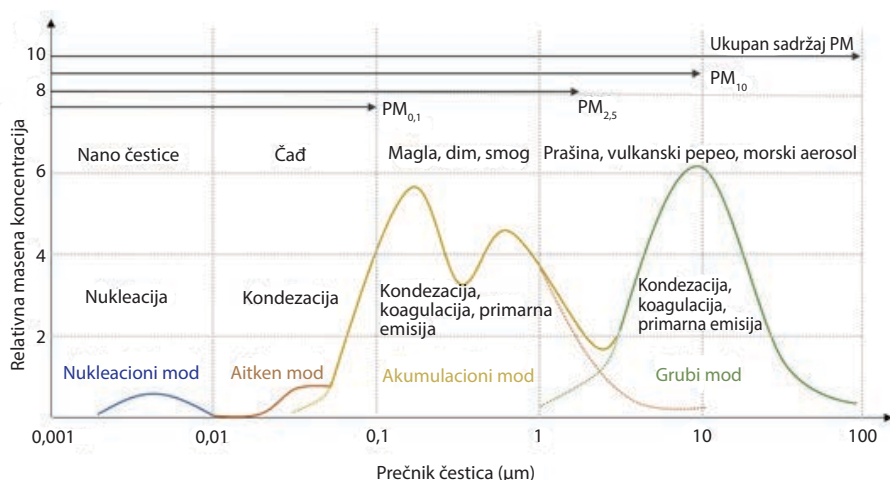
materija, atomizacijom tečnosti ili raspršivanjem prašine; **magla**–tečne čestice, kapljice vode; i **dim**–čestice nastale u procesu nepotpunog sagorevanja fosilnih goriva. Veličina čestica varira u zavisnosti od sastava i porekla, ali se atmosferskim PM smatraju sve one čestice manje od $100\text{ }\mu\text{m}$ u prečniku (d_p) ili ilustrativno objašnjeno one čestice čiji je prečnik 10 do 1000 puta manji od prečnika ljudske dlake (slika 3.2). Ukupne suspendovane čestice ($d_p < 100\text{ }\mu\text{m}$) se detaljnije dele na tri kategorije:

- **grube čestice (PM_{10})**, čiji je prečnik manji ili jednak $10\text{ }\mu\text{m}$ ($d_p < 10\text{ }\mu\text{m}$); kada se udahnu, ove čestice se mogu izdahnuti nazad ili zadržati u gornjim delovima respiratornog sistema pa se još nazivaju i „torakalne čestice“;
- **fine čestice ($\text{PM}_{2,5}$)**, čiji je dijametar manji ili jednak $2,5\text{ }\mu\text{m}$ ($d_p < 2,5\text{ }\mu\text{m}$); ove čestice su poznate i kao „respirabilne čestice“ jer mogu da dospeju u donje delove respiratornog sistema odnosno do alveola u plućima, a zatim i u krvotok; i
- **ultrafine čestice ($\text{PM}_{0,1}$)** dijametra manjeg ili jednakog $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ($d_p < 0,1\text{ }\mu\text{m}$).

Suspendovane čestice (PM): kompleksa smeša čvrstih čestica i tečnih kapljica sastavljena od brojnih organskih i neorganskih hemijskih vrsta.

Osim na osnovu veličine prečnika, čestice se mogu klasifikovati prema mehanizmu nastanka na četiri moda: nukleacioni, Aitken, akumulacioni i grubi (slika 3.3). Čestice se neprekidno menjanju učestvujući u reakcijama kondenzacije, koagulacije, fragmentacije i isparavanja, zbog čega navedeni modovi nisu monodisperzni (jedinstvene veličine) već predstavljaju polidisperzne sisteme koji sadrže čestice različitih većina. Nukleacioni i Aitken mod sadrže najsitnije čestice i zajedno čine oko 1% ukupne mase čestica u vazduhu. **Nukleacioni mod** obuhvata najmanje čestice veličine prečnika do $0,01\text{ }\mu\text{m}$ koje nastaju konverzijom gasova u čestice odnosno nukleacijom. Ove čestice rastu kondenzacijom gasova i vodene pare u početku relativno brzo gradeći čestice **Aitken moda** do veličine prečnika $0,1\text{ }\mu\text{m}$. Nakon nastanka, Aitken čestice podležu koagulaciji sa krupnijim česticama koje su već prisutne u vazduhu. Na ovaj način se grade čestice ($d_p = 0,1 - 2,5\text{ }\mu\text{m}$) prisutne u **akumulacionom modu**. Osim koagulacijom i kondezacijom, čestice koje pripadaju akumulacionom modu mogu biti i direktno emitovane u vazduh i čine značajan deo ukupne mase čestica. **Grubi mod** čine čestice čiji je prečnik veći od $2,5\text{ }\mu\text{m}$. Čestice ovog moda uglavnom dospevaju u vazduh prirodnim mehaničkim procesima kao što su erozija i transport vetrom. Grube čestice značajno podležu termodinamičkim (isparavanje, sublimacija) i mehaničkim (sedimentacija) mehanizmima uklanjanja.

Slika 3.3. Raspodela čestica prema veličini i mehanizmu nastanka



Sve čestice prisutne u atmosferi prolaze kroz niz procesa. Male koloidne čestice su podložne procesima difuzije, a manje čestice procesom koagulacije i formiraju veće čestice. Čestice koje dostignu dovoljnu veličinu se talože sedimentacijom ili učestvuju u aktivaciji kondenzacionih jezgara oblaka, ugrađuju se u kapljice oblaka i kiše, a potom se uklanjaju mokrom depozicijom. Procesima raspadanja većih čestica nastaju disperzioni aerosoli, kao što su prašina, morska so i vulkanski pepeo. Međutim, mnogo energije je potrebno da se čestični materijal razbije na manje delove, pa su veličina i zastupljenost disperzionih aerosola relativno veliki. Među hemijskim vrstama koje su odgovorne za transformaciju čestica u atmosferi izdvajaju se organska jedinjenja i NO_x (videti poglavlje Fotohemijske reakcije).

Prirodni izvori PM obuhvataju: resuspenziju zemljišta i prašine, vulkanske erupcije, sagorevanje biomase, raspršivanje morskog aerosola i čestice biološkog porekla (polen, virusi, bakterije, spore), a antropogeni izvori uključuju: sagorevanje fosilnih goriva (čađ od dizel goriva, leteći pepeo iz termoelektrana), saobraćaj (gradski smog), i veliki broj mobilnih i stacionarnih izvora. Takođe, moguće je i sekundarno formiranje čestica putem koagulacije, nukleacije i fotohemijskih reakcija u kojima učestvuju organska jedinjenja i H_2O , O_2 , O_3 , NO_2 , SO_2 i NO_x . Krupne, grube čestice se obično nalaze suspendovane u vazduhu u blizini izvora zagađenja i talože se veoma brzo nakon 4 do 8 sati od emisije dok finije, sitne čestice ostaju u vazduhu od 5 do 10 dana i mogu biti transportovane na veće udaljenosti.

Poznavanje sastava čestica je od izuzetne važnosti jer od njega zavisi veličina, gustina, isparljivost, reaktivnost i toksičnost PM. Aerosoli se sastoje od ugljeničnog materijala, metalnih oksida, rastvorenih jonskih vrsta (elektroliti) i jonske čvrste materije. Glavne komponente PM su: neorganski joni i elementi kao što su nitrati (do 20%), sulfati (do 40%), metali (Fe, Pb, Mn, Zn, itd); organska jedinjenja (fenoli, organske kiseline, VOCs, POPs); elementarni (*Elemental Carbon*, EC) i organski ugljenik (*Organic Carbon*, OC) do 50%. Fizičko-hemijske osobine nekih od navedenih zagađujućih materija diskutovane su u narednim poglavljima. Nakon emisije, čestice podležu fizičkim, hemijskim i fotohemijskim promenama.

Elementi

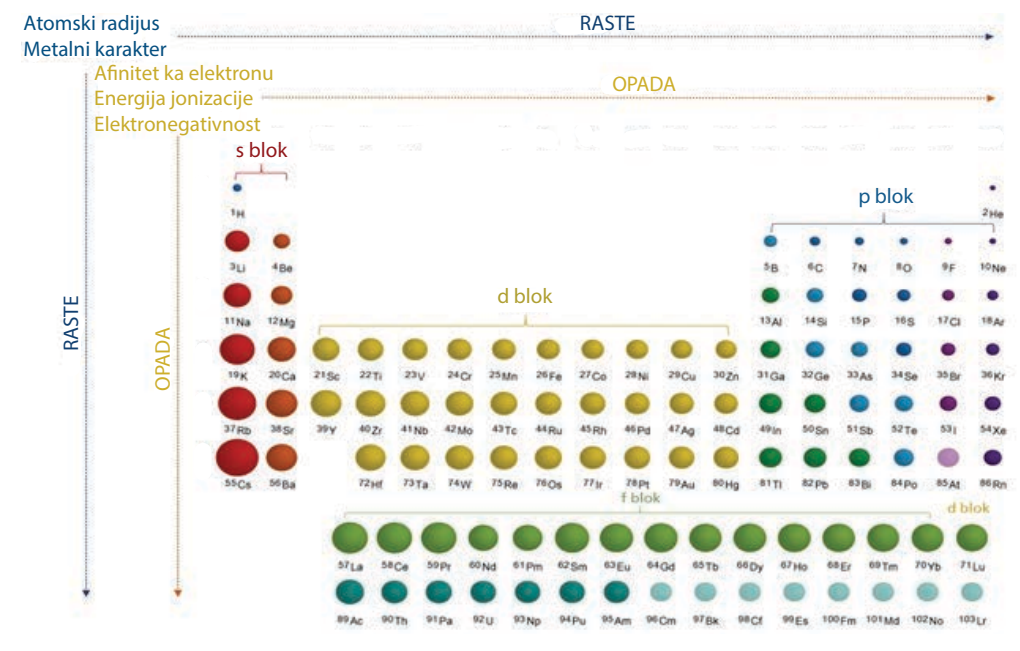
Većina elemenata koji se nalaze u periodnom sistemu se mogu posmatrati kao zagađujuće supstance u zavisnosti od koncentracije u kojoj su prisutni u zemljištu, vodi, vazduhu ili živim organizmima. Nekoliko je termina kojima se elementi opisuju imajući u vidu zagađenje životne sredine: elementi u tragovima, teški metali i potencijalno toksični elementi. **Elementi u tragovima** je termin koji se odnosi na one elemente koji se javljaju u veoma niskim koncentracijama (ppm, ppb ili ppt) u datom sistemu. Neki od njih kao što su hrom, selen, gvožđe i bakar su prepoznati kao esencijalni za život životinja i biljaka, ali ako su prisutni u povišenim koncentracijama ispoljavaju toksično dejstvo i štetne efekte na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Neki elementi pokazuju izuzetno negativne toksikološke osobine koje se povezuju sa blokiranjem funkcionalnih grupa enzima i proteina, izmeštanjem esencijalnih metalnih jona u biomolekulima i modifikovanjem aktivnih formi biomolekula. Ovo za posledicu ima razvoj raznih poremećaja i bolesti, a elementi koji ih izazivaju se klasifikuju kao „**teški metali**“ i uključuju: arsen, aluminijum, berilijum, kadmijum, kobalt, hrom, nikl, olovo, živu itd. U navedene elemente ubrajaju se i se metaloidi (arsen), i prema specifičnoj gustini definisani „lakši metali“ (aluminijum, berilijum), pa je važno napomenuti da je ispravno „teške metale“ klasifikovati na osnovu hemijskih osobina (specifična gustina, atomska masa, atomski broj), a ne prema toksičnim dejstvima. Zbog toga, termin **potencijalno toksični elementi** u novijoj literaturi potiskuje termin „teški metali“.

Raspodela i ponašanje elemenata u vodi, vazduhu i zemljištu zavisi od njihovih osnovnih fizičko-hemijskih osobina, pa je u narednim pasusima dat kratak osvrt na njih. Elementi su raspoređeni po rastućem atomskom broju u periodnom sistemu elemenata (slika 3.4). Na ovaj način je obezbeđena klasifikacija na osnovu periodičnog ponavljanja sličnih karakteristika elemenata. Svaki novi horizontalni red periodnog sistema odgovara početku nove periode, u kojoj se

pojavljuje novi glavni energetski nivo ispunjen elektronima. Elementi sličnih hemijskih svojstava pojavljuju se u pravilnim intervalima, unutar vertikalnih kolona koje se nazivaju grupe.

Osim vodonika, svi elementi grupisani levo i oni u sredini periodnog sistema su **metali** (slika 3.4). **Metali** provode struju i najbrojnija su klasa u poređenju sa nemetalima i metaloidima. Razlikuje se nekoliko grupa metala na osnovu njihove elektronske konfiguracije i fizičko-hemijskih osobina uključujući alkalne, zemno-alkalne i prelazne metale. Većina elemenata koji čine ljudsko telo i ostale žive organizme su **nemetali** odnosno svi oni elementi koji nemaju osobine metala. Najjednostavnije rečeno, nemetali su loši provodnici toplote i struje, a njihova svojstva više variraju u odnosu na metale. Većina nemetala su gasovi (npr. kiseonik, azot, hlor), brom je tečan, a nekoliko njih kao što su ugljenik i sumpor se nalazi u čvrstom agregatnom stanju. Tačke topljenja nemetala su mnogo niže nego kod metala. Elementi koji imaju osobine i metala i nemetala se nazivaju **metaloidi** (bor, silicijum, arsen, antimon, germanijum, telur, astat i polonijum). Metaloidi su lošiji provodnici od metala, ali bolji od nemetala, i imaju visoke temperature topljenja kao metali.

Slika 3.4. Periodni sistem elemenata i njihove glavne karakteristike



Način na koji će se elementi ponašati u životnoj sredini, njihovo učešće u hemijskim reakcijama sa drugim elementima i jedinjenjima, način ostvarivanja hemijskih veza, oksido-redukциони potencijal, transformacija u manje ili više toksične oblike, eliminacija iz određenog matriksa su određeni nekim od sledećih osobina: veličina atoma, elektronegativnost, afinitet ka elektronu, energija jonizacije, efekat „zaštite“ i sklonost ka građenju kompleksa. **Veličina atoma** se izražava preko **atomskeg radijusa** koji se definiše kao polovina udaljenosti između jezgara identičnih atoma koji su međusobno povezani. Veličina atoma je ograničena ivicom njegove orbitale, ali granice nisu jasne i promenljive su pod različitim uslovima, pa se u cilju standardizacije merenja atomskih radijusa, meri rastojanje između jezgara dva identična povezana atoma. Podaci o veličini i atomskom radiju atoma pomažu da se razume zašto se neki molekuli uklapaju, a zašto drugi molekuli imaju delove koji su „prenatrpani“ pod određenim uslovima i onemogućavaju im da stupaju u veze. Atomski radijus atoma generalno se smanjuje s leva na desno u periodama; primer izuzetka je radijus kiseonika koji je nešto veći od radijusa azota. Unutar perioda, protoni se dodaju jezgru dok se elektroni dodaju istom glavnom energetskom nivou i privlače se bliže jezgru zbog njegovog povećanog pozitivnog naelektrisanja (slika 3.4). Pošto se sila privlačenja između jezgara i elektrona povećava, veličina atoma se smanjuje. Atomski radijus atoma se generalno povećava od vrha do dna unutar grupe. Kako se atomski broj povećava niz grupu, ponovo dolazi do povećanja pozitivnog naelektrisanja jezgra, ali i povećanja broja zauzetih glavnih energetskih nivoa koji nadmašuje povećanje naelektrisanja jezgra. Ukoliko dolazi do primanja ili otpuštanja elektrona, atomski radijus se menja, a veličina atoma se može opisati **jonskim radijusom**. Uklanjanjem valentnih elektrona nastaje katjon koji je znatno manji od matičnog atoma jer novonastali jon ima jedan manje zauzeti glavni energetski nivo, pa je elektronski oblak oko jezgra manji. Takođe, jezgro jače privlači preostale elektrone jer su protoni sada brojniji od elektrona. Dodavanje elektrona uvek rezultira anjonom koji je veći od matičnog atoma jer dolazi do širenja elektronskog oblaka. Kada je broj elektrona veći od protona, ukupna privlačna sila koju protoni imaju za elektrone se smanjuje, a dolazi do izražaja i efekat odbijanja između elektrona.

Da bi se elektron uklonio iz određenog atoma potrebno je uložiti određenu energiju tzv. **energiju jonizacije**. Najlakše je ukloniti elektrone koji su najudaljeniji odnosno valentne elektrone u poslednjem energetskom nivou, samim tim će oni imati nižu energiju jonizacije od elektrona jezgra unutrašnje ljuske. Energija jonizacije atoma se povećava u periodnom sistemu s leva na desno, a smanjuje se unutar grupe sa porastom veličine atoma. Međutim, postoje i izuzeci od ovog pravila, elementi iz 13. grupe imaju nižu energiju jonizacije od elemenata iz 2.

grupe zbog pojave **efekta „zaštite“**. Ukoliko je oko jezgra raspoređen veći broj elektrona, elektroni iz unutrašnjih nivoa (ljuski) „štite“ spoljašnje elektrone od privlačenja jezgra. Takođe, efekat „zaštite“ se javlja između podnivoa unutar istog glavnog energetskeg nivoa, elektron u s podnivou može da zaštiti elektrone u p podnivou istog glavnog energetskeg nivoa dok suprotno nije moguće.

U većini slučajeva, formiranje anjona dodavanjem elektrona neutralnom atomu oslobađa energiju. Promena energije koja se dešava kada neutralni atom primi elektron naziva se **afinitet prema elektronu**. Elektronski afiniteti za atome u gasovitom stanju je veoma teško precizno izmeriti. Elementi 17, halogeni, (slika 3.4) najlakše dobijaju elektrone, što pokazuju visoke negativne vrednosti njihovih afiniteta prema elektronu. To znači da se više energije oslobađa u formiranju halogenog jona nego za anjone bilo kog drugog elementa. S obzirom na konfiguraciju elektrona, lako se uočava objašnjenje za ovu pojavu. Dodavanje još jednog elektrona daje halogenim jonima elektronsku konfiguraciju plemenitih gasova, koji su poznati kao izuzetno stabilna jedinjenja. Generalno, afiniteti prema elektronima se povećavaju (postaju negativniji) s leva na desno tokom perioda, a smanjuju (postaju manje negativni) od vrha do dna grupe. Međutim, postoji mnogo izuzetaka.

Hemijske veze su osnova međusobne interakcije elemenata da bi formirali jedinjenja. U formiranju hemijskih veza učestvuju valentni elektroni, a atomi nekih elemenata imaju veću sposobnost da privlače valentne elektrone uključene u vezu od drugih elemenata. Mera sposobnosti privlačenja elektrona se naziva **elektronegativnost**. Elektronegativnost se razlikuje od afiniteta prema elektronu, jer je afinitet prema elektronu stvarna energija koja se oslobađa kada atom dobije elektron, a elektronegativnost se ne meri u energetskim jedinicama, već relativno. Svi elementi se porede jedan sa drugim, pri čemu je najelektronegativnijem elementu, fluoru, dodeljena vrednost elektronegativnosti od 3,98 što znači da fluor privlači elektrone jače od bilo kog drugog elementa. Pošto metali imaju malo valentnih elektrona, oni imaju tendenciju da povećaju svoju stabilnost gubljenjem elektrona da postanu katjoni. Shodno tome, elektronegativnosti metala su generalno niske. Nemetali imaju više valentnih elektrona i povećavaju svoju stabilnost tako što dobijaju elektrone da postanu anjoni, pa su elektronegativnosti nemetala visoke.

Metali čije d ili f ljuske nisu do kraja popunjene elektronima u neutralnom ili katjonskom stanju se nazivaju **prelazni elementi** ili **prelazni metali**. Osobine prelaznih metala d-bloka (slika 3.4) se razlikuju ne samo po periodama, već i po grupama, ali svi pokazuju sklonost ka **građenju kompleksa**. Jedinjenja metalnih jona koordiniranih (okruženih) ligandima se nazivaju metalni kompleksi. Većina liganada su neutralne ili anjonske supstance. Neutralni ligandi, kao što su H_2O , NH_3 ili CO , su stabilni molekuli u svom slobodnom stanju, dok su anjonski ligandi, kao što su $EDTA$, SCN^- ili Cl^- stabilizovani samo kada su koordinisani sa centralnim metalima. Metali 3., 4. i 5. grupe se često nazivaju ranim prelaznim metalima i pokazuju afinitet ka vezivanju sa kiseonikom i halogenima, jer je u odsustvu liganda za premošćivanje, formiranje metal-metal veze teško za ove elemente. Kasni prelazni metali grupisani u desnom delu periodnog sistema i pokazuju visok afinitet prema sumporu ili selenu.

U poglavlju Specijacija i mobilnost neorganskih elemenata u zemljištu i Hemijske reakcije u vodi diskutovano je o tome kako osobine opisane iznad utiču na raspodelu i sudbinu elemenata u zemljištu i vodi. U vazduhu, elementi se najčešće javljaju asocirani sa suspendovanim česticama (videti poglavlje Suspendovane čestice). Izvori elemenata putem kojih dospevaju u sferu životne sredine mogu biti prirodni i antropogeni, a neki primeri su navedeni u nastavku:

- As: pesticidi, erozija zemljišta, saobraćaj;
- Al, Fe, Ca, Si: erozija zemljišta, prašina iz kamenoloma, sagorevanje uglja;
- Cd: sagorevanje otpada, upotreba fosfornih pesticida;
- Cr: industrija čelika, saobraćaj, sagorevanje fosilnih goriva;
- Cu: upotreba pesticida, saobraćaj;
- Hg: otpada, rudarstvo;
- Na, Cl: morski aerosoli, hlorid iz spaljivanja otpada;
- Ni: sagorevanje fosilnih goriva;
- Sb, Se, V: sagorevanjem nafte i uglja;
- Zn: prašina, rudarstvo; sagorevanje fosilnih goriva;
- Pb: sagorevanje olovnih goriva i otpada.

Monitoring i usklađivanje nivoa elemenata sa graničnim i maksimalno dozvoljenim koncentracijama u vazduhu, vodi i zemljištu je obaveza definisana zakonom na državnom i međunarodnom nivou. Zbog štetnih efekata na ljudsko zdravlje, elementi koji se prate uključuju: As, Cr, Cd, Hg, Ni i Pb u vazduhu;

As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn u zemljištu; i As, B, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb, Se i Zn u različitim tipovima voda. Od navedenih elemenata, Međunarodna agencija za istraživanje raka (*International Agency for Research on Cancer*, IARC) svrstava As, Cd, Cr i Ni kao moguće kancerogene za ljude. Takođe, povećane koncentracije kancerogenih i drugih elemenata ometaju ćelijske procese kao što je oksidativna fosforilacija i regulacija kalcijuma, dovode do oštećenja bubrega, jetre, pluća i mozga, i uzrokuje različite kardiovaskularne bolesti, hroničnu anemiju, iritacije gastrointestinalnog trakta, nesvestice i gubitke pamćenja.

Neorganski gasovi

Oksidi ugljenika, sumpora i azota su važne komponente svih sfera životne sredine, a kada su prisutni u povećanim koncentracijama smatraju se prioritetnim zagađujućim materijama. Njihove emisije, primarno u vazduh su regulisane zakonskim regulativima. Značajna količina neorganskih oksida nastaje kao rezultat ljudskih aktivnosti, a kao najznačajniji se izdvajaju: ugljen-monoksid (CO), ugljen-dioksid (CO₂), sumpor-dioksid (SO₂), azot-monoksid (NO) i azot-dioksid (NO₂). Ostali neorganski zagađivači gasovi uključuju: amonijak (NH₃), azot-suboksid (N₂O), azot-pentoksid (N₂O₅), vodonik-sulfid (H₂S), hlor (Cl₂), hloro-vodonik (HCl) i fluoro-vodonik (HF). Saobraćaj se smatra glavnim izvorom azotovih oksida, energetski sektor dominantnim izvorom SO₂, a poljoprivredne aktivnosti su odgovorne za značajne količine NH₃ u životnoj sredini.

Ugljen-dioksid, CO₂, se prirodno nalazi u atmosferi i neophodan je za rast i razvoj biljaka. Međutim, povećanje nivoa atmosferskog CO₂ može izazvati zagrevanje atmosfere poznato kao „efekat staklene bašte“, koje potencijalno ima veoma ozbiljne posledice na globalnom nivou. U vodi, prisustvo CO₂ je značajno za nastanak H₂CO₃ i održanje ugljen-dioksid karbonatne ravnoteže (videti poglavlje Ugljen-dioksid karbonatna ravnoteža. Aciditet vode. Alkalitet vode).

Iako ne predstavlja pretnju globalno, povećane koncentracije **ugljen-monoksida**, CO, mogu imati ozbiljne posledice po zdravlje ljudi jer CO blokira transport kiseonika do telesnih tkiva u krvi. Veliki deo CO nastaje kao intermedijer u oksidaciji CH₄ hidroksil radikalom, a svaka oksidacija značajno doprinosi ukupnom opterećenju CO. Oko dve trećine ukupnog CO se proizvodi u navedenim reakcijama oksidacije. Takođe, degradacijom hlorofila tokom jesenjih meseci oslobađa se CO dok antropogeni izvori čine oko 6% ukupne emisije CO.

Sumpor dioksid, SO₂, nastaje kao proizvod sagorevanja goriva koja sadrže sumpor kao što je ugalj sa visokim sadržajem sumpora. U atmosferi, SO₂ se pretvara u H₂SO₄ i pretežno doprinosi kiselim padavinama (videti poglavlje Kisele kiše).

Takođe, SO_2 se oksiduje i u kisele soli kao što su amonijum-sulfat, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, i amonijum-hidrogen sulfat, $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$. Atmosfera je dinamičan sistem, pa mnogi faktori, uključujući temperaturu, vlažnost, intenzitet svetlosti, atmosferski transport i površinske karakteristike čestica mogu uticati na atmosferske hemijske reakcije SO_2 . Kao i mnoge druge gasovite zagađujuće materije, SO_2 reaguje sa česticama u vazduhu, koje se zatim talože ili uklanjaju iz atmosfere padavinama ili drugim procesima. Drugi načini na koje SO_2 može reagovati u atmosferi su: fotohemijske reakcije (videti poglavlje Fotohemijske reakcije); fotohemijske i hemijske reakcije u prisustvo azotovih oksida i/ili ugljovodonika; i hemijski procesi u kapljicama vode, posebno onima koje sadrže metalne soli i amonijak (videti poglavlje Sekundarni organski aerosoli). Među najznačajnijim hemijskim vrstama koje mogu izazvati reakcije odnosno oksidaciju SO_2 izdvajaju se različiti slobodni radikali koji sadrže kiseonik: $\text{HO}\cdot$, $\text{HOO}\cdot$, O , O_3 , NO_3 , N_2O_5 , $\text{ROO}\cdot$ i $\text{RO}\cdot$.

Tri oksida azota koja se najčešće susreću u životnoj sredini su: azot-suboksid (N_2O), azot-monoksid (NO) i azot-dioksid (NO_2). **Azot-suboksid** je uobičajeno korišćeni anestetik poznat kao „gas za smejanje“ i proizvodi se mikrobiološkim procesima. Sastavni je deo nezagađene atmosfere, relativno je nereaktivan i smatra se da najverovatnije ne utiče značajno na važne hemijske reakcije u u nižim slojevima atmosfere. Njegova koncentracija brzo opada sa visinom u stratosferi zbog fotohemijskih reakcija.

Bezbojni **azot-monoksid** (NO) i oštar crveno-braon **azot-dioksid** (NO_2) su veoma važne komponente zagađenog vazduha, ali i u ciklusu azota (videti poglavlje Kruženje azota). Često označeni kao NO_x , ovi gasovi dospevaju u atmosferu prirodnim procesima i antropogenim aktivnostima. Skoro sav antropogeni NO_x nastaje kao rezultat sagorevanja fosilnih goriva kako u stacionarnim tako i u mobilnim izvorima. Hemijskim reakcijama u atmosferi, NO_x se pretvara u azotnu kiselinu, neorganske nitratne soli, organske nitrata i peroksiacetil nitrat. Najreaktivnije vrste su u troposferi su: NO , NO_2 i HNO_3 i međusobno su povezani različitim reakcijama (videti poglavlja Oštećenja ozonskog omotača, Kisele kiše i Fotohemijske reakcije). Konverzija NO u NO_2 je relativno brz proces u troposferi, a NO_2 je veoma reaktivna vrsta koja apsorbuje UV zračenje i zračenje iz vidljivog dela spektra. Na talasnim dužinama ispod 398 nm dolazi do fotodisocijacije NO_2 , a na talasnim dužinama iznad 430 nm nastaju samo pobuđeni molekuli NO_2 . Na talasnim dužinama između 398 nm i 430 nm, mogu se odvijati oba procesa. Sklonost NO_2 ka fotodisocijaciji se objašnjava veoma kratkim vremenom poluraspada NO_2 na direktnoj Sunčevoj svetlosti, koje je mnogo kraće u poređenju sa bilo kojom drugom uobičajenom molekulskom vrstom. Azot-dioksid se na kraju uklanja iz atmosfere kao HNO_3 , nitrati, ili u obliku organskog azota.

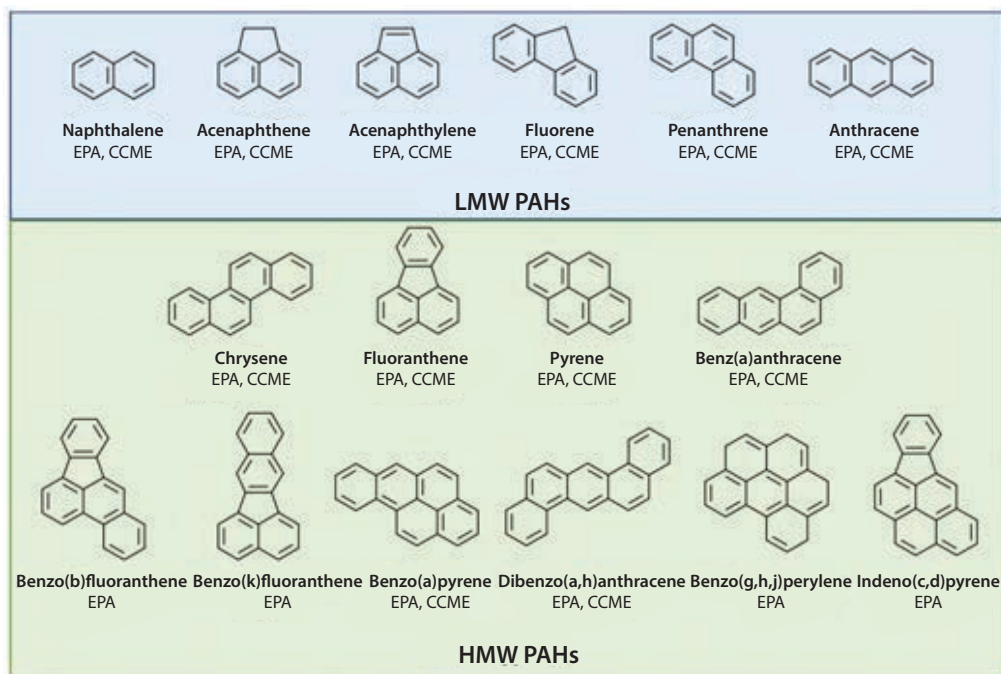
Policiklični aromatični ugljovodonici

Policiklični aromatični ugljovodonici (*Polycyclic Aromatic Hydroxcarbons*, PAHs) obuhvataju nekoliko stotina jedinjenja koja se sastoje od 2 do 7 kondezovanih benzenovih prstenova (postoje i izuzeci koji sadrže i petočlane prstenove) vezanih linearno ili pod određenim uglom. Ova jedinjenja nastaju tokom termalne razgradnje organske supstance kao što je nepotpuno sagorevanje na visokim temperaturama ili spora razgradnja na temperaturama do 300°C. Jedinjenja koja sadrže 2 ili 3 aromatična prstena se obično klasifikuju kao PAHs male molekulske mase, dok se oni sa 4 ili više benzenovih prstenova ubrajaju u PAH sa velikom molekulskom masom. Molekulska masa utiče na raspodelu PAHs u životnoj sredini; na primer, PAH manje molekulske mase se u vazduhu javljaju u gasovitom obliku, PAH srednje molekulske mase mogu biti prisutni u gasovitom obliku ili se vezati za PM, a PAH velike molekulske mase (5, 6 i 7 benzenovih prstenova) se dominantno vezuju za čestice.

Na osnovu koeficijenta raspodele oktanol–voda ($\log K_{ow} = 2-6,5$) ova jedinjenja su lipofilna i slabo rastvorna u vodi; sa porastom molekulske mase PAHs njihova lipofilnost raste, a rastvorljivost u vodi opada. Usled aromatične strukture, ova jedinjenja su stabilna i otporna na hemijsku razgradnju, ali su podložna apsorpciji zračenja iz ultraljubičaste i vidljive oblasti što dovodi do destabilizacije molekula i kidanja veza u benzenovim prstenovima.

U životnu sredinu se emituju kao smeša iz različitih prirodnih i antropogenih izvora. Prirodni izvori ovih jedinjenja obuhvataju: šumske požare, vulkanske erupcije, spaljivanje vegetacije. U urbanim i industrijskim sredinama dominantne su antropogene emisije poreklom iz sagorevanja fosilnih goriva za potrebe grejanja, saobraćaja, spaljivanja otpada, odlaganje naftnih derivata itd. Imajući u vidu fizičko-hemijske karakteristike PAHs i njihove moguće štetne efekte na zdravlje ljudi, Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Država (*United States Environmental Protection Agency*, US EPA) i Evropska unija odredile su 16 PAH jedinjenja čije je koncentracije obavezno meriti i pratiti u životnoj sredini (slika 3.5). Od njih 16, Međunarodna agencija za istraživanje raka svrstava benzo[a]piren u I grupu jedinjenja koja su kancerogena za ljude, benzo[a]antracen u IIA grupu jedinjenja koja su verovatno kancerogena za ljude, a krizen, benzo[b]fluoranten, benzo[k]fluoranten, dibenzo[a,h]antracen i indeno[1,2,3-cd]piren u IIB grupu jedinjenja koja su potencijalno kancerogena za ljude.

Slika 3.5. US EPA(United States Environmental Protection Agency) PAH klasifikovanih prema molekulknoj masi i IARC (International Agency for Research on Cancer) grupama (1, 2A i 2B)



Polihlorovani bifenili

Polihlorovani bifenili (*PolyChlorinated Byphenils*, PCB) predstavljaju aromatična jedinjenja sa bifenil strukturom, koja sadrže dva benzenova prstena, pri čemu su jedan ili više atoma vodonika zamenjeni atomima hlora. PCB su bez mirisa, bezbojna do žućkasta jedinjenja, izrazito stabilna i imaju nisku isparljivost na sobnoj temperaturi. Postoji 209 kongenera, od kojih oni sa višim stepenom hlorovanja pokazuju veću otpornost na degradaciju putem toplote i svetlosti.

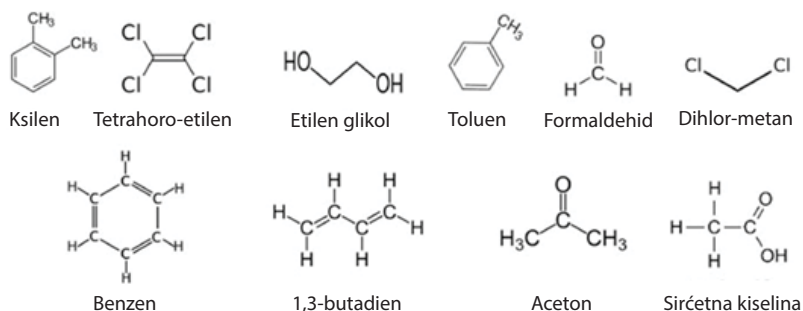
PCB su lipofilni, što znači da se lako rastvaraju u mastima i uljima, dok je njihova rastvorljivost u vodi veoma niska. Ova jedinjenja takođe pokazuju tendenciju da se vežu za organske čestice u zemljištu, sedimentima i biološkim sistemima, što omogućava njihov transport na velike razdaljine. Zbog svoje stabilnosti i otpornosti na razgradnju, PCB su identifikovani širom sveta, uključujući i udaljene i ekološki osetljive oblasti.

Prema klasifikaciji Svetske zdravstvene organizacije, PCB spadaju u grupu 2B – potencijalno kancerogena jedinjenja za ljude, pri čemu naučni dokazi za ovu klasifikaciju nisu u potpunosti utvrđeni. Osobe koje su direktno izložene visokim koncentracijama PCB, bilo putem kože, hrane ili vazduha, mogu iskusiti različite zdravstvene probleme, uključujući iritacije respiratornih puteva, teške kožne iritacije poput hlorakni i osipa, kao i probleme sa očima. Dugotrajna izloženost PCB može povećati rizik od kardiovaskularnih bolesti, hipertenzije i dijabetesa. Kod žena koje su konzumirale hranu kontaminiranu PCB zabeleženo je da njihova deca često imaju niže rezultate na testovima ponašanja, motoričke poteškoće i smanjenu kratkoročnu memoriju.

Isparljiva organska jedinjenja

Isparljiva organska jedinjenja (*Volatile Organic Compounds, VOC*) su sva ona jedinjenja koja lako isparavaju i dospevaju u vidu mirisa u okolinu pri normalnim uslovima. Ovo znači da, posmatrano sa aspekta fizičko-hemijskih osobina, VOC su ona jedinjenja čija je tačka ključanja jednaka ili manja od 250°C na standardnom pritisku (101,3 kPa). Ova jedinjenja imaju povećanu isparljivost, pokretljivost i često su otporna na degradaciju pa se mogu transportovati na velike udaljenosti. VOC uključuje veliki broj vrsta različite strukture i fizičko-hemijskih osobina, a svako jedinjenje ima jednu ili više karakterističnih organskih funkcionalnih grupa (slika 3.6). Ova jedinjenja usled različitih osobina ispoljavaju i različite uticaje na životnu sredinu. Na primer, benzen je kancerogen, neki VOC su identifikovani kao gasovi staklene bašte, a prema klasifikaciji US EPA, od 189 jedinjenja koja se ubrajaju kao zagađujuće materije u vazduhu, njih 97 su VOC. U domaćim i stranim regulatornim dokumentima u vezi sa zaštitom životne sredine, među isparljivim jedinjenjima, benzen se ističe kao jedan od indikatora za praćenje nivoa zagađenosti vazduha merenjem njegovih koncentracija u vazduhu instrumentima za automatsko merenje i/ili uzimanjem uzoraka i njihovom analizom.

Slika 3.6. Predstavnici isparljivih organskih jedinjenja



Izvori VOC se dele na prirodne i antropogene. Prirodni izvori obuhvataju: emisije iz biljaka, šumske požare i razne anaerobne metaboličke procese dok se antropogeno poreklo isparljivih jedinjenja vezuje za različite industrijske aktivnosti (upotreba đubriva i pesticida, sagorevanje ugljovodoničkih goriva, skladištenje i distribucija nafte, proizvodnja lekova i hrane, proizvodnja polimera) i sagorevanje fosilnih goriva u saobraćaju i za potrebe grejanja. Osim navedenog, mnoge studije navode VOC kao zagađujuće materije u vazduhu u zatvorenom prostoru, a izvori zagađenja su mnogobrojni. Neki primeri obuhvataju: duvanski dim, hlorisanu vodu, upotrebu parfema, sredstava za uklanjanje boje, lepkova, nove odeće ili plastike. Glavni izvori VOC se mogu grubo podeliti na:

- eksploataciju i upotrebu fosilnih goriva, nepotpuno sagorevanje fosilnih goriva ili njihovo isparavanje;
- upotrebu rastvarača (alifatični ugljovodonici, etil-acetat, glikol etri, aceton) za pripremu boja i mastila;
- proizvode u obliku komprimovanih aerosola (butan i propan);
- upotrebu biogoriva;
- sagorevanje biomase, posebno iz šuma i poljoprivrednog otpada;
- obradu metala;
- spaljivanje kućnog otpada i drugih izvora.

Prema isparljivosti VOC se dele na: veoma isparljiva organska jedinjenja, isparljiva organska jedinjenja i poluisparljiva organska jedinjenja. Detaljan opis VOC predstavnika prevazilazi obim ovog nastavnog udžbenika, a u nastavku su navedena neka često spominjana jedinjenja da bi se stekao uvid u raznolikost osobina, primene i uticaja ovih zagađujućih materija. Veoma isparljiva organska jedinjenja se smatraju najopasnijom klasom VOC jer su toksični kada su prisutni i u veoma niskim koncentracijama. Primeri uključuju propan, butan i metil-hlorid. Propan (C_3H_8) i butan (C_4H_{10}) se koriste kao tečni gas pod pritiskom za grejanje ili kuvanje i predstavljaju jedne od štetnijih isparljivih jedinjenja za udisanje. Metil-hlorid (CH_3Cl), poznat kao hlorometan, je bezbojan, zapaljiv i toksičan gas. Koristi se kao rashladno sredstvo, ali ima mnogo drugih primena, kao što su: rastvarač u prečišćavanju nafte, agens za hlorisanje i metiliranje u organskoj sintezi, herbicid, pogonsko gorivo u proizvodnji polistirenske pene. U zavisnosti od nivoa koncentracije i vremena izlaganja, izloženost metil-hloridu izaziva različite probleme od pospanosti i vrtoglavice do kome.

Primeri isparljivih organskih jedinjenja uključuju: formaldehid, ugljen-tetrahlorid, toluen, aceton i izopropil alkohol. Formaldehid (CH_2O) se koristi u proizvodnji smola za građevinske materijale, papira, premaza za odevne tkanine, a takođe se nalazi u lepkovima, livenoj plastici, lakovima, izolacionim materijalima, proizvodima od presovanog drveta kao što su šperploča, iverice, laminatni podovi. Ističe se kao kancerogen VOC. Ugljen-tetra hlorid je organsko jedinjenje sa hemijskom formulom CCl_4 . To je bezbojna tečnost slatkog mirisa koja se može detektovati na niskim nivoima. Nije zapaljiv na nižim temperaturama, a koristi se u aparatima za gašenje požara, kao prekursor rashladnih sredstava i kao sredstvo za čišćenje. Nakon izlaganja visokim koncentracijama ugljen-tetrahlorida (posebno parama), centralni nervni sistem može biti pogođen, a izlaganje može izazvati oštećenja jetre i bubrega dok dugotrajno može biti fatalno. Benzen (C_6H_6) je lako zapaljiva bezbojna do svetložuta isparljiva organska hemikalija sa slatkim mirisom koja se koristi kao hemijski rastvarač, za proizvodnju plastike, gume, fenola, maziva, boja, deterdženata, nekih lekova, pesticida, acetona, i kao aditiv u benzinu. Benzen se ispušta u životnu sredinu direktno putem emisija u vazduh iz petrohemijske proizvodnje i upotrebe uglja, i slučajnih izlivanja i curenja iz rezervoara za skladištenje i povezanih sa razvojem petrohemijske, uključujući razvoj prirodnog gasa. Takođe, benzen je prirodno prisutan u sirovoj nafti. Toluen (C_7H_8) je aromatični ugljovodonik, bezbojna tečnost koja je nerastvorljiva u vodi. Pretežno se koristi kao industrijska sirovina i rastvarač u nekim vrstama razređivača boja, trajnim markerima i nekim vrstama lepka. Toluen ima potencijal da izazove teška neurološka oštećenja. Aceton je organsko jedinjenje sa formulom $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$, najjednostavniji je i najmanji keton. To je bezbojna tečnost, veoma isparljiva i zapaljiva sa karakterističnim ostrim mirisom, meša se sa vodom i koristi se kao važan organski rastvarač. Takođe se koristi za proizvodnju metakrilata, kao i bisfenola A, a u organskoj hemiji je uobičajen gradivni blok. Izopropil alkohol je bezbojna tečna, zapaljiva hemijska jedinjenja, hemijske formule $\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$ i jakog mirisa. Koristi se u proizvodnji kozmetike, farmaceutskih proizvoda, parfema, rastvora boja, antifrizi, sapuna, sredstava za čišćenje i dezinfekciju. Produžena izloženost izaziva respiratorne probleme.

Poluisparljiva organska jedinjenja su supstance sa većom molekulskom masom i tačkom ključanja od VOC, pa je manja verovatnoća da će isparavati na sobnoj temperaturi. Međutim, ovo ne znači da su bezopasna po ljude i životnu sredinu. Upotreba poluisparljivih organskih jedinjenja kao aditiva u građevinskim materijalima, nameštaju i elektronici može izazvati ozbiljne probleme zbog toksičnosti. Takođe, pesticidi, posebno organohlorini, se u velikoj meri koriste u poljoprivredi, a kao neurotoksikanti izazivaju ozbiljne zdravstvene i ekološke probleme.

Hlordan ($C_{10}H_6Cl_8$), koji se smatra mogućim kancerogenim jedinjenjem za ljude, je organohlorno jedinjenje koje se koristi kao pesticid. To je bela čvrsta supstanca i kao i kod drugih hlorisanih ciklodienskih insekticida, klasifikovan je kao organski zagađivač opasan po zdravlje ljudi i zagađivač za životnu sredinu. Hlordan je otporan na razgradnju u životnoj sredini i u ljudskim/životinjskim telima i lako se akumulira u lipidima (mastima), a izloženost ovom jedinjenju je povezana sa rakom, dijabetesom i neurološkim poremećajima. Polihlorovani bifenili, dioksini i furani su takođe predstavnici poluisparljivih VOC. Neka od ovih jedinjenja pripadaju dugotrajnim organskim zagađujućim materijama (*Persistent Organic Pollutants*, POPs), čija je proizvodnja, upotreba i nenamerno ispuštanje u životnu sredinu regulisano Stokholmskom konvencijom sa ciljem daljeg minimiziranja uticaja i, gde je to izvodljivo, konačnog eliminisanja iz upotrebe. Među plastifikatorima, ftalati, polibromovani-difenil etri ili heksabromociklodekani se često koriste u građevinarstvu i materijalima za dizajn enterijera (meki nameštaj, podovi, tapete, boje), kozmetici, igračkama ili proizvodima za ličnu negu. Ftalati mogu kod dece izazvati astmu, alergije, neuropsihijatrijske efekte ili povećanje telesne težine, a polibromovani-difenil etri ili heksabromociklodekani negativno utiču na endokrini, neurološki ili reproduktivni sistem dece.

Transport i disperzija zagađujućih materija

Transport i disperzija zagađujućih materija predstavljaju ključne procese u širenju zagađenja kroz različite podsisteme životne sredine – atmosferu, hidrosferu i litosferu, odnosno zemljište. Razumevanje ovih procesa je od suštinskog značaja za procenu uticaja zagađivača i zagađujućih materija na ekosisteme, kao i za razvoj strategija za smanjenje zagađenja i zaštitu životne sredine.

Transport zagađujućih materija odnosi se na njihovo kretanje kroz vazduh, vodu ili zemljište, usled delovanja fizičkih sila kao što su: vetar, vodene struje, difuzija ili gravitacija. U zavisnosti od medijuma kroz koji se kreću, zagađujuće materije mogu imati različite obrasce kretanja.

Zagađujuće materije u gasovitom ili čvrstom obliku (poput čestica prašine) prenose se kroz atmosferu zahvaljujući vazдушnim strujanjima. Ovaj proces omogućava zagađivačima da pređu velike udaljenosti, pa se lokalna emisija zagađivača može proširiti i imati regionalni ili čak globalni uticaj. Na primer, čestice prašine ili sumpor-dioksida iz industrijskih zona mogu biti prenete hiljadama kilometara, uzrokujući kisele kiše ili pogoršanje kvaliteta vazduha u udaljenim područjima.

U hidrosferi, zagađujuće materije se transportuju vodotocima, podzemnim vodama ili morskim strujama. Hemikalije, metali i organski zagađivači mogu dospeti u reke, jezera, mora i okeane, šireći se i kontaminirajući različite vodene ekosisteme. Takođe, u podzemnim vodama, zagađivači mogu migrirati kroz slojeve tla, čime se kontaminiraju izvori pijaće vode i poljoprivredni resursi.

U litosferi i zemljištu, zagađujuće materije se mogu kretati kroz pore tla pod uticajem gravitacije i vodene infiltracije. Ovo kretanje je najčešće sporo, ali može dovesti do dugotrajne kontaminacije zemljišta i podzemnih voda. Zagađivači poput pesticida ili teških metala mogu se taložiti u zemljištu i ostati prisutni godinama, smanjujući plodnost tla i ugrožavajući poljoprivrednu proizvodnju.

Osim ovih procesa koji se dešavaju u okviru jednog podsistema, značajan je i transport zagađujućih materija u **multifaznim sistemima**, kakav je na primer zemljište-voda-vazduh. On obuhvata složene procese koji omogućavaju kretanje zagađujućih materija između ova tri medijuma. Ovi procesi igraju ključnu ulogu u širenju zagađenja, njegovoj transformaciji i interakciji sa ostalim činiocima životne sredine. Multifazni sistemi, u kojima zagađujuće materije prelaze iz jednog medijuma u drugi, zahtevaju razumevanje fizičkih, hemijskih i bioloških mehanizama koji omogućavaju njihov transport.

Disperzija zagađujućih materija je proces širenja zagađujućih materija u oblastima udaljenim od mesta emisije. Ona zavisi od niza faktora, kao što su brzina vetra, vodene struje, konfiguracija terena i meteorološki uslovi. Disperzija može razblažiti koncentraciju zagađujućih materija, ali i omogućiti njihov ulazak u nova staništa, povećavajući tako njihov ekološki doseg i potencijalne posledice.

Zagađujuće materije u vazduhu mogu se širiti horizontalno i vertikalno pod uticajem vetra i atmosferskih turbulencija. Faktori koji u najvećoj meri utiču na to su brzina i pravac vetra, temperaturni gradijenti, oblačnost i topografija terena. U stabilnim atmosferskim uslovima, zagađujuće materije mogu ostati koncentrisane blizu izvora emisije, dok se u turbulentnim uslovima mogu brzo proširiti na velikoj površini.

U vodenim ekosistemima, zagađujuće materije se šire kroz difuziju i advekciju. Difuzija omogućava da se zagađujuće materija spontano kreću iz područja veće koncentracije u područja niže koncentracije, dok advekcija podrazumeva njihova kretanja pod uticajem vodotoka ili morskih struja. Tako, na primer, zagađujuće materije ispuštene u reku mogu brzo dospeti u udaljene vodene ekosisteme, što u velikoj meri utiče na kvalitet vode i biodiverzitet.

U zemljištu, disperzija zagađujućih materija zavisi od poroznosti tla, prisustva podzemnih voda i vrsta zagađujućih materija. Hemijski procesi kao što su apsorpcija i desorpcija, kao i biološki procesi poput aktivnosti mikroorganizama, mogu uticati na brzinu širenja zagađivača u zemljištu. Teški metali ili pesticidi mogu ostati vezani za čestice tla, dok lako rastvorljive supstance, poput nitrata, mogu brzo prolaziti kroz slojeve tla i kontaminirati podzemne vode.

Na transport i disperziju zagađujućih materija utiče niz fizičkih i hemijskih faktora, među kojima se izdvajaju **meteorološki parametri** (pravac i brzina vetra, temperatura, vlažnost i dr.), koji direktno utiču na kretanje i širenje zagađivača. Na primer, visok atmosferski pritisak može zadržati zagađujuće materije blizu tla, dok olujni vetrovi mogu uzrokovati njihovo brzo širenje. Pored toga bitan je i **reljef** područja koji u velikoj meri može usporiti ili ubrzati transport zagađujućih materija. Planine, doline i kanjoni mogu delovati kao barijere ili pak kanali za širenje zagađujućih materija. **Fizičko-hemijske osobine** zagađujućih materija – rastvorljivost, gustina i reaktivnost takođe određuju njihovo ponašanje u životnoj sredini. Na primer, rastvorljivi gasovi poput amonijaka brzo će se rastvoriti u vodi, dok teški metali mogu ostati vezani za čestice zemljišta.

Procesa transporta i disperzije zagađujućih materija važni su za procenu njihovog uticaja na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Ovi procesi omogućavaju širenje zagađenja daleko od izvora emisije, čime se ugrožavaju udaljeni delovi jednog istog, ali i ostalih podsistema životne sredine, i problem zagađenja postaje ne samo lokalni već poprima i globalni karakter. Upravljanje zagađenjem zahteva precizno praćenje i modeliranje transporta i disperzije (o čemu će biti reči u poglavlju o analizi podataka iz životne sredine), kako bi se razvile strategije za minimizaciju njihovog štetnog uticaja na životnu sredinu.

3.2. OTPAD U ŽIVOTNOJ SREDINI

Otpad predstavlja sve proizvode bez upotrebne vrednosti koji se na bilo koji način nađu u životnoj sredini (slika 3.8). Usled neadekvatnog odnosa čoveka i nedostatka ekološke svesti, otpad predstavlja jednu od najozbiljnijih pretnji kvalitetu životne sredine. Poreklo otpada u životnoj sredini je različito i može poticati iz domaćinstava, industrije, poljoprivrede ili građevinarstva, a uključuje sve od plastičnih proizvoda, hemijskih supstanci, do opasnih i toksičnih materijala. Neadekvatno upravljanje otpadom, kao i nedostatak ekološke svesti kod stanovništva, dovode do nagomilavanja otpada u svim podsystemima životne sredine, što predstavlja ozbiljnu pretnju kvalitetu vazduha, vode i zemljišta, a indirektno zdravlju ljudi i raznovrsnosti ekosistema.

Generisanje otpada je jedna od nuspojava ubrzanog razvoja civilizacije i savremenog načina života, ali otpad koji nije pravilno odložen ili obrađen predstavlja veliku opasnost po životnu sredinu. Posebno zabrinjavajuća je njegova perzistentnost u prirodi, poput plastičnih materijala koji mogu ostati prisutni u ekosistemima stotinama godina.

U Strategiji održivog razvoja Republike Srbije, otpad je identifikovan kao drugi najvažniji ekološki rizik, odmah posle klimatskih promena. Ovaj prioritet u upravljanju otpadom naglašava potrebu za održivim sistemima za njegovo prikupljanje, reciklažu i odlaganje, kao i za razvijanje svesti o značaju smanjenja, ponovne upotrebe i reciklaže otpada. U suprotnom, nekontrolisano gomilanje otpada nastaviće da degradira prirodne resurse i ugrožava kvalitet života sadašnjih i budućih generacija.

Slika 3.8. Primeri otpada



Karakteristike otpada

Klasifikacija otpada može se vršiti na različite načine, u zavisnosti od njegovog sastava, mesta nastanka, vrste materijala ili stepena opasnosti za životnu sredinu i zdravlje ljudi. Prema sastavu, otpad se može podeliti na organski, plastični, metalni, stakleni, papirni i mnoge druge vrste, dok se prema mestu nastanka najčešće razlikuje komunalni, industrijski, poljoprivredni, građevinski i opasni otpad. Poseban značaj u klasifikaciji otpada ima njegova toksičnost, koja određuje da li, i na koji način, određeni otpad predstavlja opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi.

Opasan otpad je otpad koji ima specifična svojstva koja ga čine posebno štetnim. Ova svojstva uključuju eksplozivnost, zapaljivost, sklonost oksidaciji, akutnu otrovnost, infektivnost, korozivnost, kao i sposobnost da, u kontaktu sa vazduhom ili vodom, oslobađa zapaljive ili otrovne gasove. Takođe, opasan otpad može sadržati supstance koje imaju odloženo, hronično dejstvo, izazivajući dugoročne zdravstvene probleme poput kancerogenih ili mutagenih efekata. Zbog ovih svojstava, rukovanje, skladištenje i odlaganje opasnog otpada zahteva posebne mere predostrožnosti i stroge regulative, kako bi se smanjio rizik po životnu sredinu i ljudsko zdravlje.

Komunalni otpad obuhvata otpad koji se prikuplja sa određenog područja, a koji potiče iz domaćinstava, preduzeća, komercijalnih ustanova i drugih javnih objekata. Ovaj otpad se sastoji od različitih materijala, uključujući organski otpad, plastiku, papir, staklo, metal i druge vrste otpada. Komunalni otpad se deponuje u skladu sa zakonskim regulativama i odlukama lokalnih zajednica, a u poslednje vreme sve veći značaj pridaje se njegovom recikliranju i ponovnoj upotrebi, kako bi se smanjilo opterećenje na deponijama i negativan uticaj na životnu sredinu.

Pored opasnog i komunalnog otpada, važnu kategoriju čini **ambalažni otpad**, koji uključuje sve vrste ambalažnih materijala kao što su plastika, staklo, metal i papir. Ovaj otpad nastaje prilikom pakovanja i distribucije proizvoda i može se značajno smanjiti kroz reciklažu i upotrebu biorazgradivih materijala.

Biorazgradivi otpad odnosi se na materijale, kao što su ostaci hrane, biljni materijal i drveni otpad, koji se prirodnim putem razlažu delovanjem mikroorganizama. Ovaj otpad ima potencijal da se pretvori u kompost, koji se može koristiti za poboljšanje kvaliteta zemljišta. S obzirom na to da biorazgradivi otpad čini značajan udeo u ukupnom otpadu, kompostiranje je održiva alternativa koja smanjuje pritisak na deponije.

Industrijski otpad nastaje kao rezultat različitih industrijskih aktivnosti, poput proizvodnje, hemijskih procesa i građevinskih radova. Ova vrsta otpada može sadržavati toksične materijale, teške metale i opasne hemikalije, što ga čini posebnim izazovom za upravljanje. Industrijski otpad zahteva specijalizovane metode tretmana i odlaganja, u skladu sa strogim zakonskim regulativama, kako bi se sprečilo njegovo širenje i negativan uticaj na ekosisteme i zdravlje ljudi.

S obzirom na široku raznovrsnost vrsta otpada i potencijalno jako štetan uticaj na životnu sredinu, pravilna klasifikacija i odgovarajuće upravljanje otpadom su ključni za očuvanje prirodnih resursa, zaštitu zdravlja ljudi i smanjenje negativnih ekoloških posledica.

3.3. BUKA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Buka u životnoj sredini definiše se kao neželjen ili **štetan zvuk** koji ometa svakodnevne aktivnosti ljudi, ugrožava njihovo zdravlje i utiče na kvalitet života. Buka se javlja kao posledica različitih aktivnosti ljudi, a njeni izvori mogu biti prirodni ili veštački. Kao jedan od najrasprostranjenijih oblika zagađenja, buka je postala problem naročito u urbanim sredinama i industrijskim zonama, gde su nivoi zvučnih emisija često iznad granica koje se smatraju prihvatljivim za zdravlje.

Zvuk kao mehanički talas

Poznavanje svojstava zvuka posebno je važno u analizi štetnih uticaja u životnoj sredini, s obzirom na to da se buka, kao jedan od zagađujućih faktora, definiše upravo kao neprijatan zvuk. Zvuk kao mehanički talas ima ključnu ulogu u prirodi i ljudskom životu, a proučavanje njegovih osobina i načina prostiranja pomaže nam da bolje razumemo kako akustični procesi funkcionišu u različitim medijumima. Ova saznanja nalaze primenu ne samo u svakodnevnom životu već i u naučnim istraživanjima. Razumevanje zvuka omogućava razvoj novih tehnologija i metoda, koje se koriste u dijagnostici, komunikaciji i istraživanju životne sredine.

Zvuk ima ključnu ulogu u različitim aspektima života, od komunikacije i orijentacije do zabave i tehničkih primena. Sposobnost ljudi da detektuju zvuk omogućava govornu komunikaciju, prepoznavanje opasnosti, kao i uživanje u muzici i umetnosti. U tehnološkim oblastima, zvuk se koristi u ultrazvučnoj dijagnostici, sonarima, akustičnom inženjeringu i mnogim drugim disciplinama.

Razumevanje širenja i svojstava zvuka je od suštinskog značaja za unapređenje tehnologija koje koriste zvuk u nauci i industriji.

Zvuk je oblik energije koji se širi kroz različite medijume u obliku mehaničkog talasa. Kao mehanički talas, zvuk zahteva materijalni medijum za širenje, što znači da se ne može prenositi kroz vakuum, već se mora kretati kroz čvrste, tečne ili gasovite supstance. Ključna karakteristika zvuka kao mehaničkog talasa jeste to što prenosi energiju, ali ne i materiju, kroz oscilacije čestica medijuma u kojem se kreće.

Zvuk nastaje kada izvor zvuka, poput vibrirajućeg tela, izaziva oscilacije čestica u medijumu, stvarajući ciklične promene pritiska. Ove oscilacije kreću se kroz medijum u obliku uzdužnih talasa, gde se čestice kreću paralelno sa smerom prostiranja talasa. Za razliku od poprečnih talasa, koji su karakteristični za elektromagnetno zračenje, zvučni talasi prenose energiju kroz sabijanje (kondenzacije) i razređenje (refrakcije) čestica medijuma.

Na primer, kada govorimo, naše glasne žice vibriraju i stvaraju promene pritiska u vazduhu. Ove promene se šire kao uzdužni talasi kroz vazduh i dospevaju do ušiju, gde se registruju kao zvuk.

Kao i svi talasi, zvuk ima karakteristike koje određuju njegovo ponašanje i percepciju. Neka od osnovnih svojstava zvuka su:

- **amplituda**, koja predstavlja maksimalno odstupanje čestica medijuma od njihovog ravnotežnog položaja; veća amplituda znači jači zvuk, dok manja amplituda znači tiši zvuk; amplituda je usko povezana sa **jačinom zvuka**, koja se meri u decibelima (dB);
- **frekvencija** (ν) je broj oscilacija koje zvučni talas napravi u jednoj sekundi i meri se u hercima (Hz); frekvencija zvuka određuje njegov **tonalitet**, odnosno visinu; više frekvencije percipiraju se kao viši tonovi, dok niže frekvencije rezultuju nižim tonovima; ljudi mogu čuti zvukove u opsegu od približno 20 Hz do 20 000 Hz, dok infrasonični zvuci (ispod 20 Hz) i ultrazvuci (iznad 20 000 Hz) nisu čujni za ljudsko uho;
- **period** (T) trajanje jedne oscilacije;
- **brzina zvuka** (ϑ) je brzina kojom se zvuk prostire, i ona zavisi od vrste medijuma kroz koji se kreće, kao i od temperature i pritiska medijuma; na primer, brzina zvuka u vazduhu pri standardnim uslovima je oko 343 m s^{-1} , dok je brzina zvuka u vodi znatno veća, približno $1\,500 \text{ m s}^{-1}$; u čvrstim materijalima, poput metala, brzina zvuka je još veća;

- **talasna dužina** (λ) je rastojanje između dva uzastopna maksimuma ili minimuma talasa, i povezana je sa frekvencijom i brzinom zvuka; talasna dužina se smanjuje sa povećanjem frekvencije, pri čemu se **visoki tonovi** povezuju sa kraćim talasnim dužinama, a **niski tonovi** sa dužim; veza pomenutih fizičkih veličina data je sledećim formulama:

$$\vartheta = \lambda \cdot \nu, \quad \nu = 1/T$$

Zvuk može da se širi kroz gasove, tečnosti i čvrste supstance, pri čemu je brzina zvuka najsporija u gasovima, brža u tečnostima, a najbrža u čvrstim materijalima. Ovo je rezultat načina na koji se zvučni talasi kreću kroz različite medijume – u čvrstim materijalima, čestice su gušće raspoređene i brže prenose vibracije, dok su u gasovima čestice ređe, pa je i prenos energije sporiji. Kada govorimo u vazduhu, zvuk se širi znatno sporije nego kada lupimo po metalnoj šipki, gde se vibracije brzo prenose kroz čvrsti materijal. U vodi, zvuk se takođe širi brže nego u vazduhu, što omogućava morskim organizmima, poput delfina i kitova, da komuniciraju na velikim udaljenostima.

Osobina svih talasa, uključujući i zvuk, je da podležu zakonima refleksije, prelamanja i difrakcije. Kada zvučni talas naiđe na prepreku ili granicu između dva medijuma, može se odbiti nazad ka izvoru, što izaziva refleksiju. Refleksija zvuka može dovesti do pojave jeke, koja se čuje kada se reflektovani zvuk vraća nakon originalnog zvuka. Prelamanje zvuka dešava se kada talas prolazi kroz medijum različite gustine, pri čemu menja brzinu i pravac kretanja. Na primer, zvuk putuje brže kroz topliji nego kroz hladniji vazduh, što može izazvati prelamanje talasa u atmosferi. Difrakcija je sposobnost zvučnih talasa da se savijaju oko prepreka ili šire kroz otvore, omogućavajući da zvuk bude čujan iza objekata koji zaklanjaju njegov direktan prolaz. Razumevanje ovih osobina zvuka je ključno pri projektovanju mera zaštite od buke u različitim okruženjima.

Izvori buke

Izvori buke, odnosno emiteri neželjenog zvuka, mogu biti različite mašine, uređaji, saobraćajna sredstva, industrijski procesi, kao i druge ljudske aktivnosti, i mogu se podeliti na pokretne i nepokretne. Pokretni izvori buke najčešće uključuju saobraćajna sredstva kao što su automobili, vozovi, avioni i brodovi. Ovi izvori buke su naročito problematični u gusto naseljenim urbanim sredinama gde je frekvencija saobraćaja visoka. Nepokretni izvori buke uključuju postrojenja za proizvodnju energije, industrijske mašine, ventilacione sisteme i druge tehnološke instalacije koje kontinuirano generišu buku.

Takođe, otvoreni i zatvoreni prostori za rekreaciju, sport, koncerte i druge javne događaje predstavljaju značajne izvore buke. Sportski tereni, ugostiteljski objekti, noćni klubovi, garaže i parking prostori, kao i prostori za igre i predstave mogu generisati visok nivo zvuka, što utiče na stanovnike u blizini. Ovi objekti, posebno tokom večernjih sati, mogu izazvati poremećaj sna i dugoročne probleme sa zdravljem.

3.4. ZRAČENJE U ŽIVOTNOJ SREDINI

Zračenje u životnoj sredini može se podeliti na **jonizujuće** i **nejonizujuće** zračenje, a oba tipa zračenja mogu značajno uticati na kvalitet životne sredine i zdravlje ljudi. Dok prirodni izvori zračenja postoje od samog postanka Zemlje, aktivnosti poput nuklearnih proba, nuklearnih akcidenata i industrijskih procesa u velikoj meri doprinose dodatnoj kontaminaciji okoline. Razumevanje izvora, efekata i neophodnih mera zaštite od zračenja ključno je za očuvanje životne sredine i zdravlja.

Jonizujuće zračenje

Jonizujuće zračenje nastaje kao posledica aktivnosti radioaktivnih materijala, odnosno radionuklida, koji emituju energiju u vidu alfa, beta i gama čestica ili zračenja. Ovo zračenje može izazvati oštećenja na ćelijskom nivou, što može rezultirati ozbiljnim zdravstvenim problemima, uključujući kancerogene efekte. Tokom 20. veka, masovno ispuštanje radionuklida u atmosferu dogodilo se prilikom nuklearnih proba i u nekoliko značajnih nuklearnih akcidenata, kao što su Černobilj (1986. godine) i Fukušima (2011. godine). Ovi događaji doveli su do kontaminacije životne sredine na globalnom nivou, a posledice su i dalje prisutne u mnogim delovima sveta.

U Srbiji, posledice nuklearnog akcidenta u Černobilju još uvek su prisutne, sa mogućnošću detekcije radionuklida u životnoj sredini. Pored toga, tokom bombardovanja NATO snaga 1999. godine, jedan deo teritorije Srbije kontaminiran je osiromašenim uranijumom, čime je ugrožena lokalna životna sredina, naročito u regionima gde je došlo do korišćenja ovih projektila. Takođe, nuklearne elektrane u susednim državama predstavljaju potencijalni rizik, kao i različiti tehnološki procesi koji dovode do povećane koncentracije prirodnih radionuklida u životnoj sredini.

Jonizujuće zračenje kojem su ljudi izloženi, uglavnom dolazi iz prirodnih izvora. Ovi izvori uključuju kosmičko zračenje iz svemira, radon iz Zemljine kore i male količine radioaktivnih materijala prisutnih u ljudskom telu.

Prema podacima Naučnog odbora Ujedinjenih nacija o efektima atomskog zračenja (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, UNSCEAR), prosečna ukupna godišnja efektivna doza koju čovek primi od prirodnih izvora iznosi 2,4 mSv. Iako prirodni izvori zračenja predstavljaju najveći deo ukupne izloženosti, ne treba zanemariti ni izlaganje veštačkim izvorima zračenja, naročito onima koji se koriste u medicinske svrhe.

Profesionalna izloženost jonizujućem zračenju prisutna je kod određenih grupa radnika, kao što su medicinsko osoblje koje koristi uređaje za dijagnostiku ili terapiju zračenjem. Ova grupa radnika redovno prati svoju izloženost pomoću dozimetara, koji mere kumulativnu dozu zračenja. U slučaju da izloženost premaši propisane granice, poslodavci su obavezni da preduzmu mere za ograničenje izlaganja. Takođe, posade vazduhoplova su izložene povišenim nivoima kosmičkog zračenja, a njihova izloženost se procenjuje na osnovu vremena provedenog u letu, visine leta i drugih faktora.

Zbog prisustva različitih izvora zračenja u životnoj sredini, neophodno je sistematsko praćenje radioaktivnosti (o čemu će biti reči u poglavlju Zaštita životne sredine), koje se vrši radi pravovremenog otkrivanja eventualnog povećanja radioaktivnosti, što omogućava preduzimanje preventivnih mera za zaštitu ljudi i ekosistema. Pored toga, neophodno je sprovoditi mere radijacione sigurnosti i bezbednosti kako bi se minimizirala izloženost i zaštitilo stanovništvo od potencijalnih štetnih efekata zračenja.

Nejonizujuće zračenje

Za razliku od jonizujućeg zračenja, nejonizujuće zračenje ne poseduje dovoljno energije da izazove jonizaciju atoma, ali i dalje može imati štetne efekte na zdravlje. Nejonizujuće zračenje obuhvata elektromagnetno zračenje sa energijom fotona manjom od 12,4 eV. Ovaj tip zračenja uključuje:

- **UV zračenje** čija se talasna dužina kreće u opsegu od 100 do 400 nm; može izazvati opekotine, oštećenje kože i oči, kao i povećan rizik od razvoja raka kože;
- **vidljivo zračenje** talasne dužine od 400 do 780 nm; predstavlja svetlost koju ljudsko oko može detektovati;
- **IR zračenje** talasne dužine od 780 nm do 1000 μ m; koristi se u industriji, medicini i svakodnevnom životu, a može izazvati toplotne efekte;

- **radio-frekvencijsko zračenje (RF)** čije frekvencije variraju od 10 kHz do 300 GHz; koristi se u telekomunikacijama i može izazvati zagrevanje tkiva pri visokim intenzitetima;
- **elektromagnetna polja niskih frekvencija** do 10 kHz; obuhvataju polja koja generišu električni uređaji, dalekovodi, kao i kućna i industrijska oprema.
- **lasersko zračenje** je visoko fokusirano zračenje sa specifičnim primenama u medicini i industriji.

Ultrazvuk ne spada u elektromagnetno zračenje, ali se u domenu uticaja proučava zajedno sa nejonizujućim zračenjem. Ovi talasi imaju široku primenu u medicinskoj dijagnostici, industriji i istraživanjima.

U savremenom trenutku, nejonizujuće zračenje postalo je neizbežan deo svakodnevnog života, s obzirom na široku upotrebu uređaja poput mobilnih telefona, Wi-Fi rutera, mikrotalasnih pećnica, bežičnih slušalica i drugih elektronskih uređaja.

Mobilni telefoni, koji funkcionišu na frekvencijama od 800 MHz do 2,5 GHz, emituju RF zračenje tokom poziva, slanja podataka ili korišćenja interneta. Iako je energija koju emituju ovi uređaji niska, ona može dovesti do zagrevanja tkiva kada su uređaji blizu tela, poput glave ili ruku. Dosadašnja istraživanja nisu dala konačne dokaze o dugoročnim štetnim efektima nejonizujućeg zračenja iz ovih izvora, ali se zbog stalne izloženosti ovom zračenju nastavlja istraživanje potencijalnih efekata na zdravlje, uključujući rizik od kancerogenih bolesti.

Uređaji poput Wi-Fi rutera i Bluetooth uređaja takođe emituju niskofrekventno zračenje, ali na još nižim nivoima nego mobilni telefoni. Iako je izloženost ovom zračenju stalna, smatra se da su nivo energije i potencijalni efekti na ljudsko zdravlje minimalni.

Razumevanje različitih vrsta zračenja, njihovih izvora i posledica, ključno je za očuvanje zdravlja i životne sredine, kao i za razvoj adekvatnih strategija zaštite i prevencije.

3.5. ZAGAĐENJE PODSISTEMA ŽIVOTNE SREDINE

Zagađenje životne sredine je složen proces koji pogađa svaki od njenih ključnih podсистema – litosferu, zemljište, hidrosferu, atmosferu i biosferu. Ovi podсистemi funkcionišu u međusobnoj ravnoteži i zajedno održavaju prirodne procese koji omogućavaju život na Zemlji. Međutim, intenzivne ljudske aktivnosti, poput industrijalizacije, transporta, poljoprivrede i neodrživog korišćenja resursa, unose razne zagađujuće materije koje narušavaju ovu ravnotežu.

Atmosfera, kao gasoviti omotač Zemlje, najviše trpi od emisije gasova staklene bašte, suspendovanih čestica i drugih štetnih supstanci, što dovodi do ozbiljnih problema poput globalnog zagrevanja, kiselih kiša i lošeg kvaliteta vazduha. Hidrosfera je ugrožena ispuštanjem otpadnih voda, hemikalija i plastike u reke, jezera i okeane, što ugrožava vodene ekosisteme i snabdevanje pitkom vodom. Litosfera, odnosno zemljište, zagađuje se teškim metalima, pesticidima i nepropisno odloženim otpadom, čime se smanjuje plodnost tla i narušava poljoprivredna proizvodnja. Konačno, biosfera, koja obuhvata sve žive organizme, trpi zbog uticaja zagađenja u svim prethodno navedenim podсистemima, što dovodi do gubitka biodiverziteta i slabljenja ekosistema.

U nastavku teksta biće detaljnije opisano zagađenje svakog od podсистema životne sredine, uz analizu specifičnih problema, najznačajnijih izvora zagađenja i uticaja koje ono ima.

3.5.1. Zagađenje litosfere

Očekivalo bi se da litosfera ima skoro neograničen kapacitet zaštite od perturbacija čovečanstva i nešto manji ekološki značaj od ostalih podсистema životne sredine, jer je prostorno manje i nepovoljnije stanište za živi svet na Zemlji. Ipak, njen površinski deo naseljavaju ljudi i iz nje izvlače većinu svoje hrane, minerala i goriva, pa je litosfera postala prilično krhka i podložna štetnim efektima koje izazivaju antropogene aktivnosti. Usled kompleksnosti životne sredine, promene koje se dešavaju u litosferi, bilo da se radi o degradaciji, devastaciji ili poremećenoj hemijskoj ravnoteži, ostavljaju posledice i na ostalim podсистemima. Takođe, višak CO₂ i kisele kiše koje nastaju u atmosferi mogu da izazovu velike promene u zemljištu ali i litosferi: plodna područja se pretvaraju u pustinjske krajeve, nizak pH karakterističan za kisele kiše može dovesti do drastične promene u rastvorljivost i brzinama oksido-redukcije minerala.

U nekim oblastima industrijalizovanih zemalja površinski omotač predstavlja deponiju toksičnih hemikalija. Ljudske aktivnosti na površini zemlje i stvaranje antropogenih toplotnih ostrva mogu da utiču na klimu, najdirektnije kroz promenu albeda površine, definisanog kao procenat upadnog sunčevog zračenja reflektovanog od kopnene ili vodene površine.



Zagađenje litosfere ne ostaje ograničeno na samo jednu oblast – ono se širi kroz podzemne vode, ulazi u reke i okeane, a čak i vazduhom udišemo čestice koje potiču sa zagađenog tla.

U procesima i ciklusima koji se dešavaju u litosferi dominiraju neorganska jedinjenja, a kao štetne materije karakterišu se uglavnom srednje teški, i teški elementi periodnog sistema sa izraženim toksičnim ili radioaktivnim dejstvom. Ove materije su uglavnom neuništive, pa su kao takve glavni izvori kontinualnog zagađenja životne sredine. Niz je primera lošeg antropogenog uticaja koji dovodi do narušavanja prirodne ravnoteže neorganskih materija u litosferi. Posledice eksploatacije mineralnih sirovina su deponije flotacijskog otpada, šljake i radioaktivnih materijala, zahvaljujući kojima dolazi do tranzicije štetnih materija u više slojeve litosfere. Posebno mesto u zagađenju životne sredine imaju ugalj, nafta i zemni gas, koji su prirodni konstituenti litosfere, ali se takođe njihovom eksploatacijom, industrijskom preradom i sagorevanjem dobijaju produkti sa izuzetnim štetnim uticajem na zdravlje ljudi i ekosisteme.



Krčenje šuma je tihi razarač naše planete, koji ne samo da uništava staništa miliona vrsta, već ubrzava klimatske promene, lišava nas prirodnih filtera vazduha i vode, i ozbiljno ugrožava ekosisteme od kojih zavisi život na Zemlji.

Osim jednostavnih organizama (bakterije, alge, gljive i lišajevi), litosferu mogu da nasele i više biljke. Pokazalo se da je za litosferu značaj šume veliki, jer se usled intenzivnog krčenja njene osobine menjaju u velikoj meri. U odsustvu biljnog pokrivača smanjuje se debljina zemljišnog sloja (dolazi do spiranja), a intenzivira se degradacija i denudacija tla.

Poseban vid narušene dinamike u litosferi su veštačka radioaktivna polja koja nastaju kao posledica tranzicije radioaktivnih elemenata ka površini Zemljine kore, kao i veštačka seizmička polja koja nastaju usled hemijskih i nuklearnih eksplozija, rudarske aktivnosti, ali i seizmičkih istraživanja. Posledice seizmičkih polja su iste kao pri pojavi slabijih zemljotresa, a njima se već odavno bavi inženjerska geofizika. Najčešće do pojave potresa veštačkog porekla dolazi izgradnjom hidrotehničkih objekata (primer je brana Kariba u Centralnoj Africi), hemijskim akcidentima velikih razmera, nuklearnim eksplozijama, rudnom delatnošću ili seizmičkim istraživanjima.

3.5.2. Zagađenje zemljišta

Pod zagađenjem zemljišta podrazumeva se promena njegovih fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika, koje dovode do smanjenja njegove plodnosti, nemogućnosti razlaganja materije i narušavanja biogeohemijskih ciklusa. Do degradacije zemljišta tj. poremećaja u njegovom funkcionisanju može doći pod uticajem prirodnih ili antropogenih faktora.

Najznačajniji prirodni uticaji su: vulkanske erupcije, zemljotresi, klizišta, šumski požari, poplave, peščane oluje i erozije, dok se pod antropogenim uticajima podrazumeva urbanizacija, uticaj saobraćaja, industrije, deponovanje otpada, pojave kiselih kiša i dr. U opštem slučaju, pod degradacijom zemljišta se podrazumeva hemijsko zagađenje, erozija do koje dolazi dejstvom vetra i vode, salinizacija, sabijanje, acidifikacija ili zakiseljavanje, osiromašenje zemljišta hranljivim materijama i gubitak organskih materija.

Zagađenje zemljišta: promena fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika zemljišta koje dovode do smanjenja kvaliteta njegovih primarnih karakteristika.

Hemijski sastav zemljišta karakteriše prisustvo neorganskih materija poreklom iz stene prekursora i organske materije sa značajno manjim udelom od 2 do 5% o čemu je detaljnije diskutovano u poglavlju Hemijski sastav zemljišta. Za neorganske supstance karakteristično je, da najčešće tokom antropogenih aktivnosti, dolazi do njihove tranzicije iz litosfere u zemljište. Na taj način se remeti hemijska ravnoteža i u zemljištu beleže visoke koncentracije teških metala, radioaktivnih elemenata i dr. Najzastupljenija organska jedinjenja u zemljištu su humini, i ona doprinose njegovom kvalitetu, čineći ga plodnim u odnosu na produkte stena prekursora. Prvobitna akumulacija organske materije u zemljištu nastala je zahvaljujući nižim organizmima (litobionatima) koji naseljavaju površinu stena, da bi se erozijom i taloženjem stvorili uslovi za život i višim organizmima. Specifičnost humina je da vezuju druge organske materije u zemljištu, i to se dešava sa hemijskim jedinjenjima antropogenog porekla, kao što su pesticidi, herbicidi, komunalni i organski otpad iz industrijske proizvodnje.

Uzroci zagađenja mogu biti brojni, i njihova sistematizacija se može izvršiti na više načina, pri čemu se kao najčešći potencijalni izvori hemijskog zagađenja zemljišta navode zagađenja iz atmosfere (vazduha), zagađenja iz otpadnih voda, i kao najznačajniji izvor – zagađenje čvrstim otpadom iz privrede, domaćinstva i poljoprivrede. Lokalno zagađenje zemljišta se uglavnom događa u područjima u kojima je zastupljena intenzivna industrijska aktivnost, poljoprivredne aktivnosti, na mestima gde se nalaze neadekvatna odlagališta otpada (nesanitarne deponije), kao i na mestima gde su se dogodili hemijski akcidenti.

U poljoprivrednoj proizvodnji zemljište predstavlja osnovni resurs, a pokazatelji plodnosti poljoprivrednog zemljišta tokom višegodišnjeg korišćenja su podložni promenama. Neodrživa poljoprivredna proizvodnja može dovesti do smanjenja organske materije u zemljištu, kao jednog od oblika degradacije.



Prekomerna upotreba pesticida, herbicida i veštačkih đubriva osiromašuje plodnost tla, zagađuje podzemne vode, uništava biodiverzitet i narušava prirodnu ravnotežu.

Najznačajnije posledice zagađenja zemljišta su smanjenje plodnosti, nemogućnost obnove biljnog pokrivača, i posredan uticaj na kvalitet hrane i vode, i zdravlje ljudi. Usled uzajamne povezanosti sa ostalim podsistemima životne sredine, zagađeno zemljište utiče na zagađenje površinskih i podzemnih voda, i posredno atmosfere tj. vazduha.

3.5.3. Zagađenje hidrosfere

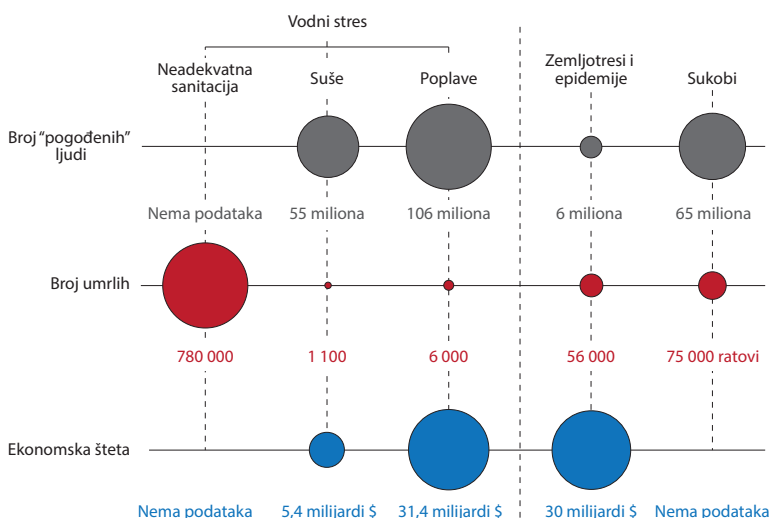
Zagađenje hidrosfere predstavlja pojavu i zadržavanje zagađujućih materija u visokim koncentracijama i duži vremenski period u bilo kom obliku u površinskim ili podzemnim vodama. Savremeno društvo je veliki broj svojih aktivnosti (urbani-zacija, industrijske i poljoprivredne aktivnosti) koncentrisalo u blizini površinskih vodenih tokova, pa se otuda zagađenje hidrosfere u svom najintenzivnijem obliku manifestuje u slučaju velikih svetskih reka. S druge strane, mora i okeani

su mesta eksploatacije i putevi transporta štetnih zagađujućih materija, nafte i naftnih derivata, i neretko bivaju izloženi ekstremnom zagađenju kao posledici velikih ekoloških akcidenata (izlivanje i paljenje naftnih derivata). Posredno, zagađeno zemljište i atmosfera utiču na kvalitet podzemnih voda, koje su od velikog značaja kao najveći rezervoari pijaće vode u svetu.

Prema podacima SZO i Ujedinjenih Nacija, procenjuje se da potrošnja vode raste za 1% godišnje od 1980. godine, a do 2050. godine se očekuje porast potrošnje za 20 do 30% u odnosu na trenutni. Od ukupne globalne potrošnje vode, oko 69% je za potrebe poljoprivrednih aktivnosti i to najviše u zemljama u razvoju. U razvijenim zemljama potrošnja vode u industriji i domaćinstvima je u porastu dok se pad potrošnje beleži u poljoprivrednim aktivnostima. Pojam kojim se opisuje narušavanje prirodnog vodnog režima je **vodni stres**, koji se procenjuje preko indeksa eksploatacije vode, tj. odnosa ukupne godišnje količine obnovljivih i zahvaćenih resursa vode. Preko 2 milijarde ljudi živi u zemljama koje se bore sa vodnim stresom; u 31 zemlji u svetu vodni stres je između 25% i 70%, a u čak 22 zemlje vodni stres je veći od 70%.

Oko 2,2 milijarde ljudi na svetu nije snabdeveno bezbednom vodom za piće, a oko 297 000 dece mlađe od 5 godina umre svake godine usled bolesti izazvanih lošim uslovima života i nebezbednom pijaćom vodom (slika 3.7). Takođe, 80 % otpadnih voda se vraća u ekosisteme bez prethodnog tretmana, a 90% prirodnih nepogoda se desi usled narušenog vodnog režima proizvodeći velike ekonomske gubitke (slika 3.7).

Slika 3.7. Posledice vodnog stresa i narušavanja hidrološkog ciklusa



Zagađenje vode može biti **fizičko** (termalno zagađenje i prisustvo radioaktivnih elemenata), **hemijsko** u vidu narušene hemijske ravnoteže usled povećanih koncentracija štetnih materija u vodi, i **biološko**, okarakterisano prenamnožavanjem pojedinih vrsta organizama u vodi. Voda kao osnova hidrosfere ima osobinu da rastvara i organske i neorganske materije, i na taj način obezbeđuje njihov transport i kruženje u litosferi, atmosferi i biosferi. Velika pokretljivost vode omogućava da ona potpomaže procese degradacije litosfere, i na taj način obezbeđuje mobilizaciju i transport neorganskih materija iz čvrste u tečnu fazu. Takođe, voda rastvara i vezuje pojedine gasovite materije iz atmosfere, pa svojim ukupnim delovanjem utiče na raspodelu materije u multifaznom sistemu voda–vazduh–zemljište (litosfera).



Naftne mrlje stvaraju toksične slojeve na površini vode, ometajući razmenu gasova i ugrožavajući živote morskih organizama, dok u priobalnim ekosistemima narušavaju staništa i dugoročno ugrožavaju biodiverzitet.

Usled rastvaranja produkata antropogenih aktivnosti (smeća, zagađenja iz vazduha, zemljišta), u vodi se kao štetne materije mogu naći teški metali, PAHs, PCBs, pesticidi, organske i neorganske industrijske otpadne materije. Takođe, kako voda predstavlja izvor života za mnoge organizme, posebni niži oblici živih organizama bakterije, virusi, gljive, alge i drugi, prisutni u vodi mogu štetno uticati na čoveka, biljke i životinje. Degradacija ovog organskog materijala, biološkog porekla potpomognuta vodom i kiseonikom iz vazduha, odvija se u okviru prirodnih procesa obnove hidrosfere i kruženja materije u prirodi. Ravnotežu, kao i u ostalim podsystemima životne sredine, narušava prisustvo neuništivih agensa, rastvorenih oblika teških i štetnih elemenata, i slabo razgradive organske materije (pesticidi, boje, lakovi).

3.5.4. Zagađenje atmosfere

Atmosfera, kao složeni podsistem životne sredine u stalnoj je interakciji sa ostalim podsistemima, i veoma je heterogena po svom sastavu. Pored gasova organskog i neorganskog porekla, u najnižim slojevima atmosfere, vazduhu nalaze se suspendovane čestice, aerosoli, vodena para i druge supstance u čvrstom i tečnom obliku. Suština procesa zagađenja atmosfere sastoji se u: promeni hemijskog sastava u određenim slojevima atmosfere; promeni apsorpcionih karakteristika u odnosu na zračenje koje dolazi iz kosmosa; promeni cirkulacije vazдушnih masa i sadržaja vode u atmosferi.

Kao i u ostalim medijumima, osnovna podela prisutnih štetnih materija je na one prirodnog i antropogenog porekla (supstance nastale kao posledica delovanja čoveka u životnoj sredini). Kao najznačajniji prirodni izvori najčešće se navode: vulkani, pustinje, šumski požari, emisija elemenata iz Zemljine kore (radon) degradacija hemijskih materija u vodi i litosferi. Daleko štetniji je uticaj zagađujućih materija poreklom iz antropogenih izvora počev od industrijske revolucije do danas. Prema poreklu zagađujućih materija u atmosferi (vazduhu) moguće je takođe kategorisati agense na one fizičkog, hemijskog i biološkog porekla. Čvrste materije, suspendovane čestice, čađ i prašina su fizičkog, gasovi i supstance rastvorene u vodi hemijskog, a virusi, bakterije, spore i polen, agensi biološkog porekla.

Prema tipu izvora iz koga se emituju zagađujuće materije u atmosferu, moguće je izvršiti podelu na stacionarne (industrijski izvori, deponije, dimnjaci) i mobilne izvore zagađenja (vozila, tj. saobraćajne aktivnosti). Takođe, prema načinu emisije izvori mogu biti tačkasti (odžaci, auspusi) ili difuzni (požari, deponije).

U procesima zagađenja i promenama koje se dešavaju u atmosferi podjednaku ulogu imaju i neorganske (ugljendioksid, sumporovi i azotovi oksidi, troposferski ozon) i organske (VOCs, POPs, metan) materije. Štetne materije utiču na degradaciju atmosfere jer se usled povećanja koncentracije gasova, sa dokazano štetnim uticajem na zdravlje i životnu sredinu, narušava hemijska ravnoteža i uspostavljeni prirodni balans. Lokalno, najznačajniji uticaj zagađenja vazduha je na zdravlje ljudi, kvalitet i dužinu života. Najnovija istraživanja pokazuju da je u vazduhu prisutno preko 400 jedinjenja, još uvek nedovoljno istraženih, koja imaju štetne akutne i hronične efekte na zdravlje ljudi čak i pri veoma niskim koncentracijama. Globalne posledice zagađenja vazduha ogledaju se u promeni klime na Zemlji i povećanju prosečne temperature poslednje dve decenije. Posledice klimatskih promena su i promena u režimu padavina, u hemijskom sastavu i ravnoteži u hidrosferi; dolazi do ubrzanja degradacije litosfere i fizičko hemijskih promena zemljišta. Proces degradacije atmosfere može se pratiti kroz

narušenu ravnotežu kiselog oksida CO_2 u atmosferi, HCO_3^- jona u hidrosferi i CO_3^{2-} u obliku karbonata u litosferi, čime se na još jedan način dokazuje kompleksnost i povezanost životne sredine.



Zagađujuće materije u vazduhu nisu uvek vidljive i dolaze iz mnogo različitih izvora, prodiru u svaki aspekt našeg života, od vazduha koji udišemo do hrane koju jedemo, ostavljajući trajne posledice na ljudsko zdravlje i životnu sredinu.

Uslovi u atmosferi često deluju katalitički na hemijske reakcije transformacije do kojih dolazi među hemijskim supstancama. Neretko su produkti ovih hemijskih reakcija takođe zagađujuće materije sa mnogo štetnijim uticajem bilo na zdravlje ljudi ili ekosisteme. Takođe, velika pokretljivost i vazдушna strujanja doprinose sa jedne strane disperziji zagađenja u atmosferi (provetravanje), ali i transportu na velike udaljenosti, čime se problem zagađenja vazduha sa lokalnog premešta na regionalni i globalni nivo.

3.5.5. Zagađenje biosfere

Pojam štetnih materija u biosferi nije jednostavan za definisanje, jer supstance koje su štetne za jednu biljnu ili životinjsku vrstu, mogu biti korisne za drugu. Na primer, određeni hemijski elementi ili jedinjenja mogu biti otrovni za jednu vrstu, dok istovremeno igraju ključnu ulogu u fiziološkim procesima druge vrste. Ovaj složeni balans regulisan je kroz međusobne odnose organizama, poznate kao biotički faktori. Biotički faktori predstavljaju međusobne interakcije

organizama unutar ekosistema, a evolucionni procesi i adaptacija omogućavaju organizmima da se prilagode specifičnim uslovima u svom okruženju. Jedna od ključnih osobina biosfere je njena sposobnost da se prilagodi promenama u količini i vrsti dostupnih materija i energije, kako bi se održala ravnoteža i funkcionalnost ekosistema.

Evolucija je omogućila organizmima da razviju mehanizme prilagođavanja prirodnim koncentracijama materija u životnoj sredini. Na primer, kiseonik, danas ključan za opstanak velikog broja organizama, u ranim fazama razvoja Zemljine atmosfere predstavljao je štetnu supstancu. U tadašnjoj redukcionoj atmosferi, kiseonik je bio otrovan za većinu ranih organizama. Međutim, razvoj fotosintetičkih organizama doveo je do povećanja koncentracije kiseonika, što je omogućilo evoluciju aeroba i uspostavljanje današnjih ekoloških uslova. Ovaj primer pokazuje kako su prirodne supstance, koje su nekada bile zagađujuće materija, kroz evolucionni proces postale osnovni resurs za održanje života.

Ipak, značajne promene u biosferi nisu rezultat prirodnih evolutivnih procesa, već su posledica ljudskih aktivnosti. Razvoj tehnologije i industrije u velikoj meri je narušio uspostavljenu ekološku ravnotežu. Ljudske aktivnosti, kao što su ispuštanje toksičnih supstanci u atmosferu, vodu i zemljište, direktno utiču na biosferu. Industrijske hemikalije, pesticidi i teški metali, koji se široko koriste u poljoprivredi i industriji, dospevaju u ekosisteme i uzrokuju teratogene, mutagene i kancerogene efekte na organizme.

Toksikološki uticaj abiogenih (neživotnih) supstanci na biosferu može biti razoran. Te materije narušavaju biološke procese unutar organizama i ekosistema, uništavajući vitalne funkcije. Toksične materije, poput dioksina, polihlorovanih bifenila (PCB), teških metala i pesticida, akumuliraju se u organizmima kroz lanac ishrane, izazivajući bioakumulaciju i biomagnifikaciju, što povećava koncentraciju toksičnih materija na višim trofičkim nivoima. Ovaj proces može imati ozbiljne posledice po zdravlje ekosistema, dovodeći do smanjenja biodiverziteta i destabilizacije prirodnih zajednica.

Pored direktnog uticaja toksičnih materija, interakcije unutar biosfere mogu takođe izazvati patogene efekte. Na primer, virusi i bakterije često izazivaju oboljenja kod viših organizama, ali su i sami deo složenih ekosistemskih mreža. Razlike između prirodnih interakcija organizama unutar biosfere i uticaja antropogenih toksičnih materija ključne su za razumevanje ekoloških poremećaja.

Dok su organizmi u biosferi razvili sposobnost da se prilagode prirodnim promenama u sredini, brzina i obim promena uzrokovanih ljudskim aktivnostima često premašuju kapacitet prirodne adaptacije, što dovodi do globalnih ekoloških problema poput gubitka biodiverziteta, zagađenja i klimatskih promena.

Zbog toga je neophodno razumeti kako se toksične materije ponašaju u biosferi, kao i njihov dugoročni uticaj na ekosisteme i ljudsko zdravlje.



Ljudske aktivnosti ozbiljno narušavaju prirodnu ravnotežu u biosferi, dok organizmi pokušavaju da se prilagode ovim brzim promenama koje često prevazilaze njihove evolutivne kapacitete.

3.6. UTICAJ ZAGAĐENJA NA ŽIVOTNU SREDINU

Posledice zagađenja životne sredine su brojne, a kao najznačajnije se uvek navode ugrožavanje života i zdravlja ljudi, kao i izumiranje i nestajanje mnogih biljnih i životinjskih vrsta. U tom smislu se često definišu dva pojma **ekološki rizik** koji se odnosi na ugrožavanje životne sredine, a rizik koji se odnosi na ugrožavanje zdravlja je **zdravstveni rizik**. Prema istraživanjima US EPA⁶ u ekološke rizike ubrajaju se globalne klimatske promene, promene debljine ozonskog sloja u stratosferi, izmena komponenti životne sredine, uništavanje populacije i gubitak biološke raznovrsnosti. Karakteristični rizici koji ugrožavaju zdravlje ljudi su spoljašnje i unutrašnje zagađenje vazduha, radioaktivnost, zagađenje pijaće vode, prisustvo toksičnih materija na radnom mestu, zagađenje zemljišta i voda pesticidima. O zagađenju vazduha, vode i zemljišta i reakcijama koje se odvijaju u ovim medijumima (npr. smanjivanje debljine ozonskog omotača u stratosferi) detaljnije je diskutovano u prethodnim poglavljima.

6 United States Environmental Protection Agency - <https://www.epa.gov/>

3.6.1. Ekološki rizik

Ekološki rizik odnosi se na mogućnost pojave štetnih efekata na ekosisteme, biljne i životinjske vrste, kao i na prirodne resurse, usled različitih faktora, među kojima su najčešći zagađenje, klimatske promene, ljudske aktivnosti i prirodne nepogode. Ovaj pojam obuhvata potencijalne opasnosti koje mogu ugroziti ekološku ravnotežu i dovesti do degradacije staništa, smanjenja biodiverziteta ili narušavanja prirodnih procesa koji su od suštinskog značaja za održavanje stabilnosti ekosistema.

Ekološki rizici mogu proisteći iz različitih aktivnosti i procesa, kako prirodnih, tako i antropogenih. Neki od ključnih izvora ekološkog rizika uključuju:

- industrijsko zagađenje – hemijski otpad, emisije gasova staklene bašte, teški metali i druge opasne materije koje se oslobađaju iz industrijskih postrojenja predstavljaju značajan rizik po kvalitet vode, vazduha i zemljišta. Industrijski zagađivači mogu izazvati ozbiljne posledice na ekosisteme, uključujući smanjenje plodnosti zemljišta, toksičnost vodenih ekosistema i gubitak biodiverziteta;
- poljoprivredne aktivnosti – intenzivna upotreba pesticida, herbicida i veštačkih đubriva može dovesti do zagađenja voda i degradacije zemljišta. Ove zagađujuće materije mogu dospeti u vodene tokove i izazvati eutrofikaciju, što dovodi do smanjenja količine kiseonika u vodi i ugrožavanja vodenih organizama;
- klimatske promene – globalno zagrevanje, promene u padavinama, porast nivoa mora i druge posledice klimatskih promena mogu ozbiljno ugroziti ekosisteme. Ugrožene su ne samo vrste koje ne mogu brzo da se prilagode promenama, već i čitavi ekosistemi, poput koralnih grebena i arktičkih ekosistema;
- urbanizacija i degradacija staništa – ekspanzija urbanih sredina često dolazi uz cenu uništavanja prirodnih staništa. Izgradnja puteva, zgrada i infrastrukture dovodi do fragmentacije staništa, čime se smanjuju migracione mogućnosti i ugrožavaju vrste koje zavise od većih, povezanih prostora;
- eksploatacija prirodnih resursa – prekomerna eksploatacija šuma, rudnih bogatstava, fosilnih goriva i vodenih resursa može ugroziti stabilnost ekosistema. Ovi procesi ne samo da iscrpljuju prirodne resurse, već mogu uzrokovati i dugoročne posledice poput erozije zemljišta, zagađenja voda i smanjenja bioraznovrsnosti.

Ekološki rizici mogu imati dalekosežne posledice, ne samo na ekosisteme, već i na društvo i ekonomiju. Jedna od ključnih posledica je gubitak biodiverziteta, gde izumiranje vrsta, degradacija staništa i poremećaji u ekološkim procesima dovode do narušavanja ekosistemske stabilnosti, što dalje može uticati na uslove za opstanak drugih organizama. Takođe degradacija ekosistema kao što su šume, močvare, okeani i reke smanjuje njihovu sposobnost da obavljaju vitalne funkcije, kao što su apsorpcija ugljen-dioksida, pročišćavanje vode i održavanje klimatske stabilnosti. Kao najznačajniji ekološki rizik najčešće se navodi delovanje na ljudsko zdravlje (o kome će posebno biti reči u narednom poglavlju), gde uticaj može biti direktan i indirektan. Na primer, zagađenje vazduha može izazvati respiratorne probleme, dok degradacija prirodnih resursa može smanjiti pristup čistoj vodi, hrani i energiji, što povećava ranjivost zajednica.

Upravljanje ekološkim rizicima zahteva sveobuhvatan pristup koji uključuje preventivne mere, monitoring i procenu potencijalnih posledica. **Sistematska procena ekoloških rizika** omogućava identifikaciju ključnih pretnji po životnu sredinu, kao i procenu verovatnoće i ozbiljnosti potencijalnih posledica. Ova procena pruža osnovu za donošenje odluka o preventivnim merama i smanjenju rizika. **Implementacija preventivnih mera**, kao što su smanjenje emisija zagađujućih materija, kontrola eksploatacije prirodnih resursa i uvođenje održivih praksi u industriji i poljoprivredi, može značajno smanjiti ekološke rizike. Uvođenje politika održivog razvoja ključni je aspekt smanjenja dugoročnih rizika po ekosisteme. Kontinuirano **praćenje stanja životne sredine** kroz monitoring kvaliteta vazduha, vode, zemljišta i biodiverziteta omogućava pravovremeno prepoznavanje novih ekoloških pretnji i preduzimanje potrebnih mera. **Podizanje svesti o ekološkim rizicima** i njihovim posledicama ključno je za mobilizaciju društva i donošenje održivih odluka. Edukacija o očuvanju prirodnih resursa, pravilnom upravljanju otpadom i smanjenju zagađenja doprinosi stvaranju ekološki svesnog društva.

3.6.2. Zdravstveni rizik

Procena rizika je složen proces koji uključuje izračunavanje i procenu mogućih štetnih efekata na ciljni organizam nakon izlaganja zagađujućim materijama. Ovaj proces uzima u obzir karakteristike zagađujućih materija, kao i sistem u kojem se izloženost dešava. Njegov osnovni cilj je da proceni verovatnoću nastanka negativnih efekata na zdravlje ljudi ili ekosistema, te da pruži osnovu za donošenje odluka o merama zaštite. S obzirom na kompleksnost zagađenja i različite puteve izloženosti, procena rizika zahteva multidisciplinarni pristup koji uključuje istraživanja i analize u oblasti ekologije, toksikologije, epidemiologije, uz poznavanje statistike.

Jedna od vodećih organizacija koja je razvila standardizovane postupke za procenu rizika je US EPA. Ova agencija je uspostavila smernice, priručnike, okvire i opšte standardne operativne procedure koje omogućavaju sistematsku procenu rizika. Iako su mnogi od ovih resursa razvijeni za specifične programe pod jurisdikcijom SAD, mnoge od smernica su dovoljno univerzalne da se mogu primeniti i u drugim zemljama, prilagođene njihovim lokalnim potrebama i zakonodavnim okvirima.

Postoji nekoliko faza procene rizika:

Identifikacija opasnosti

Prva faza procene rizika podrazumeva identifikaciju potencijalnih opasnosti koje zagađujuća materija može izazvati. Ovaj korak uključuje proučavanje mogućih negativnih efekata izloženosti, kao što su respiratorne bolesti, kancerogene promene, hormonalni poremećaji ili oštećenja reproduktivnog sistema. Identifikacija opasnosti se oslanja na eksperimentalne podatke, laboratorijske studije i epidemiološke analize koje pružaju dokaze o vezi između zagađujućih materija i mogućih bolesti. U ovoj fazi se takođe razmatraju različite karakteristike populacije, kao što su osetljivost dece, starijih osoba ili ljudi sa hroničnim bolestima, koji mogu biti pod većim rizikom.

Karakterizacija opasnosti

Nakon identifikacije opasnosti, sledi karakterizacija opasnosti, koja se fokusira na procenu odnosa doza–odgovor. Ovaj korak podrazumeva analizu kako različiti nivoi izloženosti zagađujućim materijama utiču na pojavu negativnih efekata. Na primer, veća izloženost može povećati verovatnoću pojave teških bolesti, dok niže doze mogu izazvati blage ili odložene efekte. Pored toga, karakterizacija opasnosti uključuje i analizu puteva kojima supstanca ulazi u organizam – bilo inhalacijom, ingestijom ili dermalnom apsorpcijom – kao i metaboličke procese koji utiču na eliminaciju ili akumulaciju supstance u organizmu. Ova faza je od suštinskog značaja za razumevanje stepena štetnosti zagađivača u različitim uslovima izloženosti.

Procena izloženosti

U ovom koraku procenjuje se koliko su ljudi izloženi zagađujućim materijama u određenom vremenskom periodu i na kojim mestima. Procena izloženosti uključuje analizu koncentracija zagađujuće supstance u različitim medijima (vazduh, voda, zemljište), procenu vremena trajanja i učestalosti izlaganja, kao i broj ljudi koji su izloženi. Na primer, ljudi koji žive u industrijskim zonama ili u blizini saobraćajnih koridora često su izloženi višim koncentracijama zagađujućih

materija nego oni u ruralnim oblastima. Procena izloženosti omogućava procenu stepena rizika za različite populacije, a podaci se prikupljaju pomoću monitoringa zagađenja, upitnika i analize uzoraka iz životne sredine.

Karakterizacija rizika

Završna faza procene rizika kombinuje podatke o izloženosti i rezultate odnosa doza-odgovor, kako bi se odredio ukupni rizik po zdravlje. Ovaj korak omogućava kvantifikaciju verovatnoće nastanka specifičnih zdravstvenih problema, kao što su respiratorne bolesti, oštećenja organa ili kancerogeni efekti, tokom dužeg vremenskog perioda. Na primer, za kancerogene supstance procenjuje se rizik od razvoja kancera tokom životnog veka usled kontinuirane izloženosti određenim koncentracijama. Karakterizacija rizika daje preciznu sliku o tome koliko je određena populacija ugrožena i koje mere zaštite treba preduzeti.

Smernice i standardi koje je razvila US EPA koriste se kao osnov za sprovođenje procene rizika u mnogim zemljama. Ove smernice definišu metode za procenu rizika od hemijskih i bioloških zagađivača, kao i specifične operativne procedure koje obuhvataju kvantifikaciju izloženosti i karakterizaciju rizika. Pored US EPA, Svetska zdravstvena organizacija (WHO) takođe nudi smernice koje se fokusiraju na zaštitu ljudskog zdravlja, pri čemu su njihovi standardi često strožiji i osmišljeni tako da minimiziraju rizik i za najosetljivije grupe u populaciji.

Procena rizika je ključni alat u zaštiti zdravlja ljudi i očuvanju životne sredine. Kroz identifikaciju opasnosti, karakterizaciju odnosa doza-odgovor, procenu izloženosti i kvantifikaciju rizika, moguće je precizno odrediti koje supstance predstavljaju najveću pretnju i kako se mogu minimizirati njihovi štetni efekti. Primena ovih postupaka osigurava pravovremeno donošenje odluka i primenu odgovarajućih mera kako bi se zaštitilo stanovništvo i ekosistemi od štetnih uticaja zagađujućih materija.

Rizik: verovatnoća nastanka nepovoljnog uticaja na organizam koji nastaje izlaganjem agensima pod odgovarajućim okolnostima.

Uticaj zagađujućih materija na zdravlje ljudi

Zagađenje životne sredine predstavlja jedan od najozbiljnijih izazova za zdravlje ljudi u savremenom svetu. Različite zagađujuće materije prisutne u vazduhu, vodi, zemljištu i hrani imaju potencijal da izazovu širok spektar akutnih i hroničnih zdravstvenih problema, uključujući respiratorne bolesti, kardiovaskularne poremećaje, pa čak i kancerogene efekte. Uticaj zagađenja na zdravlje ljudi zavisi od vrste, koncentracije i dužine izloženosti štetnim supstancama, a najosetljivije grupe su deca, starije osobe i hronični bolesnici. Razumevanje

mehanizama putem kojih zagađujuće materije deluju na ljudski organizam ključno je za razvoj efikasnih strategija za prevenciju i kontrolu zagađenja, kao i za očuvanje zdravlja stanovništva na globalnom nivou.

Granične vrednosti zagađujućih materija

Zagađenje životne sredine ima direktan uticaj na zdravlje ljudi, a regulisanje nivoa zagađujućih materija ključno je za očuvanje zdravlja populacije. Da bi se zagađenje kontrolisalo i sprečili negativni efekti po ljudsko zdravlje, propisuju se granične vrednosti zagađujućih materija, koje predstavljaju standarde kvaliteta životne sredine. Ove vrednosti definišu maksimalno dozvoljene koncentracije pojedinačnih ili grupa zagađujućih supstanci u različitim medijumima, kao što su vazduh, voda, zemljište, biološki uzorci i hrana, ali takođe uključuju i parametre kao što su vrednosti zračenja ili nivo buke.

Granične vrednosti se temelje na rezultatima dugoročnih epidemioloških studija, koje koriste biološke i medicinske pokazatelje kako bi se procenio uticaj zagađenja na zdravlje ljudi. Kroz statističke analize i zakone verovatnoće, određuje se **maksimalno dozvoljena doza** (MDD) neke supstance, koja izaziva štetan efekat. Na osnovu MDD, definiše se **maksimalno dozvoljena koncentracija** (MDK) zagađujuće materije u datom medijumu, koja ne bi smela biti prekoračena. Ova vrednost je poznata i pod nazivom **granična vrednost imisije** (GVI) i koristi se za procenu koncentracija zagađujućih materija u životnoj sredini, kako bi se osigurala zaštita zdravlja ljudi i očuvala ekološka ravnoteža.

Pored imisije, monitoring životne sredine obuhvata i praćenje **granične vrednosti emisije** (GVE), koja označava najveću dozvoljenu količinu zagađujuće materije koja može biti emitovana u okolinu iz izvora poput industrijskih postrojenja, saobraćaja ili građevinskih radova. GVE se najčešće izražava kao masa zagađivača po jedinici zapremine (npr. masa po kubnom metru otpadnih gasova ili otpadnih voda). Ove vrednosti su ključne za kontrolu emisija iz različitih privrednih aktivnosti i usklađuju se sa propisima međunarodnih agencija.

Najveće svetske agencije, kao što su Evropska agencija za zaštitu životne sredine (*European Environment Agency*, EEA) i US EPA, imaju usklađene granične vrednosti za većinu zagađujućih supstanci. Evropske zemlje svoje standarde prilagođavaju regulativama Evropske unije, dok se u nekim delovima Azije ovi standardi razlikuju. Svetska zdravstvena organizacija (WHO) takođe propisuje granične vrednosti zagađenja, koje su prvenstveno usmerene na očuvanje zdravlja ljudi. WHO standardi su često strožiji i propisuju niže granične vrednosti za zagađujuće materije, kako bi se smanjio rizik od negativnih zdravstvenih posledica.

Važno je napomenuti da propisane granične vrednosti ne garantuju apsolutnu zaštitu od štetnih efekata zagađenja, jer određeni deo populacije može biti osetljiv čak i na koncentracije ispod propisanih pragova. Neki ljudi mogu doživeti zdravstvene posledice čak i pri nižim nivoima zagađenja, zbog individualnih razlika u osetljivosti.

Uticaj buke na zdravlje ljudi

Buka se smatra jednim od značajnih štetnih faktora u životnoj sredini, jer ne samo da može ozbiljno narušiti fizičko zdravlje ljudi i izazvati psihološke poremećaje, već i ugroziti brojne životinjske vrste, kao i kulturna i materijalna dobra.

Dugotrajna izloženost visokim nivoima buke često dovodi do brojnih zdravstvenih problema, od kojih su najčešći problemi sa sluhom. Oštećenje sluha i gubitak sluha usled prekomerne izloženosti buci postali su uobičajeni u industrijskim zonama i kod osoba koje rade u bučnim okruženjima. Pored toga, buka izaziva fiziološke reakcije u telu, kao što je povećanje krvnog pritiska, što dugoročno može doprineti razvoju kardiovaskularnih bolesti. Naročito noćna buka može izazvati poremećaje sna, što dovodi do smanjenja koncentracije, povećanja stresa i hroničnog umora. Dugotrajna izloženost buci takođe može pogoršati mentalno zdravlje, izazivajući povećanu anksioznost, razdražljivost i simptome depresije.

Buka negativno utiče na životnu sredinu, ometajući komunikaciju i ponašanje mnogih životinjskih vrsta, poput ptica i sisara, što narušava njihove migracije i reprodukciju. Dugotrajna izloženost buci izaziva stres kod životinja, što može oslabiti njihov imunološki sistem i smanjiti reproduktivni uspeh. Podvodna buka posebno ugrožava morske organizme, dezorijentišući sisare poput kitova i delfina. Na kraju, buka smanjuje kvalitet staništa, dovodeći do gubitka biodiverziteta i narušavanja ekološke ravnoteže.

Stepen ometanja i uznemiravanja ljudi bukom meri se kroz niz ispitivanja na terenu, koristeći propisane metode za procenu. Ova ispitivanja uključuju merenje jačine zvuka u decibelima (dB), koji je osnovna jedinica za izražavanje jačine buke. Međutim, subjektivna percepcija buke može varirati od osobe do osobe, te se uznemiravanje bukom često ocenjuje na osnovu ličnih osećaja pojedinaca koji su izloženi buci. Mnoge studije sugerišu da je nivo uznemiravanja bukom veći u situacijama kada buka dolazi iz neočekivanih ili nekontrolisanih izvora, poput iznenadnih saobraćajnih gužvi ili glasnih zvukova iz susednih objekata.

Jačina zvuka, izražena u decibelima (dB), je najčešće korišćen indikator koji meri nivo zvučnog pritiska u odnosu na referentni nivo. Prekoračenje određenih pragova dB u urbanim sredinama može dovesti do ozbiljnih zdravstvenih problema.

Pored jačine, frekvencija zvuka takođe igra ključnu ulogu, jer niskofrekventni zvuci često deluju iritantnije na ljudsko zdravlje u poređenju sa zvucima viših frekvencija. Takođe, nije samo trenutna jačina buke faktor rizika, već i dugotrajna izloženost buci može izazvati štetne posledice. Stoga je važno ne samo meriti trenutne nivoe buke, već i kontinuirano pratiti njeno prisustvo u određenim sredinama kako bi se adekvatno zaštitilo zdravlje ljudi.

Uticaj zračenja na zdravlje ljudi

Jonizujuće i nejonizujuće zračenje imaju različite, ali ozbiljne efekte na zdravlje ljudi i životnu sredinu, zbog čega je njihovo razumevanje ključno za razvoj odgovarajućih zaštitnih mera. **Jonizujuće zračenje**, koje uključuje X-zrake, gama zrake, kao i alfa i beta čestice, ima dovoljno energije da izazove jonizaciju atoma i molekula. To znači da može direktno oštetiti DNK u ćelijama organizma, što dovodi do mutacija i povećava rizik od razvoja ozbiljnih bolesti, poput raka, leukemije i drugih hroničnih poremećaja. Posebno je opasno kod dugotrajne izloženosti ili u slučajevima kao što su nuklearne nesreće, gde su radnici i stanovništvo izloženi visokim nivoima zračenja. Ova vrsta zračenja, osim što utiče na ljudsko zdravlje, može imati ozbiljne posledice na životnu sredinu, izazivajući mutacije u biljnim i životinjskim vrstama, kao i degradaciju ekosistema, što dugoročno ugrožava biodiverzitet. Glavni izvori jonizujućeg zračenja su nuklearne elektrane, medicinski uređaji poput rendgen aparata, kao i prirodni izvori, poput raspada radioaktivnih elemenata u Zemljinoj kori.

Jonizujuće zračenje može izazvati mutacije u genetskom materijalu biljaka i životinja, što može smanjiti biodiverzitet i narušiti ekološku ravnotežu. Zračenje kontaminira zemljište, vodu i atmosferu, a kako se pokazalo u oblastima poput Černobila ili Fukušime, ovi efekti mogu trajati decenijama. Takođe, zračenje smanjuje sposobnost reprodukcije biljnih i životinjskih vrsta, povećava sterilitet i smanjuje otpornost na bolesti, što ugrožava biološku raznovrsnost. Radioaktivni materijali u vodenim ekosistemima kontaminiraju organizme poput riba, što utiče na ceo prehrambeni lanac, uključujući i ljude. Dugoročno, mutacije uzrokovane zračenjem mogu dovesti do izumiranja osetljivih vrsta i trajne degradacije ekosistema.

U pogledu zaštite zdravlja ljudi i životne sredine od jonizujućeg zračenja, veoma je važno izvršiti procenu stvarnog ili potencijalnog izlaganja stanovništva, identifikaciju nekontrolisanih izvora zračenja i praćenje efikasnosti mera zaštite. Tipična merenja uključuju aktivnosti radioaktivnih uzoraka, izražene u bekerelima (Bq), kao i apsorbovane doze zračenja u grejima (Gy) i ekvivalentne doze u sivertima (Sv), koje uzimaju u obzir vrstu zračenja i njegov uticaj na različita

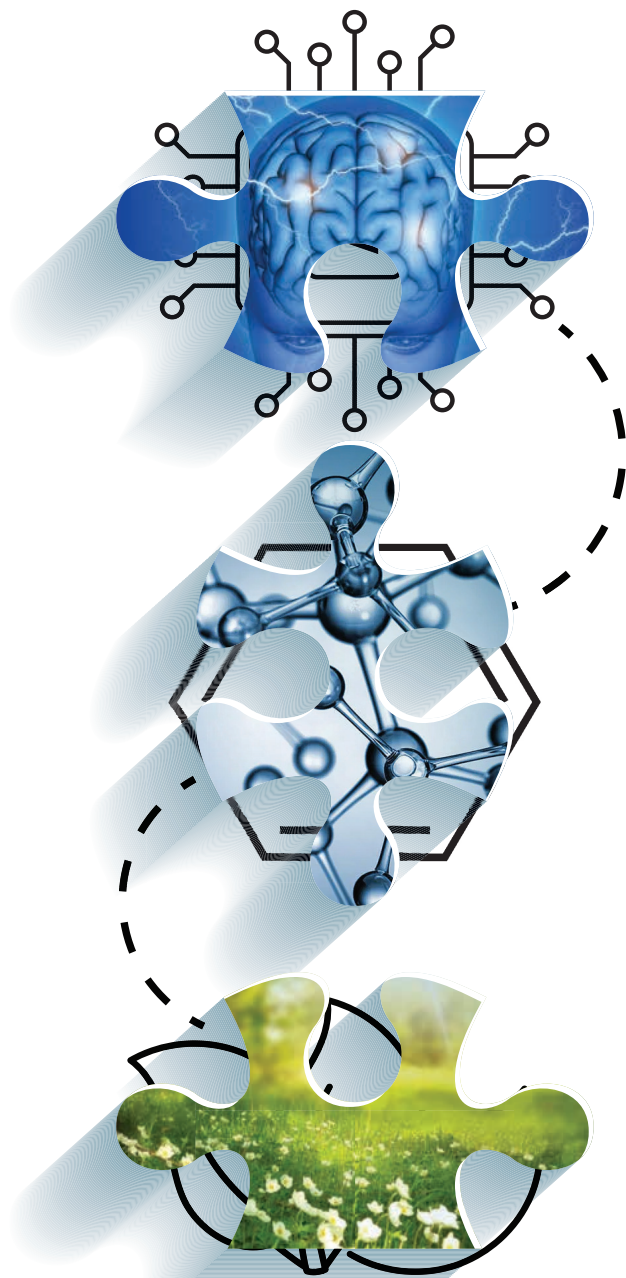
tkiva u ljudskom organizmu. Međunarodne organizacije, poput Međunarodne agencije za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency*, IAEA), postavile su standarde za bezbedno izlaganje zračenju (o čemu će detaljnije biti reči u poglavlju Monitoring životne sredine), čime se omogućava zaštita kako stanovništva, tako i ekosistema.

S druge strane, **nejonizujuće zračenje** obuhvata elektromagnetne talase niže energije, kao što su radio talasi, mikrotalasi, IR, VIS i UV zračenje, kao i elektromagnetna polja niskih frekvencija. Iako nema dovoljno energije da izazove jonizaciju atoma, dugotrajna izloženost visokim nivoima nejonizujućeg zračenja može izazvati različite štetne posledice. Na primer, izlaganje visokim nivoima UV zračenja može uzrokovati opekotine, ubrzano starenje kože, pa čak i povećan rizik od raka kože. Takođe, dugotrajna izloženost radiofrekvencijskom zračenju iz mobilnih telefona može izazvati poremećaje u funkciji mozga i potencijalno doprineti razvoju tumora.

U slučaju nejonizujućeg zračenja takođe je neophodno identifikovati nivoe zračenja kojima su ljudi izloženi u svakodnevnim aktivnostima, sa posebnim fokusom na mobilne telefone, Wi-Fi mreže i druge uređaje. Ovaj tip monitoringa uključuje merenja jačine električnog i magnetnog polja u urbanim sredinama i u blizini antena, baznih stanica i transformatora, gde je elektromagnetno zračenje najintenzivnije (detaljnije u poglavlju Monitoring životne sredine).

Osim uticaja na zdravlje ljudi, nejonizujuće zračenje može imati ozbiljne posledice po prirodne ekosisteme. Na primer, prekomerno UV zračenje može smanjiti fotosintetsku aktivnost kod biljaka, oštetiti koralne grebene i izazvati poremećaje u ponašanju životinja koje koriste elektromagnetna polja za orijentaciju. Iako su efekti nejonizujućeg zračenja generalno manje štetni u poređenju sa jonizujućim, dugoročni efekti mogu biti ozbiljni, kako za ljude, tako i za životnu sredinu. Stoga je važno sprovoditi stroge mere regulacije i monitoring oba tipa zračenja kako bi se minimizirali njihovi štetni efekti i osigurala zaštita zdravlja i ekosistema.

U Republici Srbiji, u cilju očuvanja kvaliteta životne sredine i zaštite zdravlja, uspostavljene su granične vrednosti za nivoe zagađujućih materija u vazduhu, vodi i zemljištu, kao i za nivo buke, zračenja i energije. Ove vrednosti uključuju regulisanje emisija iz fiksnih i mobilnih izvora zagađenja, kako bi se osiguralo dugoročno očuvanje životne sredine i zdravlja ljudi, a detaljniji osvrt na ovu temu biće prikazan u poglavlju o Monitoringu životne sredine.



ANALITIČKI PRISTUP RAZUMEVANJU FENOMENA I REŠAVANJU PROBLEMA U ŽIVOTNOJ SREDINI

4. ANALITIČKI PRISTUP RAZUMEVANJU FENOMENA I REŠAVANJU PROBLEMA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Fenomeni u životnoj sredini su tako složene prirode da nije moguće pružiti definitivne odgovore na probleme u okviru životne sredine na osnovu dostupnih naučnih saznanja koja karakteriše i određeni stepen neizvesnosti. Samim tim, donosioci odluka često moraju da donose izbore i odluke u uslovima (ponekad ogromnih) neizvesnosti. Pošto ove odluke mogu imati veliki uticaj na životnu sredinu i društvo, stručnjaci za životnu sredinu moraju da se suočavaju sa nekoliko izazova kao što su:

1. smanjenje neizvesnosti u proceni problema na minimum;
2. sagledavanje problema iz mnoštva perspektiva, i
3. pronalaženje načina za integraciju različitih tipova znanja.

Rešavanje ovih izazova nije jednostavno i jasno definisani recepti i metodologije ne postoje. U zavisnosti od složenosti problema, različite vrste znanja i načini njihove primene će biti odgovarajući. Na osnovu nivoa saglasnosti o ciljevima i vrednostima, i stepena slaganja nesigurnosti u znanju, problemi se najčešće dele na: strukturirane (zagađenje bukom), nestrukturirane (klimatske promene) i one između, umereno strukturirane (zagađenje vazduha). Problem se smatra strukturiranim kada se pretpostavlja da postoji sporazum o društvenim normama i vrednostima u pogledu problema i o vrsti znanja koje se koristi da se dođe do rešenja. Sa druge strane, problem se smatra nestrukturiranim kada postoji priznati sukob vrednosti u vezi sa problemom i neslaganja oko naučnih saznanja koje treba iskoristiti za njegovo rešavanje.

Strukturirani problem: zagađenje bukom; umereno strukturirani problem: zagađenje vazduha; nestrukturirani problem: klimatske promene

Imajući u vidu da su fenomeni i procesi u životnoj sredini složeni, nameće se pitanje koji pristup primeniti za razumevanje i rešavanje problema. Iako postoji mnoštvo perspektiva i polaznih osnova, za potrebe stručnjaka i analitičara za životnu sredinu, najjednostavnije je primeniti sledeće korake (slika 4.1):

1. identifikacija i definicija problema/fenomena u životnoj sredini;
2. osmišljavanje metodologije, teorijskog ili eksperimentalnog postupka, za pristup problemu;
3. sprovođenje eksperimenta ili istraživanja i prikupljanje podataka;
4. analiza eksperimentalnih podataka;
5. predlaganje rešenja problema.

Slika 4.1. Pristup složenim fenomenima/pojavama u životnoj sredini



Pristup počinje **identifikacijom problema**, kao na primer, kolika je koncentracija štetnih gasova kojima su izloženi stanovnici Beograda u toku grejne sezone i zimskih meseci? Za početak analitičar za životnu sredinu mora da razume koje informacije je potrebno prikupiti. Vrsta informacija koja je potrebna i kontekst problema su ključni za dizajniranje metodologije za pristup problemu.

Dizajniranje metodološkog postupka uključuje: informisanje o dostupnosti opreme koja je potrebna za izvođenje analize (uzorkovanje gasova); izbor odgovarajuće metode analize na osnovu utvrđenih kriterijuma (tačnost, preciznost, osetljivost, granica detekcije, količina uzorka dostupna za analizu); broj uzoraka vazduha koji će biti analizirani; procenu hitnosti potrebnih rezultata; procenu troškova pojedinačne analize; i izbor metode za obradu podataka. Zatim se izrađuje detaljan plan za sprovođenje merenja i prikupljaju se podaci.

Nakon **prikupljanja podataka**, analitičar za životnu sredinu **analizira rezultate**, tumači podatke, poredi ih sa relevantnim referentnim vrednostima ili standardima, identifikuje eventualne anomalije ili greške u rezultatima. Vrlo važan korak u analizi rezultata je **izbor statističke metode i metoda modeliranja** koje će se primeniti za obradu podataka kako bi se dobile verodostojne informacije. Da bi se dobijene informacije razumele, neophodno je da stručnjak raspolaže znanjem iz različitih nauka. Na primeru navedenog problema zagađenja vazduha štetnim gasovima, potrebno je uzeti u obzir hemijske reakcije gasova u atmosferi, uticaj meteoroloških uslova na raspodelu i transport zagađujućih materija, informacije o dominantnim izvorima zagađenja tokom zimskih meseci i intezitetu njihovog rada i sl.

Na osnovu analize podataka, analitičar za životnu sredinu predlaže **rešenje problema**. Ovo može uključivati izveštavanje o količini određene zagađujuće materije u uzorku (koncentracije gasova u vazduhu), donošenje zaključaka o štetnim efektima (procena prekoračenja dozvoljenih koncentracija gasova u vazduhu prema važećim pravilnicima) ili predlaganje mera za smanjivanje emisije zagađujućih materija.

Važno je napomenuti da pristup problemima u životnoj sredini zahteva rad interdisciplinarnih timova, kao i da se predlaganjem rešenja ne završava razumevanje i istraživanje problema u životnoj sredini. Takođe, analitički pristup nije linearan, već uključuje petlju povratnih informacija u kojoj rezultat jednog koraka može izazvati ponovno procenjivanje druga dva koraka. Rezultati i metode analize često se koriste kao osnova za dalje istraživanje i razvoj, čime se poboljšava razumevanje hemijskih procesa i reakcija, kao i njihov uticaj na okolinu i ljudsko zdravlje. Takođe, metode uzorkovanja, osmatranja i analize podataka se kontinuirano razvijaju i unapređuju, pa se dizajn primenjene metodologije često razmatra ponovo, sprovode se dodatni testovi i modifikuju predložena rešenja. Kada se predloži rešenje, rezultati su podvrgnuti spoljnoj evaluaciji koja može otvoriti nova pitanja o postojećem problemu i izazvati pokretanje novog analitičkog ciklusa. Neka od njih su: da li su prikupljene relevantne informacije da bi se rešio problem?; koji kriterijumi su razmatrani pri dizajniranju metodologije?; da li su postojali ometajući faktori koje je trebalo eliminisati i ako jesu, kako su tretirani?; da li su primenjene adekvatne metode za analizu podataka?; da li je postignuto uspešno rešenje problema?

4.1. KONCEPTUALIZACIJA FENOMENA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Konceptualizacija fenomena u životnoj sredini predstavlja ključan korak u razumevanju složenih interakcija između prirodnih procesa i ljudskih aktivnosti, koje oblikuju ekosisteme i utiču na njihovu ravnotežu. Ovaj proces podrazumeva identifikaciju i analizu ključnih pojava, kao što su klimatske promene, zagađenje, erozija zemljišta, smanjenje biodiverziteta i promene u hidrološkim ciklusima. U okviru konceptualizacije, proučava se uzajamno delovanje između različitih podsistema životne sredine – atmosfere, hidrosfere, litosfere i biosfere – kako bi se precizno utvrdili uzroci i posledice promena u životnoj sredini.

Interdisciplinarni pristup je od suštinskog značaja, jer fenomeni u životnoj sredini obuhvataju širok spektar naučnih disciplina, uključujući ekologiju, geologiju, hemiju, fiziku, društvene i ekonomske nauke kao i upotrebu računara i računarskih modela u analizi podataka. Analiza ovih pojava zahteva integraciju različitih metodologija i pristupa kako bi se razvili modeli koji mogu objasniti kompleksne procese i omogućiti bolje razumevanje uticaja čoveka na prirodu. Na primer, konceptualni modeli zagađenja mogu pomoći u razumevanju kako zagađujuće materije putuju kroz različite medijume, poput vazduha, vode i zemljišta, i na koji način utiču na ekosisteme i ljudsko zdravlje.

Pored identifikacije i analize trenutnih fenomena, konceptualizacija u životnoj sredini igra ključnu ulogu u predviđanju budućih promena. Kroz modeliranje i simulaciju različitih scenarija, moguće je predvideti kako će određeni ekološki ili klimatski faktori uticati na buduće stanje ekosistema. Ovo je posebno važno u kontekstu održivog razvoja, jer omogućava kreiranje strategija za upravljanje prirodnim resursima na način koji minimizuje negativne uticaje i osigurava dugoročnu stabilnost ekosistema.

Konačno, konceptualizacija fenomena u životnoj sredini nije samo naučni, već i praktični proces, koji je od suštinske važnosti za donošenje informisanih odluka u vezi sa zaštitom prirode. Ona pomaže kreatorima politika i menadžerima životne sredine da donesu odluke zasnovane na čvrstim naučnim dokazima i modelima, čime se osigurava bolja zaštita prirodnih resursa i očuvanje biodiverziteta.

4.2. NAUKA O ŽIVOTNOJ SREDINI

Nauka o životnoj sredini (*environmental science*) predstavlja relativno novu naučnu disciplinu koja integriše aspekte prirodnih i društvenih nauka, u cilju holističkog proučavanja ekoloških fenomena. Ova interdisciplinarna oblast oslanja se na metodologije i saznanja iz širokog spektra nauka, uključujući biologiju, fiziku, hemiju, geografiju, tehnološke i biotehničke nauke, kao i pravo, sociologiju i etiku. Takav multidisciplinarni pristup ukazuje na potrebu za sagledavanjem životne sredine iz različitih perspektiva, pri čemu je podjednako važno angažovanje kako prirodnih, tako i društvenih nauka. Razvoj ove naučne discipline pokazuje da je nužno objediniti teorijska i praktična znanja kako bi se efikasno odgovorilo na ekološke izazove modernog društva.

Tradicionalno, nauka o životnoj sredini je podeljena na proučavanje glavnih sfera – atmosfere, hidrosfere, litosfere i biosfere, o kojima je detaljno bilo reči u poglavlju Podsystemi životne sredine. Atmosfera, gasoviti omotač planete Zemlje, nije samo rezervoar gasova, već njena struktura i sastav utiču na brojne procese, uključujući regulaciju Zemljine temperature, apsorpciju štetnog UV zračenja i učestvovanje u hidrološkom ciklusu. Hidrosfera obuhvata sve vodene resurse na planeti, od kojih se preko 97% nalazi u okeanima, dok manji deo cirkuliše kroz atmosferu, zemljište i vodene tokove, igrajući ključnu ulogu u održavanju života i ekosistema. Litosfera predstavlja spoljašnji sloj Zemljine kore, koji se nalazi u neposrednoj interakciji sa atmosferom, hidrosferom i biosferom, čineći osnovu za mnoge geološke i ekološke procese. Biosfera obuhvata sve oblike života na Zemlji, a interakcije između biotičkih (živih) i abiotičkih (neživih) faktora u biosferi čine temelj ekološke ravnoteže.

Ruski naučnik Vladimir Vernadski, tvorac koncepta evolucije podsistema životne sredine, uveo je pojam noosfere (sfere uma) kao sledeće evolutivne faze u razvoju životne sredine. Prema njegovoj teoriji, noosfera obuhvata sve društvene fenomene, uključujući pravne, obrazovne, verske, tehnološke i industrijske elemente, te predstavlja biosferu kojom razumno upravlja ljudska vrsta.

Pored ovog koncepta, savremene biološke i tehnološke teorije uvode i pojam tehnosfere, koja se definiše kao skup dostignuća ljudskog tehnološkog napretka. Tehnosfera utiče na prirodne procese u biosferi, remeteći cikluse kruženja materije i protoka energije. Njen uticaj je posebno vidljiv u modernoj eri, gde tehnološke inovacije menjaju prirodne tokove i balans ekosistema. Krajem 20. veka, svet se suočio sa globalnim ekološkim izazovima, što je dovelo do usvajanja međunarodnih sporazuma koji su postavili održivi razvoj kao primarni cilj. Briga o životnoj sredini i zaštita prirodnih resursa postali su imperativ za očuvanje biosfere, u kojoj ljudska aktivnost igra ključnu ulogu u njenoj transformaciji i evoluciji.

4.3. HEMIJA I ANALITIČKA HEMIJA ŽIVOTNE SREDINE

Hemija životne sredine nije nova disciplina, a razvila se kao odgovor na probleme i brige vezane za zagađenje životne sredine nastale još u prošlom veku. Svest o hemijskom zagađenju značajno je porasla tokom dve decenije nakon Drugog svetskog rata. Jedan od primera je pojava tzv. velikog smoga Londona, odnosno smrtonosnog smoga koji je pokrivao grad London od 5. do 9. decembra 1952. godine. Nastao je usled povećanog industrijskog zagađenja i meteoroloških uslova u kojima su preovladavale niske temperature i visok vazdušni pritisak. Dim i magla doveli su London skoro do zastoja i rezultirali hiljadama mrtvih. Ipak, počeci modernog ekološkog pokreta se vezuju za 1962. godinu i objavljivanja knjige „Tiho proleće“ autorke Rejčel Karson. Glavna tema ove knjige bila je akumulacija insekticida poznatog kao DDT (dihlor-difenil-trihloretan) i drugih postojećih pesticida u lancu ishrane, što je uzrokovalo da ptice na kraju lanca proizvode jaja sa mekom ljuskom iz kojih nisu izlegli vitalni ptići. Zaključak je bio da supstance koje štete populacijama ptica takođe mogu štetiti i ljudima.

Do oko 1970. godine, veliki broj istraživanja u oblasti hemije životne sredine obavljen je u akademskim odeljenjima ili industrijskim grupama koje nisu primarno bile povezane sa hemijom. Na primer, kada su sintetisani pesticidi, biolozi su iz prve ruke posmatrali neke od manje poželjnih posledica njihove upotrebe. Kada je započeta proizvodnja deterdženata, sanitarni inženjeri su bili zaprepašćeni kad su videli kako aeracioni tankovi u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda nestaju ispod metarskih slojeva pene, dok su se limnolozi pitali zašto su prethodno normalna jezera odjednom postala zagušena smrdljivim cijanobakterijama. Takođe, postalo je opšteprihvaćeno da je zagađenje vazduha, vode i zemljišta dostiglo nepodnošljive nivoe. Kao rezultat toga, različite zemlje su usvojile i sprovele zakone da smanje koncentracije zagađujućih materija.

Danas, hemija životne sredine može pružiti odgovore na pitanja poput: da li su zagađujuće materije u vazduhu prisutne u koncentracijama nižim/većim od dozvoljenih; da li su fizičko-hemijske osobine zemljišta pogodne za uzgajanje određene biljne vrste; da li je voće bezbedno za konzumaciju u odnosu na sadržaj pesticida, da li je voda ispravna za piće; kolike su koncentracije kofeina u gaziranim pićima itd. Takođe, hemija životne sredine proučava mehanizme reakcija degradacije stratosfernog ozona, nastanka troposfernog ozona, formiranje sekundarnog organskog aerosola, raspodelu zagađujućih materija u multifaznim sistemima (voda–vazduh, voda–zemljište, voda–zemljište–vazduh). Hiljade drugih primera hemijskih fenomena u životnoj sredini mogle bi da se navedu. S tim u vezi, **hemija**

životne sredine se može definisati kao proučavanje koncentracija, izvora, reakcija, prenosa i efekata hemijskih vrsta u vodi, zemljištu, vazduhu i živom okruženju, kao i antropogenih uticaja na sudbinu zagađujućih materija.

Hemija životne sredine proučava izvore, reakcije, prenos i efekat hemijskih vrsta u vodi, zemljištu, vazduhu i živom okruženju, kao i antropogenih uticaja na njihovu sudbinu.

Na osnovu primera datih u prethodnom pasusu, jasno je da je analitička hemija nezaobilazna disciplina u hemiji životne sredine. Analitička hemija (od grčke reči „analysis“ što znači razlaganje na sastavne delove) se često se opisuje kao oblast hemije koja koristi klasične hemijske i instrumentalne metode za odvajanje, dokazivanje i određivanje pojedinih sastojaka u uzorku supstance. **Kvalitativno određivanje** podrazumeva identifikaciju sastavnih delova analizirane supstance (atomi, joni, molekuli) dok se **kvantitativnim određivanjem** utvrđuje količina sastavnih delova. Specifičnije, **pojava analitičkog signala** ukazuje na prisustvo nekog analita (npr. promena boje, izdvajanje taloga) dok **intenzitet analitičkog signala** ukazuje na to koliko je nekog analita prisutno (preko mase ili zapremine).

Međutim, veština analitičke hemije ne leži u vršenju rutinske analize na rutinskom uzorku, što se pravilnije naziva hemijskom analizom. Gotovo svi hemičari rutinski vrše kvalitativna ili kvantitativna merenja; na primer, mnogi uvodni kursevi hemije uključuju kvalitativne šeme za identifikaciju neorganskih jona i kvantitativne analize koje uključuju titracije. Analitički hemičari i analitičari zaštite životne sredine rade na unapređenju postojećih metoda, proširenju postojećih metoda na nove vrste uzoraka i razvijanju novih metoda za merenje hemijskih fenomena. S tim u vezi, prikladniji **opis analitičke hemije** je „nauka razvijanja i primene koncepata, principa i strategija za merenje karakteristika hemijskih sistema i vrsta“. Analitički hemičari obično poboljšavaju sposobnost svih hemičara da vrše značajna merenja sa manjim količinama uzoraka, u složenijim matriksima, na kraćim vremenskim skalama i na vrstama prisutnim u nižim koncentracijama.

Analitička hemija je nauka razvijanja i primene koncepata, principa i strategija za merenje karakteristika hemijskih sistema i vrsta.

4.4. FIZIKA ŽIVOTNE SREDINE

Fizika životne sredine predstavlja interdisciplinarnu naučnu oblast koja se bavi proučavanjem fizičkih procesa i fenomena koji oblikuju i utiču na životnu sredinu. Ova grana nauke obuhvata analizu energije, materije, kretanja, i dinamike prirodnih sistema, kao i interakcije između različitih podsistema životne sredine – atmosfere, hidrosfere, litosfere i biosfere. Razumevanje fizičkih zakona i mehanizama koji upravljaju prirodnim procesima ključno je za predviđanje i ublažavanje ekoloških problema, poput klimatskih promena, zagađenja, erozije zemljišta, kao i za očuvanje ekološke ravnoteže i održivih resursa.

Jedan od ključnih aspekata fizike životne sredine je proučavanje **energetskih tokova** i **zračenja** u prirodi. Sunčeva energija, koja predstavlja osnovni izvor energije za Zemljine ekosisteme, igra ključnu ulogu u regulisanju globalne temperature, kretanju atmosferskih i okeanskih struja, kao i u procesima fotosinteze. Protok energije kroz atmosferske, hidrološke i biološke sisteme, kao i njena transformacija između različitih oblika, omogućava razumevanje kako se energija raspoređuje i koristi u ekosistemima. Fizičari životne sredine analiziraju mehanizme apsorpcije, refleksije i redistribucije energije, što je od velikog značaja za razumevanje klimatskih promena i njihovih posledica.

Posebno je važan koncept radijativnog balansa između energije koja stiže do Zemlje u obliku Sunčevog zračenja i energije koja se vraća u svemir u obliku IR zračenja. Ovaj balans direktno utiče na globalnu temperaturu planete, a njegovo narušavanje, usled povećane emisije gasova sa efektom staklene bašte, jedan je od glavnih uzroka globalnog zagrevanja.

Pored energetskih tokova, fizika životne sredine proučava **kruženje materije** kroz različite prirodne cikluse, kao što su kruženje ugljen-dioksida, kiseonika, vode i drugih jedinjenja. Ovi ciklusi predstavljaju osnovu za održavanje života na planeti, a promene u njihovoj dinamici mogu imati ozbiljne posledice po ekosisteme. Na primer, poremećaji u ciklusu ugljen-dioksida, izazvani prekomernim sagorevanjem fosilnih goriva, dovode do povećanja koncentracije ovog gasa u atmosferi, što dalje utiče na klimatske promene i acidifikaciju okeana.

Fizika životne sredine takođe istražuje procese poput difuzije, advekcije i konvekcije, koji su ključni za transport toplote, materije i zagađujućih materija kroz različite medijume. **Difuzija** se odnosi na spontano širenje čestica iz oblasti više u oblasti niže koncentracije, dok **advekcija** označava transport supstanci usled kretanja fluida, poput vetra ili morskih struja. **Konvekcija** predstavlja vertikalno kretanje fluida usled temperaturnih razlika, što je od ključnog značaja za formiranje vremenskih obrazaca i prenos toplote u atmosferi i hidrosferi.

Atmosferska dinamika je još jedno važno područje fizike životne sredine, koje se bavi proučavanjem kretanja vazdušnih masa, formiranja vremenskih obrazaca i klimatskih promena. Kroz analizu atmosferskih procesa kao što su vetar, padavine, i termalne struje, fizičari životne sredine pokušavaju da predvide kako promene u energetske tokovima i koncentracijama gasova utiču na klimu i vremenske prilike. Na primer, promene u cirkulaciji vazduha, uslovljene promenom temperature okeana i atmosfere, dovode do pojave ekstremnih vremenskih uslova poput suša, poplava i oluja.

Takođe, fizički procesi kao što su **refleksija**, **apsorpcija** i **prelamanje** svetlosti utiču na optička svojstva atmosfere, kao što su pojava duge, halo efekti ili efekat staklene bašte. Proučavanje ovih pojava pomaže u boljem razumevanju interakcije između sunčevog zračenja i atmosferskih sastojaka, poput vodene pare, ugljen-dioksida i

Fizika životne sredine takođe proučava kako se zagađujuće materije transportuju kroz atmosferu, vodu i zemljište, kao i procese njihove **disperzije** i **taloženja**. Kretanje zagađujućih materija, bilo da su u gasovitom, tečnom ili čvrstom obliku, zavisi od fizikalnih karakteristika medijuma kroz koji se kreću, kao i od vremenskih uslova. Razumevanje ovih procesa omogućava tačnije predviđanje širenja zagađenja i pomaže u razvoju efikasnih metoda za njihovu kontrolu i smanjenje štetnog uticaja na ekosisteme i ljudsko zdravlje.

4.5. EKOLOGIJA

Ekologija je mlada naučna disciplina koja se razvila polovinom prošlog veka kao sinteza više istraživačkih pravaca koji se bave proučavanjem kompleksne strukture i zakonitostima funkcionisanja prirode u celini, kao i njihovim istorijskim razvojem. Razvoj ekologije započeo je opisivanjem prirode, biološke raznovrsnosti, proučavanjem odnosa između vrsta živih organizama i okruženja u kome žive. Začetnicima se smatraju Ernest Hekel i Čarls Darwin, koji su se bavili ovom problematikom sredinom 19. veka.

Ekologija se smatra specifičnom granom nauke o životnoj sredini koja proučava interakciju između organizama i njihovog okruženja. Predmet proučavanja ekologa može biti od nivoa molekula poput nukleinskih kiselina, organela (jedro) i ćelije do odnosa jedinki u populaciji, zajednici (bicenozi), ekosistemu, biomu i na najvišem nivou, u biosferi. S druge strane, nauka o životnoj sredini proučava međusobne odnose fizičkih, hemijskih i bioloških komponenti životne sredine, kao i uticaje ljudskih aktivnosti na životnu sredinu i mogućnostima njenog očuvanja.

Ekologija proučava odnose između organizama i njihovog okruženja, a nauka o životnoj sredini proučava interakciju fizičkih, hemijskih, bioloških i antropogenih komponenti životne sredine.

Ekološki faktori

Svi uticaji koje spoljašnja sredina ostvaruje na neki organizam ili grupu organizama (biocenozu) nazivanju se **ekološki faktori**. Ekološki faktori su promenljivi u vremenu i prostoru, deluju istovremeno i međusobno su uslovljeni, a svi zajedno stvaraju uslove za opstanak nekog organizma. Sva živa bića su se tokom evolucije adaptirala na određeni opseg i način delovanja pojedinih ekoloških faktora. Intenzitet optimalnog dejstva ekoloških faktora je prirodno određen za svaku vrstu organizama. Ukoliko dođe do značajne promene ekoloških faktora, i narušavanja prirodne ravnoteže, opstanak organizama može biti doveden u pitanje.

Uticaji nežive sredine jednim imenom se zovu **abiotički**, dok su uticaji žive sredine, tj. uzajamni odnosi i zavisnost među živim bićima, **biotički ekološki faktori**. Uticaji čoveka, zbog svih specifičnosti, se posebno kategorišu u **antropogene ekološke faktore**, kao podgrupu biotičkih faktora.

Pod **abiotičkim činiocima** podrazumevaju se geomorfološki i fizičko-hemijski uslovi sredine. Oni nastaju kao rezultat fizičkih i hemijskih procesa u neživoj prirodi, i u abiotičke faktore se najčešće ubrajaju:

- faktori klime – temperatura, pritisak, vlažnost, padavine, Sunčevo zračenje, kretanje vazдушnih masa, brzina i pravac vetra, oblačnost i dr;
- faktori zemljišta – fizičke osobine tla (njegova granulacija, rastresitost, vlažnost) i hemijske osobine tla (kiselost, prisustvo organskih i neorganskih jedinjenja);
- faktori reljefa – razuđenost, nagib terena, nadmorska visina, osunčanost, izloženost stranama sveta.

Biotički ekološki faktori obuhvataju sve uticaje organizama jednih na druge. Mogu se razlikovati uticaji između pojedinih biljnih i životinjskih vrsta i međusobno uzajamno delovanje biljaka i životinja. To znači, uticaj biljaka na biljke, uticaj životinja na životinje, uticaj biljaka na životinje, i obratno. Raznovrsni su primeri međusobnih odnosa u živom svetu (lanci ishrane, simbioze, posredni uticaji na abiotičke faktore – promena osobina tla, velike biljke kao prepreka Sunčevom zračenju i dr.).

Antropogeni ekološki faktori obuhvataju sve uticaje koje čovek svojim aktivnostima ostvaruje na prirodu, i on može biti dvostruk: posredno – menjanjem fizičko-hemijskih i bioloških uslova sredine i neposredno - delovanjem na životne organizme i njihove zajednice (uključujući i ekosisteme). Delovanje čoveka na životnu sredinu je svakodnevno, svestrano i često veoma negativno. Intenzivni porast industrijskih, saobraćajnih, poljoprivrednih i drugih aktivnosti koje karakterišu savremeni razvoj ljudskog društva, doveo je do niza štetnih uticaja na prirodu i posledica koje posredno ili neposredno utiču na opstanak brojnih biljnih i životinjskih vrsta, pa i samog čoveka.

Abiotički faktori: uticaji nežive sredine; biotički faktori: uticaji žive sredine, uzajamni odnosi i zavisnost među živim bićima; antropogeni ekološki faktori: uticaji čoveka

Ekološki problemi

Savremena ekološka istraživanja posebno se bave ulogom čoveka u biološkim sistemima i životnoj sredini. Ljudska vrsta predstavlja specifičnu komponentu biosfere, koja svojim delovanjem, menjajući odnos između žive i nežive prirode, značajno utiče na životnu sredinu. Delovanje čoveka u biosferi vođeno je pre svega njegovom težnjom da prirodu prilagodi svojim potrebama. Pored svih

prednosti koje ima kao misaono biće, čovek nanosi veliku štetu biosferi i oseća posledice promena koje sam stvara. Narušavanje prirodne ravnoteže i promene koje nastaju kao posledica antropogenih uticaja, identifikovani su još sredinom 20. veka kao globalni ekološki problemi.



„Čini mi se da pokušaj prirode da na ovoj planeti stvori misaono biće nije uspeo“ Maks Born

Po posledicama koje uzrokuju jedan od najznačajnijih ekoloških problema današnjice su **klimatske promene**. Elementi koji karakterišu klimu na Zemlji su promenljivi, ali kada se na prirodnu varijabilnost doda i komponenta promena koje nastaju kao posledica narušene prirodne ravnoteže, govorimo o promeni klime. Promena klime se može objasniti na primeru globalnog porasta temperature vazduha na Zemlji. Sunčevo zračenje reflektovano od Zemljine površine biva delimično propušteno, reflektovano i jednim delom apsorbovano od molekula gasova i vodene pare u atmosferi. Apsorpcija zračenja dovodi do zagrevanja prizemnih slojeva vazduha, pojave poznate kao **efekat staklene bašte**. U odsustvu ovog efekta temperatura na Zemlji bi bila -18°C , i ona bi bila samo jedna u nizu beživotnih planeta Sunčevog sistema. U procesima intenzivne proizvodnje i potrošnje energije, došlo je do značajnog porasta koncentracija gasova staklene bašte u atmosferi (ugljiendioksid – CO_2 , azotsuboksid – N_2O , troposferski ozon – O_3 , metan – CH_4 , hlorfluorougljenici – HFC), što je pojačalo pomenuti efekat i doprinelo povećanju globalne temperature na planeti. U 20. veku prosečna temperatura na Zemlji, koja je bila nešto manje od 15°C porasla je za jedan stepen, što je veći porast nego za proteklih 10 000 godina. Trend rasta

temperature nastavlja se i poslednjih godina, a očigledne posledice promene klime su: globalno zagrevanje, otopljanje leda na polovima, porast nivoa okeana i mora, vremenske nepogode, i dr. Klimatske promene su globalni ekološki i ekonomski problem savremenog društva, bilo da se radi o direktnom uticaju na život ljudi (**suše, poplave, požari**, i dr.) ili posrednom, kao što su nedostatak i otežana proizvodnja hrane, pojava i širenje zaraznih bolesti.

U nizu globalnih ekoloških problema posebno se izdvaja **zagađenje vazduha**, koje je sve više predmet analiza i naučnih istraživanja poslednjih godina. Svetska zdravstvena organizacija u svom poslednjem izveštaju upozorava da oko 99% ljudske populacije udiše vazduh lošeg kvaliteta, što znači da su koncentracije zagađujućih materija više od propisanih graničnih vrednosti. Pored gasova staklene bašte, atmosferskih aerosola, sumpornih i azotovih oksida, novije studije pokazale su da je u atmosferi povećana koncentracija još oko 200 jedinjenja sa štetnim uticajem na životnu sredinu i zdravlje ljudi.

Prirodnu ravnotežu u značajnoj meri narušavaju i druge aktivnosti čoveka, kao što su **krčenje šuma** radi dobijanja obradivog zemljišta, kao i **degradacija i zagađenje zemljišta prekomernom upotrebom pesticida**. Pomenute aktivnosti prvenstveno utiču na balans O_2 , CO_2 i ostalih elemenata u atmosferi i zemljištu, narušavajući biogeohemijske cikluse u prirodi. Značajan ekološki problem je i **opadanje biološke raznovrsnosti** na Zemlji, do koga dolazi usled masovnog uništavanja prirodnih staništa i izvora hrane pojedinim biljnim i životinjskim vrstama. Usled nemogućnosti da se brzo adaptiraju na novonastale promene, mnogi organizmi izumiru.

Savremeno energetska zavisno društvo, suočeno je sa ozbiljnim posledicama lošeg odnosa prema prirodi. Sve češće su prirodne nepogode velikih razmera. U manje razvijenim delovima sveta deficit je vode za piće, plodnog zemljišta i hrane, a prema izveštajima relevantnih svetskih zdravstvenih agencija, u porastu je i obolevanje od infektivnih i kancerogenih bolesti. Pored navedenih problema koji nastaju nesavesnim odnosom ljudi prema životnoj sredini, na globalnom planu se beleži skroman napredak u sprečavanju ekoloških problema i saniranju nastale štete.

4.6. NAUKA O PODACIMA

Nauka o podacima postaje ključni alat u analizi i upravljanju životnom sredinom, omogućavajući obradu velikih baza podataka, predviđanje ekoloških promena i donošenje informisanih odluka u cilju očuvanja ekosistema. S obzirom na složenost i dinamiku prirodnih procesa, upotreba podataka prikupljenih iz različitih izvora, kao što su stanice za praćenje indikatora u različitim podsistemima životne sredine, senzori, satelitski snimci, meteorološke stanice i terenski eksperimenti, igra ključnu ulogu u boljem razumevanju i rešavanju ekoloških izazova.

Podaci o životnoj sredini dolaze iz različitih izvora i u različitim formatima, uključujući vremenske serije koncentracija zagađujućih materija u različitim medijima, geografske informacije (GIS podaci), atmosferske promene i biodiverzitet. Raznovrsnost i količina podataka zahtevaju napredne metode prikupljanja i obrade podataka, kako bi se omogućilo tačno i pravovremeno praćenje ekoloških pojava. Nauka o podacima koristi tehnike poput čišćenja podataka, pretvaranja podataka u korisne formate, kao i integraciju različitih tipova podataka u cilju stvaranja konzistentnih baza podataka.

Podaci prikupljeni putem satelitskih snimaka omogućavaju kontinuirano praćenje promena na velikim površinama, dok stanice i senzori prate ključne parametre kao što su nivo zagađenja vazduha, temperatura vode ili koncentracija toksičnih materija na lokalnom nivou. Obrada ovih podataka zahteva korišćenje naprednih metoda obrade signala i alata za analizu velikih skupova podataka (*Big Data*), što omogućava brzo otkrivanje anomalija ili promena u stanju životne sredine.

Jedna od najvažnijih primena nauke o podacima u oblasti analize životne sredine je modeliranje ekoloških procesa i predviđanje promena. Korišćenjem statističkih i mašinskih algoritama, o čemu će detaljnije biti reči u poglavlju Analiza podataka iz životne sredine, nauka o podacima omogućava izradu modela koji simuliraju složene interakcije u životnoj sredini, kao što su kruženje ugljen-dioksida, prenos zagađujućih materija, klimatske promene ili dinamika ekosistema.

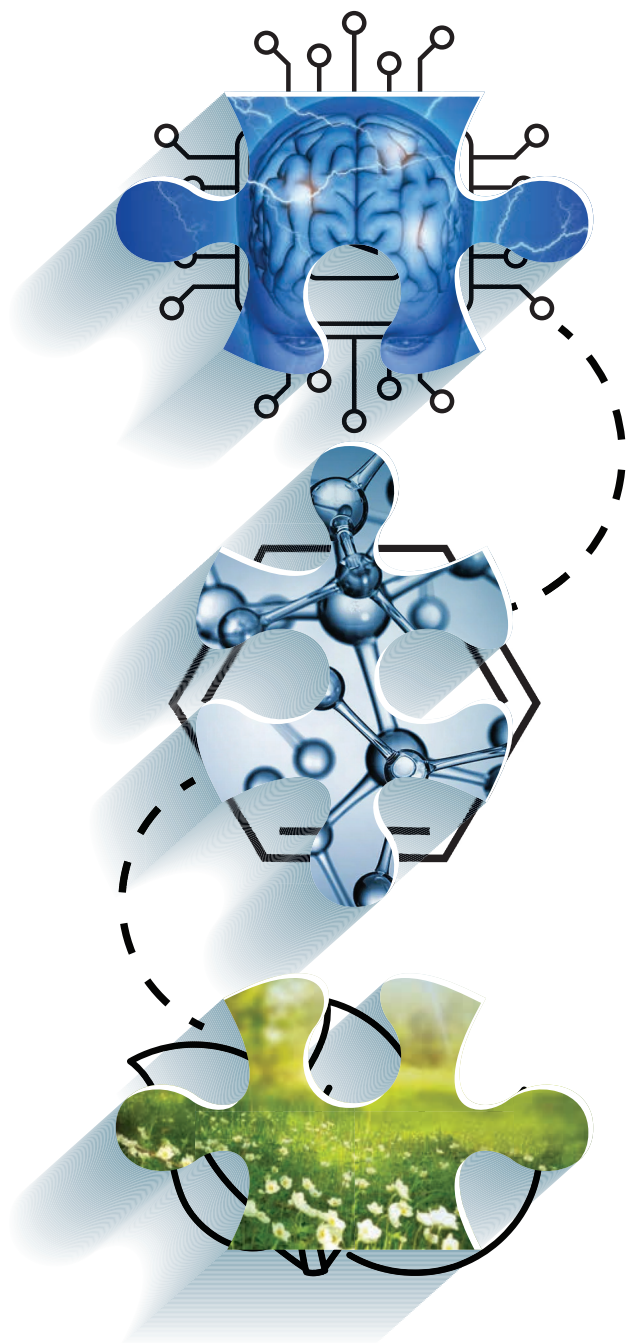
Primena mašinskog učenja omogućava analizu istorijskih podataka i prepoznavanje obrazaca koji mogu pomoći u **predviđanju** budućih ekoloških promena. Na primer, vremenske serije podataka o temperaturi i padavinama mogu se koristiti za prognozu vremenskih uslova ili za predikciju uticaja klimatskih promena na određene regione. Modeli predikcije takođe mogu pomoći u proceni rizika od poplava, šumskih požara ili zagađenja, što omogućava bolje planiranje i upravljanje prirodnim resursima.

Vizualizacija podataka igra ključnu ulogu u interpretaciji rezultata analize životne sredine, omogućavajući lakše razumevanje složenih ekoloških fenomena. Koristeći alate za grafičku prezentaciju podataka, kao što su interaktivne mape, grafici, dijagrami i 3D modeli, nauka o podacima omogućava predstavljanje informacija na način koji je lako razumljiv ne samo stručnjacima, već i široj javnosti.

Na primer, vizualizacija podataka o koncentraciji zagađujućih materija u vazduhu u različitim delovima grada može pomoći lokalnim vlastima u donošenju odluka o smanjenju zagađenja, kao i edukaciji stanovništva o opasnostima po zdravlje. Vizualizacija klimatskih promena na globalnom nivou, putem geografski utemeljenih grafičkih prikaza, može pružiti uvid u promene temperature, nivoa mora i ekoloških sistema, čime se unapređuje svest o hitnosti preduzimanja mera za očuvanje životne sredine.

Podaci prikupljeni i analizirani kroz nauku o podacima igraju ključnu ulogu u kreiranju politika održivog razvoja. Donosioci odluka se sve više oslanjaju na tačne i pravovremene informacije kako bi razvili strategije za upravljanje prirodnim resursima, zaštitu biodiverziteta i smanjenje emisija štetnih materija. Na primer, podaci o zagađenju vode i zemljišta mogu pomoći u planiranju tretmana otpadnih voda ili regulaciji industrijskih emisija.

Korišćenje podataka o klimatskim promenama omogućava razvoj strategija za adaptaciju na ekstremne vremenske uslove, kao što su suše ili poplave, dok podaci o zagađenju vazduha mogu poslužiti kao osnova za poboljšanje kvaliteta života u urbanim sredinama. U ovom kontekstu, nauka o podacima doprinosi donošenju informisanih politika koje imaju za cilj očuvanje životne sredine i poboljšanje uslova života.



OSMATRANJE ŽIVOTNE SREDINE

5. OSMATRANJE ŽIVOTNE SREDINE

Osmatranje životne sredine je ključna komponenta u upravljanju ekološkim sistemima, jer omogućava prikupljanje podataka o stanju prirodnih resursa i uticajima ljudskih aktivnosti. Ovaj proces obuhvata kontinuirano praćenje fizičkih, hemijskih, bioloških, estetskih i ostalih karakteristika životne sredine, kao i procenu trenutnih i budućih rizika. Cilj osmatranja životne sredine je obezbeđivanje pouzdanih informacija koje su ključne za donošenje odluka u vezi sa zaštitom i očuvanjem prirodnih resursa.

Osmatranje životne sredine najčešće podrazumeva praćenje stanja u podsystemima (vazduha, vode, zemljišta, buke, radioaktivnosti), ali i stanje bioloških sistema. Svaka od ovih vrsta osmatranja koristi specifične metode i tehnologije za prikupljanje podataka, što omogućava tačno praćenje promena u životnoj sredini. Na primer, monitoring vazduha uključuje merenje koncentracija zagađujućih materija, kao što su ozon, sumpor-dioksid i azotovi oksidi, dok monitoring vode prati nivoe zagađujućih materija u rekama, jezerima i podzemnim vodama. U slučaju bioloških vrsta prati se njihova brojnost, staništa i sl.

Tehnološki napredak je značajno unapredio osmatranje životne sredine. Senzori koji prikupljaju podatke u realnom vremenu, satelitsko snimanje, dronovi i automatizovani monitoring sistemi omogućavaju precizno praćenje promena u različitim ekosistemima. Na primer, sateliti se koriste za praćenje globalnih klimatskih obrazaca, deforestacije, požara i zagađenja mora, dok referentni uređaji omogućavaju tačno merenje lokalnih parametara, kao što su temperatura, vlažnost i koncentracije zagađujućih materija.

Pored tehnologija, terensko osmatranje uključuje direktno prikupljanje uzoraka zemljišta, vode, vazduha, biljaka i drugih bioloških materijala, kako bi se izvršile laboratorijske analize. Ove analize pružaju važne informacije o stanju ekosistema, biodiverzitetu i prisustvu zagađujućih materija, i u nastavku teksta biće više reči o načinu uzorkovanja i mernim analitičkim metodama koje se koriste u životnoj sredini.

Vrste osmatranja životne sredine

Jedna od važnih oblasti osmatranja životne sredine je monitoring kvaliteta vazduha, koji uključuje praćenje nivoa zagađujućih materija poput sumpor-dioksida (SO_2), azotovih oksida (NO_x), ugljen-monoksida (CO) i prizemnog ozona (O_3). Zagađenje vazduha ima ozbiljne posledice po zdravlje ljudi i životnu sredinu, zbog čega je neophodno kontinualno praćenje kako bi se blagovremeno identifikovali izvori zagađenja i preduzele odgovarajuće mere. Tehnologije koje se koriste u monitoringu vazduha uključuju automatske referentne uređaje, prenosive i fiksne senzore, kao i satelitske sisteme koji prate kvalitet vazduha na globalnom nivou. Takođe, mreže za praćenje kvaliteta vazduha postavljene su u urbanim područjima, industrijskim zonama i u blizini saobraćajnica kako bi pružile podatke o trenutnom stanju zagađenosti.

Praćenje kvaliteta vode je još jedan ključni aspekt osmatranja životne sredine, jer se vodeni resursi koriste za piće, irigaciju i industrijske procese. Zagađenje vode može imati ozbiljne posledice po ekosisteme i zdravlje ljudi, zbog čega je važno redovno pratiti parametre poput koncentracije nitrata, fosfata, teških metala i organskih zagađivača. Tehnike za praćenje kvaliteta vode uključuju uzorkovanje sa različitih lokacija (reke, jezera, podzemne vode), a zatim analizu uzoraka u laboratorijama. Automatizovani senzori se takođe koriste za praćenje hidroloških karakteristika i nivoa zagađujućih materija u realnom vremenu, omogućavajući brzo reagovanje u slučaju ekoloških incidenata.

Biomonitoring predstavlja specifičan vid osmatranja životne sredine, gde se koristi živi svet kao indikator stanja ekosistema. Biljke, životinje i mikroorganizmi reaguju na promene u životnoj sredini, što omogućava naučnicima da prate njihovo stanje i identifikuju eventualne rizike. Na primer, prisustvo teških metala u tlu ili vodi može se detektovati analizom tkiva biljaka ili životinja koje su izložene ovim zagađujućim materijama. Biomonitoring se koristi i u praćenju promene u biodiverzitetu, gde se prati bogatstvo vrsta, njihova rasprostranjenost i zdravlje populacija. Ove informacije su od ključne važnosti za donošenje odluka o zaštiti prirodnih staništa i očuvanju vrsta koje su ugrožene.

Osmatranje životne sredine omogućava identifikaciju problema i rizika pre nego što dođe do ekoloških katastrofa, što omogućava preventivne mere i efikasnije upravljanje resursima. Redovni monitoring pruža podatke o trenutnom stanju životne sredine i omogućava dugoročno praćenje promena koje mogu nastati usled klimatskih promena, industrijalizacije, urbanizacije i poljoprivredne delatnosti.

Kroz analizu prikupljenih podataka, donosioci odluka mogu kreirati strategije i politike za očuvanje ekosistema i smanjenje štetnih uticaja ljudskih aktivnosti na životnu sredinu. Takođe, javnost se može informisati o stanju životne sredine i uključiti u aktivnosti za njeno očuvanje.

Osmatranje životne sredine je osnovni alat za procenu i upravljanje stanjem ekosistema i prirodnih resursa. Koristeći napredne tehnologije, terenske metode i analize, monitoring omogućava prikupljanje ključnih informacija za identifikaciju problema i donošenje adekvatnih odluka. Ovaj proces je od suštinske važnosti za očuvanje ekološke ravnoteže, zaštitu zdravlja ljudi i planiranje održivog razvoja u savremenom društvu. O načinu kako se sprovodi i kako je regulisan monitoring svakog od podsistema životne sredine biće više reči u poglavlju Monitoring životne sredine.

5.1. UZORKOVANJE I PRIPREMA UZORAKA

Procedura monitoringa životne sredine podrazumeva i postupak uzimanja uzorka. Iako se kod praćenja pojedinih indikatora merenje može izvršiti bez uzorkovanja (npr. merenje temperature ili pH vrednosti vode u reci, merenje nivoa buke i dr.), veliki broj analitičkih metoda određivanja vrednosti indikatora se vrši u laboratoriji, analizom uzorka iz sredine koju ispituujemo.

Osnovni cilj uzorkovanja je da se sakupi dovoljno materijala da bi monitoring životne sredine mogao da se izvrši tačno i precizno, i da uzeti uzorak obezbedi rezultat koji će adekvatno reprezentovati sastav materijala koji se analizira. Reprezentativan je svaki uzorak koji ima isti sastav kao i sredina iz koje je uzet, i on mora ostati nepromenjen do trenutka kada se vrši analiza. Najčešća podela uzorkovanja je na **aktivno i pasivno uzorkovanje**. Aktivno podrazumeva dinamičke sisteme, protok, stalnu aktivnost operatera ili instrumenta, dok pasivno uzorkovanje ne zahteva stalno prisustvo, kao ni stalno merenje. Tip uzorka koji se uzima, zavisi od medijuma koji se ispituje, ali i od karakteristika izvora zagađenja. Najčešće se uzima **pojedinačni (trenutni) uzorak**, koji se karakteriše jednokratnim uzorkovanjem u kratkom vremenskom intervalu (uzorak mulja sa dna reke, uzorak gasa u evakuisanim posudama, i dr.). Ovakav uzorak je reprezentativan za analizirano mesto ako se uslovi i stanje životne sredine sporo menjaju. **Kompozitni (mešoviti) uzorak** dobija se mešanjem više pojedinačnih uzoraka, i koristi se u cilju određivanja opštih karakteristika. Pojedinačni uzorci se mogu razlikovati po vremenu ili po mestu uzorkovanja, pa se često za potrebe analiza koristi **integralni (srednji) uzorak**, koji daje informaciju o srednjoj vrednosti neke zagađujuće materije u određenom vremenskom intervalu (srednja dnevna koncentracija koncentracije aerosola u vazduhu).

5.1.1. Uzorkovanje zemljišta

Procedura uzimanja uzoraka podrazumeva da se za svaki tip zemljišta u okviru kvadrata mreže vrši izbor reljefne konfiguracije terena koja na najbolji način predstavlja to zemljište. Posle izbora reljefne konfiguracije, obeležava se kvadrat dimenzija 25×25 m i deli na 25 kvadrata dimenzija 5×5 m. Na ivici kvadrata 25×25 m otvara se pedološki profil do 2 m dubine. Ostali kvadrati se koriste za uzimanje uzoraka zemljišta iz bušotina koje se otvaraju u preseku dijagonala kvadrata dimenzija 5×5 m. Slučajnim odabirom uzimaju se uzorci iz šest kvadrata po horizontima koji se identifikuju na osnovnom profilu. Od šest uzoraka iz svakog horizonta formira se kompozitni uzorak. Broj kompozitnih uzoraka jednak je broju horizonata u pedološkom profilu. Svako sledeće otvaranje pedološkog profila se obavlja na drugoj ivici kvadrat 25×25 m, a svako sledeće uzimanje uzoraka zemljišta se vrši u drugih šest kvadrata dimenzija 5×5 m, vodeći računa da ne dođe do ponavljanja. Pojedinačno uzorkovanje zemljišta na određenim tačkama na lokalitetu se obavlja pedološkom (holandskom) sondom iz svakog horizonta definisanog u opisu unutrašnje morfologije zemljišta.

Nakon uzorkovanja vrši se opis pedološkog profila zemljišta, koji sadrži: 1) opšte podatke o lokalitetima na kojima se obavlja monitoring; 2) opis pedogenetskih faktora: matični supstrat, klima, reljef, prirodna vegetacija područja, način korišćenja zemljišta; 3) opis spoljašnje morfologije zemljišta: stenovitost površine, skeletnost, površinska iscvetanja soli, proces erozije, pokorica, površinske pukotine i vodoleže; 4) opis unutrašnje morfologije zemljišta (opis pedološkog profila): broj i dubina horizonata u zemljištu, izgled donje granice horizonata, zastupljenost, veličina, oblik i vrsta skeleta, procena teksture zemljišta, stepen humifikacije biljnih ostataka, boja zemljišta, prisustvo i boja mazotina, identifikacija oksido-redukcionih procesa u zemljištu, sadržaj lakorastvorljivih soli, pH vrednost zemljišta, procena sadržaja organske materije, procena sadržaja karbonata i njihov oblik, procena sadržaja gipsa i njegov oblik, procena vlažnosti zemljišta, procena gustine suvog zemljišta (zapreminske mase), procena strukture i konzistencije zemljišta, procena ukupne poroznosti, prisustvo i prečnik korenova i ostala biološka svojstva, procena prevlaka, procena zbijenosti - cementacije, miris zemljišta i procena umetaka antropogenog porekla.

Ispitivanje uzoraka podrazumeva određivanje fizičkih, hemijskih i mikrobioloških svojstva zemljišta, pri čemu se ona mogu podeliti na opšte i specifične parametre za karakterizaciju.

Parametri kvaliteta zemljišta

Da bi se na nekom lokalitetu odredio tip zemljišta, određuju se **opšti parametri**, koji obuhvataju niz osnovnih svojstava zemljišta i saznanja o dejstvu pedogenetskih faktora. Zemljište se ispituje na pedološkom profilu koji se otvara do 2 m dubine (ili do čvrste stene, ili do podzemne vode). Nekada je moguće na samom terenu utvrditi pripadnost sistematskoj kategoriji, pa se neposredno nakon iskopa ispituje građa profila i njegove morfološke osobine po horizontima, kao i uticaj pedogenetskih faktora. Nakon uzimanja uzorka zemljišta u laboratoriji se na osnovu određivanja sadržaja humusa, boje zemljišta, kiselosti, sadržaja kalcijum-karbonata, određivanja mehaničkog sastava, određivanja stepena zasićenosti bazama i karakterizacije matičnog supstrata može utvrditi pripadnost sistematskoj kategoriji na nivou tipa.

Specifični parametri zemljišta koji se analiziraju na nekom lokalitetu obuhvataju prisustvo vodorastvorljivih i adsorbovanih katjona (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} i Na^{+}), vodorastvorljivih anjona u zemljištu i podzemnoj vodi, kao i određivanje elektroprovodljivosti vodnog ekstrakta. Takođe, određuje se dubina i oscilacije u nivou podzemnih voda, kao i dubina nepropusnog horizonta. Za antropogena zemljišta, odnosno zemljišta izmenjena pod uticajem čoveka kroz poljoprivrednu aktivnost ili kao posledica delovanja industrije, kao i različite vidove degradiranih zemljišta, potrebno je ispitati uticaje i dejstva poljoprivredne proizvodnje kroz određivanje sadržaja lako pristupačnog fosfora i kalijuma, ukupnog azota, sabijenosti, ostataka pesticida, erozionih procesa, smanjenja biodiverziteta, mikrobioloških svojstava. Kod zagađenih zemljišta je potrebno odrediti na osnovu tipa zagađenja i sadržaje ukupnih i pristupačnih oblika teških metala, sadržaj anjona u zemljištu i podzemnoj vodi, POPs, organo-metalna jedinjenja, azbest, ugljovodonike naftnog porekla (frakcije C6 – C40), radionuklide i patogene organizme.

Na mestima koja nisu uvrštena u program državnog monitoringa, uspostavlja se praćenje kvaliteta zemljišta na nivou lokalne mreže. Izbor lokaliteta za monitoring na nivou lokalne mreže zavisi od specifičnih uslova svake lokalne samouprave, pri čemu treba voditi računa o prisustvu i rasprostranjenosti dominantnih pritisaka koji dovode do degradacije zemljišta pretežno pod uticajem čoveka (erozija, zagađenje, sabijenost i narušavanje fizičkih svojstava, gubitak organskog ugljenika i biodiverziteta, salinizacija, alkalizacija, acidifikacija, klizišta i poplave, prekrivanje zemljišta i dr.). Prilikom primene i državnog i lokalnog monitoringa postoji obaveza formiranja Katastra kontaminiranih lokacija, koji je skup relevantnih podataka o ugroženim, zagađenim i degradiranim zemljištima. Ovaj dokument je u nadležnosti Agencije za zaštitu životne sredine i deo je informacionog

sistema zaštite životne sredine u Republici Srbiji. Osnovna namena Katastra je da obezbedi sistematične podatke o izvorima zagađenja kao što su tip, količine, metoda i lokacija ispuštanja zagađujućih materija u zemljište kako bi se sprovele preventivne i remedijacione mere.

5.1.2. Uzorkovanje vode

Uzorkovanje vode predstavlja ključni proces za procenu njenog kvaliteta, pri čemu se koriste strogo definisane standardizovane metode i protokoli. Standardizacija, kao skup koordiniranih aktivnosti, omogućava stvaranje jedinstvenih pravila i smernica za sprovođenje uzorkovanja, što garantuje usklađenost rezultata sa međunarodnim standardima i obezbeđuje pouzdane podatke o kvalitetu vode. U Republici Srbiji, uzorkovanje vode sprovodi se u skladu sa nizom standarda, kao što su SRPS ISO 5667, koji obuhvataju uputstva za uzimanje uzoraka iz različitih izvora, uključujući površinske, podzemne, pijaće i otpadne vode. Na primer, SRPS ISO 5667-1 definiše smernice za izradu programa uzorkovanja, dok SRPS ISO 5667-3 pruža smernice za zaštitu i rukovanje uzorcima nakon uzorkovanja.

Pravilno uzorkovanje vode podrazumeva odabir odgovarajućih tačaka uzorkovanja, pravilnu tehniku uzorkovanja, čuvanje i transport uzoraka, te obeležavanje i dokumentovanje svih relevantnih informacija o uzorku. Za uzorkovanje pijaće vode, preporučuje se uzimanje uzoraka direktno iz mreže, uz prethodno ispiranje sistema kako bi se eliminisala eventualna kontaminacija. Ambalaža za uzorkovanje varira u zavisnosti od tipa analiziranih parametara – staklene boce se koriste za analize organskih jedinjenja, dok su plastične boce prikladne za elemente kao što su natrijum i fluoridi.

Uzorkovanje površinskih voda, poput reka, jezera i akumulacija, može se sprovesti na različite načine, uključujući uzimanje pojedinačnih, kompozitnih ili integralnih uzoraka. Pojedinačni uzorci predstavljaju trenutni presek stanja na određenom mestu i vremenu, dok kompozitni uzorci omogućavaju uvid u prosečne koncentracije zagađujućih materija tokom određenog vremenskog intervala. Integralni uzorci, koji kombinuju uzorke sa različitih dubina i širina vodene mase, koriste se za procenu varijabilnosti kvaliteta vode na većim površinama. Pravilna primena ovih metoda ključna je za tačnu procenu kvaliteta vode i donošenje odluka o njenom tretmanu i zaštiti životne sredine.

Parametri kvaliteta voda

Procena kvaliteta vode zasniva se na analizi različitih fizičkih, hemijskih, mikrobioloških i organoleptičkih parametara, koji omogućavaju klasifikaciju voda prema njihovoj pogodnosti za različite namene, uključujući pijaću vodu, industrijsku upotrebu, navodnjavanje i rekreativne aktivnosti. Ovi parametri su regulisani standardima i zakonskim okvirima kako bi se osigurala zaštita zdravlja ljudi, ekosistema i održivost vodenih resursa. Na osnovu stanja voda i njihove podobnosti za specifične upotrebe, prirodne vode se klasifikuju u različite klase kvaliteta. Ova klasifikacija se vrši na osnovu detaljnih fizičko-hemijskih ispitivanja, koja uključuju ključne parametre opisane ispod.

Fizički parametri kvaliteta vode odnose se na karakteristike koje mogu biti merene neposredno ili jednostavnim postupcima. Proticaj, kao jedan od ključnih parametara, određuje brzinu i količinu vode koja prolazi kroz određeno područje. Temperatura vode utiče na rast i opstanak akvatičnih organizama, ali i na efikasnost hemijskih reakcija i koncentraciju kiseonika. Suspendovane čestice predstavljaju zagađenja poput mulja i peska, koji mogu smanjiti providnost vode i uticati na život u vodi. Boja i mutnoća (turbiditet) ukazuju na prisustvo organskih ili neorganskih materija, dok se radioaktivnost analizira kako bi se utvrdilo prisustvo potencijalno opasnih izotopa u vodi.

Fizičko-hemijski parametri uključuju kombinaciju fizičkih i hemijskih osobina vode koje ukazuju na njenu sposobnost da provodi struju i reaguje na određene hemijske supstance. Vrednost pH opisuje kiselost ili baznost vode i predstavlja ključni faktor za održanje hemijske ravnoteže i biološke aktivnosti u vodi. Elektroprovodljivost ukazuje na prisustvo rastvorenih jona, dok se UV ekstinkcija na 254 nm koristi za detekciju organskih supstanci, poput huminskih i fulvo kiselina.

Hemijski parametri kvaliteta vode obuhvataju analizu širokog spektra supstanci, uključujući neorganske i organske komponente. Neorganske komponente uključuju katjone i anjone, pri čemu se posebno ispituje prisustvo toksičnih metala poput olova, žive, kadmijuma i arsena, koji mogu predstavljati ozbiljan rizik po zdravlje. Parametri, kao što su tvrdoća, alkalitet i aciditet, direktno utiču na hemijsku stabilnost vode i njen uticaj na cevovode, postrojenja i akvatične ekosisteme. Nutrijenti, kao što su azot (N) i fosfor (P), važni su za održanje biološke proizvodnje, ali njihovo prekomerno prisustvo može dovesti do eutrofikacije, procesa prekomernog rasta algi koji ugrožava ekosisteme.

Organski parametri u vodi, poput surogat parametara – HPK (hemijska potrošnja kiseonika), BPK5 (biološka potrošnja kiseonika), ukupni organski ugljenik (TOC) – pružaju informacije o prisustvu organskih materija koje potiču

iz otpadnih voda, industrijskih zagađenja ili prirodnih procesa razlaganja. Prisustvo pesticida i organohlornih jedinjenja (PCB) ukazuje na zagađenje iz poljoprivrednih i industrijskih izvora. Takođe se ispituju policiklični aromatični ugljovodonici (PAH), koji su kancerogeni i dolaze iz sagorevanja fosilnih goriva.

Organoleptički parametri obuhvataju karakteristike koje se mogu proceniti čulima, kao što su ukus, miris i vidljive otpadne materije. Iako ovi parametri nemaju direktan uticaj na zdravlje, oni su važni za subjektivni doživljaj kvaliteta vode. Na primer, prisustvo nepoželjnog ukusa ili mirisa može ukazivati na prisustvo hemijskih supstanci ili bioloških kontaminanata, dok vidljive otpadne materije upućuju na neadekvatno tretiranje vode ili zagađenje iz okoline.

Mikrobiološki parametri su ključni za ocenu zdravstvene ispravnosti vode, jer prisustvo određenih mikroorganizama može direktno ugroziti zdravlje ljudi. Koli bakterije i žive klice su pokazatelji fekalnog zagađenja, što znači da voda može biti kontaminirana otpadnim vodama ili životinjskim izmetom. Prisustvo ovih mikroorganizama zahteva hitne mere prečišćavanja i dezinfekcije kako bi se osigurala bezbednost potrošača.

5.1.3. Uzorkovanje vazduha

Uzorkovanje vazduha je ključan deo sistematskog praćenja kvaliteta vazduha u cilju određivanja koncentracija različitih zagađujućih materija u atmosferi kako bi se ocenilo stanje životne sredine i identifikovali potencijalni rizici po zdravlje ljudi. Ovaj proces uključuje merenje osnovnih parametara kvaliteta vazduha, kao što su suspendovane čestice (TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$), sumpor-dioksid (SO_2), azotni oksidi (NO_x), čađ, ugljen-monoksid (CO), ozon (O_3), teški metali, benzo(a)piren, kao i isparljiva organska jedinjenja poput benzena, toluena, etilbenzena i ksilena (BTEX). Obim merenja zavisi od vrste i intenziteta emisija u neposrednoj okolini mernih mesta, a ona se klasifikuju prema tipu područja – gradska, prigradska i ruralna – i prema izvorima emisija, na merna mesta izložena saobraćajnim aktivnostima, industrijskim ili bez direktnog uticaja izvora zagađenja (*background*).

Odabir makrolokacije za merne stanice vrši se na osnovu demografskih, geografskih i klimatsko-topografskih karakteristika područja, kao i broja i vrste zagađivača, poput industrijskih postrojenja ili frekvencije saobraćaja. Pored toga, uzimaju se u obzir i raspoloživi podaci o kvalitetu vazduha u datom području. Mikrolokacija mernih stanica mora da zadovolji stroge tehničke kriterijume kako bi se osiguralo pravilno uzorkovanje. Na primer, merno mesto mora biti postavljeno na otvorenom prostoru, udaljeno od zgrada, drveća i drugih prepreka koje bi mogle ometati strujanje vazduha. Uzorkivači za zagađujuće materije, poput

PM čestica, NO_x i CO, moraju biti postavljeni na tačno određenim visinama i udaljenostima od izvora zagađenja, kao što su saobraćajnice, kako bi uzorci bili reprezentativni za datu lokaciju.

Uzorkovanje vazduha se vrši na visini od 1,5 do 4 metra iznad površine terena, što omogućava merenje koncentracija zagađujućih materija koje direktno utiču na ljude. Mikrolokacije mernih stanica takođe moraju ispunjavati tehničke uslove, uključujući pouzdano napajanje električnom energijom, lak pristup i odgovarajuću bezbednost, kako bi se osigurala dugoročna stabilnost i tačnost podataka o kvalitetu vazduha. Kvalitet podataka zavisi od pravilnog postavljanja uzorkivača, koji mora biti optimalno pozicioniran u odnosu na prepreke i saobraćaj, čime se osigurava da uzorci precizno predstavljaju stvarno stanje zagađenja na terenu.

Parametri kvaliteta vazduha

Osnovni parametri kvaliteta vazduha, poznati kao **kriterijumske zagađujuće materije** (*criteria air pollutants*), prikazani su u tabeli 5.1, koja uključuje i informacije o metodama uzorkovanja, merenja i relevantnim standardima koji se primenjuju u analizi navedenih zagađujućih materija. U poglavlju Instrumentalne metode za analizu uzoraka iz životne sredine biće detaljno opisane analitičke metode navedene u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Osnovni parametri kvaliteta vazduha - metode uzorkovanja i merenja

<i>Parametar</i>	<i>Princip uzorkovanja i merenja</i>	<i>Standard</i>
Čađ	<i>Uzorkovanje u toku 24 časa, analiza uzorka u laboratoriji, reflektometrija</i>	<i>ISO 9835:1993 Kvalitet vazduha - Određivanje indeksa crnog dima</i>
SO₂	<i>Automatski analizator, UV fluorescencija</i>	<i>EN 14212:2005 Ambient air quality- Standard method for the measurement of SO₂ concentration</i>
SO₂	<i>Uzorkovanje u toku 24 časa, analiza u laboratoriji, UV/VIS spektrofotometrija</i>	<i>SRPS ISO 6767:1998 Kvalitet vazduha - Određivanje masene koncentracije SO₂, metoda sa tetrahlormerkatom i pararozanilinom</i>
NO₂/NO_x	<i>Automatski analizator, hemijska luminiscencija</i>	<i>EN 14211:2005: Ambient air quality- Standard method for the measurement of NO₂ and NO concentrations</i>
NO₂	<i>Uzorkovanje u toku 24 časa, analiza u laboratoriji, UV/VIS spektrofotometrija</i>	<i>SRPS ISO 6768:1990 (E) Kvalitet vazduha- Određivanje masene koncentracije NO₂– Modifikovana metoda Gris Solcmana</i>

Kompleksnost životne sredine: integralni pristup razumevanju fenomena

<i>Parametar</i>	<i>Princip uzorkovanja i merenja</i>	<i>Standard</i>
CO	<i>Automatski analizator, IR apsorpcija</i>	<i>EN 14626:2005: Ambient air quality- Standard method for the measurement of CO by non-dispersive infrared spectroscopy</i>
O₃	<i>Automatski analizator, UV apsorpcija</i>	<i>EN 14625:2005: Ambient air quality- Standard method for the measurement of ozone by ultraviolet photometry</i>
PM10	<i>Automatski analizator, apsorpcija β zračenja</i>	<i>EN 12341:1998 Air quality- Determination of PM10 fraction of suspended particulate matter</i>
PM10	<i>Uzorkovanje u toku 24 časa, analiza u laboratoriji, gravimetrija</i>	<i>EN 12341:1998 Air quality- Determination of PM10 fraction of suspended particulate matter</i>
Benzen	<i>Automatski analizator, gasna hromatografija sa detekcijom ionizacije plamena (FID)</i>	<i>EN 14662-3:2005 Ambient Air Quality- Standard method for benzene concentrations, Part 3: Automated pumped sampling with in situ gas chromatography</i>
Benzen	<i>Apsorpcija na čvrstom adsorbentu, desorpcija sa rastvaračem, analiza na GC-FID</i>	<i>EN 14662:2005 Ambient Air Quality- Standard method for the measurement of benzene concentrations parts 1 and 2</i>
As, Pb, Cd, Ni, Cr, Mn	<i>Uzorkovanje u toku 24 časa, analiza u laboratoriji, AAS/ICP-OES/ICP-MS</i>	<i>SRPS EN 14902:2008 Standardna metoda za određivanje Pb, Cd, As i Ni u PM10 suspendovanim česticama</i>
PAH	<i>Uzorkovanje u toku 24 časa, analiza u laboratoriji, gasna hromatografija, GC-MSD</i>	<i>SRPS EN 15549:2010 Standardna metoda za merenje koncentracije benzo(a)pirena u vazduhu ambijenta</i>
Taložne materije	<i>Uzorkovanje u toku mesec dana, analiza u laboratoriji, gravimetrija/ AAS/ICP-OES/ICP-MS/IC</i>	<i>ISO /DIS 4222.2; 1980; SRPS EN 15841:2011 Kvalitet vazduha ambijenta – Standardna metoda za određivanje As, Cd, Pb i Ni iz taložnih materija</i>

5.2. BIOMONITORING

Za razliku od instrumentalnog monitoringa, koji koristi uređaje za uzorkovanje i analizu u procesima praćenja stanja životne sredine, **biomonitoring** predstavlja organizovan sistem praćenja bioloških promena na živim organizmima, čime se oslikava uticaj antropogenih aktivnosti i prirodnih procesa na stanje u životnoj sredini. Biomonitoring se temelji na analizi biljnih i životinjskih vrsta, delova njihovih organizama ili delova ljudskog organizma (izlučevina, krvi i sl.), pri čemu se merenjem koncentracija određenih supstanci dobijaju informacije za procenu stanja životne sredine u kojoj organizmi žive i razvijaju se. Koncentracije jedinjenja u organizmima, povezane sa njihovim fiziološkim i metaboličkim procesima, čine interpretaciju rezultata ovog monitoringa naučno složenim i izazovnim zadatkom.

Biomonitoring nije deo redovnog sistematskog monitoringa, već se koristi kao indikativna metoda za procenu kvaliteta ekosistema i identifikaciju zagađenja u vodi, zemljištu ili vazduhu. U biomonitoringu se koriste bioindikatori i biomonitori. Bioindikatori su organizmi (deo organizma ili zajednica organizama) koji daju informaciju o kvalitetu životne sredine na osnovu prisustva ili odsustva indikatorske vrste ili određene promene fiziološkog sastava. Biomonitor predstavlja organizam (deo organizma ili zajednica organizama) koji omogućava kvalitativno i kvantitativno određivanje uticaja zagađujućih supstanci na životnu sredinu. Aktivni biomonitoring se primenjuje korišćenjem organizama, uzgojenih ili prethodno pripremljenih u laboratoriji za praćenje kvaliteta životne sredine na lokacijama gde prirodno rastući biomonitori odsustvuju. Pasivni biomonitoring podrazumeva upotrebu organizama koji se prirodno pojavljuju u određenom ekosistemu i vrši se praćenje njihove reakcije na promene u istom. Među najčešće korišćenim bioindikatorima su lišajevi, mahovine, bakterije, ribe i ptice. Prisustvo ili odsustvo određenih vrsta biljaka i životinja u ekosistemima može ukazati na poremećaje prirodne ravnoteže ili povećan nivo zagađenja. U skladu sa Direktivom Evropske unije o vodama, **makrofite** (npr. alge, mahovine, vodene paprati i vaskularne biljke) koriste se za bioindikaciju kvaliteta voda i određivanje ekološkog statusa, što čini njihov monitoring obaveznim.

Pojedine biljne vrste, poznate kao akumulatori, imaju sposobnost nakupljanja zagađujućih materija, kao što su teški metali, u mnogo većim koncentracijama nego što su prisutne u okolini. Na primer, biljka *Eichhornia crassipes* akumulira olovo i druge toksične materije iz vode, dok je *Viola arsenika* indikator povećanih koncentracija arsena u zemljištu. Upotrebom ovih biljaka može se dobiti kvantitativna ocena stanja zagađenja. Bioindikatori kvaliteta vazduha, kao što su mahovine i lišajevi, uzimaju zagađujuće materije iz atmosfere putem apsorpcije, što omogućava merenje koncentracija tih supstanci u njihovim tkivima i indirektnu procenu kvaliteta vazduha.

Aktuelna naučna istraživanja se sve više fokusiraju na usklađivanje biomonitoringa i instrumentalnog monitoringa, te na razvijanje odgovarajuće legislative koja bi biomonitoring ustanovila kao zvaničnu metodu procene životne sredine u oblastima gde je instrumentalni monitoring otežan ili nedostupan.

Humani biomonitoring, kao posebna grana, koristi analizu bioloških uzoraka (npr. krvi, urina, kose) za procenu ljudske izloženosti zagađujućim materijama i njihovih uticaja na zdravlje. Ova metoda pruža ključne informacije o fiziološkim procesima i mogućim zdravstvenim posledicama dugoročne izloženosti zagađivačima, čime postaje sve relevantnija u naučnim istraživanjima i politikama koje se bave javnim zdravljem.

5.3. INSTRUMENTALNE METODE ZA ANALIZU UZORAKA IZ ŽIVOTNE SREDINE

Analitička hemija, često nazivana i hemija/nauka merenja, predstavlja disciplinu hemije koja koristi klasične hemijske i instrumentalne metode za odvajanje, dokazivanje i određivanje pojedinih sastojaka u uzorku supstance. Termin analitička je u vezi sa grčkom reči *analysis* što znači razlaganje na sastavne delove. Mnogi problemi u analitičkoj hemiji počinju potrebom da se identifikuje šta je prisutno u uzorku, koji atomi, molekuli, joni i ovo je obim **kvalitativne analize**, čiji primeri uključuju skrining urina sportiste za prisustvo leka za poboljšanje performansi, određivanje sastava stena i minerala ili prisustvo neorganskih elemenata na površini suspendovanih čestica u vazduhu. Veliki deo ranih istraživanja u analitičkoj hemiji je podrazumevao određivanje prisustva neorganskih jona i organskih funkcionalnih grupa. Klasični laboratorijski kursevi iz neorganske analitičke hemije koji se još uvek pohađaju na osnovnim studijama hemije zasnovane su na ovom radu. Većina kvalitativnih analiza koristi instrumentalne metode kao što su IR spektroskopija, nuklearna magnetna rezonanca i masena spektrometrija, a osnovni principi rada nekih od navedenih metoda su prikazani u narednim poglavljima.

Ipak, najčešći tipovi problema i zadataka sa kojim se susreće u analitičkoj laboratoriji su u vezi sa **kvantitavnom analizom** koja obuhvata određivanje količine sastavnih delova uzorka. Veliki deo analitičkog rada u kliničkim, farmaceutskim, ekološkim i industrijskim laboratorijama uključuju razvoj novih metoda za određivanje koncentracije ciljanih vrsta u složenim uzorcima. Primeri tipičnih kvantitativnih analiza uključuju utvrđivanje sledećeg: da li su zagađujuće materije u vazduhu prisutne u koncentracijama nižim/većim od dozvoljenih, da li je sastav

zemljišta pogodan za uzgajanje određene kulture, koliki je sadržaj pesticida u voću/povrću, da li je voda ispravna za piće, koliki je sadržaj aditiva u hrani, da li su u krvi prisutni tragovi opijata ili alkohola. Instrumentalne metode kojima se kvantifikuje sadržaj ciljane vrste ili zagađujuće materije obuhvataju hromatografiju, apsorpcione i emisione metode, čije su osnove rada diskutovane ispod.

Važan aspekt analitičke hemije kom se posvećuje značajna pažnja u analitičkim laboratorijama je razvoj novih metoda za karakterizaciju fizičkih i hemijskih svojstava. Određivanje hemijske strukture, konstante ravnoteže, brzine reakcije su primeri **karakterizacije analize**. S druge strane, **fundamentalna analiza** je usmerena ka poboljšanju eksperimentalnih metoda koje se koriste kroz proširivanje i unapređenje teorije na kojoj je se metode zasnivaju, proučavanje ograničenja metode i dizajniranje novih i modifikovanje starih metoda.

Kvalitativna analiza: šta je prisutno u uzorku? Određuju se sastavni delovi.

Kvantitativna analiza: određuje se količina sastavnih delova.

Analizom uzorka se generiše hemijski ili fizički signal (**analitički signal**) čija pojava ukazuje na prisustvo nekog analita, a intezitet ukazuje na to koliko je nekog analita prisutno odnosno veličina signala je proporcionalna količini analita u uzorku. Signal može biti bilo šta što se može meriti, uobičajeni primeri su masa, zapremina ili apsorpcija. Tehnike kojima se dobija ukupna, totalna odnosno apsolutna količinu analita nazivaju se „totalnim“ ili klasičnim tehnikama. Masa, zapremina i naelektrisanje su najčešći signali za tehnike „totalne“ analize kao što su gravimetrija, titrimetrija (volumetrija) i kulometrija. Uz nekoliko izuzetaka, signal u klasičnim tehnikama je rezultat jedne ili više hemijskih reakcija (taložne, kiselinsko-bazne, kompleksirajuće ili redoks) koje uključuju analit pri čemu stehiometrijski odnosi u svakoj reakciji moraju biti poznati.

Primenom tehnika kao što su spektroskopija, potenciometrija, voltometrija i hromatografija dobija se signal koji proporcionalan relativnoj količini analita u uzorku i one se nazivaju „tehnike koncentracije“. Većina ovih tehnika se zasniva na merenju optičkog ili električnog signala, pa su poznate i kao instrumentalne tehnike. Odnos između signala i analita je teorijska funkcija koja zavisi od eksperimentalnih uslova i instrumenta koji se koriste za merenje signala.

Pojava analitičkog signala: ukazuje na prisustvo analita (promena boje, izdvajanje taloga).

Intezitet analitičkog signala: ukazuje na to koliko je nekog analita prisutno (preko mase ili zapremine).

5.3.1. Osnovni pojmovi u analitičkoj hemiji

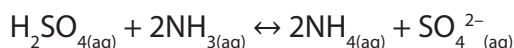
Da bi se razumela analitička hemija, važno je napraviti razliku među terminima koji se najčešće koriste prilikom opisivanja i rešavanja problema iz životne sredine. Prvu važnu razliku treba napraviti među pojmovima analiza, određivanje i merenje. **Analiza** daje informacije o hemijskim ili fizičkim svojstvima uzorka. Komponente od interesa u uzorku se nazivaju **analiti** i mogu se odrediti kvantitativno i kvalitativno, dok su **interferirajuće supstance** jedinjenja koja ometaju analizu i uklanjaju se odgovarajućim postupkom u zavisnosti od karakteristika. Ono što „nosi“ analit i interferirajuće supstance naziva se **matriks** (npr. zemljišne komponente). Matriks, analit i interferirajuće supstance zajedno čine realan **uzorak**. Analizom se utvrđuje identitet, koncentracija ili svojstva analita, a da bi se ovo određivanje izvršilo, meri se jedno ili više hemijskih ili fizičkih svojstava analita. Na primer, Zakon o zaštiti vazduha nalaže redovan monitoring kvaliteta vazduha praćenjem određenih hemijskih jedinjenja uključujući benzo[a]piren. U skladu sa zakonom, nadležne institucije, prikupljaju i analiziraju uzorke vazduha na tačno definisanim lokacijama, deo uzorka se podvrgava hemijskoj analizi na kraju koje se na osnovu inteziteta dobijenog signala utvrđuje koncentracija benzo[a]pirena. Dakle, nadležni organi analiziraju uzorke merenjem i određivanjem koncentracije benzo[a]pirena.

Takođe, važno je razlikovati pojmove tehnika, metoda, procedura i protokol. **Tehnika** je bilo koji hemijski ili fizički princip koji se može koristiti za proučavanje analita. Mnoge tehnike se mogu koristiti za određivanje nivoa arsena u zemljištu. Primenom atomske apsorpcione spektroskopije sa grafitnom peći, arsen se atomizuje (hemijski princip), a meri se količina svetlosti koju apsorbuju slobodni atomi (fizički princip). **Metoda** je primena tehnike za određivanje specifičnog analita u specifičnom matriksu. Metoda koja koristi atomsku apsorpcionu spektroskopiju sa grafitnom peći za određivanje nivoa arsena u zemljištu se razlikuje od metode za određivanje arsena u vodi. Izbor metode za određivanje analita zavisi od toga koje će se informacije koristiti. **Procedura** je skup pisanih uputstava koja detaljno opisuju kako primeniti metodu na određeni uzorak, uključujući informacije o pravilnom uzorkovanju, čuvanju uzoraka, hemijskoj analizi, uklanjanju interferenci i validaciji rezultata. Jedinствена procedura ne postoji, jer će različiti analitičari, laboratorije ili internacionalne ekološke i zdravstvene agencije prilagoditi metodu svojim specifičnim potrebama. Na kraju, **protokol** je skup strogih pisanih smernica koje detaljno opisuju proceduru koja se mora poštovati ako institucija koja navodi protokol treba da prihvati rezultate analize. Protokoli se obično prate kada se analitička hemija koristi za podršku ili definisanje javne politike, a najčešće su definisani od strane Evropske agencije za zaštitu životne sredine, Američke agencije za zaštitu životne sredine ili Internacionalne organizacije za standardizaciju.

Analitička hemija je inherentno kvantitativna nauka. Bilo da se utvrđuje koncentracija vrste u rastvoru, procena konstante ravnoteže, merenje brzine reakcije ili korelacije između strukture jedinjenja i njegove reaktivnosti, analitički hemičari vrše merenja i proračune. S tim u vezi, važno je poznavati osnovna pravila upotrebe brojeva kao što su zaokruživanje i značajne cifre, ali i osnovne jedinice iz Međunarodnog sistema jedinica (SI sistem) i prefikse mernih jedinica, što je van cilja razmatranja i proučavanja ovog udžbenika. U ovom delu će biti dat kratak osvrt na pojam koncentracije i jedinice koje se koriste za njeno opisivanje jer je koncentracija jedan od najvažnijih pojmova u analitičkoj kvantitativnoj instrumentalnoj hemiji.

Koncentracija je opšta merna jedinica koja opisuje količinu prisutne rastvorene supstance u poznatoj količini rastvora. Iako se pojmovi rastvorena supstanca i rastvor često povezuju sa tečnim uzorcima, takođe se mogu odnositi na uzorke u gasnoj i čvrstoj fazi. Jedinice za opisivanje koncentracije zavise od toga kako se mere količine rastvorene supstance i rastvora. U tabeli 5.2 su date najčešće jedinice koncentracije.

Molarnost (M) predstavlja količinu rastvorene supstance u molovima po litru rastvora (tabela 5.2). Stariji pojam koji se nekada češće koristio, a danas se zanemaruje je **normalitet** (N). Normalitet koristi **hemijski ekvivalent** odnosno količinu jedne hemijske vrste koja reaguje stehiometrijski sa drugom hemijskom vrstom. Ovo znači da na primer normalitet rastvora H_2SO_4 koji ima fiksni molaritet zavisi od reakcija u kojima učestvuje ova kiselina.. Normalitet se izražava preko broj ekvivalenata (n) po jedinici zapremine. U kiselinsko-baznoj reakciji, između sumporne kiseline i amonijaka:



broj ekvivalenata je $n = 2$ za H_2SO_4 i $n = 1$ za NH_3 .

Veza između normaliteta i molariteta se može predstaviti jednačinom:

$$N = n \times M$$

Molaritet i normalitet se zasnivaju na zapremini rastvora u kojoj je rastvorena rastvorena supstanca. Pošto je gustina svojstvo koje zavisi od temperature, zapremina rastvora, a samim tim i njegove molarne i normalne koncentracije, promeniće se u funkciji njegove temperature. Korišćenjem mase rastvarača umesto njegove zapremine, rezultujuća koncentracija postaje nezavisna od temperature, pa se u termodinamičkim proračunima gde je neophodno opisati koncentraciju nezavisno od temperature, koristi molalitet. **Molalitet** (m, b) je broj molova rastvorene supstance po kilogramu rastvarača.

Osim navedenih, u upotrebi su i jedinice kao što su: **maseni udeo** (% ω/ω), **zapreminski udeo** (% v/v) i **udeo mase prema zapremini** (% ω/v). Na primer, rastvor koja ima koncentraciju od 23% (% ω/v) sadrži 23 g rastvorene supstance u 100 mL rastvora. **Deo na milion** (ppm) i **deo na milijardu** (ppb) su maseni odnosi grama rastvora na milion ili milijardu grama uzorka, respektivno. Na primer, ako je koncentracija bakra u čeliku 4000 ppm Cu to znači da svaki gram čelika sadrži 4000 μg bakra. Ako se gustina vodenog rastvora aproksimira kao $1,00 \text{ g mL}^{-1}$, onda koncentracije rastvora mogu biti izraženi u delovima na milion ili delovima na milijardu koristeći sledeće odnose:

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}$$

$$\text{ppb} = \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} = \frac{\text{ng}}{\text{mL}}$$

Za gasove deo na milion obično predstavlja zapreminski odnos, pa koncentracija azota od 780 000 ppm znači da jedan litar vazduha sadrži 780 000 μL azota.

Tabela 5.2. Uobičajeni načini izražavanja koncentracije

<i>Naziv</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Simbol</i>
<i>Molaritet</i>	<i>Molovi rastvorene supstance/zapremina rastvora (L)</i>	<i>M</i>
<i>Normalitet</i>	<i>Ekvivalentna masa/zapremina rastvora (L)</i>	<i>N</i>
<i>Molalitet</i>	<i>Molovi rastvorene supstance/kg rastvarača</i>	<i>m, b</i>
<i>Maseni udeo</i>	<i>g rastvorene supstance/100 g rastvora</i>	<i>% w/w</i>
<i>Zapreminski udeo</i>	<i>mL rastvorene supstance/100 mL rastvora</i>	<i>% v/v</i>
<i>Deo na milion</i>	<i>g rastvorene supstance/10^6 g rastvora</i>	<i>ppm</i>
<i>Deo na milijardu</i>	<i>g rastvorene supstance/10^9 g rastvora</i>	<i>ppb</i>

Ponekad je nezgodno koristiti jedinice koncentracije date u tabeli 5.2. Tokom nekih reakcija, koncentracija reaktanata može se promeniti za mnogo redova veličine, pa je često pogodnije izraziti koncentraciju kao p-funkciju. P-funkcija broja X zapisuje se kao pX i definiše se kao:

$$\text{pX} = -\log(\text{X})$$

5.3.2. Odabir i validacija metode

Da bi se razvila analitička metoda za određeni analit u specifičnoj matrici mogu se primeniti različite tehnike. Za određivanje nerastvornih soli, kao što su PbCrO_4 , BaCrO_4 ili FeCO_3 može se primeniti gravimetrijska metoda u kojoj se masa precipitata (taloga) koristi kao analitički signal. Metali kao što je Cu formiraju nekoliko rastvorljivih kompleksa, pa se za njegovo određivanje mogu koristiti kompleksometrijske titrimetrijske metode. Da bi se odredila ukupna koncentracija metala u vodi može se koristiti neka od apsorpcionih ili emisionih tehnika, a višestruka oksidaciona stanja elemenata kao što su As i Cr se mogu odrediti primenom raznih elektrohemijskih metoda.

Odabir najbolje metode je određen zahtevima analize. **Validacija** metode podrazumeva provere koje se izvode da bi se razumele karakteristike metode i da bi se pružio objektivni dokaz da su ispunjeni zahtevi za korišćenje metode u uslovima njene specifične primene. Metoda mora da ispunjava kriterijum specifične upotrebe što se potvrđuje ispitivanjem odnosno eksperimentalnim određivanjem parametara validacije: tačnost, preciznost, osetljivost, specifičnost, selektivnost, linearnost, robusnost, opseg primene, vreme analize, dostupnost opreme i cenu. Validacija metode obuhvata sledeće faze: uspostavljanje ciljeva vezano za karakteristike izvođenja; dobijanje podataka o karakteristikama izvođenja; dokumentovanje validacionog procesa i zaključivanje o primenljivosti metode za namenjenu svrhu. Na ovaj način, validacijom se teži da se smanje analitičke greške i obezbedi ispravnost rezultata, kao i da se dobiju pouzdani i reproduktivni podaci i osigura kvalitet rezultata merenja. Takođe, validacijom se metoda usklađuje sa predviđenim specifikacijama i uslovima za akreditaciju. Internacionalna organizacija za standardizaciju i Institut za standardizaciju Srbije (ISO/IEC 17025:2001) zahtevaju validaciju: nestandardnih metoda, metoda projektovanih i razvijenih u laboratoriji, standardnih metoda izvan predviđenog obima, i proširenih i modifikovanih standardnih metoda.

Kada je već ostvarena potpuna validacija, **verifikacijom** se potvrđuje da su specifični zahtevi ispunjeni putem ispitivanja objektivnih dokaza. Potvrđivanje može obuhvatati: obavljanje alternativnih/dodatnih proračuna, upoređivanje nove projektne specifikacije sa sličnom ranije odobrenom projektom specifikacijom, preduzimanje ispitivanja i prikazivanja, i preispitivanje dokumenata pre izdavanja. Verifikacija je manje strog proces od validacije, a neki od primera postupaka verifikacije uključuju proveru linearnosti sa manje koraka nego u originalnoj validaciji; upoređivanje rezultata pre i posle modifikacije; ili proveru preciznosti sa manje ponavljanja.

Pre opisa parametara validacije, potrebno je navesti da su svako merenje i primena određene metode podložni različitim tipovima grešaka. **Slučajne greške** su posledica mnogobrojnih različitih i promenljivih uzroka, koji se ne mogu kontrolisati i između kojih ne postoji nikakva korelacija. Ove greške ne mogu biti potpuno otklonjene. Kada pri ponovljenim merenjima greške ostaju konstantne ili se menjaju po određenom zakonu radi se o **sistematskim greškama**. Ove greške su uzrok velikih razlika srednje vrednosti seta podataka od stvarne vrednosti, i uvek utiču na „pomeranje” rezultata u istom „smeru”. **Grube greške** dovode do pojave ekstremnih vrednosti.

Nekoliko važnih parametara validacije biće razmatrano u narednim pasusima. **Tačnost** opisuje bliskost određenog rezultata sa stvarnom ili prihvatljivom vrednosti odnosno ukazuje na stepen odstupanja izmerenih od stvarnih vrednosti (slika 5.1). Takođe, tačnost ukazuje na sposobnost tehnike da pokaže vrednost blisku pravoj. U analizama uzoraka iz životne sredine, najčešće ne poznajemo pravu vrednost analita čiju koncentraciju merimo, nego rezultate poredimo sa konvencionalnim odnosno dogovorenim vrednostima (standardima). Tačnost se izražava se preko apsolutne ($e = \text{dobijena vrednost} - \text{očekivana vrednost}$) i relativne greške ($\%e_r = (\text{dobijena vrednost} - \text{očekivana vrednost}) / \text{očekivana vrednost} \times 100$).

Preciznost opisuje bliskost određenog rezultata sa drugim rezultatima dobijenim na potpuno isti način, jer kada se jedan uzorak analizira više puta, vrlo retko se dobije isti rezultat. Precizno merenje ne garantuje istovremeno i zadovoljavajuću tačnost merenja (slika 5.1). Preciznost se određuje ponavljanjem merenja, a kao mera odstupanja i disperzije pojedinačnih rezultata od srednje vrednosti koriste se: standardna devijacija, varijansa i koeficijent varijacije (relativna standardna devijacija). Standardna devijacija (s) predstavlja meru odstupanja pojedinačne vrednosti merenja (x_i) od aritmetičke sredine (x_{sr}) seta podataka (n):

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_{sr} - x_i)^2}{n-1}}$$

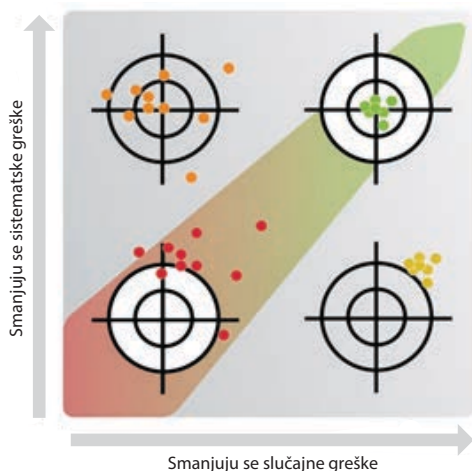
Varijansa je prosečno kvadratno odstupanje od srednje vrednosti:

$$s^2 = \frac{\sum (x_{sr} - x_i)^2}{n-1}$$

Koeficijent varijacije (relativna standardna devijacija) se može izraziti kao odnos standardne devijacije i srednje vrednosti u procentima

$$v = \frac{s}{x_{sr}} \times 100$$

Slika 5.1. Prikaz tačnosti i preciznosti i uticaj parametara na prisustvo slučajnih i sistematskih grešaka



Sposobnost da se pokaže da dva uzorka imaju različite količine analita je suštinski deo mnogih analiza. **Osetljivost** metode je mera njene sposobnosti da utvrdi da su takve razlike značajne. Osetljivost se često meša sa limitom detekcije metode, pa će u ovom delu biti definisan i ovaj parametar. Limit detekcije (*Limit of Detection*, LOD) je najniža količina analita koja se sa datim nivoom poverenja može detektovati u uzorku, ali ne uvek i kvantifikovati dok je limit kvantifikacije (*Limit of Quantification*, LOQ) najniža koncentracija (količina) analita u uzorku koja može biti određena sa prihvatljivom preciznošću i tačnošću. Limit detekcije i kvantifikacije su statistički parametri i često se predstavljaju kao odnos signala i šuma:

$$\text{LOD} = \text{signal}:\text{šum} = 3:1$$

$$\text{LOQ} = \text{signal}:\text{šum} = 10:1$$

ili preko standardne devijacije korišćenih slepih proba prilikom merenja ($\text{LOD} = 3s$; $\text{LOQ} = 10s$).

Osetljivost je promena signala po jedinici promene količine analita i može se predstaviti preko konstante proporcionalnosti (k) i najmanjeg inkrementa (Δs) koji se može meriti:

$$\Delta n = \frac{\Delta s}{k}$$

Ako se masa meri pomoću vage koja može izmeriti najmanje $\pm 0,0001$ g, a osetljivost metode je 0,500 onda metoda može detektovati razliku od $\pm 0,0002$ g.

Selektivnost je mogućnost određivanja više sličnih jedinjenja u uzorku koja daju zasebne signale odnosno mogućnost da se odredi analit bez interferencija od strane drugih komponenti smeše. Ukoliko je interferencije nemoguće eliminisati, njihov doprinos ukupnom signalu je moguće proceniti i uvrstiti u jednačinu kojom se opisuje selektivnost. S druge strane, **specifičnost** predstavlja mogućnost određivanja samo jednog analita i pored prisustva drugih jedinjenja u uzorku.

Da bi metoda bila korisna i široko primenjiva, mora da pruži pouzdane rezultate. Međutim, različite hemijske i fizičke smetnje utiču i doprinose nesigurnostima u analizi. Kada je metoda relativno otporna na smetnje kao što su temperatura, pH rastvora, koncentracija reagenasa, vreme reakcije ili instrumentalni parametri, može se primeniti na određivanje analita u širokom spektru matrika i smatra se **robusnom**. Ako osetljivost metode u velikoj meri zavisi od eksperimentalnih uslova, i kada male promene u tim uslovima, npr. primena metode u različito organizovanim laboratorijama, mogu dovesti do značajno drugačijih rezultata, onda su metode „neotporne“.

Još jedan od načina da se suzi izbor metoda je da se uzme u obzir **opseg primene** odnosno opseg koncentracija koje se mogu izmeriti i za koje se može dostići zahtevana tačnost i preciznost. Realni opseg primene može da se razlikuje od teorijskog, a tri ograničenja su od posebnog značaja: količina raspoloživog uzorka za analizu, koncentracija analita u uzorku i apsolutna količina analita koja je potrebna za dobijanje merljivog signala. Poslednje ograničenje je i u vezi sa parametrom validacije definisanim kao **linearnost**. Metoda ispunjava ovaj zahtev ukoliko su dobijeni signali direktno proporcionalni količini analita u uzorku unutar datog opsega, i mogu se opisati zadovoljavajućim koeficijentom korelacije (R).

Na kraju, primena analitičkih metoda može zahtevati skupu opremu, dugo vreme analize i dobro obučenog operatera, a postizanje odgovarajuće ravnoteže između parametara validacije često je otežano njihovom međuzavisnošću. Na primer, poboljšanje preciznosti analize može zahtevati veću količinu analita odnosno uzorka, a kompleksan matriks zahteva visoko selektivnu metodu i otklanjanje fizičko-hemijskih smetnji.

5.3.3. Razvijanje postupka i kontrola kvaliteta

Nakon odabira metode, osim njenoj validaciji, potrebno je posvetiti pažnju razvijanju procedure koja ima za cilj da kompenzuje smetnje, odabiru i kalibraciji opreme, standardizaciji metode i dobijanju reprezentativnog uzorka. Tačnost metode zavisi od njene selektivnosti za analit, ali čak najbolje metode su često opterećene smetnjama koje doprinose izmerenom signalu. Potencijalne interferencije mogu biti prisutne u samom uzorku ili u reagensima koji se koriste tokom analize, za ekstrakciju, rastvaranje, taoženje i slično. U odsustvu interferencije, ukupan signal izmeren tokom analize je zbir signala dobijenog od analita i upotrebljenih reagensa. Doprinos reagensa se određuje merenjem signala samo za reagens ili blanko uzorak tzv. **slepu probu** koja ne sadrži uzorak. Na primer, signal se meri kada se 0,5 g uzorka rastvori u 250 mL rastvarača nakon čega se u ovako rastvoren uzorak dodaje ukupno 100 mL još nekoliko reagenasa. U navedenom primeru, slepa proba bi bio rastvor koji sadrži 250 mL rastvarača i 100 mL ostalih reagenasa.

Kompenzacija interferencija koje potiču iz matriksa uzorka je teža. Neciljane interferirajuće supstance negativno utiču na selektivnost i delotvornost određivanja, povećavaju nesigurnost analize i smanjuju tačnost i preciznost analitičke metode. Ako su identitet i koncentracija interferirajućeg jedinjenja poznati, onda se ono može dodati u reagens, ali u većini analiza, ovo nije slučaj pa se vrši **prečišćavanje uzorka**. Na primer, prilikom određivanja PCB u zemljištu, mućkanje ekstrakta s koncentrovanom H_2SO_4 će ukloniti sva ostala neželjena jedinjenja. Kao efikasan način prečišćavanja, često se koristi i adsorpciona hromatografija na sorbensima kao što su : aluminijum-oksidi, florisil (MgO –15,5%, SiO_2 –84,0%, Na_2SO_4 –0,5%), aktivni ugalj i silika gel i sorbensi na bazi silikagela. Kolone s odgovarajućim sorbensom mogu se praviti u laboratoriji ili su komercijalno dostupne, a mogu biti višeslojne sa nekoliko različitih sorbensa ili se može primeniti niz od nekoliko kolona s različitim sorbensima.

Prilikom primene određene metode, važno je praviti razliku između dva postupka koja su neizostavan deo razvijanja analitičke procedure, kalibracije i standardizacije. Vremenom, uređaji koji se koriste u instrumentalnim tehnikama mogu da daju rezultate koji odstupaju od očekivanih zbog uobičajenog, pa je važno da uređaji budu pravilno kalibrisani pre upotrebe. **Kalibracija** je postupak kojim se osigurava da će sprovedena analiza, procedura ili instrument dati tačne rezultate odnosno postupak kojim se utvrđuje funkcionalni odnos između izmerenih vrednosti i analitičkih veličina. Svaki instrument koji se koristi u istraživanju mora biti pravilno kalibrisan kako bi se osiguralo da su podaci koje proizvodi validni i

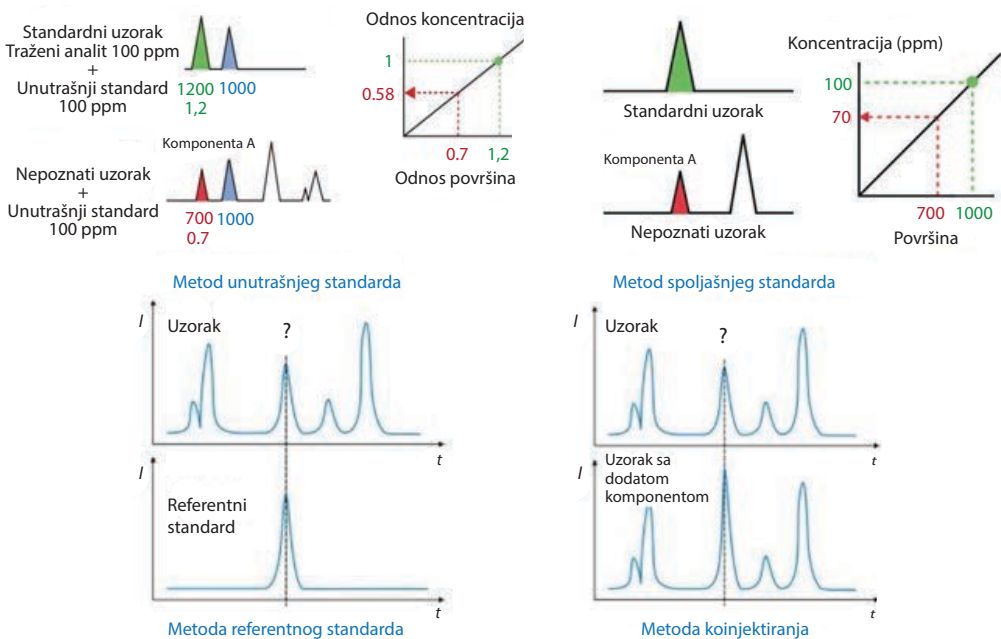
da ih drugi mogu koristiti. Na primer, vage se kalibrišu korišćenjem standardnih tegića različitih masa. U slučaju merenja sa tačnim uzorcima, priprema se niz standarda, sa poznatom količinom analita koji se meri. Količina analita u standardima se meri pomoću određenog instrumenta, a potom se crta **kalibraciona kriva**. Ova kriva pokazuje odnos između odziva instrumenta i koncentracije analita. Važno je da se svaki standard priprema pojedinačno, a ne svi iz istog osnovnog rastvora, jer će bilo kakve greške u pravljenju osnovnog rastvora uticati na ceo proces kalibracije. Koncentracije analita u standardima za kalibraciju treba da pokriju opseg očekivanih koncentracija u uzorku, a u kalibraciju treba uključiti i slepu probu. Postoji niz scenarija u kojima uređaji treba da budu kalibrisani, a neki uključuju: udarac ili pomeranje instrumenta, kada analitičar iskustveno proceni da merenja nisu ispravna i po instrukciji proizvođača (najčešće je u uputstvu navedeno koliko često).

Standardizacija je proces eksperimentalnog određivanja odnosa između signala i količine analita. Tačnost standardizacije zavisi od kvaliteta reagenasa i posuđa koje se koristi za pripremu standarda. **Primarni reagensi** su reagensi poznate čistoće koji se koriste za pripremu standarda poznate koncentracije, a **sekundarni reagensi** su oni čija čistoća mora biti uspostavljena u odnosu na primarni reagens. Najčešće korišćeni metod standardizacije je **metod spoljašnjeg standarda** (slika 5.2) u kom se pripremaju eksterni, spoljašnji standardni rastvori određene koncentracije i analiziraju se odvojeno od uzorka (analita). Metod spoljašnjeg standarda omogućava da se srodna serija uzoraka analizira korišćenjem jedne kalibracione krive i ovo je važna prednost u laboratorijama gde treba analizirati mnogo uzoraka ili kada je potrebno analizu uraditi za kratko vreme. Međutim, prilikom primene spoljašnjeg standarda, pretpostavlja se da bilo koja razlika između matriksa standarda i matriksa uzorka nemaju uticaja na osetljivost metode odnosno na odnos signala i koncentracije analita. Kada se očekuju velika odstupanja u matriksima, primenjuju se druge metode opisane ispod.

Metod standardnog dodatka (metod koinjektiranja) predstavlja standardizaciju u kojoj se alikvoti standardnog rastvora dodaju u uzorak (slika 5.2). Na primer, određena zapremina uzorka koji sadrži analit (V_a) se razblažuje do ukupne zapremine (V_s), a drugi identičan alikvot uzorka (V_a) se, takođe, razblažuje do ukupne zapremine (V_s), ali uz dodatak određene zapremine standardnog rastvora (V_s) koji sadrži poznatu koncentraciju analita. Svaki uzorak, dakle, zahteva sopstvenu standardnu kalibracionu krivu dodavanja što predstavlja ozbiljan nedostatak za rutinsku primenu metode standardnog dodatka.

Uspešna primena gore navedenih metoda standardizacije zavisi od sposobnosti analitičara da pažljivo i ponovljivo rukuje uzorcima i standardima, a kada se postupak ne može kontrolisati do te mere da svi uzorci i standardi budu tretirani jednako dolazi do netačne i neprecizne standardizacije. Na primer, ako je analit prisutan u isparljivom rastvaraču, njegova koncentracija će se povećati ako se deo rastvarača izgubi isparavanjem. Ako iz uzorka i standarda sa identičnim koncentracijama analita i identičnim signalima ispari ista zapremina rastvarača, koncentracije analita i signali će i dalje biti identični. Međutim, ako u identičnom standardu i uzorku dolazi do različitog gubitka rastvarača, koncentracija analita i rezultirajući signali neće biti isti. U ovom slučaju, standardizacija je moguća ako se signal analita posmatra u odnosu na signal koji daje druga vrsta koja je dodata u fiksnoj koncentraciji svim uzorcima i standardima. Dodata vrsta, koja se mora razlikovati od analita, naziva se **unutrašnjim standardom** (slika 5.2).

Slika 5.2. Primeri standardizacije



Iako je odabir odgovarajuće metode vrlo značajan za dobijanje tačnih rezultata, **uzorkovanje** koje prethodi analizi je od velike važnosti za izbegavanje grešaka prilikom analize. Odgovarajuća strategija uzorkovanja osigurava da uzorci budu reprezentativni za materijal iz kojeg su uzeti. Pristrasno ili nerepre-

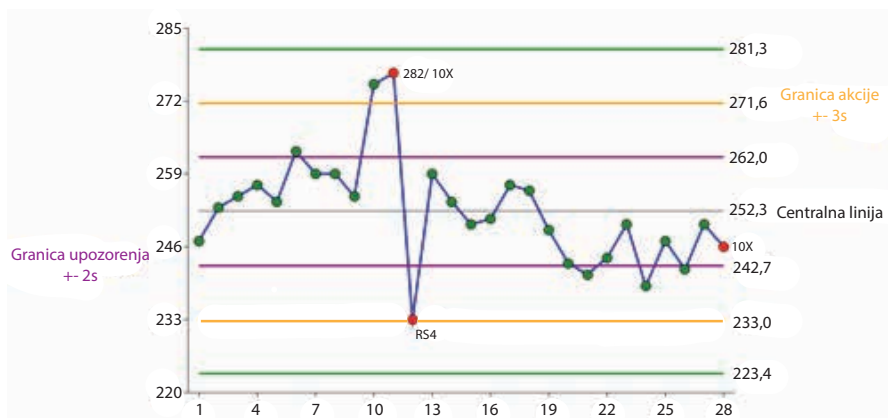
zentativno uzorkovanje, kao i kontaminacija uzoraka tokom ili nakon njihovog prikupljanja su dva izvora koja mogu dovesti do značajnih grešaka u krajnjem rezultatu, a koja se ne mogu ispraviti kasnije tokom analize.

Primena bilo koje metode ili procedure analize analita mora biti u skladu sa aspektima **obezbeđenja i kontrole kvaliteta** (*Quality Assurance and Quality Control, QA/QC*) koja se sprovodi u skladu sa tim kakav analitički rezultat se očekuje i za koju svrhu se izdaje. Prema standardizovanim dokumentima (ISO/IEC 17025): "Laboratorije moraju imati procedure kontrole kvaliteta za praćenje testova koje izvode. Podaci o rezultatima moraju biti zapisivani na takav način da su vidljivi trendovi i, gde je to primenljivo, moraju biti primenjene statističke tehnike za kontrolu rezultata. Praćenje mora da uključi internu kontrolu kvaliteta... Podaci o kontroli kvaliteta moraju biti analizirani i kada se, tom analizom, utvrdi da je metoda izvan unapred određenih kriterijuma, preduzima se planirana akcija radi rešavanja problema, kao i preventivni koraci u cilju izbegavanja izveštavanja pogrešnih rezultata."

Najvažniji deo kontrole kvaliteta je poznavanje i sprovođenje pisanih direktiva koje opisuju relevantne kriterijume specifične za: opremljenost i čistoću laboratorije, korišćene instrumente, uzorak, metodu i protokol. Principi dobre laboratorijske prakse (*Good Laboratory Practice, GLP*) se moraju poštovati u svakoj analizi, a obuhvataju: pravilno evidentiranje podataka, način uzorkovanja, načine čuvanja uzoraka, upotrebu i prečišćavanje hemijskih reagensa, pripremu uobičajenih reagensa, čišćenje, održavanje i kalibraciju korišćenih uređaja, kao i obuku laboratorijskog osoblja.

Jedan od pristupa u obezbeđenju kvaliteta je korišćenje iskustva kako bi se odredio najbolji način za prikupljanje i praćenje podataka o proceni kvaliteta. Alati za procenu kvaliteta mogu biti: duplikati uzoraka, slepe probe, standardni rastvori, sertifikovani referentni materijali. Takođe, analitičar u laboratoriji može da kontroliše učestalost kojom analizira uzorke za procenu kvaliteta i uslove koje bira da signalizira kada analiza više nije u stanju statističke kontrole. Glavni alat za procenu kvaliteta je **kontrolna karta** (slika 5.3), koja obezbeđuje kontinuiranu evidenciju podataka o proceni kvaliteta. Osnovna pretpostavka je da ako je analiza pod statističkom kontrolom, pojedinačni rezultati procene kvaliteta se nasumično raspoređuju oko poznate srednje vrednosti sa poznatom standardnom devijacijom. Kada analiza izađe iz statističke kontrole, na podatke o proceni kvaliteta utiču dodatni izvori greške, što povećava standardnu devijaciju ili menja srednju vrednost.

Slika 5.3. Primer kontrolne sa naznačenim granicama upozorenja i akcije



Najjednostavnija kontrolna karta sadrži niz tačaka, od kojih svaka predstavlja jedno određivanje analita koji pratimo. Za crtanje kontrolne karte, analizira se najmanje od 7 do 15 uzoraka dok je sistem pod statističkom kontrolom. **Centralna linija (CL) kontrolne karte** je prosečna vrednost merenja ovih n uzoraka. Što je više uzoraka u originalnoj kontrolnoj karti, lakše je otkriti kada analiza počinje da izlazi iz statističke kontrole. Granične linije oko centralne linije konstruišu se na osnovu standardne devijacije (s) od n merenja. **Gornja i donja granica akcije** se računaju kao $CL \pm 3s$ jer će se 99,74% normalno raspoređenih podataka naći u okviru tri standardne devijacije srednje vrednosti. To znači da postoji samo 0,26% verovatnoće da se dobije rezultat veći od gornje granice akcije ili manji od donje granice akcije. Kada rezultat pređe kontrolnu granicu, najverovatnije objašnjenje je sistematska greška u analizi ili gubitak preciznosti. Nekoliko pravila se poštuju prilikom praćenja kontrolne karte koja govore o tome da analiza više nije pod statističkom kontrolom ako:

- bilo koja pojedinačna tačka prelazi gornju ili donju granicu akcije. Postavljanjem **gornje i donje granice upozorenja** na $CL \pm 2s$, očekuje se da ne više od 5% rezultata prelazi jednu od ovih granica;
- su dve od tri uzastopne tačke između gornje granice upozorenja i gornje granice akcije ili između gornje granice upozorenja i gornje granice akcije. Ako je analiza pod statističkom kontrolom, očekuje se slučajna distribucija rezultata oko centralne linije, a prisustvo malo verovatnog obrasca u podacima je još jedan pokazatelj da analiza više nije pod statističkom kontrolom;
- je sedam uzastopnih rezultata potpuno iznad ili potpuno ispod centralne linije;

- se vrednost šest uzastopnih rezultata povećava (ili smanjuje);
- se vrednost 14 uzastopnih rezultata naizmenično povećava i smanjuje;
- postoji bilo kakav očigledan neslučajni obrazac u rezultatima.

5.3.4. Spektroskopske apsorpcione i emisione metode

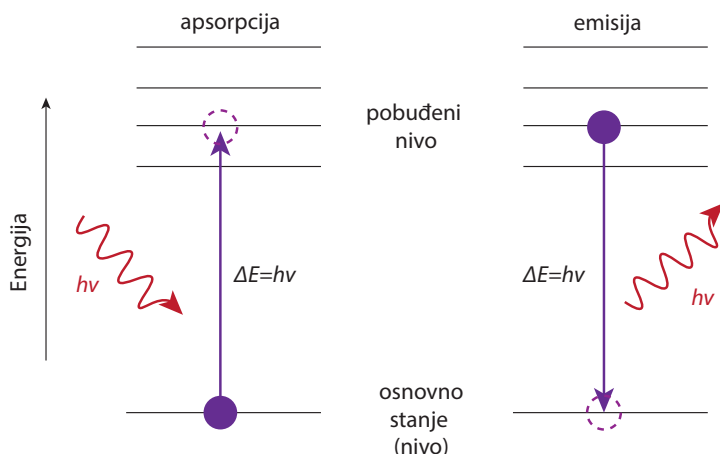
Spektroskopija, poznata i pod nazivima fotonska ili optička spektroskopija, se definiše kao oblast koja proučava međusobne interakcije elektromagnetnog zračenja i jona i molekula u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju. Interakcije koje se posmatraju najčešće obuhvataju apsorpciju, emisiju ili rasejanje elektromagnetnog zračenja, a na osnovu njih se dobijaju kvantitativne i kvalitativne informacije o ispitivanoj supstanci.

Spektroskopija omogućava dobijanje kvantitativnih i kvalitativnih informacija o analitu na osnovu interakcije elektromagnetnog zračenja i analita.

Elektromagnetno zračenje, ili svetlost, je oblik energije koja poseduje dualnu prirodu odnosno ponašanje elektromagnetnog zračenja se može opisati svojstvima i talasa i čestica. Optička svojstva elektromagnetnog zračenja, kao što je difrakcija, najbolje se objašnjavaju opisom svetlosti kao talasa. Međutim, mnoge interakcije između elektromagnetnog zračenja i materije, kao što su apsorpcija i emisija, bolje se opisuju tretiranjem svetlosti kao čestice ili fotona. Elektromagnetno zračenje se može predstaviti električnim i magnetnim poljima koja osciluju normalno na ravan prostiranja zraka. Nekoliko osnovnih svojstava karakteriše elektromagnetni talas: talasna dužina, talasni broj, amplituda, frekvencija, fazni ugao i pravac prostiranja (videti poglavlje Protok energije). Razlaganjem apsorbovanog, emitovanog ili reflektovanog zračenja prema talasnim dužinama, frekvencijama ili energijama dobija se **spektar**. **Kontinualni spektar** je neprekidan i sadrži svetlosne komponente različitih talasnih dužina dok **linijski spektar** sadrži spektralne linije specifičnih talasnih dužina.

Prilikom emisije ili apsorpcije zračenja od strane analita, dolazi do kretanja elektrona između orbitala odnosno različitih energetske nivoa. Najjednostavnije objašnjeno, prema Borovom modelu atoma izvedeni su Borovi postulati: 1) elektroni se kreću po stacionarnim orbitama (orbitalama) određenih energija i radijusa; 2) prilikom kretanja po stacionarnim orbitala najniže energije (**osnovni nivo**, $n=1$) elektroni ne emituju zračenje; i 3) elektron emituje ili apsorbuje kvant energije ($E = h\nu$) kada prelazi sa jednog energetskog nivoa na drugi (slika 5.4) pri čemu kada elektron pređe sa osnovnog na nivo sa većom energijom prelazi u **pobuđeno stanje**.

Slika 5.4. Apsorpcija i emisija fotona između energetske nivoa



U **apsorpcionoj spektroskopiji**, analit apsorbuje energiju koju nosi foton prelazeći iz nižeg energetskeg stanja u višeenergetsko pobuđeno stanje. Na primer, prilikom apsorpcije vidljive svetlosti, valentni elektroni u analitu prelaze na viši energetski nivo dok prilikom apsorpcije IR zračenja, jedna od hemijskih veza u analitu doživljava promenu vibracione energije. Intenzitet fotona koji prolaze kroz uzorak koji sadrži analit je oslabljen zbog apsorpcije, a merenje ovog slabljenja odnosno apsorpcije predstavlja signal. Apsorpcija se dešava samo kada energija fotona odgovara razlici u energiji, ΔE , između dva energetske nivoa. Kada se grafički predstavi apsorpcija kao funkcija energije fotona dobija se apsorpcioni spektar. U **emisioj spektroskopiji**, dolazi do emisije fotona kada se analit vrati iz stanja veće energije u stanje niže energije. Stanje više energije može se izazvati na nekoliko načina: toplotnom energijom, energijom zračenja iz fotona ili hemijskim reakcijama. Emisija nakon apsorpcije fotona naziva se fotoluminiscencija, a emisija nakon hemijske reakcije naziva se hemiluminiscencija. Osim energetske promene, u drugim klasama spektroskopije, posmatra se promena amplitude, faznog ugla, polarizacije ili pravca širenja elektromagnetnog zračenja do koje dolazi usled prelamanja, refleksije, rasejanja, difrakcije ili disperzije zračenja od strane uzorka. Podela spektroskopskih tehnika na osnovu promene koja se prati i korišćenog zračenja iz elektromagnetnog spektra data je u tabeli 5.3.

Apsorpcija: smanjenje energije fotona usled interakcije sa analitom (uzorkom).

Emisija: oslobađanje fotona prilikom prelaska elektrona sa višeg na niži energetski nivo.

Tabela 5.3. Podela spektroskopskih tehnika

<i>Način transfera energije</i>	<i>Deo elektromagnetnog spektra</i>	<i>Spektroskopska tehnika</i>
<i>Apsorpcija</i>	<i>X-zraci</i>	<i>Apsorpciona spektroskopija X-zracima</i>
	<i>UV/VIS</i>	<i>UV/VIS spektroskopija</i>
		<i>Atomska apsorpciona spektroskopija</i>
	<i>Infracrveno zračenje</i>	<i>Infracrvena spektroskopija</i>
	<i>Mikrotalasi</i>	<i>Raman spektroskopija</i>
		<i>Mikrotalasna spektroskopija</i>
<i>Emisija</i>	<i>Radio talasi</i>	<i>Spektroskopija sa nuklearnom magnetnom rezonansom</i>
<i>Fotoluminiscencija</i>	<i>UV/VIS</i>	<i>Atomska emisiona spektroskopija</i>
	<i>X-zraci</i>	<i>Fluorescencija X-zracima</i>
<i>Način interakcije (nema transfera energije)</i>	<i>Deo elektromagnetnog spektra</i>	<i>Spektroskopska tehnika</i>
<i>Difrakcija</i>	<i>X-zraci</i>	<i>Difrakcija X-zracima</i>
<i>Refrakcija</i>	<i>UV/VIS</i>	<i>Refraktometrija</i>
<i>Rasipanje</i>	<i>UV/VIS</i>	<i>Nefelometrija</i>
		<i>Turbidimetrija</i>
<i>Disperzija</i>	<i>UV/VIS</i>	<i>Optička rotaciona disperzija</i>

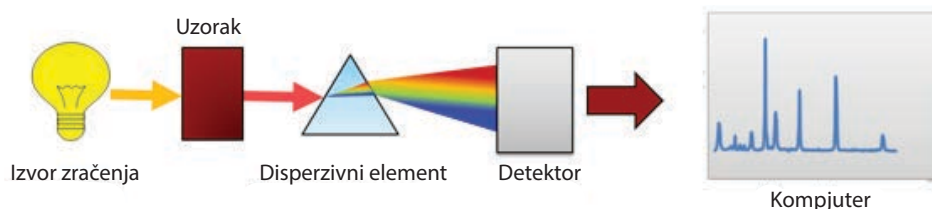
Osim prema promeni zračenja koja se prati odnosno vrsti interakcije zračenja i analita, spektroskopske tehnike se mogu podeliti na destruktivne i nedestruktivne, kao i na one koje se primenjuju na nivou atoma ili molekula. U nastavku je prikazan pojednostavljen opis najčešće primenjivanih metoda za analizu elemenata u tragovima u vodi, vazduhu i zemljištu. Primeri destruktivnih tehnika koje zahtevaju hemijsku pripremu uzoraka i njegovo razaranje su: atomska apsorpciona spektroskopija (*Atomic Absorption Spectroscopy*, AAS); induktivno kuplovana/spregnuta plazma–optičko emisiona spektrometrija (*Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectroscopy*, ICP–OES) i induktivno kuplovana/spregnuta plazma–masena spektroskopija (*Inductively Coupled Plasma–Optical Mass Spectrometry*, ICP–MS). Na nivou molekula često korišćene nedestruktivne metode su:

IR; spektroskopija u IR oblasti sa Furieovim transformacijama (*Fourier Transform InfraRed spectroscopy*, FTIR); spektroskopija sa nuklearnom magnetnom rezonancom (*Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy*, NMR) i fluorescencija X-zracima (*X-Ray Fluorescence*, XRF).

Osnovni delovi spektroskopskih uređaja

Instrumenti koji se koriste u spektroskopskim metodama se sastoje od nekoliko uobičajenih komponenti uključujući: izvor energije (zračenja) koja prolazi kroz uzorak, disperzivni element za izolovanje uskog opsega talasnih dužina, detektor za merenje signala i signalni procesor za prikaz signala u formi pogodnoj za tumačenje od strane analitičara (slika 5.5). Koji delovi i instrumenti će se koristiti zavisi od prednosti i nedostataka samih komponentni uređaja, tipa uzorka koji se analizira, koncentracija analita koje je potrebno izmeriti, kao i od finansijske opravdanosti.

Slika 5.5. Osnovni delovi spektroskopskih instrumenata



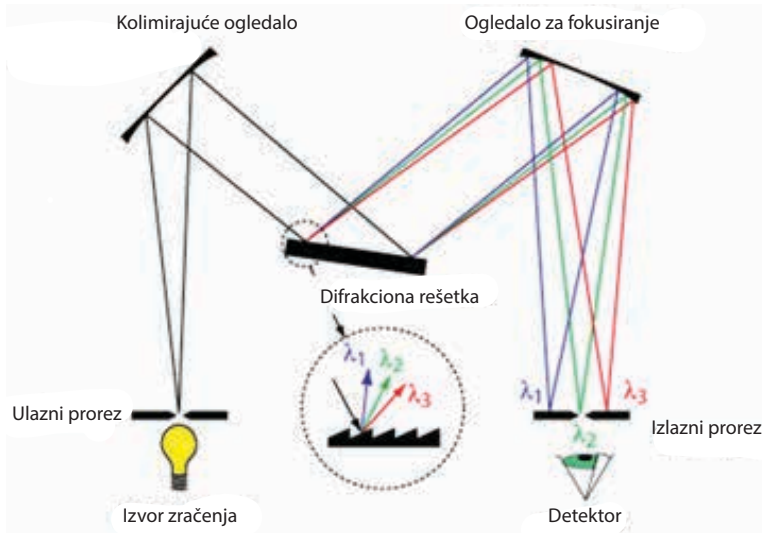
Izvor mora da obezbedi intenzivno zračenje koje je stabilno u željenom regionu elektromagnetnog spektra. Izvori elektromagnetnog zračenja se dele na kontinualne i linijske. **Kontinualni izvor** emituje zračenje u širokom opsegu talasnih dužina dok **linijski izvor** emituje zračenje u nekoliko odabranih, uskih opsega talasnih dužina. Primeri kontinualnih izvora uključuju: vodonikovu i deuterijumsku lampu (160–380 nm) za molekulska apsorpciju UV zračenja, volframovu lampu (320–2400 nm) za molekulska apsorpciju VIS zračenja, i Nernstov štapić (400–20 000 nm) za apsorpciju IR zračenja. Najčešće korišćen linijski izvor je lampa sa šupljom katodom koja emituje zračenje u UV/VIS delu spektra koje se apsorbuje od strane atoma. Prema vrsti energije koju proizvode, razlikuju se **izvori toplotne energije**, kao što su plamen i plazma, i **izvori hemijske energije** nastale hemijskim reakcijama. U izvorima poput plamena koji koriste sagorevanje goriva i oksidansa kao što su acetilen i vazduh postižu se temperature od 2 000 do 3 400 K dok plazma obezbeđuje temperature od 6 000 do 10 000 K. Primeri hemijskih reakcija koje se koriste kao izvor energije su hemiluminiscencija i bioluminiscencija.

Prilikom primene spektroskopskih metoda teži se ka tome da se izabere analit koji apsorbuje na jedinstvenoj talasnoj dužini. Međutim, kada se koristi kontinualni izvor zračenja, nemoguće je izolovati apsorpciju na jednoj talasnoj dužini, pa se koriste **disperzivni elementi** koji mehanički razdvajaju opseg određenih talasnih dužina zračenja. Zračenje izdvojeno na ovaj način se opisuje parametrima kao što su: nominalna talasna dužina, efektivna širina opsega talasnih dužina i maksimalna vrednost propuštenog zračenja. Ako se nacrtá grafík zavisnosti inteziteta zračenja od talasne dužine, efektivna širina opsega se može predstaviti kao širinu signala (pika) zračenja u tačkama gde je zračenje dostiglo polovinu maksimalne vrednosti. Idealán disperzivni element se odlikuje uskom efektivnom širinom opsega što obezbeđuje bolju rezoluciju signala, i intezivnim protokom zračenja kojim se postiže jači signal na detektoru sa manje pozadinskog šuma. Za kvalitativnu analizu, rezolucija je generalno važniji parametar od protoka zračenja dok je u kvantitativnoj analizi veći protok zračenja poželjniji.

Najčešće korišćeni disperzivni elementi su apsorpcioni ili interferentni filteri i mohohromatori. **Apsorpcioni filteri** selektivno apsorbujú zračenje iz uskog regiona elektromagnetnog spektra, a **interferentni filteri** koriste pojavu smetnji (interferencija) za izolaciju uskog opsega talasnih dužina. Jednostavan primer apsorpcionog filtera je staklo u boji; ljubičasti filter uklanjá komplementarnu zelenu boju na talasnim dužinama od 500 do 560 nm. Interferentni filteri su skuplji od apsorpcionih filtera, ali imaju užu efektivnu širinu opsega (10–20 nm), sa maksimalnim propusnošću od najmanje 40%.

Jedan od nedostataka upotrebe filtera je to što se prilikom merenja na dve talasne dužine, filter mora menjati između merenja. Takođe, filteri su dostupni za ograničen broj nominalnih opsega talasnih dužina. Ovi nedostaci se mogu prevazići upotrebom **monohromatora** (slika 5.6). Zračenje iz izvora ulazi u monohromator kroz ulazni prorez, a potom se prikuplja kolimirajućim ogledalom, koje reflektuje paralelni snop zračenja na difrakcionu rešetku. Difrakciona rešetka je optički reflektujuća površina koja sadrži veliki broj paralelnih žlebova na kojima dolazi do raspršivanja zračenja u prostoru. Ovako raspršeno zračenje se fokusira drugim ogledalom na ravnu površinu koja sadrži izlazni prorez. U nekim monohromatorima, umesto difrakcione rešetke koristi se prizma. Izlazno zračenje iz monohromatora prelazi na detektor. Uži izlazni prorez obezbeđuje manju efektivnu širinu i bolju rezoluciju, ali omogućáva manji protok zračenja.

Slika 5.6. Monohromator sa difrakcionom rešetkom



Savremeni **detektori** koriste osetljive pretvarače za pretvaranje fotonskog signala u električni signal koji se lako meri. U optičkoj spektroskopiji kao detektori se koriste: fotocevi, fotomultiplikatori, termistori, piroelektrični detektori, itd. Fotomultiplikatori sadrže fotoosetljivu površinu koja apsorbuje zračenje u UV, VIS i IR oblasti i proizvodi električnu struju proporcionalnu broju fotona koji dospevaju do pretvarača. Drugi fotonski detektori koriste poluprovodnike kao fotoosetljivu površinu ili termalne pretvarače. Na primer, IR zračenje nema dovoljno energije da proizvede merljivu struju kada se koristi fotonski pretvarač, pa se u IR spektroskopiji koriste termalni pretvarači. Apsorpcija IR fotona od strane termalnog pretvarača povećava njegovu temperaturu što utiče na promenu signala. Električni signal koji generiše pretvarač šalje se u signalni procesor gde se prikazuje u formi (cifre, grafički prikaz) koja je pogodna za razumevanje od strane analitičara.

Atomska apsorpciona spektroskopija

U bilo kojoj spektroskopskoj tehnici zasnovanoj na apsorpciji, elektromagnetno zračenje prolazi kroz uzorak (analit) uglavnom nepromenjeno odnosno ne gubeći svoj intezitet. Međutim, intezitet na određenim talasnim dužinama slabi usled apsorpcije. U ovom delu razmatraće se atomska apsorpciona spektroskopija kao primer tehnike za određivanje sadržaja elemenata u uzorcima iz životne sredine.

Da bi došlo do apsorpcije UV/VIS zračenja potrebno je da budu zadovoljena dva uslova. Prvi uslov podrazumeva da zračenje interaguje sa valentnim elektronima atoma u uzorku koji zbog apsorpcije energije prelaze sa osnovnog nivoa na nivo veće energije (pobuđeni nivo). Prelazi elektrona su jasno određeni elektronskom konfiguracijom atoma, a nasumični prelazi sa osnovnog na bilo koji drugi energetski nivo nisu mogući. Na primer, elektronska konfiguracija Na je $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ što znači da Na poseduje 1 valentni elektron u 3s atomskoj orbitali dok su orbitale veće energije (3p, 4s, 3d, 4p itd.) nepopunjene. Apсорpcijom UV/VIS zračenja, valentni elektron iz 3s orbitale može preći u neku od p orbitala ($s \rightarrow p$), ali prelazi $s \rightarrow d$ nisu dozvoljeni jer bi tada došlo do promene kvantnog broja za više od ± 1 . Drugi uslov zahteva da energija zračenja mora biti jednaka razlici energija dva energetska nivoa između kojih se dešavaju prelazi elektrona.

Apsorpcija zračenja koje prolazi kroz uzorak se može opisati preko dve veličine: transparentnija (transmisija) i apsorbanca. **Transparentnija** (T) predstavlja odnos inteziteta zračenja koje je prošlo kroz uzorak (I_p) i inteziteta upadnog snopa zračenja (I_0):

$$T = \frac{I_p}{I_0}$$

Ukoliko se vrednost transparentnije pomnoži sa 100 dobiće se procentna vrednost u opsegu od 0% (svo zračenje je apsorbovano) do 100% (nije došlo do apsorpcije zračenja). Smanjenje inteziteta upadnog snopa zračenja uvek će dati transparentniju čija je vrednost manja od 1. Ono što ne može da se analizira na osnovu iznad navedene jednačine jeste način na koji dolazi do apsorpcije, jer osim apsorpcije od strane analita, intezitet zračenja se može smanjiti zbog rasejanja, apsorpcije zračenja drugih komponentni u matriksu uzorka, refleksije i apsorpcije posude koja sadrži uzorak.

Smanjenje inteziteta elektromagnentnog zračenja se može izraziti i preko apsorbanca (A):

$$A = -\log T = -\log \frac{I_p}{I_0} = \log \frac{I_0}{I_p}$$

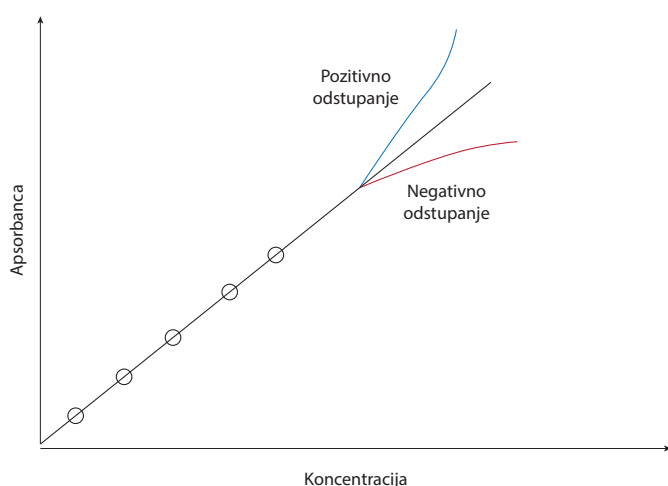
Apsorbanca se češće koristi od transparentnije jer je linearnom zavisnošću povezana sa koncentracijom analita preko Lamber-Berovog zakona (slika 5.7). Prema **Lamber-Berovom zakonu** količina zračenja koja je apsorbovana ili propuštena kroz rastvor ili neku drugu sredinu zavisi od koncentracije prisutne apsorbujuće supstance i od dužine puta zračenja kroz uzorak:

$$A = \epsilon b C$$

gde je ϵ – molarna apsorptivnost analita ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$), b – debljina apsorbujućeg sloja (cm), i C – koncentracija (mol dm^{-3}). Molarna apsorptivnost opisuje verovatnoću da će doći do apsorpcije fotona određene energije, što znači da njena vrednost zavisi od talasne dužine upadnog zračenja. Absorbanca opisana Lamber-Berovim zakonom je aditivna veličina i ukoliko su u uzorku prisutne komponente X, Y i Z, može se predstaviti jednačinom:

$$A_{\text{ukupno}} = \epsilon_X b_X C_X + \epsilon_Y b_Y C_Y + \epsilon_Z b_Z C_Z$$

Slika 5.7. Lamber-Berov zakon i odstupanja



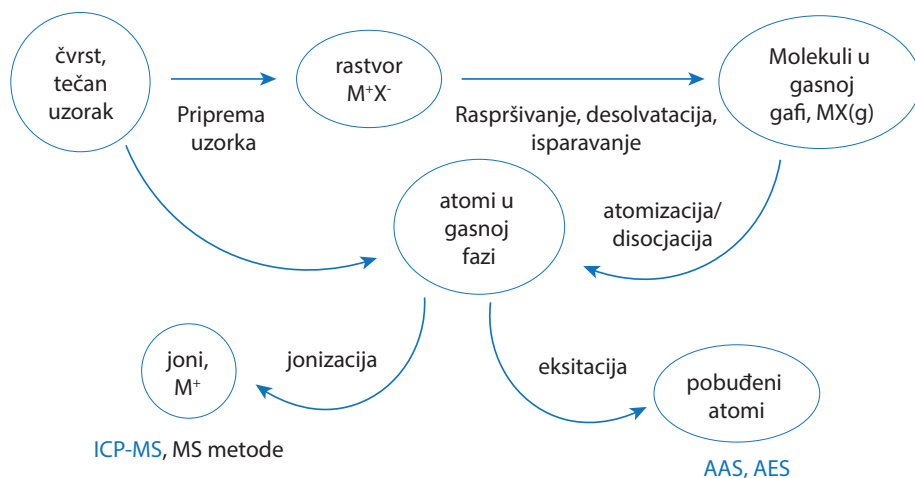
Glavni nedostatak Lamber-Berovog zakona je taj što važi samo za razblažene rastvore čija je koncentracija manja od 0,01 M. Kada je analit prisutan u većim koncentracijama, prosečna udaljenost između čestica u rastvoru je veoma smanjena, pa se međumolekulske interakcije ne mogu zanemariti i svaka čestica utiče na distribuciju naelektrisanja čestice u neposrednoj blizini. Ove interakcije utiču na vrednost molarne apsorptivnosti. Takođe, Lamber-Berov zakon podrazumeva da je upadno zračenje monohromatsko (sadrži samo jednu talasnu dužinu) i da pada normalno na površinu apsorbujućeg sloja. U slučaju da je upadno zračenje polihromatsko, dolazi do negativnih odstupanja od idealne krive (slika 5.7). Odstupanja od linearne zakonitosti se javljaju i ukoliko se u rastvoru odvijaju ravnotežne reakcije.

Atomsku apsorpciju su prvo primenjivali *Guystav Kirchhoff* i *Robert Bunsen* sredinom XIX veka za kvalitativnu identifikaciju atoma, a modernu atomsku apsorpcionu spektroskopiju su 1955. godine nezavisnim radom uveli *Alan Walsh* i *Alkemade* dok su prvi komercijalni uređaji konstruisani tokom 1960. godine. **Atomska apsorpciona spektroskopija** je destruktivna tehnika za analizu elemenata u tečnim ili čvrstim uzorcima. Zasniva se na principu apsorpcije svetlosti (zračenja) od strane atoma u gasnoj fazi, a na osnovu smanjenja intenziteta upadnog zračenja dobija se informacija o koncentraciji analita.

Nakon pripreme uzorka za analizu, prvi korak u primeni atomske apsorpcione spektroskopije je **atomizacija** (slika 5.8). Atomizacijom se analit koji je u tečnom ili čvrstom stanju, ili u rastvoru, prevodi u atom u gasovitom stanju. Najčešće se koriste atomizacija plamenom (*FLame Atomic Absorption Spectroscopy*, FL–AAS) i elektrotermalna jonizacija (*Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy*, GF–AAS), a za nekoliko elementa se koriste drugi tipovi atomizacije. Živa se određuje tehnikom hladnih para (*Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry*, CV–AAS) u kojoj se redukuje do elementalne Hg, a potom biva nošena inernim gasom do izvora zračenja. Elementi kao što su As, Se, Sb, Bi, Ge, Te i Pb se određuju hidridnom tehnikom (*Hydride Generation Atomic Absorption Spectroscopy*, HG–AAS), gde se u reakciji elemenata i NaBH_4 u kiselim uslovima formiraju isparljivi hidridi koji interaguju sa snopom zračenja.

Pre **atomizacije plamenom**, od 2 do 5 mL uzorka se uvodi u sprej komoru u kojoj pneumatski raspršivači formiraju kapljice i aerosol rastvora različite veličine i uniformnosti; veće kapljice se talože, a u plamen (atomizer) dospevaju samo najsitnije (slika 5.8). Moguće je i uvesti u plamen i manje količine uzorka, od 50 do 250 μL . Kapljice i aerosol se mešaju sa gasovima čijim sagorevanjem nastaje plamen. Zbog visoke temperature, u plamenu dolazi do desolvatacije kapljica i aerosola i formiraju se samo sitne čvrste čestice koje dalje isparavaju proizvodeći molekule, jone i slobodne atome (slika 5.8). Visoka temperatura plamena se postiže sagorevanjem smeše gorivi gas–oksidans. Najčešće korišćena smeša je acetilen–vazduh čijim sagorevanjem se dostiže temperatura od 2 100 K do 2 400 K; primeri drugih uključuju: azot–suboksid–vazduh (2 600–2 800 K), vodonik–vazduh (2 000–2 100 K), i acetilen–kiseonik (3 050–3 150 K). Gorionik (plamenik) može da se pokreće u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Horizontalno pomeranje omogućava da se plamen nađe na putanji svetlosnog zraka, a vertikalna pomeranja služe za podešavanje visine plamena. Sa porastom visine plamena rastu broj slobodnih atoma i vreme koje oni provedu u plamenu što znači da se povećava efikasnost atomizacije. Međutim, produženo vreme boravka u plamenu može dovesti do nastanka metalnih oksida koji apsorbuju zračenje na talasnim dužinama različitim od onih na kojima apsorbuju atomi.

Slika 5.8. Koraci u pripremi uzoraka za analizu apsorpcionim i emisionim spektroskopskim tehnikama



Prilikom primene **elektrotermalne atomizacije**, uzorak se smešta na platformu, unutar grafitne kivete, dužine od 1 do 3 cm i prečnika oko 3–8 cm (slika 5.9). Kiveta je smeštena cevi na čijim krajevima se nalaze prozori propustljivi za zračenje koje dolazi iz izvora. Oko 5 do 50 μL uzorka se stavlja na platformu i kiveta se greje dejstvom električne energije. Atomizacija u kiveti se odvija u tri faze koje ukupno traju od 45 do 90 s. U prvoj, temperatura u kiveti dostiže do 110°C što je dovoljno za sušenje uzorka. U drugoj fazi, uzorak se prevodi u pepeo i CO_2 i H_2O na temperaturama od 350°C do 1200°C . Na kraju, temperatura raste do $2000\text{--}3000^\circ\text{C}$ i sve komponente uzorka su atomizovane. Elektrotermalna atomizacija je osetljivija tehnika u odnosu na plamenu atomizaciju, jer mala zapremina kivete omogućava da više atoma bude zarobljeno na malom prostoru, a samim tim i da prelazi na pobuđene nivoe. Veća osetljivost znači i unapređen limit detekcije atomske apsorpcione spektroskopije; na primer, limit detekcije Pb korišćenjem plamena je 10 ppb, a pomoću grafitne kivete je moguće detektovati i 0,007 ppb Pb.

Atomizovan uzorak se postavlja na put snopa svetlosti (izvora zračenja) određene talasne dužine i meri se količina apsorbovanog zračenja. Svaki element ima svoju karakterističnu talasnu dužinu, pa se za svaki element koristi različit **izvor zračenja** što znači da atomskom apsorpcionom spektroskopijom nije moguće odrediti koncentracije više elemenata istovremeno. Najčešće korišćen izvor zračenja je **lampa sa šupljom katodom**. Unutar lampe su smeštene anoda od volframa ili cirkonijuma u obliku štapića i cilindrična katoda od metala za čije

$$I = k N^*$$

gde je k konstanta koja je u vezi sa efikasnošću energetske prelaza. U sistemu koji se nalazi u termodinamičkoj ravnoteži, popunjenost pobuđenog stanja zavisi od ukupne koncentracije atoma (N) prema Bolcmanovoj raspodeli. Na temperaturama manjim od 5 000 K, Bolcmanova raspodela u pobuđenom stanju za većinu elemenata se može predstaviti jednačinom:

$$N^* = N \left(\frac{g_i}{g_o} \right) e^{\frac{-E_i}{kT}}$$

gde su g_i i g_o statistički faktori koji uzimaju u obzir broj ekvivalentnih vrednosti energije za pobuđeno i osnovno stanje, E_i je energija u pobuđenom stanju, k je Bolcmanova konstanta ($1,3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) i T je temperatura u kelvinima. Iz jednačine se može zaključiti da će energetske nivoe sa manjom energijom biti populisaniji i da će prelazi u koje su uključeni davati intenzivnije emisijske linije u spektru.

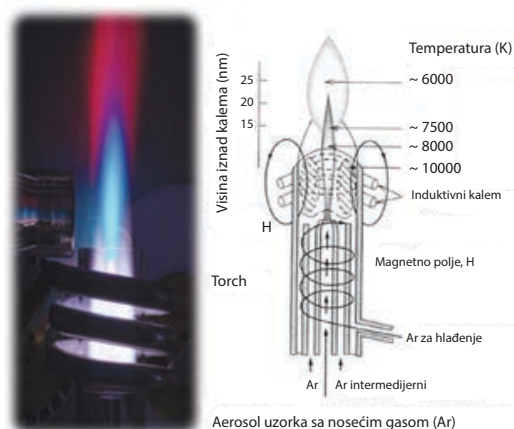
Za razliku od atomske apsorpcione spektroskopije, induktivno spregnuta plazma—optičko emisijska spektrometrija omogućava simultana multielementna analiza makroelemenata (npr. Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na i P) i mikroelemenata (As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Sn, Sr i Zn). U ovoj tehnici, plamen ili česće plazma se koriste i za atomizaciju i za prevođenje rastvora u gasovite atome, pri čemu toplotna energija služi kao izvor pobuđivanja elektrona. **Plazma** predstavlja četvrto agregatno stanje i definiše se kao jonizovan gas. Jonizacija se dešava kada pri sudaru dva atoma ili molekula dolazi do otkidanja elektrona iz elektronskog omotača jednog od njih pri čemu se stvaraju pozitivan jon i slobodan elektron. Energija bar jedne hemijske vrste koja učestvuje u sudaru mora da bude veća od energije jonizacije. Proces u plazmi su mnogobrojni (tabela 5.4), pa se smatra da se plazma približava lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži iako ne dostiže potpunu).

Tabela 5.4. Procesi u plazmi; A – neutralni atom, A^* – pobuđeni atom, e – elektron, $h\nu$ – kvant energije $E=h\nu$, A^+ – pozitivni jon, A^{++} – dvostruko jonizovani atom, AB – molekul

$A + A \rightarrow A^* + A$	<i>Ekscitacija prilikom sudara dva atoma</i>
$A + e \rightarrow A^* + e$	<i>Ekscitacija prilikom sudara atoma i elektrona</i>
$A + h\nu \rightarrow A^*$	<i>Fotoekscitacija</i>
$A + A \rightarrow A^+ + A + e$	<i>Termalna jonizacija</i>
$A + h\nu \rightarrow A^+ + e$	<i>Fotojonizacija</i>
$A + e \rightarrow A^+ + e + e$	<i>Jonizacija prilikom sudara elektrona i atoma</i>
$A^+ + h\nu \rightarrow A^{++} + e$	<i>Višestruka fotojonizacija</i>
$A^+ + e \rightarrow A^{++} + e + e$	<i>Višestruka jonizacija sudarom jona i elektrona</i>
$A + e \rightarrow A^- + h\nu$	<i>Radijativni zahvat</i>
$A + e + e \rightarrow A^- + e$	<i>Trojni zahvat</i>
$AB + e \rightarrow (AB)^- \rightarrow A^- + B$	<i>Disocijativni zahvat</i>
$A^+ + B \rightarrow A+B^+$	<i>Izmena naelektrisanja</i>
$A^{++} + B \rightarrow A^+ + B^+$	<i>Izmena naelektrisanja</i>

Plazma nastaje i održava se induktivnim sprežanjem sa radiofrekventnim elektromagnetnim poljem. Plamenik (*torch*) se sastoji iz tri koncentrične kvarcne cevi (slika 5.10). Kroz unutrašnju cev se uvodi uzorak u obliku finog aerosola pomoću struje argona. Putem srednje cevi se uvodi argon za formiranje plazme dok spoljašnja cev služi za dotok argona koji se koristi za termičku izolaciju plazme; izolacija je neophodna da bi se izbeglo topljenje kvarcne cevi. Oko spoljašnje kvarcne cevi obmotana su 3–4 navoja induktivnog kalema koji je povezan sa radiofrekventnim generatorom (27 MHz, 1–3 kW). Visokofrekventna struja koja protiče kroz induktivni kalem stvara oscilatorno magnetno polje, a inicijalno naelektrisanje u plazmi se uspostavlja pomoću Teslinog pražnjenja. Kada se gas (argon) zasiti elektronima, elektroni se ubrzavaju u elektromagnetnom polju i mogu da jonizuju atome gasa sudarima sa drugim atomima gasa koji dovode do lančane kolizije jonizacije. Na ovaj način nastaje induktivno kuplovana plazma. Jednom stvoreni joni argona mogu da apsorbuju dovoljnu snagu iz spoljašnjeg izvora za održavanje plazme. Magnetno polje izaziva ubrzavanje jona i elektrona u horizontalnoj ravni unutar kalema, zagrevajući neutralne atome argona kolizionom razmenom energije i stvara se vrela „vatrena lopta“.

Slika 5.10. Plazma kao izvor za atomizaciju i eksitaciju u emisionoj spektroskopiji



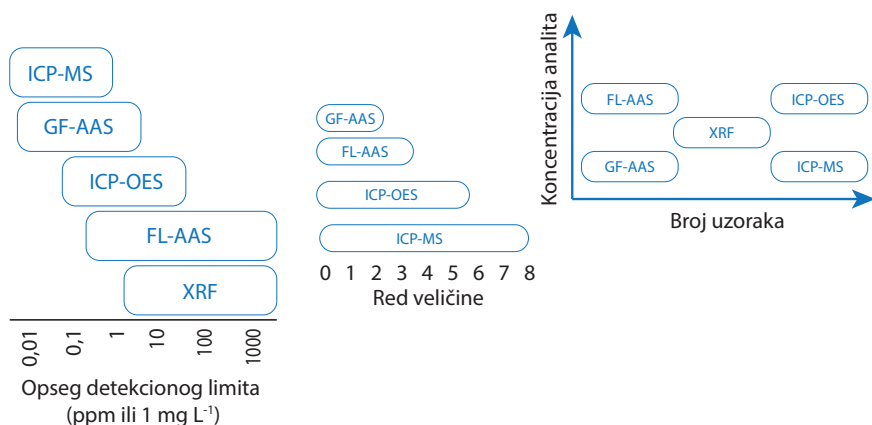
Plazma je kompleksna smeša, ali je u celini elektroneutralna, sa jednakim brojem pozitivno naelektrisanih čestica (jona) i negativno naelektrisanih čestica (elektrona). Sastav plazme čine: neutralni atomi argona (Ar), jonizovani atomi argona (Ar^+), ekscitovani atomi argona (Ar^*), ekscitovani jonizovani argon (Ar^{+*}), metastabilni atomi argona (Ar^m), i elektroni (e^-). Temperatura plazme je oko 7 000–10 000 K, ali je prostorno nehomogena. Razlikuju se: ekscitaciona temperatura koja predstavlja meru populacione gustine energetskih nivoa; jonizaciona temperatura koje zavisi od gustina populacije različitih jonizacionih stanja; temperatura elektrona kao mera kinetičke energije elektrona i temperatura gasa kao mera kinetička energija atoma. Najtopliji deo plazme ima temperaturu od 8 000 do 10 000 K. Za analitičke potrebe je najbitniji deo „repa plamena“, odnosno normalna analitička zona u kojoj je temperatura od 5 000 do 6 500 K. Ova zona se nalazi 15–20 mm iznad kalema i u njoj se odvijaju atomska, jonska i molekulska emisija.

Tečni uzorak se uvodi u plazmu putem „nebulajzera“ (raspršivača) pomoću kojeg se formira aerosol. Selekcija kapljica na osnovu veličine i količine se vrši u aerosol/sprej komori (*spray chamber*) da bi se izbeglo podrhtavanje plazme i nepreciznost merenja. Na izlazu iz komore, aerosol čestice prolaze kroz injekcionu cevčicu dijametra 2 mm, koja je deo plamenika, i ulaze u bazu plazme. Na ulasku u plazmu, kapljice aerosola se prevode u čestice soli pri čemu dolazi do desolvatacija uzorka. U toplijim delovima plazme, čestice soli se razlažu na molekule, a zatim na atome i jone i prelaze u gasovito stanje. Zbog visokih temperatura, većina elemenata se jonizuje vrlo efikasno (više od 90%), a slobodnih molekula i atoma u osnovnom stanju u plazmi nema. Kada atomi i joni napuštaju

plazmu, hlade se na otprilike 6 000 K i emituju karakteristično elektromagnetno zračenje u UV/VIS delu spektra. Zračenje iz plazme se prikuplja, fokusira optičkim delovima i razlaže u spektrometru. Spektrometar je multikomponentni deo i sadrži fokusirajuća ogledala, monohromator ili polihromator, i detektor. U relativno širokom spektralnom rasponu (190–900 nm), monohromator izdvađa uzak raspon talasnih dužina, od 1 do 0,01 nm. Svaki elemenat ima veliki broj emisionih linija na specifičnim talasnim dužinama u spektru koje mogu da se analiziraju. Isti polazni sistem sa plazmom kao izvorom se može koristiti u kombinaciji sa masenom spektrometrijom (videti poglavlje Masena spektrometrija) koja služi za razlaganje i detekciju atoma (elemenata) umesto optičkih komponenti; ova tehnika je poznata pod nazivom induktivno spregnuta plazma–masena spektrometrija (ICP–MS).

Pomoću emisijne spektroskopije sa plazmom se može analizirati više od 70 elemenata simultano dok se ova tehnika ne može primenjivati za određivanje: Ar, CO₂, H i O kada se voda koristi kao rastvarač, C ako se koristi organski rastvarač, atoma halogena koji imaju visoke ekscitacione energije (Cl, Br, I) i radioaktivnih elemenata. Simultana analiza i linearni opseg od 4 do 6 redova veličine su jedne od glavnih prednosti emisijne tehnike u odnosu na apsorpcionu (slika 5.11). Takođe, limit detekcije emisijne tehnika je niži u poređenju sa apsorpcionim. Međutim, cene uređaja koji rade na principu apsorpcije je niža u odnosu na one koji se zasnivaju na emisiji zračenja.

Slika 5.11. Poređenje spektroskopskih tehnika: plamena atomska apsorpciona spektroskopija (FL–AAS), elektrotermalna atomska apsorpciona spektroskopija (GF–AAS), induktivno spregnuta plazma–optičko emisijna spektrometrija (ICP–OES), induktivno spregnuta plazma–masena spektrometrija (ICP–MS), i fluorescencija X-zracima (XRF)



Infracrvena spektroskopija

Kao i ostale spektroskopske metode, primena **IR spektroskopije** se zasniva na interakciji elektromagnetnog zračenja i molekula analita u uzorku. IR zračenje je većih talasnih dužina, a manje energije u poređenju sa zračenjem iz vidljivog dela spektra (videti poglavlje Protok energije u prirodi). Apsorpcija elektromagnetne energije različitih talasnih dužina pobuđuje molekule na različite načine. Ako je frekvencija dovedenog IR zračenja jednaka frekvenciji kojom osciluje molekul duž svoje veze, doći će do rezonancije i molekul će apsorbovati IR zračenje tačno određene frekvencije. Područja koja odgovaraju vibracijama istezanja i savijanja u molekulu se snimaju IR spektrofotometrima.

Ukoliko se molekul zamisli kao grupa „loptica“ (atoma) sa određenom masom, a hemijske veze kao elastične opruge, onda se može pretpostaviti da će pojedine veze u poliatomskom molekulu ponašati kao harmonijski oscilator. Atomi vibriraju oko ravnotežnog položaja na različite načine, uvek pri specifičnim kvantiranim nivoima. Prema Hukovom zakonu frekvencija svake vibracije zavisi od konstante jačine veze (f) i mase (m) odnosno redukovane mase atoma (μ):

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{\mu}}$$

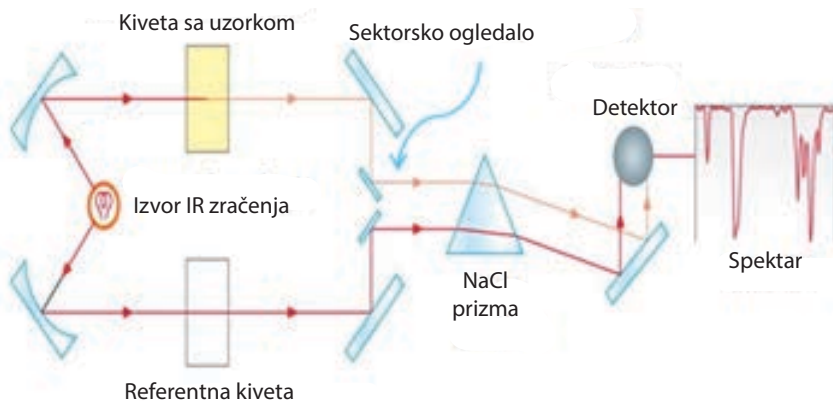
$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

Što je veza jača i konstanta jačine veze će biti jača, a samim tim i frekvencija oscilacije. Na primer, trostruka veza između dva atoma ugljenika je jača od jednostruke i dvostruke pa je i frekvencija istezanja najveća ($f_{C \equiv C} > f_{C=C} > f_{C-C}$). Međutim, sa porastom mase atoma raste redukovana masa, a frekvencija se smanjuje, na primer, $f_{C-H} > f_{C-C}$.

Savremeni IR instrumenti beleže energiju apsorpcije kao funkciju smanjivanja frekvencije, a meri se zavisnost transmitancije (T) od talasnog broja ($\tilde{\nu}$) i/ili talasne dužine (λ). Više detalja o navedenim zavisnostima dato je u poglavlju Protok energije u prirodi. Najčešće primenjivani su dvoznačni spektrometri i spektrometri sa Furijeovom transformacijom (*Fourier Transform Infrared Spectrometer*, FTIR). Osnovni delovi **dvoznačnog IR spektrometra** su: izvor zračenja, sektorsko ogledalo, monohromator, detektor i uređaj za beleženje signala. **Izvor IR zračenja** je inertan čvrst materijal (W nit, Nerstov štapić–Zr+Y, Hg lučna lampa) koji se zagreva i u usijanom stanju emituje kontinualno IR zračenje (slika 5.12). Iz istog izvora se emituju dva ekvivalenta zraka, jedan prolazi kroz uzorak (**merni zrak**), a drugi kroz praznu kivetu ili kivetu sa referentnom supstancom, rastvaračem (**referentni zrak**).

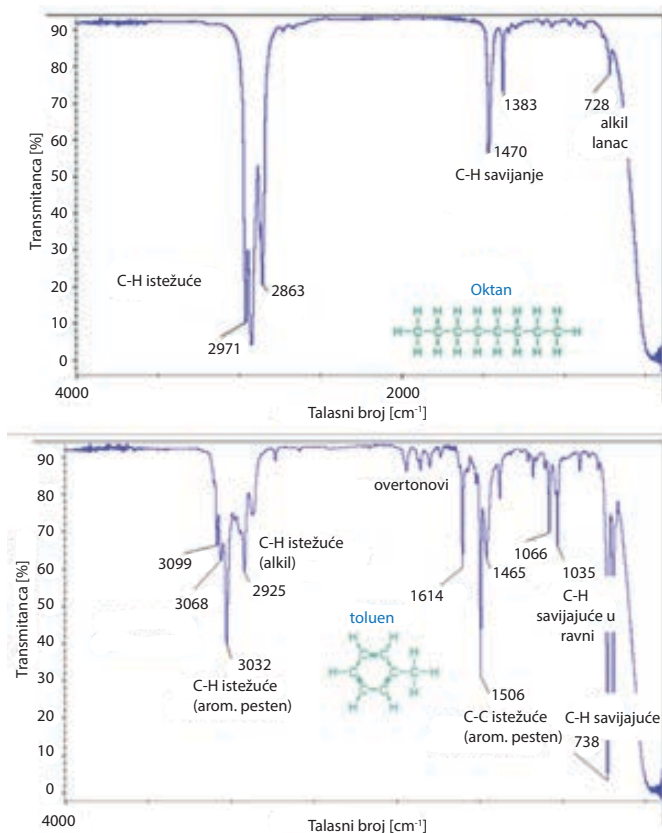
Oba zraka su paralelna i skreću ka rotirajućem **sektorskom ogledalu** koje rotira frekvencijom 10 Hz i naizmenično upućuje zrake ka monohromatoru. **Monohromator** je prizma ili difrakciona rešetka koja razlaže zračenje na sastavne frekvencije (talasne dužine) nakon čega zračenje prolazi kroz **detektor**, koji meri intenzitete zračenja. Uži prorezi u disperzivnom sistemu omogućavaju bolju rezoluciju dok širi prorezi obezbeđuju veću osetljivost jer propuštaju više svetla.

Slika 5.12. Osnovni delovi dvozračnog spektrometra



Pri prolasku mernog zraka kroz uzorak dolazi do apsorpcije IR zračenja. Intenzitet mernog zraka slabi, a na detektor stižu naizmenično zraci različitog intenziteta ($I < I_0$), pa izlazni signal iz detektora ima naizmeničnu komponentu. Ako su oba zraka istog intenziteta, ne apsorbuju ili podjednako apsorbuju, izlazni signal iz detektora nema naizmeničnu komponentu i neće se pojačati u naizmeničnom pojačivaču. Intenzitet referentnog zraka slabi u istoj meri u kojoj slabi i intenzitet mernog zraka usled apsorpcije. Signal preko servomotora pokreće optički klin (optički cešalj, zaklon, attenuator). Mehaničko pomeranje klina prenosi se na pero pisača koje se pomera u uzlaznom smeru IR maksimuma. Optički klin i pero pisača se zaustavljaju kada se uspostavi ravnoteža ($I = I_0$), što odgovara vrhu IR maksimuma. Nakon maksimuma, apsorpcija slabi, ponovo dolazi do neravnoteže ($I > I_0$) i nastaje signal naizmenične struje koji pokreće klin u pravcu uklanjanja sa referentnog zraka i pri tome pero ispisuje silazni deo trake. Po prestanku apsorpcije, zraci su opet jednakih intenziteta, a optički klin i pero miruju (pero se pomera samo po osi λ). Ravnomernim obrtanjem prizme ravnomerno se menja talasna dužina zračenja koje sa monohromatora pada na detektor. Detektori mogu biti električni (termopar, fotoprovodne ćelije, bolometar—promena električnog otpora) i fotonski.

Slika 5.13. Primeri IR spektara



Kod **FTIR spektrometara**, upadno zračenje je polihromatsko. Umesto disperzi-onog elementa koristi se interferometar (Mikelsonov, sa dva ogledala, jedno je fiksirano, drugo se pomera). Posle interakcije sa uzorkom, smanjen je intenzitet na onim talasnim dužinama na kojima uzorak apsorbuje zračenje. Prvo se snima referentni spektar, a potom spektar uzorka. Spektar se dobija matematičkim raščlanjivanjem polihromatskog zračenja na monohromatske komponente i prikazivanjem u vidu zavisnosti frekvencija–intenzitet. Prednosti FTIR spektrometara u odnosu na dvoznačni su:

- kraće snimanje jednog spektra koje traje od 0,25 s (moć razlaganja: 8 cm⁻¹) do 10 s (moć razlaganja: 0,08 cm⁻¹). Kod klasičnih dvoznačnih spektrofotometara snimanje spektra traje najmanje nekoliko minuta;
- veća osetljivost: do 10⁻⁹ g pa se mogu detektovati jedinjenja prisutna u tragovima, kao i analizirati uzorci veličine do nekoliko desetina μm u prečniku. Klasični dvoznačni spektrofotometar zahteva uzorak veličine miligrama;

- mogućnost ponavljanja i sabiranja interferograma što povećava osetljivost;
- veća preciznost i znatno bolje razlaganje – do $0,01\text{ cm}^{-1}$;
- računar omogućava sabiranje i oduzimanje spektara, kao i druge računske manipulacije;
- mogućnost poređenja snimljenih spektara sa spektrima iz biblioteke računara; i
- širi spektralni opseg.

Kvalitativna IR analiza podrazumeva tumačenje IR spektara sa ciljem da se detektuju jedinjenja, njihove strukture i funkcionalne grupe (slika 5.13). Identifikacija nepoznatog jedinjenja bazira se na postojanju „otiska prsta“ (*fingerprint region*) koje se upoređuje sa spektrom poznatog jedinjenja. Svako jedinjenje ima karakterističan spektar u oblasti otiska prsta, koji ne pokazuje ni jedna druga supstanca. Kvantitativna IR analiza je zasnovana na Lamber-Berovom zakonu i daje podatak o količini ispitivane supstance.

Energija u srednjoj IR oblasti odgovara frekvencijama vibracija (oscilovanja) hemijskih veza u nepobuđenim molekulima. Da bi došlo do apsorpcije IR zračenja moraju da budu ispunjeni sledeći uslovi: 1) frekvencija vibracije (oscilacije) hemijske veze (odnosno prirodna frekvencija) mora biti jednaka frekvenciji zračenja; i 2) hemijska veza mora da ima svojstva električnog dipola. Na primer, molekuli H_2 i N_2 nemaju dipolni momenat, simetrični su. Svaka veza u molekulu ima svoju frekvenciju vibracije, a apsorpcijom zračenja iste frekvencije povećava se amplituda te vibracije. Apsorbovana energija IR zračenja u organskim molekulima povećava energiju vibracija i rotacija. Usled toga se javljaju fini spektri u gasnoj fazi dok se u tečnoj fazi se gubi fina struktura jer rotacija nije potpuno slobodna. U čvrstoj fazi je rotacija onemogućena. Broj mogućih vibracija za nelinearne molekule se računa kao $3N-6$, a za linearne kao $3N-5$. Ovo znači da se od ukupnog broja stepeni slobode ($3 \times N = 3 \times 3 = 9$) oduzima broj kretanja pri kojima se ne menja međusobni položaj atoma u molekulu (3 za translatorna kretanja, i 3 za rotacije u nelinearnim i 2 u linearnim molekulima). Simetrične vibracije su neaktivne u IR spektru.

Svaki **IR spektar** odlikuju: **apsorpcioni maksimum** (vrlo jaka traka, jaka traka, srednje jaka traka, slaba traka, vrlo slaba traka i traka promenljivog intenziteta; **apsorpcione trake**; i „**otisak prsta molekula**“. Položaj trake zavisi od frekvencije vibracije hemijske veze, intenzitet trake zavisi od veličine promene dipolnog momenta. Kod višeatomski molekula koji poseduju polarne veze, apsorpcija IR zračenja nije strogo uslovljena postojanjem dipolnog momenta. U IR spektru naročito su izražene frekvencije molekula koje poseduju atomi različitih elektronegativnosti (C–N, C=N, C–O, C=O). Primer IR spektra dat je na **slici 5.13**.

Fluorescencija X-zracima

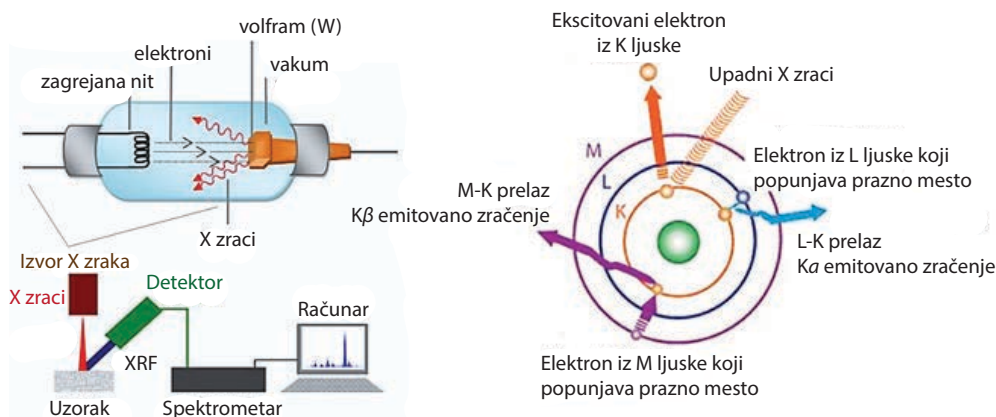
Fluorescencija X zracima odnosno XRF spektrometrija se često ističe kao brza i nedestruktivna metoda za određivanje sadržaja elemenata u uzorcima u čvrstom, tečnom i praškastom stanju. Osim navedenog, njene glavne prednosti u odnosu na ostale spektroskopske metode su brza priprema uzoraka i mogućnost analize istog uzorka više puta. Međutim, limit detekcije ove metode je najčešće na nivou ppm, pa se koristi za analizu zemljišta, stena i minerala; ređe, kod nekih XRF instrumenata, određivanje može dostići limit detekcije na nivou ppb ili ppt.

Primenom XRF spektrometrije, analit se „bombarduje“ X zracima koji se generišu najčešće u rendgenskoj cevi ili drugim izvorima (sinhrotron ili radioizotopi). U rendgenskoj cevi, elektroni emitovani sa volframove katode se ubrzavaju pomoću visokog napona (20–100 kV) i padaju na anodu, koja se obično sastoji od čistog metala kao što su Rh, W, Mo ili Cr (slika X). Sa anode se emituju X zraci i usmeravaju ka analitu. Atomi elemenata prisutnih u uzorku apsorbuju X zračenje. **X zračenje interaguje sa atomima u uzorku: delom se propušta, apsorbuje ili rasejava.** Razlikuju se Komptonovo i Rejljevo rasejanje. Prilikom pojave Komptonovog rasejanja dolazi do sudara fotona sa slabo vezanim elektronom iz spoljašnje ljuske i gubitka energije fotona. U ovom slučaju, talasna dužina rasejanog zračenja je veća od talasne dužine izvora zračenja. Kod Rejljevog rasejanja foton interaguje sa elektronima iz unutrašnje ljuske bez gubitka energije, a talasna dužina rasejanog zračenja je jednaka talasnoj dužini upadnog zračenja. Ukoliko su u uzorku prisutni lakši elementi, Komptonovo rasejanje će dominirati u odnosu na Rejljevo.

Nakon apsorpcije, energija X zraka se predaje elektronima u unutrašnjim ljuskama atoma (K ili L). Ako je upadno zračenje veće energije od energije veze elektrona, elektron se „izbacuje“ iz nivoa u kom se nalazi. Elektroni iz spoljašnjih ljuski više energije prelaze na mesto izmeštenih elektrona (ljuske niže energije) i tom prilikom se emituje fluorescentno X zračenje (slika 5.14). Svaki element ima jedinstvenu elektronsku strukturu pa emituje karakteristično zračenje. Energija emitovanog fluorescentnog zračenja jednaka je razlici energija elektrona na nivoima između kojih je izvršen prelaz. Minimalna energija potrebna da dođe do ekscitacije elektrona iz određene ljuske i koja je jednaka energiji veze elektrona u datoj ljusci naziva se **granica apsorpcije (edge)**. Energije X zračenja koje su niže (duže talasne dužine) od granice apsorpcije nisu dovoljne da proizvedu ekscitaciju elektrona iz orbitale. Što je veća apsorpcija veća je i fluorescencija. Apsorpcija se smanjuje sa porastom energije X zračenja i naglo raste kada se dostigne granica.

Nekada, emisija fluorescentnog zračenja izostaje. Na primer, prilikom prelaska elektrona iz jedne ljuske u drugu (npr. iz M u L) energija može da pređe na spoljašnji elektron koji se nalazi u N ljusci usled čega se on ekscituje; ovakav elektron se naziva Ožeev (*Auger*) elektron. Kod elemenata sa manjim atomskim brojem, intenzitet zračenja K i L linije smanjuje se sa smanjenjem atomskog broja, pa ih je teško meriti XRF analizom. Na kraju, emitovani zraci se detektuju pomoću detektora, a nakon prolaska kroz multikanalni analizator dobija se spektar.

Slika 5.14. Osnovni principi XRF analize i delovi uređaja



Kvalitativna XRF analiza podrazumeva merenje energije spektralnih linija, a kvantitativna XRF analiza na osnovu inteziteta spektralnih linija daje informaciju o koncentraciji elemenata. Najčeste se koriste dve vrste XRF spektrometara: **energijsko-disperzivni** (*Energy Dispersive Spectrometer, EDXRF*) koji sadrži detektor koji meri različite energije karakterističnog zračenja analita, i **talasno-disperzivni** (*Wavelength Dispersive Spectrometer, WDXRF*) u kom se talasne dužine karakterističnog zračenja analita razdvajaju na kristalu, a nakon difrakcije se detektuju pod različitim uglovima. EDXRF je jeftiniji, brži i njim se jednostavnije rukuje nego sa WDXRF. Međutim, WDXRF poseduje bolju rezoluciju u odnosu na EDXRF, niži limit detekcije, osetljiviji je na prisustvo elemenata sa manjim atomskim brojem.

U XRF spektru razlikuju se: karakterističan, Komptonov i Rejljev pik i pozadinsko zračenje. **Karakterističan pik** se javlja kada element emituje fluorescentno X zračenje određene energije. Površina ispod pika direktno je proporcionalna koncentraciji elemenata u ispitivanom uzorku. **Rejljev pik** je oštar isto kao i karakterističan pik, a **Komptonov pik** je širi od Rejljevog i energija Komptonovog pika će biti manja od Rejljevog. **Pozadinsko zračenje** se javlja uglavnom kao

rezultat Rejljevog i Komptonovog rasejanja primarnog zračenja (emitovanog iz rendgenske cevi) na površini analiziranog uzorka. Intezitet pozadinskog zračenja je veći kod analize elemenata sa manjim atomskim brojem.

5.3.5. Separacione metode i hromatografija

Među mnogobrojnim analitičkim tehnikama, od kojih su neke opisane u okviru poglavlja 4, razvijene su i dizajnirane metode za određivanje jako niskih koncentracija analita u jako kompleksnim matriksima. Uprkos snazi ovih tehnika, one često pate od nedostatka selektivnosti, pa iz tog razloga, mnoge analitičke procedure uključuju korak prečišćavanja odnosno odvajanja analita od potencijalnih interferirajućih supstanci. Neke od metoda prečišćavanja su su poznate kao **separacione tehnike**, a primeri su prikazani u tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Primeri separacionih tehnika

<i>Osnova za razdvajanje</i>	<i>Metoda</i>
<i>Razlika u veličini molekula</i>	<i>Filtracija</i>
	<i>Dijaliza</i>
	<i>Ekskluziona hromatografija</i>
<i>Razlika u masi i gustini</i>	<i>Centrifugiranje</i>
	<i>Formiranje kompleksa</i>
	<i>"Maskiranje"</i>
<i>Promena fizičkog stanja</i>	<i>Destilacija</i>
	<i>Sublimacija</i>
	<i>Rekristalizacija</i>
<i>Promena hemijskog stanja</i>	<i>Taloženje</i>
	<i>Jonska izmena</i>
	<i>Elektrodepozicija</i>
<i>Razdvajanje između faza</i>	<i>Ekstrakcija</i>
	<i>Hromatografija</i>

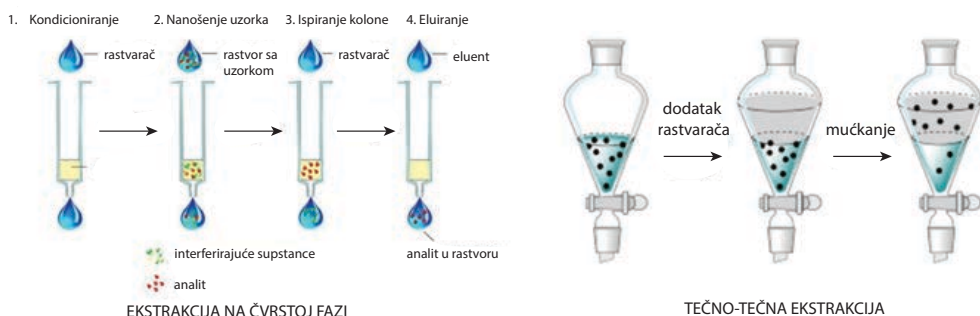
Tipičan primer separacione metode je **tečno-tečna ekstrakcija**, pri čemu ekstrakcija podrazumeva transfer analita (rastvorene supstance) iz jedne faze u drugu (slika 5.15). Analit od interesa se „deli“ između dve tečne faze koje su različite polarnosti i gustine i koje se ne mešaju međusobno. Najčešće je jedna faza vodena, a druga je organski nepolaran rastvarač. Raspodela analita i interferirajuće supstance između dve faze koje se ne mešaju može se opisati konstantom ravnoteže odnosno particionim koeficijentom:

$$K_D = \frac{(\text{molaritet ili rastvorljivost})_2}{(\text{molaritet ili rastvorljivost})_1}$$

Ukoliko je vrednost K_D dovoljno velika, analit će preći iz faze 1 u fazu 2 dok se pri dovoljno niskim vrednostima K_D , analit se zadržava u fazi 1. Particioni koeficijent je parameter koji zavisi od hemijske ravnoteže i ima fiksnu vrednost, i važno ga je razlikovati od distribucionog koeficijenta koji se menja u zavisnosti od uslova u rastvorima faza kao što je postojanje sekundarnih reakcija (kiselinsko-bazne promene i kompleksirajući agensi) na vrednost D . Usled kompleksnosti matriksa uzoraka iz životne sredine, tečno-tečna ekstrakcija se retko kada izvodi u jednom koraku već se ponavlja više sukcesivnih ekstrakcija što zahteva potrošnju velikih količina rastvarača i dugo traje. Takođe, da bi se analit odvojio od matriksa, njegov distribicioni koeficijent mora biti znatno veći od onog za sve ostale komponente u matriksu. Ako je odnos raspodele analita sličan onom koji imaju interferirajuće supstance, onda razdvajanje postaje nemoguće.

Drugi primer ekstrakcije je **ekstrakcija na čvrstoj fazi** (*Solid-Phase Extraction, SPE*) prilikom čije primene se uzorak propušta kroz čvrsto punjenje tj. sorbent (slika 5.15). Nakon sorpcije, analit se spira odgovarajućim rastvaračem koji se naziva eluent. Moguć je izvršiti i obratan postupak odnosno težiti zadržavanju intereferirajućih supstanci na sorbentu.

Slika 5.15. Primeri principa izvođenja ekstrakcionih tehnika

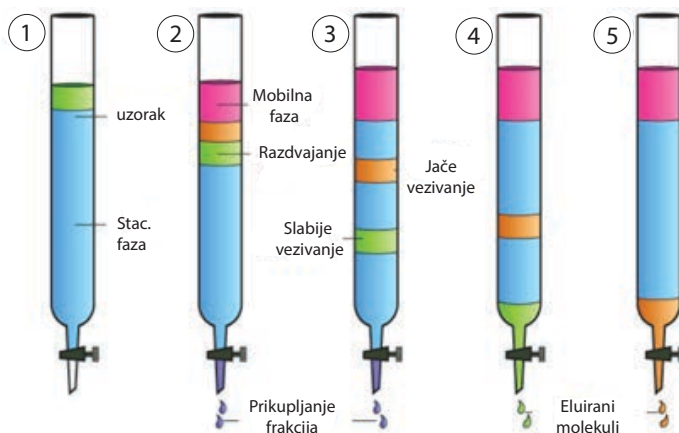


Izbor sorbenta zavisi od osobina analita i matriksa u kom se on nalazi, a delotvornost ekstrakcije zavisi od: primenjenog rastvarača (ekstrakcionog sredstva), temperature, pritiska i vremena kom je uzorak (matriks) izložen rastvaraču. U poređenju sa tečno-tečnom ekstrakcijom, ekstrakcija na čvrstoj fazi je brža, traje od 10 do 20 min po uzorku (u odnosu na 1 do 2 h); troše se manje zapremine rastvarača (2–20 mL u odnosu na 200–500 mL); ne stvaraju se emulzije i selektivnija je. Često primenjivane ekstrakcije uključuju i: Soksletovu, ultrazvučnu, mikrotalasnu i ekstrakciju pod pritiskom.

Problem sa jednostavnom ekstrakcijom je što se razdvajanje dešava samo u jednom pravcu. Na primer, u tečno-tečnoj ekstrakciji, jednom ponovljena ekstrakcija odvaja analit i interferirajuću supstancu u određenom odnosu čija se vrednost smanjuje sa svakom ponovljenom ekstrakcijom i dolazi do lošijeg odvajanja. Odvajanje se može poboljšati ekstrahovanjem rastvorene supstance napred i nazad stalnim dodavanjem svežih delova dve faze, što čini osnovu moderne hromatografije. **Hromatografija** je metoda za razdvajanje komponenti smeša (preparativna hromatografija) i njihovu analizu (kvantitativna i kvalitativna analitička hromatografija). Začecima hromatografije se smatraju eksperimenti Mihaila Cveta koje je sprovodio davne 1903. godine za razdvajanje biljnih pigmenata.

Osnovni princip hromatografije podrazumeva da različite komponente smeše različito reaguju sa jednom istom supstancom. Najpre se uzorak se rastvori u pogodnom rastvaraču (**mobilna faza**/eluent/pokretna faza), a potom se nanosi preko nepokretne faze (**stacionarna faza**). Komponente uzorka (molekuli) u mobilnoj fazi interaguju sa stacionarnom fazom putem adsorpcije ili hemijskih reakcija. Prostor u kom dolazi do interakcije između mobilne i stacionarne faze se naziva **hromatografska kolona**. Nekoliko je osnovnih procesa koji se odvijaju prilikom hromatografskog odvajanja: 1) uzorak se dovodi u dodir sa stacionarnom fazom na vrhu hromatografske kolone; 2) dodavanjem eluenta (rastvarač kojim se uzorak spira sa kolone) razdvajaju se komponente u uzorku prema jačini vezivanja za stacionarnu fazu (nosač); i 3) različite komponente stižu za različito vreme do kraja hromatografske kolone pri čemu komponente koje se vezuju jače sa stacionarnu fazu, putuju duže kroz hromatografsku kolonu (slika 5.16). Ceo postupak se naziva **eluiranje**.

Slika 5.16. Razdvajanje komponentni smeše u hromatografskoj koloni



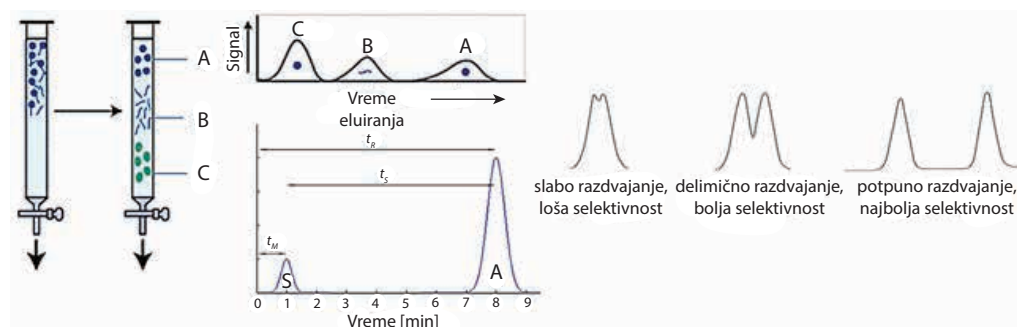
Vreme za koje neka komponenta prođe kroz hromatografsku kolonu naziva se **retenciono vreme** (t_R) i predstavlja zbir mrtvog vremena i korigovanog retencionog vremena (slika 5.17):

$$t_R = t_M + t_s$$

Mrtvo vreme (t_M) je vreme koje je potrebno da mobilna faza prođe kroz kolonu. Često je najkraće moguće vreme i javlja se i kada neka od komponenti ne interaguje sa stacionarnom fazom. **Korigovano retenciono vreme** (t_s) je vreme tokom kojeg je komponenta od interesa vezana sa stacionarnu fazu. Retenciono vreme je karakteristično za određenu komponentu i zavisi od njenih fizičkih i hemijskih osobina, temperature, pritiska, eluenta, brzine eluiranja i osobina stacionarne faze. Zavisnost hromatografskog signala od retencionog vremena se predstavlja na **hromatogramu**. Signali na hromatogramu imaju često izgled Gausove raspodele (moguća pozitivna i negativna odstupanja) i nazivaju se **hromatografski pikovi**, a njihov intezitet je srazmeran koncentraciji komponente (slika 5.17). Razdvajanje hromatografskih pikova zavisi od retencionog vremena koje primarno zavisi od strukture mobilne faze, tj. njene jačine. Menjanjem jačine mobilne faze menjaju se ravnoteža između faza i elucione osobine jedinjenja od interesa. **Efikasnost** hromatografskog razdvajanja zavisi od veličine i oblika čestica stacionarne faze, pora i dužine kolone, nanošenja uzorka. Punjenja sa manjim česticama uzrokuju oštrije pikove. Rastojanje između pikova zavisi od karakteristika stacionarne i mobilne faze i utiče na **selektivnost razdvajanja**. Glavni faktori koju utiču na selektivnost su hidrofobnost, polarnost i hemijska struktura stacionarne faze. Odvajanja na stacionarnoj fazi se odvijaju po principu

„slično reaguje sa sličnim“. Na primer, C_{18} stacionarna faza je nepolarna i idealna za odvajanje peptida i proteina; stacionarna faza sa amino grupama je delimično polarna i dobra za razdvajanje ugljenih hidrata, i jedinjenja koja sadrže azot; stacionarna faza sa aluminijum oksidom je visoko polarna i pogodna razdvajanje jedinjenja sa kiselim osobinama.

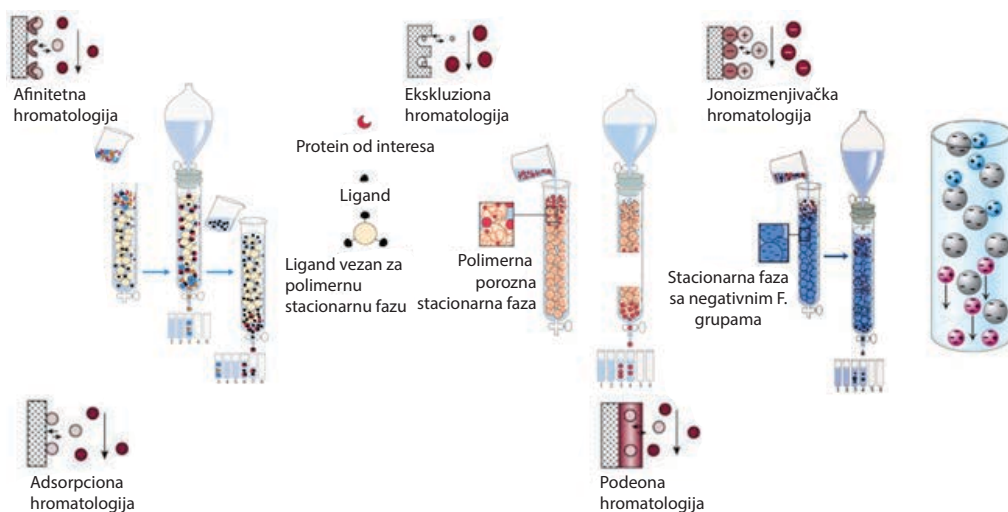
Slika 5.17. Hromatograf i osnovni delovi



Podela hromatografije na osnovu **vrste interakcija sa stacionarnom fazom** obuhvata sledeće tipove: adsorpciona hromatografija, podeona (particiona) hromatografija, jonoizmenjivačka hromatografija, ekskluziona hromatografija i afinitetna hromatografija (slika 5.18). **Adsorpciona hromatografija** podrazumeva adsorpciju kao glavni mehanizam vezivanja molekula za stacionarnu fazu. Molekuli, komponentne iz uzorka, koji imaju izražen afinitet prema stacionarnoj fazi se jače adsorbuju i imaju veće retenciono vreme. Uz proces adsorpcije istovremeno je moguća i desorpcija. Pilikom primene **podeone hromatografija**, komponente uzorka se rastvaraju u tečnoj stacionarnoj fazi. Stepent rastvaranja je određen koeficijentom raspodele jedinjenja koji predstavlja odnos njegovih koncentracija u stacionarnoj odnosno mobilnoj fazi. Ukoliko se komponenta bolje rastvara u stacionarnoj fazi, koeficijent raspodele biće veći što znači da će molekuli sporije prolaziti kroz kolonu i imati veće retenciono vreme. **Jonoizmenjivačka hromatografija** se koristi za odvajanje molekula u obliku jona. Hromatografske kolone sadrže jonoizmenjivačke smole koje imaju inertnu podlogu za koju su vezane specifične funkcionalne grupe. Na primer, katjonske smole sadrže negativno naelektrisane kiselinske grupe za koje se vezuju katjoni, a kao eluent se može koristiti kiselina (HCl). Anjonske smole sadrže pozitivno naelektrisane bazne grupe koje vezuju anjone, a kao eluent se primenjuje rastvor hidroksida (KOH). Takođe, postoje i amfoterne smole koje mogu da vezuju i anjone i katjone u zavisnosti od pH vrednosti. Joni se razdvajaju na osnovu različitog afiniteta prema smoli

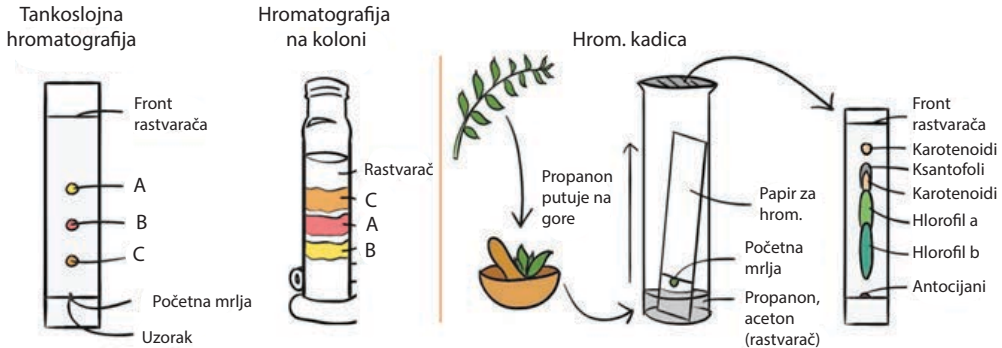
što je uslovljeno različitim dimenzijama i naelektrisanjem. Veći i više naelektrisani joni će se jače vezivati za stacionarnu fazu. **Ekskluziona hromatografija** se zasniva na razdvajanju u zavisnosti od veličine čestica. Čestice različite veličine se različitom brzinom kreću kroz stacionarnu fazu koja je porozna i čije su pore različitih veličina. Ako su molekuli veći od pora, prolaze brže kroz kolonu dok se manji zadržavaju u porama. Prilikom razdvajanja ne dolazi do adsorpcije ili hemijskih interakcija. U afinitetnoj hromatografiji razdvajanje se odvija prema principu „ključ-brava“ koji je karakterističan za biološke molekule kao što su veze antigen-antitelo i enzim-supstrat.

Slika 5.18. Podela hromatografije prema interakciji sa stacionarnom fazom



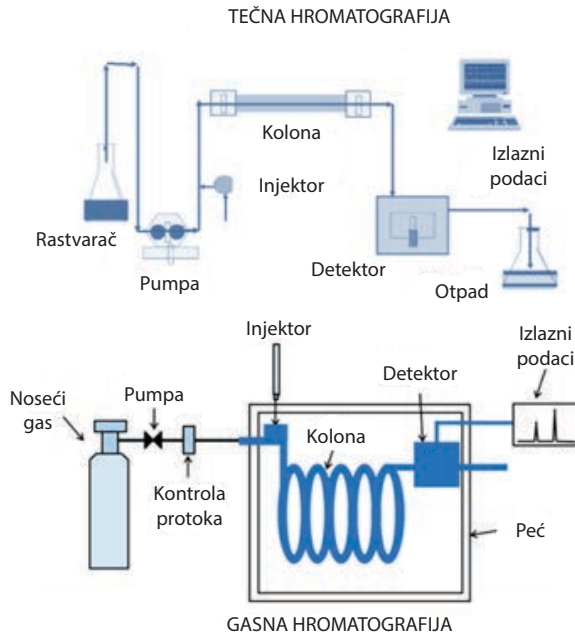
Osim prema tipu interakcija, hromatografija se klasifikuje prema **tipu nosača** na: **dvodimenzionalnu hromatografiju na tankom sloju** i **hromatografiju na papiru** i **trodimenzionalnu hromatografiju na koloni** (slika 5.19.). Hromatografija na tankom sloju i hromatografija na papiru su planarne tehnika za razdvajanje obojenih i neisparljivih uzoraka, na primer biljnih pigmenata (slika 5.19). Uzorak se nanosi u vidu tačke, a potom se uranja u rastvarač (eluent) koji se kapilarnim silama penje ili silazi uz papir. Nakon eluiranja, procenjuju se retencioni faktori koji predstavljaju odnos rastojanja od centra traga koje je prešla neka komponenta i fronta rastvarača. Kod tankoslojne umesto papira se koristi adsorbens kao što su silika gel ili aluminijum oksid. Tankoslojna hromatografija je brža od hromatografije na papiru.

Slika 5.19. Podela hromatografije prema tipu nosača



Prema **tipu mobilne faze**, hromatografija se deli na: tečnu, gasnu i u novije vreme, superkritičnu. **Tečna instrumentalna hromatografija** uglavnom se odnosi na tečnu hromatografija pod visokim pritiskom ili tečnu hromatografiju visokih i ultra performansi (*High/Ultra Performance Liquid Chromatography*, HPLC/UPLC). Izvođenjem pod pritiskom se postiže brže eluiranje i efikasnije razdvajanje, a razlika u pritiscima na krajevima kolone može dostići i do 1000 atmosfera (bar).

Slika 5.20. Šematski prikaz uređaja za tečnu i gasnu hromatografiju



Eluiranje može biti izokratsko kada je eluent istog sastava tokom celog izvođenja, i gradijentno, kada se sastav eluenta menja u zavisnosti od željene efikasnosti razdvajanja. Uređaj za HPLC/UPLC preuzima rastvarače iz rezervoara sa rastvaračima visoke čistoće i uvodi ih u pumpu (slika 5.20). Pumpa ih pod visokim pritiskom (50 do 1000 atmosfera) uvodi u kolonu, a takođe se u kolonu uvodi 5 do 20 μL uzorka pomoću injektora. Injektovanje može biti ručno pomoću mikrošprica ili automatsko. Stacionarne kolone koje se koriste su punjene česticama dimenzija 3 do 5 μm u prečniku, a njihova dužina je oko 20 cm i prečnik od 2 do 4 mm. Kolone su od čelika sa punjenjem od silika-gela, polietilena ili polimetakrilata (tabela 5.6). Kao detektori se mogu koristiti: detektor indeksa prelamanja, UV-VIS, IC, fluorescentni, elektrohemijski, i masena spektrometrija.

Tečna hromatografija uključuje sve tipove hromatografije opisane iznad: tečno-tečnu, tečno-čvrstu, normalno faznu, reverzno faznu, adsorpcionu, ekskluzionu, jonoizmenjivačku, afinitetnu, tankoslojnu i hromatografiju na papiru. U **normalno faznoj hromatografiji** koristi se stacionarna faza koja je polarna (na primer, silika gel sa OH grupama), a mobilna faza je nepolarna. Što je komponenta u uzorku polarnija ostvariće će jaču interakciju sa nepokretnom fazom. Međutim, ponovljivost ove metode je niska, jer se vezuje voda iz uzorka i druge ometajuće polarne komponente. U **reverzno faznoj hromatografiji**, stacionarna faza je nepolarna (silika gel sa alkil grupama) dok je mobilna faza polarna. Nepolarni molekuli ostvaruju hidrofobne interakcije sa stacionarnom fazom i duže se zadržavaju na koloni. Komponente izlaze iz smeše obratnim redosledom u odnosu na onaj u normalno faznoj hromatografiji.

Tabela 5.6. Poređenje karakteristika kapilarnih i pakovanih kolona

<i>Pakovane kolone</i>	<i>Kapilarne kolone</i>
<i>Kolona sadrži stacionarnu fazu sastavljenu od finih čestica</i>	<i>Kolona sadrži stacionarnu fazu koja je naneta u unutrašnjosti čvrstog materijala</i>
<i>Pakovano "punjenje"</i>	<i>Tanak sloj</i>
<i>Zahteva veliku količinu uzorka</i>	<i>Zahteva malu količinu uzorka</i>
<i>Veliki pritisak unutar kolone</i>	<i>Mali pritisak unutar kolone</i>
<i>Kratke</i>	<i>Duge</i>
<i>Prečnik nekoliko milimetara</i>	<i>Prečnik oko 1 milimetar</i>
<i>Niska efikasnost</i>	<i>Visoka efikasnost</i>
<i>Niža rezolucija</i>	<i>Veća rezolucija</i>
<i>Jeftinija</i>	<i>Skuplja</i>
<i>Bolja za razdvajanje nepolarnih jedinjenja</i>	<i>Bolja za razdvajanje polarnih jedinjenja</i>

U **gasnoj hromatografiji**, mobilna faza je gas, a jedinjenja od interesa moraju da budu isparljiva i termostabilna (BTEX, pesticidi, mirisi, arome, ugljovodonici). Noseći gas odnosno mobilna faza (O_2 , He, N_2) se iz boce uvodi u kolonu preko regulatora pritiska i protoka (slika 5.20.). Upotreba svakog od navedenih gasova poseduje svoje prednosti i nedostatke; O_2 ima nisku cenu i visoku efikasnost, ali je zapaljiv i reaguje kao redukciono sredstvo; He je skup, ali inertan, nezapaljiv i efikasan dok je N_2 jeftin, inertan, nezapaljiv, ali manje efikasan od O_2 i He. Pomoću injektora oko 1 μ L uzorka se uvodi u struju nosećeg gasa, a ako je uzorak tečan, zagreva se u injektoru da bi ispario. Temperatura injektora je za 50°C veća od tačke ključanja najmanje isparljive komponente koja se analizira. Uzorci u gasovitom obliku se uvode gasnim slavinama (oko 1 mL). Stacionarna kolona, najčešće kapilarna (tabela 5.6), je smeštena u peć u kojoj se održava stalna temperatura ili se menja po određenom programu. Što je temperatura kolone veća, komponente prolaze brže, ali slabije reaguju sa stacionarnom fazom. U zavisnosti od jedinjenja koja je potrebno detektovati koriste se različiti detektori: plameno-jonizujući za ugljovodonike, detektor toplotne provodljivosti i maseni kao univerzalni detektori, detektor zahvata elektrona za halogena jedinjenja, fotojonizacioni za jedinjenja koja apsorbuju UV zračenje, i plameno fotometrijski za jedinjenja sa sumporom i fosforom. Poređenje karakteristika gasne i tečne hromatografije dato je u tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Poređenje karakteristika gasne i tečne hromatografije

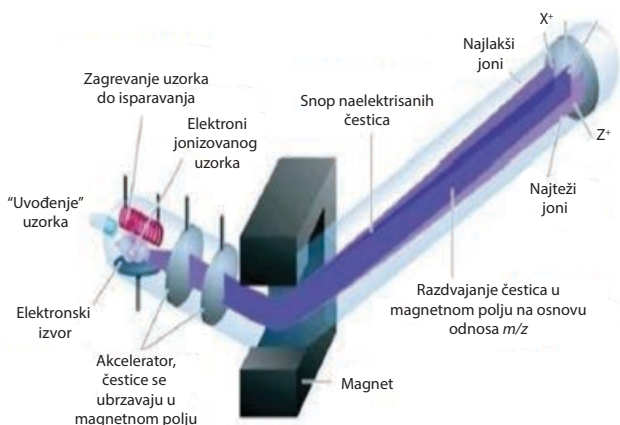
Gasna hromatografija	Tečna hromatografija
<i>Analiza isparljivih jedinjenja u gasovitom obliku</i>	<i>Analiza jona i molekula rastvorenih u rastvaraču</i>
<i>Gasno-tečna</i>	<i>Tečno-čvrsta</i>
<i>Mobilna faza: gas</i>	<i>Mobilna faza: tečnost</i>
<i>Kolone duge i uske, pakovane i kapilarne</i>	<i>Kolone kratke i šire, pakovane</i>
<i>Niska efikasnost</i>	<i>Visoka efikasnost</i>
<i>Visoka temperatura</i>	<i>Visok pritisak</i>
<i>Rezolucija zavisi od isparljivosti komponenti</i>	<i>Rezolucija zavisi od polarnosti komponenti i sastava mobilne faze</i>
<i>Uzorak isparljiv</i>	<i>Manje isparljivi uzorci</i>
<i>Jeftinija</i>	<i>Skuplja</i>
<i>Ulja, pigmenti, pesticidi, masne kiseline, toksini, uzorci vazduha, itd.</i>	<i>Neorganski joni, polimeri, biomolekuli (proteini, šećeri, masti), vitamini, itd.</i>

5.3.6. Masena spektrometrija

Masena spektrometrija je jedna od najznačajnijih savremenih analitičkih tehnika u analizi organskih i neorganskih jedinjenja koja se koristi za određivanje: 1) molekulske mase analita u uzorku, i 2) identifikaciju strukturnih jedinica unutar molekula na kojima je najveća verovatnoća da dođe do fragmentacije molekuskog jona u spektru masa organskih jedinjenja. U životnoj sredini, masena spektrometrija ima višestruku namenu za: ispitivanje kvaliteta vazduha, vode i hrane; proučavanje metaboličkih puteva zagađujućih materija; biohemijska ispitivanja bioloških molekula kao što su proteini i polimeri; kliničko dijagnostifikovanje prisutnosti lekova, opijata i steroida u ljudskom organizmu itd.

Osnovni princip analize se zasniva na jonizaciji uzorka primenom električnog polja ili „bombardovanjem“ elektronima, jonima ili fotonima. Nakon uvođenja uzorka u uređaj, u procesu **jonizacije**, dolazi do sudara između elektrona koji poseduju energiju od 50 do 70 eV i molekula u uzorku, pri čemu se na ovako nastali joni cepaju u više fragmentacionih jona (slika 5.21). Svaki novonastali jon poseduje masu i naelektrisanje, a njihov **odnos m/z** je karakterističan za svaku vrstu jona. Nije redak slučaj da većina jona poseduje naelektrisanje $z=1$, pa m/z predstavlja masu tog jona. Naelektrisani joni/njihovi klasteri/njihovi fragmenti prolaze u snopu kroz električno ili magnetno polje koji se razlaže u analizatoru na osnovu razlike u količnicima mase i naelektrisanja jona. Nakon razlaganja, joni dospevaju do detektora u kom formiraju električni signal koji se snima na kompjuteru/lap topu. Na kraju, kvalitativna i kvantitativna analiza se vrše na osnovu vrednosti m/z i relativne zastupljenosti vrsta u jedinstvenom spektru masa.

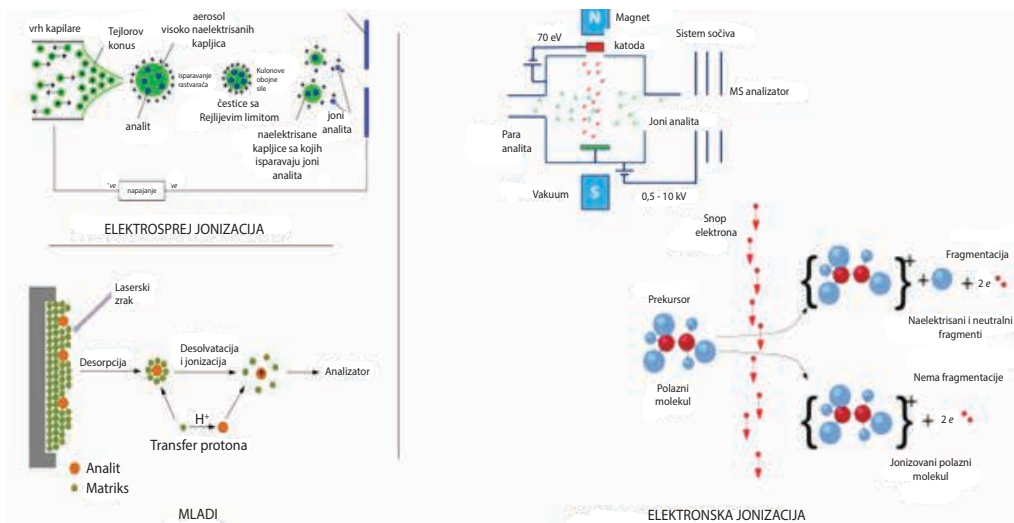
Slika 5.21. Osnovni koraci u analizi primenom masene spektrometrije



Osnovni delovi masenog spektrometra su: 1) deo za uvođenje uzorka (*inlet*); 2) jonski izvor za jonizaciju uzorka i stvaranje tzv jonskog snopa; 3) maseni analizator koji razlaže jone prema m/z odnosu; 4) detektor (najčešće elektronski multiplikatori) koji detektuje razložene jone i meri njihov intenzitet; 5) vakuum sistem u kom visok vakuum održava nizak pritisak od 10^{-2} do 10^{-5} Pa i omogućava da joni stignu sa jednog kraja uređaja na drugi, a da se ne sudare sa drugim molekulima, neutrališu ili raseju; i 6) računar za prijem i obradu podataka. Iz atoma ili molekula u uzorku, **jonski izvor** proizvodi jone, va iše jona čini jonski snop koji je potrebno ubrzati ka masenom analizatoru. Prilikom interakcije sa energijom iz jonskog izvora, molekuli u uzorku gube jedan ili više elektrona i nastaju joni koji se zagrevaju i desorpcijom i desolvatacijom prevode u gasovitu fazu. Takođe, polazni molekuli se mogu fragmentisati na dva ili više segmenata koji ukazuju na to od kojih je komponenta sastavljen ispitivani molekul i čijom identifikacijom se može odrediti struktura molekula. Deo molekula koji ne fragmentiše odnosno ostaje ceo, na kraju analize u masenom spektru daje signal s najvećom vrednosti mase koja pokazuje molekulsku masu molekula i naziva se **molekulski jon**. Izbor jonskog izvora zavisi od prirode uzorka kao i od vrste informacija koje treba dobiti. Primeri jonskih izvora i načina jonizacije su: elektronska jonizacija (*Electron Ionisation*, EI), hemijska jonizacija (*Chemical Ionisation*, CI), desorpcija poljem (*Field Desorption*, FD), bombardovanje brzim atomima (*Fast Atom Bombardment*, FAB), elektrosprej jonizacija (*Electrospray Ionisation*, ESI), i jonizacija potpomognuta laserskom desorpcijom (otparavanjem) iz matriksa (*Matrix Assisted Laser Desorption Ionisation*, MALDI).

U toku **elektronske jonizacije**, molekuli u gasnoj fazi se bombarduju snopom brzih elektrona, koji se proizvodi pomoću filameta (katode) zagrejanog do visoke temperature provođenjem struje kroz njega (energije oko 70 eV). Elektroni koji se izbiju sa filameta, ubrzavaju se prema pozitivno naelektrisanom anodi (slika 5.22). Variranjem potencijala između katode i anode, menja se i energija elektrona, a time i učinak fragmentacije. Primenom elektronske jonizacije molekuli analita jako fragmentišu.

Slika 5.22. Principi rada izvora jonizacije



Primenom **elektrosprej jonizacije** analit se jonizuje u obliku rastvora. Kao rastvarač se bira supstanca koja je isparljivija od analita sa polarnim karakteristikama (voda, pufer). Rastvarač se u struji azota raspršuje kroz čeličnu kapilaru na koju se pri atmosferskom pritisku primenjuje jako električno polje od 1,5 do 2 kV (slika 5.22). Pod uticajem električnog polja dolazi do odvajanja pozitivnog i negativnog naelektrisanja u rastvoru. Kada se kapilara priključi na pozitivan kraj izvora napona, pozitivno naelektrisani joni putuju prema katodi i akumuliraju se na površini tečnosti. Jako električno polje dovodi do toga da kapljice analita dospevaju do vrha kapilare dispergujući se u aerosol visoko naelektrisanih kapljica. Pri kritičnoj jačini polja, kapljice obogaćene pozitivno naelektrisanim jonima počinju kontinualno da se proizvode i formiraju tzv. Tejlorov konus (kupu). Vremenom, rastvarač isparava pa se njegova količina smanjuje, a gustina neravnotežnog naelektrisanja se povećava na površini kapljice. Zbog ovog, odbojne sile među naelektrisanjima rastu prouzrokujući niz eksplozija sve dok joni analita isparavaju iz kapljice. Pod uticajem gradijenta potencijala i pritiska, ove čestice putuju prema analizatoru masenog spektrometra. Elektrosprej jonizacija je blaga jonizacija koji omogućava prenos jona iz rastvora u gasnu fazu, pa ima veliki doprinos u razvoju moderne masene spektrometrije. Jedinstveno svojstvo elektrospreja je nastajanje višestruko naelektrisanih jona.

Još jedna visoko primenjivana tehnika meke jonizacije je **MALDI**. Ova tehnika direktno jonizuje i prevodi jone analita iz tečne faze u gasnu i koristi se za bio-molekule koji su termolabilni i neisparivi poput proteina, peptida, i polisaharida. Takođe, MALDI metodom se smanjuje uticaj heterogenih uzoraka koji doprinose variranju parametara (intenzitet i rezolucija pikova, tačnost izračunatih masa) u masenom spektru. Uzorak se izlaže laserskim zracima koji izazivaju i jonizaciju i desorpciju (isparavanje, prelaz iz tečnosti u gas) uzorka bez hemijske degradacije. Primena MALDI jonizacije obuhvata tri faze: 1) formiranje „čvrstog rastvora“, 2) eksitaciju matriksa, i 3) jonizaciju analita (slika 5.22). Formiranje čvrstog rastvora podrazumeva mešanje uzorka sa osnovom (matriksom) i ta smeša se stavlja na podlogu, najčešće mikrotitarsku pločicu (*plate*). Matriks imitira „rastvarač“ za molekule analita i najčešće je neka organska komponenta koja ima osobinu da jako apsorbuje zračenje (npr. UV) na talasnoj dužini lasera. Matriks sa uzorkom se ostavi dok rastvarač ispari, a potom se primeni metoda osušene kapi (*dried droplet*) u kojoj se uzorak izlaže laserskom pulsu u trajanju 3 do 5 ns. Matriks treba da bude u višku jer su na taj način molekuli analita potpuno međusobno izolovani. U drugom koraku koji podrazumeva ekscitaciju matriksa, laserski zrak se usmeri na površinu matriks–analit. Hromofore u matriksu apsorbuju energiju lasera i transformišu je u ekscitacionu vibracionu energiju uzorka što izaziva lokalizovano raspadanje površine matriks–analit i njihovu desorpciju sa površine na kojoj su naneti. Klasteri koji se odvajaju sa površine sadrže molekule analita, matriks i jone analita. Molekuli matriksa isparavaju iz klastera i ostavljaju slobodni analit u gasnoj fazi. Na kraju, u toku jonizacija analita, molekuli matriksa pobuđeni laserom (fotoekscitovani) se stabilizuju kroz transfer protona. U reakciji fotojonizacije između fotoelektrona i neutralnih molekula nastaju visoko reaktivni radikal molekulski joni $[M\cdot]$ i njihovi višestruko protonizovani oblici: $[M-H]^-$, $[M+2H]^+$ i $[M+3H]^+$. Joni se zatim ekstrahuju u maseni spektrometar za analizu.

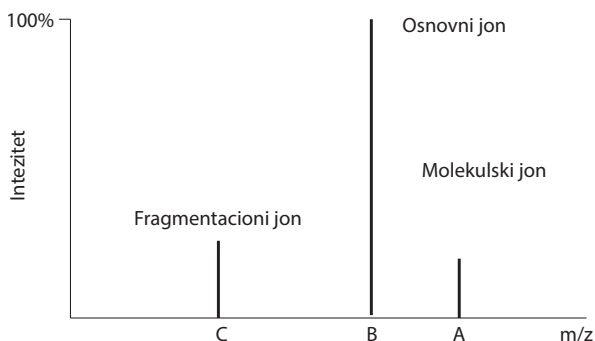
Analizator je osnovni deo masenog spektrometra koji razdvaja jone nastale nekom od tehnika jonizacije na osnovu m/z odnosa i omogućava merenje njihove relativne zastupljenosti. Analizatori se dele na kontinualne i pulsne. Kontinualni analizatori propuštaju jone određenog m/z koji dolaze do detektora i kod takvih analizatora je potrebno menjati jačinu magnetnog polja da bi svi joni bili detektovani. Dele se na: kvadrupole i magnetne sektore. Kvadrupol je najčešće korišćeni analizator. Karakterišu ga prednosti kao što su: pogodne dimenzije, velika brzina snimanja spektra, visoka efikasnost transmisije odnosno broja jona koji stigne do detektora, dobra linearnost i niska cena. Kvadrupol čine dva para međusobno paralelnih cilindričnih ili hiperboličnih elektroda od kojih su dve na pozitivnom električnom potencijalu, a dve na negativnom električnom potencijalu istog inteziteta. Na elektrode se dovodi električno polje koje je kombinacija

naizmeničnog radio-frekventnog i jednosmernog napona. Joni se selektuju pri prolasku kroz analizator na osnovu m/z vrednosti, tako da samo pojedini joni sa stabilnom putanjom bivaju propušteni. Joni sa nestabilnom putanjom se ne mogu detektovati, jer se razelektrišu na elektrodama. Za vreme prve polovine radio-frekventnog ciklusa, gornja i donja elektroda su pozitivno, a leva i desna negativno naelektrisane. Ovakav raspored naelektrisanja potiskuje pozitivne jone u horizontalnu ravan. U drugoj polovini ciklusa, gornja i donja elektroda su negativno, a leva i desna pozitivno naelektrisane, pa se joni fokusiraju u vertikalnoj ravni. Električno polje kvadrupolnog analizatora nastavlja da se menja, pa nastaje trodimenzionalni talas kretanja jona. Odabirom odgovarajućeg radio-frekventnog potencijala, analizator će propuštati jone većeg m/z odnosa do detektora, a joni manjeg m/z odnosa biće privučeni ka elektrodama. Jednosmerni napon, takođe ima uticaja na kretanje jona. Uticaj je veći na jone sa većom molekulskom masom, jer se sporije refokusiraju pod dejstvom RF polja, nego joni sa manjom molekulskom masom. Zbog toga se oni polako usmeravaju dalje od centra kvadrupola, a pri kraju analizatora privlače ih elektrode.

Pulsni analizatori detektuju ceo spektar iz jednog pulsa jona. Dele se na: jon trap analizatore i TOF (*Time of Flight*) analizatore sa jon ciklotronskom rezonancom. Jon trap analizator ograničava i „čuva“/„zarobljava“ jone od interesa u prostorno definisanoj oblasti. TOF analizator je jedan od najjednostavnijih uređaja za analizu masa. Prednosti su što se razdvajanje odvija brzo, sa niskom pragom detekcije i velikom brzinom skeniranja, a nedostatak mu je manja moć razdvajanja od električnog ili masenog sektora. U TOF analizatoru, joni formirani u izvoru se razdvajaju na osnovu različitog vremena (t) potrebnog da različiti joni pređu poznato rastojanje do detektora nakon ubrzanja u električnom polju. Na početku procesa svi joni imaju istu energiju i njihove brzine su proporcionalne odnosu m/z . Kroz cev preleta (evakuisana cev bez prisustva električnog polja) dužine oko 100 cm, putuju joni i sva energija se u toku kretanja jona pretvara u kinetičku energiju. Joni sa većom molekulskom masom putuju sporije. Prag detekcije je 1 ns, pa se mogu detekovati joni koji se razlikuju po vremenu preleta za najmanje 1 ns.

Detekcija jona u masenom spektrometru se najčešće izvodi električnim putem, tako što se meri ukupna jonska struja koja je mera relativne zastupljenosti jona. Kada su vrednosti jonske struje male jačine, od 10^{-9} do 10^{-6} A, tj. relativna zastupljenost jona je niska, kao detektori se koriste razni jednosmerni električni pojačavači, fotomultiplikatori, elektron multiplikatori i vibracioni-cevasti elektrometri.

Slika 5.23. Joni u masenom spektru



Detektovani joni nastali jonizacijom i fragmentacijom su različitog karaktera i intenziteta i vide se kao pojedinačne linije, pikovi, u masenom spektru. **Maseni spektri** mogu da sadrže: osnovni jon, metastabilni jon (M^+), jon koji se nalazi na necelebrojnim vrednostima masa, višestruko naelektrisanе jone, preuređene jone, fragmentacione jone (M^+ , M^{++} , F^+), izotopske jone, negativne jone, i jone nastale u jonsko-molekulskim reakcijama (slika 5.23). **Osnovni jon** je najintenzivniji jon u spektru, može da bude molekulski ili fragmentacioni jon, a ostali joni se obračunavaju u odnosu na njega. **Molekulski jon** (M^+) nastaje eliminacijom jednog elektrona iz neutralnog molekula uzorka i nalazi se na masi m/z koja odgovara molekulskoj masi jedinjenja, pa se na osnovu njega najtačnije i najpouzdanije određuje molekulska masa ispitivanog molekula. **Fragmentacioni joni** su tipični joni za neka jedinjenja i specifične strukture (molekulske grupe). Na primer jedinjenja koja sadrže ugljovodonične lance daju serije jona sa međusobnom razlikom od 14 Da ($-CH_2$), pa se kod alkana mogu očekivati joni na masama: 15, 29, 43, 57, 71, 85, 99 Da. Molekuli koji sadrže benzenov prsten često daju fenilijum jon na m/z 77, kojima se pridružuju fragmenti koji odgovaraju gubitku acetilena na m/z 51.

5.3.7. Elektroanalitičke metode

U prethodnim poglavljima opisano je nekoliko instrumentalnih analitičkih metoda koje su zasnovane na interakciji elektromagnetnog zračenja sa materijom. U ovom poglavlju dat je kratak osvrt, osnovni principi i podela analitičkih metoda u kojima se kao analitički signal posmatraju potencijal, struja ili naelektrisanje u elektrohemijskoj ćeliji (elektroanalitičke metode). Iako postoje samo tri glavna izvora koji se posmatraju kao analitički signal, mogućnosti za dizajn elektroanalitičkih određivanja su mnogobrojne, pa njihov opis i primena prevazilaze ciljeve ovog udžbenika.

Elektroanalitičke metode se zasnivaju na **elektrohemijskim procesima** koji obuhvataju razdvajanje ili protok naelektrisanih čestica u tečnim i čvrstim sistemima. Prilikom ovih procesa dolazi do pretvaranja hemijske energije u električnu i obrnuto. Električna energija se oslobađa na račun smanjenja hemijske energije reakcionog sistema, a hemijska energija reakcionog sistema raste pod uticajem akumulacije električne energije koja je dovedena iz spoljašnjeg izvora. Reakcioni sistem odnosno **elektrohemijsku ćeliju** čine hemijska supstanca, koja je jonski provodnik (**elektrolit**) i dva metalna elektronska provodnika koja su uronjena u hemijsku supstancu, čijim povezivanjem se formira električno kolo i protok električne energije. Elektrohemijska ćelija sadrži dve granice faza metal/elektrolit: **metal 1–elektrolit–metal 2**. Kada kroz zatvoreno električno kolo elektrohemijske ćelije teče jednosmerna električna struja, na jednoj granici faza elektroni prelaze sa metala u elektrolit dok na drugoj granici faza elektroni prelaze iz elektrolita u metal. Na granicama metal/elektrolit, prelazak elektrona sa metala u elektrolit i obratno moguć je samo ako se u elektrolitu nalaze molekuli ili joni neke hemijske vrste koji mogu da se oksiduju i redukuju.

Elektroaktivne vrste su komponente koje svojim oksido-redukcionim reakcijama omogućavaju prenos elektrona kroz navedene fazne granice. Za trajni tok električne struje kroz elektrohemijsku ćeliju nije dovoljno samo prisustvo elektroaktivnih vrsta već je neophodno prisustvo jona koji su prenosioci naelektrisanja kroz elektrolit. Joni su u ovakvim sistemima elektroprovodne vrste, ali ne moraju da istovremeno budu i elektroaktivne vrste jer elektroaktivne vrste mogu da budu i neutralni molekuli. U toku elektrohemijskih procesa, menja se priroda električne struje; elektronska struja sa metala prelazi u jonsku struju kroz elektrolit. Predavanje elektrona elektronskom provodniku (oksidacija) se odvija na anodi dok na katodi elektroni prelaze sa elektronskog provodnika kroz granicu faza (redukcija).

Oksidacija i redukcija su hemijski mehanizmi za prenos naelektrisanja kroz fazne granice metal/elektrolit. Redukcija podrazumeva primanje elektrona, a oksidacija otpuštanje elektrona. Supstanca koja gubi elektrone i tokom reakcije se oksiduje, naziva se **redukciono sredstvo**, a supstanca koja prima elektrone i tokom reakcije se redukuje je oksidaciono sredstvo. Ukupan broj elektrona koje prima **oksidaciono sredstvo** jednak broju elektrona koje otpušta redukciono sredstvo.

polureakcija oksidacije: $\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$

polureakcija redukcije: $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu(s)}$

Ukoliko je redukovani oblik neke supstance jače redukciono sredstvo, njegov oksidovani oblik je slabije oksidaciono sredstvo i obratno. Sposobnost atoma da se oksiduje ili redukuje u elementarnom stanju zavisi od njegove energije jonizacije i elektronegativnosti. Metali su najčešće redukciona sredstva, jer poseduju male energije jonizacije i elektronegativnosti dok su nemetali su u elementarnom stanju oksidaciona sredstva, jer imaju velike energije jonizacije i elektronegativnosti. Alkalni metali su najjača redukciona sredstva, a fluor najjače oksidaciono sredstvo. Redukcioni potencijali polureakcija oksidacije ili redukcije daju podatke o lakoći kojom se neka supstanca oksiduje ili redukuje, tj. kakvo je redukciono ili oksidaciono sredstvo. Na vrhu naponskog niza nalaze se najjača redukciona sredstva (alkalni metali), a na dnu su plemeniti metali koji su najmanje reaktivni odnosno najslabija su redukciona sredstva. Svaki metal u ovom nizu može da preda svoje elektrone svim metalima koji se nalaze ispod njega u nizu i da ih u reakcijama „istisne“ iz rastvora njihovih soli. Svi metali koji se u nizu nalaze iznad vodonika će se rastvarati u kiselinama uz izdvajanje gasovitog vodonika, a metali koji su ispod to ne mogu čak i ako reaguju sa datom kiselinom.

Električna struja se kroz elektrohemijsku ćeliju može pokrenuti na dva načina. U **galvanskim ćelijama** elektroda se povezuju pomoću metalnog provodnika u zatvoreno električno kolo. U ćeliji se spontano odigravaju elektrodne reakcije na obe fazne granice metal/elektrolit koje daju zbirnu hemijsku reakciju elektrohemijske ćelije, energija električne struje oslobađa se na račun energije spontane hemijske reakcije. U **elektrolitičkim ćelijama** električno kolo se zatvori rednim vezivanjem spoljašnjeg izvora električne struje nasuprot naponu ćelije pri čemu je spoljašnji napon veći od elektromotorne sile ćelije. Struja koja teče kroz ćeliju je suprotnog smera od smera spontanog toka. Prinudni procesi u elektrolitičkoj ćeliji koji se odvijaju pod uticajem spoljašnjeg izvora električne struje nazivaju se **elektroliza**.

Elektroanalitičke metode se dele na:

- **faradejske metode** u kojima dolazi do direktne razmene elektrona između elektroaktivne vrste i elektrode (radna elektroda). Kroz elektrolitičku ćeliju protiče faradejska struja određenog intenziteta, a radna elektroda je polarizovana značajnim gustinama struje. Primeri metoda su: **elektrogravimetrija, kulometrija i voltametrij**a; i
- **nefaradejske metode** u kojima nema direktne razmene elektrona između elektroaktivne vrste i elektrode (indikatorska elektroda). Kod nekih od ovih metoda jedna ili obe indikatorske elektrode se polarizuju malim gustinama struje. Primeri su: **konduktometrija, potenciometrija i elektroforeza**.

Prilikom primene **elektrogravimetrije**, elektron se posmatra kao taložni reagens, a proizvod kao što je metal ili oksid metala se izdvaja na radnoj elektrodi. Masa proizvoda se meri pomoću analitičke vage nakon ispiranja i sušenja. Sadržaj određivane vrste u uzorku se izračunava na osnovu poznatog hemijskog sastava ispitivane vrste i iz razlike masa čiste (suve) radne elektrode pre elektrolize i elektrode sušene pod istim uslovima zajedno.

U **kulometriji** se meri se količina proteklog naelektrisanja koje je potrebno za potpunu elektrolizu do proizvoda poznatog hemijskog sastava. Za razliku od elektrogravimetrijskih određivanja neophodno je da iskorišćenje proteklog naelektrisanja bude 100%. Elektrogravimetrija i kulometrija su umereno osetljive i relativno brze metode. Ubrajaju se među najtačnije i najpreciznije u hemijskoj analizi i ne zahtevaju upotrebu standardnih rastvora. Relativne greške ovih metoda su oko nekoliko promila.

Volt(ampero)metrija-voltametrija podrazumeva merenje zavisnosti struja-potencijal u elektrohemijским ćelijama. **Polarografija** uključuje merenja u kojima se koristi tečna radna elektroda, kao što su kapajuća živina elektroda i statička živina elektroda, čija se površina obnavlja periodično ili kontinualno (npr. kapima). **Voltametrij**a obuhvata metode gde se koriste stacionarne ili fiksne radne elektrode: viseća živina elektroda, elektroda presvučena tankim filmom žive, elektroda od staklastog ugljenika, elektroda od ugljenične paste, itd.

U **konduktometriji** se meri otpor (provodljivost) elektrolita na osnovu čega se može odrediti koncentracija neke jonske vrste, stepen disocijacije, konstanta disocijacije, proizvod rastvorljivosti, konstanta stabilnosti itd. Primenujuju se niskofrekventne niskonaponske naizmjenične struje, jer bi primena jednosmerne struje dovela do elektrohemijских promena koje menjaju sastav rastvora. Konduktometrija se može izvoditi direktnim merenjima i konduktometrijskim titracijama u kojima se prati promena provodljivosti rastvora nepoznate koncentracije u zavisnosti od dodate zapremine standardnih rastvora titracionog sredstva.

Potencijometrija podrazumeva merenje potencijala indikatorske elektrode na osnovu čije vrednosti se donose zaključci o sastavu ispitivanog rastvora (koncentracija jona, pH vrednost). Kao i kod konduktometrije, moguće je primeniti direktna potencijometrijska merenja i potencijometrijske titracije (promena potencijala indikatorske elektrode u zavisnosti od dodate zapremine standardnog rastvora titracionog sredstva). Prednost potencijometrijskih titracija u odnosu na klasične volumetrijske je odsustvo subjektivnih grešaka.

Elektroforeza se sprovodi tako što se sistemu nameću velike gustine struje, odnosno jaka električna polja. Ispitivana supstanca putuje kroz električno polje, prema odgovarajućim elektrodama, praktično nikada ne stigne do njih. Bez obzira na primenjene gustine struje, nema razmene elektrona.

U elektrohemijским merenjima, **referentna elektrode** je elektrode sa stalnim potencijalom. Postavlja se kao anoda u spregu, a standardni elektrodni potencijal ćelije se može predstaviti:

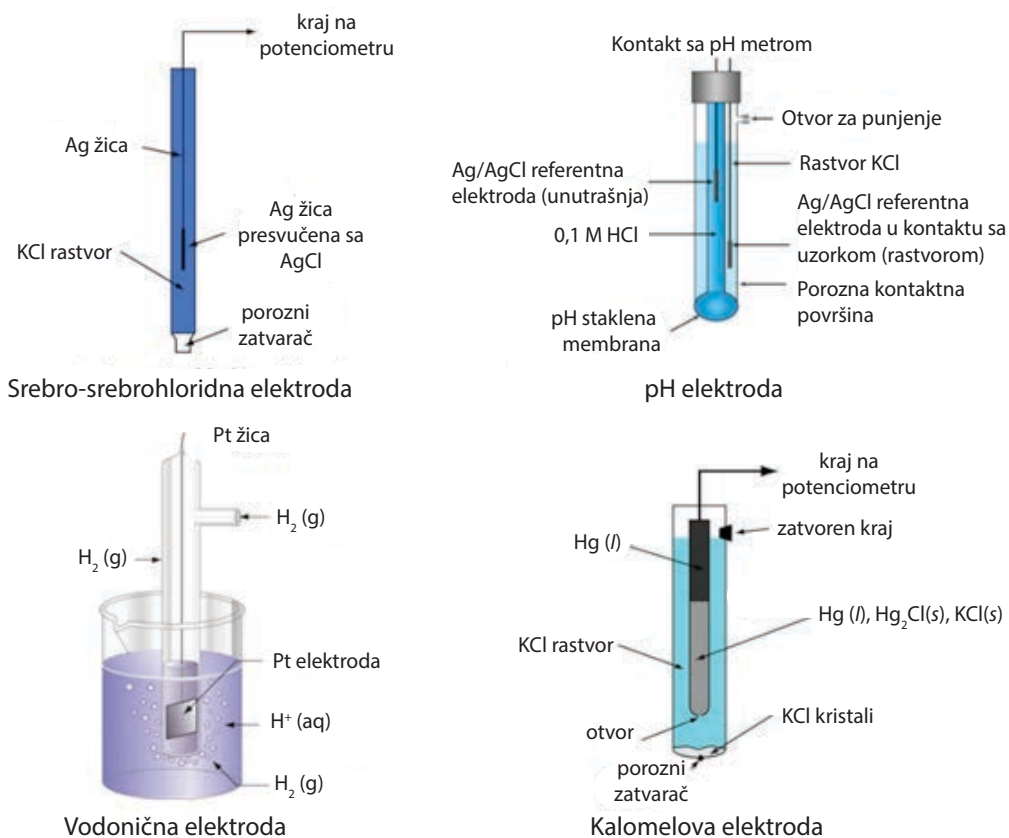
$$E^{\circ} \text{ ćelije} = E^{\circ} \text{indikatorska elektroda} - E^{\circ} \text{referentna elektroda}.$$

Primeri referentnih elektroda su: standardna vodonična, srebro-srebrohloridna, kalomelova i pH elektroda. Standardna vodonična elektroda se sastoji od platinske elektrode uronjene u rastvor HCl u kojoj je aktivitet H_3O^+ jona 1 mol dm^{-3} (slika 5.24). Pod platinsku elektrodu se dovodi gasoviti vodonik pod pritiskom od 101,3 kPa, pri čemu je temperatura sistema 298 K. Ovakva elektroda se ponaša kao da je od metalnog vodonika i po konvenciji njen standardni potencijal iznosi $E^{\circ}=0,000000 \text{ V}$.

Srebro-srebrohloridnu elektrodu čini srebrna žica uronjena u rastvor srebrnih jona i njen potencijal u svakom slučaju zavisi od koncentracije ovih jona (slika 5.24). U rastvoru je prisutna i teško rastvorna so, KCl, a koncentracija srebrnih jona zavisi i od proizvoda rastvorljivosti AgCl. Ukoliko se ova elektroda opteretiti katodno malim gustinama struje (nametne joj se negativniji potencijal od ravnotežnog) doći će do elektrohemijškog izdvajanja srebrnih jona iz rastvora na srebrnu žicu što za posledicu ima smanjenje koncentracije (aktiviteta) srebrnih jona. Kao odgovor na ovu promenu dolazi do rastvaranja nove količine teško rastvornog srebro-hlorida i na taj način se kompenzuje smanjenje koncentracije srebrnih jona, a elektroda održava konstantan potencijal. Ako se elektroda opteretiti anodno malim gustinama struje (polarizuje se pozitivnijim potencijalom) dolazi do anodne oksidacije srebra odnosno do povećanja koncentracije srebrnih jona na šta elektroda reaguje taloženjem nove količine srebro-hlorida i na taj način održava konstantan potencijal.

Kalomelova elektroda se sastoji od žive, a kao teško rastvorna so se koristi živin(I)-hlorid (kalomel). Kao elektrolit se obično koristi zasićeni rastvor KCl. Kao i srebro-srebrohloridna elektroda, i kalomelova elektroda reaguje na mala katodna opterećenja rastvaranjem nove količine teško rastvornog kalomela, a na anodna opterećenja taloženjem kalomela.

Slika 5.24. Primeri referentnih elektroda



pH elektroda je kombinovanog dizajna koji obuhvata staklenu membranu i neophodne referentne elektrode ugrađene u isto telo elektrode (slika 5.24). Unutrašnji rastvor za punjenje koji dolazi u kontakt sa staklenom membranom sadrži fiksnu koncentraciju H^+ jona. Referentna elektroda Ag/AgCl je u kontaktu sa ovim unutrašnjim rastvorom, a rastvor sadrži 0,1 M rastvor HCl zasićenog AgCl. Druga Ag/AgCl referentna elektroda se nalazi unutar odeljka za rastvor koji okružuje unutrašnji odeljak za rastvor. Ovaj rastvor je u kontaktu sa spoljašnjim rastvorom nepoznate H^+ aktivnosti preko porozne membrane elektrode. Staklene membrane se sastoje od SiO_2 molekula koji grade tetraedarsku mrežu u kojoj atomi kiseonika predstavljaju most između dva atoma silicijuma. Staklene membrane sadrže i različite količine drugih metalnih oksida, poput Na_2O i CaO .

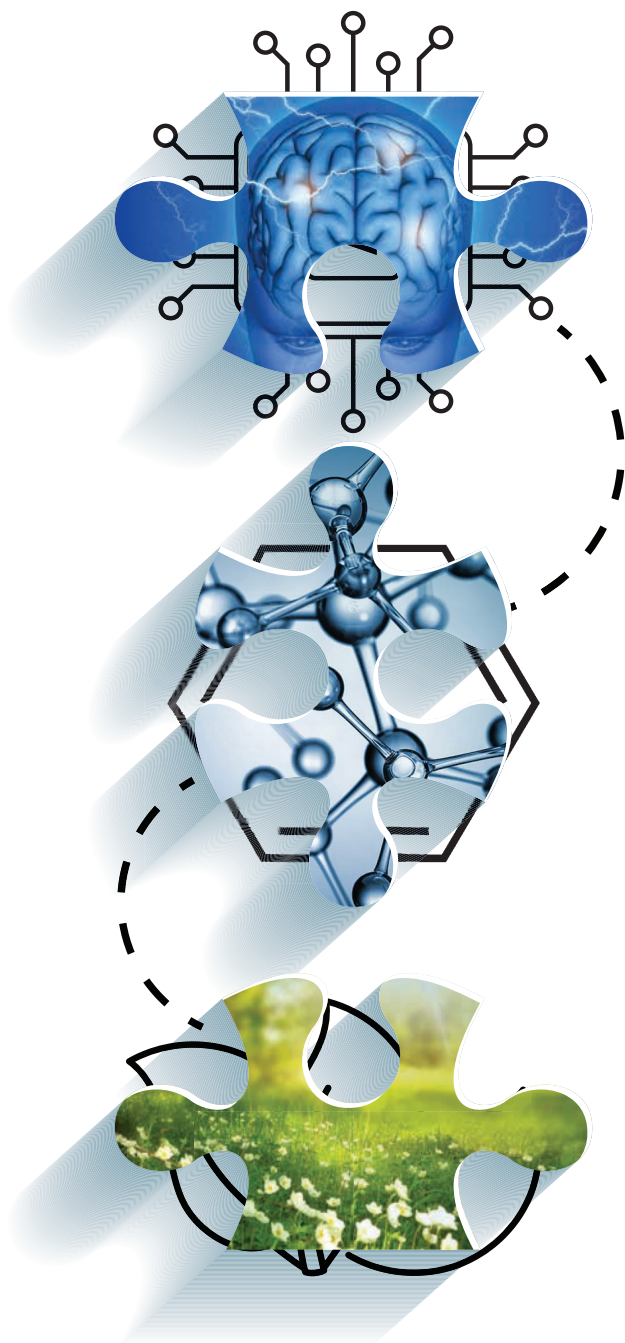
Atomi kiseonika unutar rešetke koji nisu vezani za dva atoma silicijuma su negativno naelektrisani i sa njima katjoni mogu da grade jonske parove. Joni (prvenstveno Na^+) polako difunduju kroz kristalnu rešetku, krećući se od jednog naelektrisanog para do drugog. Ovo kretanje katjona unutar stakla omogućava merenje potencijala preko njega. Ako se staklo ovog tipa uroni u vodeni rastvor koji sadrži H^+ jone, površina stakla u kontaktu sa rastvorom postaje hidratizana, jer molekul vode dolazi u kontakt sa spoljašnjim delovima kristalne rešetke koja gradi staklenu membranu. Dolazi do „bubrenja“ stakla dok njegova „unutrašnjost“ ostaje suva. Neki od metalnih jona unutar kristalne rešetke stakla, koja je blizu granice rastvor/staklena membrana mogu da difunduju u rastvor, a neki H^+ joni iz rastvora mogu da grade naelektrisani par sa kiseonikom na površini stakla. Uspostavlja se ravnoteža izmene jona između fiksnih negativno naelektrisanih mesta na površini stakla i H^+ jona. Da bi funkcionisao kao pH senzor, sloj stakla koji je osetljiv na promene pH vrednosti se postavlja između dva rastvora koji sadrže H^+ jone. Pošto samo staklo najbliže rastvoru postaje hidratizano, uspostavljaju se dve pojedinačne ravnoteže sa obe strane stakla, koje zavise od odgovarajuće H^+ aktivnosti. Razlika u aktivnostima H^+ jona na obe strane staklene membrane dovodi do razlike u broju jonskih parova koji postoje i do neravnoteže u površinskom naelektrisanju između hidratizanih slojeva. Ovo dovodi do pojave membranskog potencijala (E) koji zavisi od pH vrednosti (koncentracije H^+ jona), i koji se može opisati prema Nernstovoj jednačini:

$$E_{\text{membrane}} = E_{\text{unutra}} - E_{\text{spolja}} = 0,059 \log ([\text{H}^+]_{\text{spolja}}/[\text{H}^+]_{\text{unutra}})$$

Indikatorske elektrode se dele na:

- **elektrode prve vrste**, najjednostavnije elektrode i sastoje se od jedne dodirne faze. Metalna elektroda je uronjena u rastvor svojih odgovarajućih jona, a primer je bakarna elektroda uronjena u rastvor bakar(II)-sulfata.
- **elektrode druge vrste** koje imaju dve granice faza. Kao elektrolit se uzima zasićeni rastvor teško rastvorne soli tog metala u nekom elektrolitu koji ima isti anjon kao i teško rastvorna so, a drugu vrstu katjona. Primer je srebro-srebrohloridna elektroda, kalomelova elektroda.
- **elektrode treće vrste** sadrže tri granice faza. Metal je uronjen u teško rastvornu so tog metala kao i teško rastvornu so drugog metala koji ima zajednički anjon teško rastvorne soli, a kao elektrolit se koristi rastvorna so drugog metala sa drugim anjonom. Primer je elektroda od srebra uronjenog u smesu teško rastvornih oksalata (srebro-oksalata i kalcijum oksalata), a kao elektrolit se koristi rastvor kalcijum-hlorida.

Primer primene elektroanalitičkih metoda u svakodnevnoj upotrebi su **elektrohemijski senzori (biosenzori)**. Elektrohemijski senzori se sastoje se od tri osnovne komponente: receptora koji vezuje uzorak; uzorka ili analita; i pretvarača za pretvaranje reakcije u merljivi električni signal. U slučaju elektrohemijskih senzora, elektroda deluje kao pretvarač. U većini elektrohemijskih senzora, površina elektrode se koristi kao mesto reakcije. Struja koja se proizvodi iz reakcije se prati i koristi za izračunavanje važnih podataka kao što su koncentracije iz uzorka. Biosenzori zahtevaju iste elemente kao i elektrohemijski senzori da bi funkcionisali. Potrebni elementi su receptor koji vezuje uzorak, površina za reagovanje uzorka i poseban pretvarač. Osnova za upotrebu biosenzora je postojanje specifične reakcije i mogućnost kvantifikacije putem biološkog markera. Enzimi, antitela i receptori ćelijske površine se najčešće koriste za merenje količine analita u datom uzorku. Struja koju meri elektroda ili promena potencijala izazvana redoks reakcijom koja se dešava na elektrodi, direktno je proporcionalna koncentraciji datog uzorka. Biosenzori su posebno važni u otkrivanju nivoa različitih supstanci u našim telima: nivoi hranljivih materija ili kiseonika, hormona i glukoze.



ANALIZA PODATAKA IZ OBLASTI ŽIVOTNE SREDINE

6. ANALIZA PODATAKA IZ OBLASTI ŽIVOTNE SREDINE

Savremeno društvo nedovoljno prepoznaje ulogu većine faktora koji oblikuju evoluciju zagađenja u životnoj sredini. Uzmimo za primer kvalitet vazduha. Kao što je u prethodnom delu knjige navedeno, na koncentracije zagađujućih materija u vazduhu utiču fizičko-hemijske transformacije koje dovode do formiranja sekundarnog zagađenja, klimatski faktori, meteorološke prilike, ostali medijumi životne sredine, ciklusi uzrokovani položajem Sunca, topografija i mnogi drugi faktori. Kao rezultat sprege svih ovih činilaca dolazi do značajnih promena u prostornoj i vremenskoj raspodeli zagađenja čiju dinamiku je teško razumeti, jer je slika koju pokušavamo da sagledamo veoma izobličena, uz mnogo nedostajućih delova.

Iako verujemo da je naše znanje u ovom trenutku veliko, ne samo da smo daleko od zadovoljavajućeg razumevanja fenomena u životnoj sredini, već nam nedostaju podaci, metode analize, stručni kadar koji može da razume i donese relevantne činjenice, infrastruktura koja bi podržala duboka i/ili globalna istraživanja, organizacija, znanje, svest i drugi ključni elementi.

Kako unaprediti trenutno stanje? Da bi se postigao optimalniji i organizovaniji suživot prirode i ljudi, potrebno je duboko i sveobuhvatno sagledavanje kompleksnosti životne sredine. Na suštinskom nivou, to znači da razumevanje fenomena u životnoj sredini mora biti povezano sa razumevanjem konteksta u kojem se fenomeni pojavljuju, jer samo kroz razumevanje konteksta možemo osvetliti uzroke.

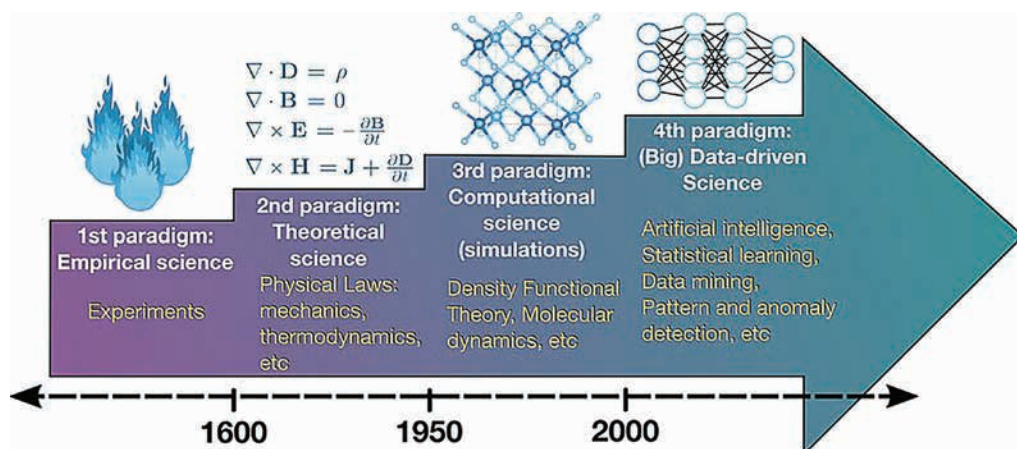


6.1. OKVIR ZA RAZUMEVANJE FENOMENA U OBLASTI ŽIVOTNE SREDINE

Nauka o životnoj sredini suočava se sa mnogim problemima u dostizanju svoje misije, prvenstveno u obezbeđivanju osnove za održivu budućnost u sve složenijem, brzo promenljivom i preopterećenom svetu. Problemi koji sprečavaju ispunjenje misije su brojni. Pre svega, odnose se na međusobnu povezanost, složenost, multifaznost i nelinearnost ekoloških fenomena, koje možemo definisati kao sisteme koje čine objekti, procesi, stanja i njihove međusobne interakcije. Takođe, evidentan je nedostatak znanja zasnovanog na podacima, posebno onog koji je nastao kao rezultat istraživanja na globalnom nivou, koja su u stanju da ponude potreban nivo generalizacije. Veliki problem predstavlja asimetričan pristup podacima, informacijama i znanju, kao i nedostatak adekvatne infrastrukture za prikupljanje i čuvanje velikih skupova podataka koji kontekstualizuju ekološke fenomene. Barijere u pristupu tehnološkim inovacijama, posebno onih koji se tiču nauke o podacima i veštačke inteligencije, dodatno komplikuju razumevanje problema iz životne sredine.

Ako se sagleda naučni postupak, cilj je podatke pretvoriti u činjenice, činjenice u znanje, znanje u uvid i na kraju uvid u mudrost koja će pomoći u razumevanju sveta u kome živimo, ali i donošenju boljih odluka, odluka u skladu sa civilizacijskim trenutkom u kom se nalazimo. Ono što podržava ovaj postupak predstavlja naučnu paradigmu. Naučna paradigma se može definisati kao okvir sastavljen od konceptata, pretpostavki, teorija, načina razmišljanja, rezultata i praksi koje definišu naučnu disciplinu u određenom trenutku.

Evolucija naučne paradigme prošla je kroz nekoliko važnih faza razvoja. Do pre nekoliko vekova bila je čisto empirijska, fokusirana na opis prirodnih fenomena korišćenjem empirijskih sredstava, kao što su osmatranja, merenja ili eksperimenti. Od tada se razvila paradigma sistematskog eksperimentisanja teorijskim konceptima, gde su teorije, modeli i zakoni dodati empirijskom pristupu. Budući da su tokom poslednjih decenija teorije postale prekomplikovane za analitičko rešavanje, paradigmi je dodata komponenta zasnovana na računarskim metodama, naročito onim koji dolaze iz oblasti numeričkih simulacija, statistike, a u poslednje vreme i veštačke inteligencije. Od nedavno se aktuelizuje era paradigme vođene velikim skupovima podataka, koja primenjuje računarske metode na podatke dobijenih osmatranjem, generisanjem različitim simulatorima ili primenom različitih vrsta analiza podataka. Upravo bi sinergija velikih skupova podataka, naprednih metoda njihove analize i naučne teorije mogla dovesti do značajnih paradigmatičkih promena, veoma važnih za unapređenje aktuelnog stanja životne sredine.



Faze razvoja naučne paradigme

6.2. ANALIZA FENOMENA

Predznanje

Postavljanje smislenog pitanja u vezi sa fenomenom koji se analizira pretpostavlja određeni nivo znanja kao potreban uslov. Na primer, nije moguće zamisliti razumevanje uticaja kiše na stanje kvaliteta vazduha bez svesti o nizu faktora životne sredine koji utiču na njega. Fizičko-hemijske karakteristike pojedinačnih zagađujućih materija, poput polarnosti, utiču na njihovu rastvorljivost u vodi. Pored toga, fizičko-hemijske karakteristike same kiše, kao što su temperatura, električna provodljivost ili Henrijeva konstanta, igraju svoju ulogu. Meteorološke prilike, kao što su mikro-fizičke karakteristike oblaka koje određuju nukleaciju kišnih kapi, visina baze oblaka koja je u direktnoj vezi sa vertikalnom raspodelom zagađenja ili samo intenzitet kiše, predstavljaju dodatne važne faktore koji oblikuju kvalitet vazduha tokom padavina. Međutim, sve navedeno predstavlja samo mali broj uglova u odnosu na onaj iz kojih je potrebno sagledati padavine i njihov uticaj na zagađenje vazduha kako bi se formirala, a potom i razjasnila odgovarajuća slika i nivo znanja unapredio.

Hipoteze i kontekstualizacija

Ukoliko određena baza znanja postoji, pokušaj odgovora na postavljeno pitanje vodi ka postavljanju hipoteza koje predstavljaju potencijalne smernice ka odgovoru. One direktno upućuju na kontekstualizaciju fenomena koja predstavlja pokušaj sprežavanja fenomena koji se analizira i ambijenta u kom se on pojavljuje u nerazdvojnu celinu. Ako se osvrnemo na ono što čini fenomen, u primeru analize uticaja kiše na stanje kvaliteta vazduha, objekti koji čine fenomen bili bi ne samo kiša, kao atmosferska voda, i zagađujuće materije, već i svi atmosferski, fizičko-hemijski, meteorološki i mnogi drugi činioci. S druge strane, nije moguće zamisliti sve procese, stanja i međusobne interakcije koji bi bili važni za razumevanje uticaja kiše na stanje kvaliteta vazduha. Na primer, stabilnost atmosfere nesumnjivo utiče makar na atmosferske procese, samim tim ima i određenu ulogu tokom padavina. Kako opisati stabilnost atmosfere? Koji faktori određuju vertikalna i horizontalna strujanja vazduha?

Osmatranje

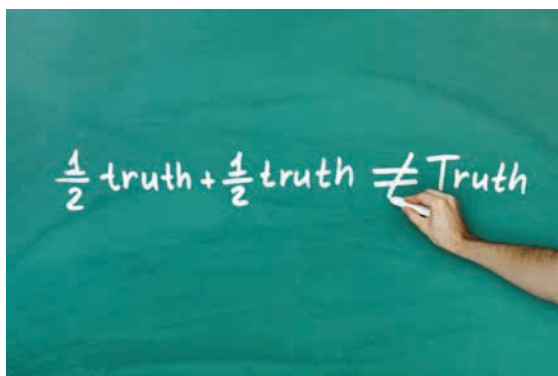
Ako smo u fazi postavljanja hipoteze i kontekstualizacije fenomena identifikovali objekte, stanja, procese i međusobne interakcije i došli do određenog nivoa razumevanja sprega između njih, došli smo na korak do osmatranja. Ono što onemogućava jednostavan iskorak i prikupljanje informacija o fenomenu koji se analizira jesu ograničenja koncepata i instrumenata osmatranja. Čime se meri stabilnost atmosfere? Da li se zapravo radi o većem broju parametara koje je potrebno sagledati u cilju razumevanja strujanja vazduha, koji tek u jasnom međusobnom odnosu daju meru stabilnosti? Kako i čime ih izmeriti?

Sve faze naučnog postupka, a posebno faza kontekstualizacije, direktno utiču na dubinu razumevanja fenomena. Odjednom, iako smo poželili da izmerimo koncentracije svih zagađujućih materija u atmosferi, sve meteorološke parametre i sve ostale parametre koji određuju uticaj padavina na kvalitet vazduha, moramo se fokusirati na raspoloživo. Raspoloživo praktično uvek postaje „nama raspoloživo“ što dodatno desetkuje skup potencijalno važnih informacija. Zadržimo se na primeru kvaliteta vazduha. U atmosferi urbane sredine nalaze se desetine hiljada vrsta zagađujućih materija. Dodajmo na to da urbanu sredinu čini kompleksna topologija koja dodatno usložnjava već složene meteorološke prilike makar zbog veoma komplikovane cirkulacije vazduha, tako da već broj mernih uređaja potrebnih za adekvatnu kontekstualizaciju postaje ogroman i skup, samim tim i nedostižan za implementaciju. Ako saberemo potencijal svih mernih metoda navedenih u ovoj knjizi, jasno je da nismo u stanju da izmerimo ni hiljaditi deo onoga što je potrebno da bismo imali adekvatnu bazu podataka iz

koje bismo mogli da dođemo do velikog iskoraka u znanju, znanju utemeljenog u podacima. Zamislimo hirurga koji dobija samo svaku hiljaditu informaciju o tome šta je potrebno uraditi tokom operacije.

Ako nastavimo analogiju sa medicinom, šta je najvažnije kada osoba sa ozbiljnim zdravstvenim problemom ode kod lekara? Precizna, tačna i pravovremena dijagnoza. Lekar neće samo rukom dodirnuti čelo pacijenta, ustanoviti povišenu temperaturu i na osnovu toga postaviti dijagnozu teškog oboljenja. Pre svega, potrebno je obaviti preglede i medicinske analize, kao što su analiza krvi i urina, biopsija, ultrazvuk, skener ili magnetna rezonanca. Dakle, radi se o temeljnom ispitivanju pacijenta koje obezbeđuje mnoštvo parametara pomoću kojih se može razumeti priroda oboljenja. To znači dobijanje preciznih i tačnih, često veoma kompleksnih i raznolikih podataka koji sa različitih aspekata oslikavaju zdravstveno stanje pacijenta.

Jasno je da slika koju želimo da razumemo mora biti u dovoljnoj meri potpuna bar u smislu adekvatnog oslikavanja konteksta ili sa što je moguće manjim brojem nedostajućih delova. To znači da bi se moglo očekivati da društvo 21. veka, svesno važnosti praćenja faktora koji ga dramatično ugrožavaju, prati nivoe, ako ne svih, onda bar većine zagađujućih materija. Kakva je realnost? Držeći se primera kvaliteta vazduha, najopremljenije merne stanice u Evropi mere koncentracije do oko 40 različitih materija, ali od preko 4000 hiljade raspoloživih stanica, takvih ima manje od deset. Na malom broju stanica mere se koncentracija dvadesetak, dok na većini stanica jedva da se prati tek nekoliko zagađujućih materija. Štaviše, savremeno društvo je fokusirano na praćenje svega par frakcija suspendovanih čestica, sumpor-dioksida, azotnih oksida, ugljen-monoksida i ozona, uz povremeno praćenje nekih organskih jedinjenja i tek poneki teški metal.



Modeliranje

Iz rezultata osmatranja proističu informacije koje se u različitim naučnim postupcima analize transformišu u činjenice. Ako nastavimo primer iz oblasti medicine, nakon pregleda, sledi detaljna analiza dobijenih podataka, koju ne obavlja jedan lekar, već konzilijum sastavljen od stručnjaka iz različitih oblasti. Kroz duboku i sveobuhvatnu analizu, interpretaciju rezultata, sučeljena mišljenja i donete zaključke na bazi višedecenijske edukacije i prakse, konzilijum dolazi znanja utemeljenog u činjenicama koje dalje vodi do dijagnoze. Životna sredina je, poput organizma ljudi, izuzetno kompleksna struktura koja zavisi od ogromnog broja složenih interakcija različitih elemenata. U tom smislu, postupak postavljanja dijagnoze je sličan dijagnozi lekara. Ono što na tom putu igra neizostavnu ulogu jeste modeliranje. Generalno, modeli predstavljaju pojednostavljene reprezentacije stvarnosti. Iako ne sadrže sve varijable sistema, pomažu u rešavanju specifičnih problema i imaju široku primenu u nauci i praksi.

Uzmimo za primer komplikovaniji fenomen – uticaj urbanizacije na životnu sredinu, koji spada među najvažnije probleme sa kojima se moderno društvo suočava. Nezabeležena brzina i raznovrsnost urbanizacije uključuju brzo geografsko širenje i porast broja stanovnika, razvoj industrije, povećanu potrebu za infrastrukturuom, kao i generisanje velike količine raznovrsnog zagađenja i otpada. Sve ove promene dovode do ogromnih promena u životnoj sredini, koje zahtevaju duboko razumevanje kako bi se mogle preduzeti adekvatne reakcije. Ali kako ih osmotriti i opisati pa onda i razumeti?

Urbani sistemi se po mnogim ključnim parametrima, kao što su različite determinante poput prostorno-vremenske dinamike i međusobnih veza, kreću daleko izvan obrazaca koji bi se mogli pojednostavljeno posmatrati. Mikroklima, odnos zelenila i betona, tokovi ljudi, energije, materijala, resursa i zagađujućih materija predstavljaju neograničen skup puteva za interakcije koje su ugrađene u brojne faktore urbane životne sredine.

Navedene interakcije čine sisteme ekstremno kompleksnim za osmatranje i analizu, samim tim i za razumevanje. Širok spektar odnosa koji se stvaraju i funkcionišu na različitim nivoima zahteva višeslojni pristup za razumevanje sve većeg broja dokaza o uticaju zagađenja na životnu sredinu, klimatski sistem, biodiverzitet i zdravlje ljudi. Upravo je prepoznavanje kompleksnosti urbanih faktora životne sredine razlog pomeranja analitičkih koncepata sa pojednostavljenih pristupa ka sofisticiranijem i sinergetskom modeliranju.

Poslednjih godina ulažu su veliki napori ne samo da se identifikuju ključni faktori koji oblikuju urbano okruženje, već i da se postigne konvergencija u odnosu na dobijene činjenice, bez obzira da li su međusobno komplementarne ili u skladu jedne sa drugima. U tom kontekstu, razmatranje pitanja zagađenja iz različitih uglova oslanja se na primenu i razvoj specijalizovanih metoda i njihovo kombinovanje – hibridizaciju. Ove metode koriste se za utvrđivanje statističkih i prostorno-vremenskih raspodela zagađujućih materija, fluktuacija, odloženih i kumulativnih efekata, kao i njihovih međusobnih veza i odnosa sa relevantnim faktorima životne sredine na različitim prostornim i vremenskim skalama.

Zašto je matematička formalizacija odnosa unutar fenomena koji se proučava važna?

Matematika se fokusira na razvoj apstraktnih reprezentacija stvarnog sveta, dok druge naučne discipline koriste dobijene reprezentacije za sticanje znanja o njemu. Odnos naučnih disciplina i matematike je dvosmeran. Ne samo da se matematika koristi kao alat u naučnim istraživanjima, već osvojeno znanje daje smernice matematičkim istraživanjima što rezultira strukturom koja integriše razumevanje fenomena koji se analizira sa simboličkim reprezentacijama matematike, dodajući mu značenje i strukturu.

Takođe, kvantitativna analiza koja se koristi u naučnim disciplinama oslanja se na alate primenjene matematike koji proučavaju obrasce empirijskih opažanja ili merenja povezanih sa varijablama koje se nalaze u određenoj vezi sa fenomenom koji se istražuje. U suštini, varijable predstavljaju određene aspekte fenomena koje je moguće opaziti ili izmeriti, koji variraju u vremenu i/ili prostoru. Razumevanje ovih varijacija je ključno za mnoge discipline, uključujući ekologiju, geologiju, agronomiju, geografiju, javno zdravlje, epidemiologiju, ekonomiju, društvenu politiku, upravljanje rizicima i mnoge druge.

6.3. PRIMENA NAUKE O PODACIMA U OBLASTI ŽIVOTNE SREDINE

Kompleksnost sagledavanja fenomena iz oblasti životne sredine u ambijentu u kom se pojavljuje nužno uvodi potrebu za matematičkim modeliranjem, a matematičko modeliranje za naukom o podacima. Nauka o podacima je interdisciplinarna oblast koja koristi koncepte, algoritme, procedure i procese iz različitih matematičkih i računarskih disciplina za istraživanje skupova podataka u cilju otkrivanja implicitnih obrazaca, anomalija i statističkih informacija, generisanja uvida i usmeravanja donošenja odluka. Ove discipline uključuju oblasti statistike, veštačke inteligencije, manipulacije bazama podataka, optimizacije i vizuelizacije.

Statistika je nauka koja se bavi formalizacijom odnosa između varijabli u vidu jednačina. Ona koristi različite matematičke metode za analizu podataka, prepoznavanje obrazaca, kao i za donošenje zaključaka i predviđanja na osnovu uzoraka iz skupa podataka.

S druge strane, veštačka inteligencija (*artificial intelligence* – AI) predstavlja široku oblast koja obuhvata mašinsko učenje, metode optimizacije hiperparametara algoritama mašinskog učenja, metode interpretacije modela mašinskog učenja (*explainable artificial intelligence* – XAI, možda nedosledno prevedenu na srpski jezik kao objašnjiva veštačka inteligencija)⁷ i mnoge druge podvrste, a odnosi se na razvoj sistema koji mogu obavljati zadatke koji inače zahtevaju prirodnu inteligenciju. To uključuje učenje, zaključivanje i donošenje odluka. Iako se termin često meša sa terminom veštačka inteligencija, mašinsko učenje predstavlja samo jedan od njenih delova koji se fokusira na razvoj algoritama koji uče iz podataka na osnovu iskustva. To znači da algoritmi tokom vremena mogu poboljšavati svoje performanse, koristeći postojeće, ali i nove podatke za prilagođavanje svojih hiperparametara,⁸ učenje i donošenje preciznijih predviđanja.

7 Metode XAI bave se globalnom i lokalnom interpretacijom modela mašinskog učenja o čemu će biti reči u nastavku. Veoma mali podskup metoda mašinskog učenja, poput linearne regresije ili stabala odlučivanja, daje modele koji su objašnjivi. Svrha XAI je da učini procese donošenja odluka modela transparentnijim i razumljivijim za ljude. Dakle, XAI ima za cilj da pruži jasna objašnjenja o tome kako metode mašinskog učenja dolaze do svojih zaključaka ili predviđanja formirajući modele. Pošto većina metoda daje modele koje nije moguće objasniti bez primene XAI, uloga XAI je da ih objasni. Iz tog razloga je u ovoj knjizi korišćen termin – metode interpretacije modela mašinskog učenja.

8 Hiperparametri metoda mašinskog učenja predstavljaju spoljašnje konfiguracije algoritama koje se ne uče direktno iz podataka, već ih korisnici postavljaju pre početka obučavanja modela. Oni kontrolišu ponašanje algoritma tokom procesa učenja i mogu značajno uticati na performanse dobijenih modela u smislu njihove tačnosti ili osetljivosti.

Zašto veštačka inteligencija? Da bismo bolje sagledali razloge njene primene, uzmimo za primer istraživanje uticaja stanja životne sredine na zdravlje ljudi. Ogroman broj činilaca u međusobnim interakcijama određuje stanje životne sredine s jedne, zdravlje ljudi s druge, kao i njihovu međusobnu spregu s treće strane. Većinu veza nismo u stanju da sagledamo i pretočimo u jednačine, što predstavlja preduslov kvantitativnom razumevanju uzroka i posledica. U cilju sticanja naučno utemeljenog znanja, rešenje predstavlja korišćenje sofisticiranih algoritama koji leže u osnovi različitih oblasti veštačke inteligencije, a koji jesu u stanju da ih otkriju i kvantifikuju.

Tradicionalni pristup nije primenljiv. Zašto? Nije moguće ispisati niti hemijske, niti diferencijalne, niti bilo kakve druge jednačine koje bi opisale evoluciju zagađujućih materija u atmosferi u kontekstu svih faktora koji je mogu određivati. U najmanju ruku, previše je nepoznanica, promenljivih, veza i interakcija. Takođe, nije moguće dovoljno dobro ni simulirati ambijent životne sredine u laboratorijskim uslovima, što je osnovni razlog za veoma mali broj aktuelnih eksperimenata ovog tipa.

Potreban je drugačiji pristup. Veštačka inteligencija u sadejstvu sa super računarima i velikim bazama kvalitetnih podataka, nesumnjivo predstavlja osnovu sistema za navigaciju kroz probleme koji nas kao civilizaciju uveliko tište. Simbolično, koncept adekvatne kontekstualizacije podataka i primene analitičkih okvira baziranih na veštačkoj inteligenciji kao da okuplja konzilijum, obezbeđuje detaljne medicinske pretrage, skalpel stavlja u šake hirurga, iscrtava mesto za rez, operiše, prati stanje nakon operacije i koriguje sve što je potrebno radi bržeg ozdravljenja. Čini se da u savremenom svetu u ovom trenutku drugačiji pristup ne može obezbediti osnovu za razumevanje i održivost suživota ljudi i prirode. Dosadašnji način života pa i bavljenja životnom sredinom ishodovao je tome da više od 99% svetske populacije udiše vazduh lošeg kvaliteta, da preko 2 milijarde ljudi trpi posledice zbog lošeg kvaliteta vode za piće, kao i preko 3 milijarde zbog degradiranog zemljišta. Rezultat ovakvog načina života i odluka koje donosimo na ličnom i civilizacijskom nivou predstavlja više od 9 miliona smrti godišnje. A uticaj zagađenja na zdravlje ljudi nije isključivo toksičan. Zagađenje utiče na prenatalni razvoj, dovodi do genetskih mutacija i razvoja mnogih bolesti, poput infarkta, raka pluća, akutnih i hroničnih respiratornih ili neuroloških oboljenja. Ono devastira biodiverzitet i životnu sredinu, doprinosi klimatskim promenama i ima štetan uticaj na ekonomiju.

Vrste podataka

Vrsta podataka određuje početnu ravan u njihovoj analizi i interpretaciji, jer različite vrste zahtevaju različite pristupe u procesiranju, analizi i tumačenju. Podaci se najčešće klasifikuju prema svojim karakteristikama i strukturi na nominalne, ordinalne, intervalne i razmerne. Svaka od ovih vrsta poseduje specifične osobine koje utiču na način na koji se tretiraju u daljoj analizi.

Nominalni podaci koriste za označavanje kategorija ili klasa koje nemaju inherentni redosled. Primeri nominalnih podataka su tipovi zemljišta (poljopriredno, urbano ili šumsko), tip stanice za monitoring kvaliteta vazduha (urbana, semiurbana, ruralna ili merno mesto bez direktnog uticaja izvora zagađenja – *background*) ili doba dana (dan ili noć). Kod nominalnih podataka, jedina statistička operacija koja se može primeniti jeste izračunavanje frekvence pojavljivanja ili procentualna raspodela pojavljivanja. Oni ne omogućavaju poređenje ili rangiranje između kategorija, tako da su podložni samo jednostavnijim deskriptivnim metodama.

Za razliku od nominalnih, ordinalni podaci imaju prirodan redosled ili rangiranje, ali razlike između rangiranih kategorija nisu nužno jednake. Ovi podaci omogućavaju poređenje u smislu više/manje, ali ne i u smislu tačne razlike između njihovih vrednosti. Primeri ordinalnih podataka uključuju stepen erozije zemljišta (niska, umerena, visoka ili vrlo visoka) ili indeks kvaliteta vazduha (*air quality index* – AQI: dobar, umeren, nezdrav za osetljive grupe, nezdrav, veoma nezdrav ili opasan). Zbog svojih karakteristika, ordinalni podaci zahtevaju specifične statističke metode, poput neparametrijskih testova koji ne pretpostavljaju normalnu raspodelu podataka.⁹

Intervalni podaci predstavljaju kvantitativne podatke kod kojih postoji fiksna i jednaka razlika između vrednosti, ali ne postoji apsolutna nula. Primer ove vrste podataka su temperatura u Celzijusovim stepenima (razlika između dve vrednosti može se kvantitativno izraziti, ali 0°C ne znači apsolutno odsustvo toplotne energije) ili pH vrednost vode (pH vrednost 0 ne označava apsolutno odsustvo hemijske aktivnosti, već vrlo kiselo stanje). U analizi intervalnih podataka, moguće je izračunavati srednje vrednosti, standardne devijacije i druge statističke parametre, ali nije moguće vršiti proporcijalne analize jer nula nema apsolutno značenje.

⁹ O pojmu raspodela podataka i ostalim statističkim pojmovima navedenim u ovom poglavlju biće reči u nastavku knjige.

Razmerni podaci predstavljaju najbogatiji tip kvantitativnih podataka, jer poseduju sve karakteristike intervalnih podataka, uz dodatak apsolutne nule koja označava odsustvo posmatrane veličine. Ovi podaci omogućavaju primenu svih statističkih metoda, uključujući računanje proporcija, odnosa, sredina i standardnih devijacija. Primeri razmernih podataka uključuju koncentraciju zagađujućih materija u nekom medijumu životne sredine (nula označava odsustvo zagađujućih materija) ili količinu padavina (nula označava izostanak padavina). Razmerni podaci su veoma značajni u naučnim istraživanjima jer omogućavaju precizne kvantitativne analize.

Pored prethodne podele, podaci se mogu kategorizovati i na osnovu prirode vrednosti koje nose. Kategorijski podaci uključuju nominalne i ordinalne podatke, dok kvantitativni obuhvataju intervalne i razmerne podatke. Kategorijski podaci su diskretni i obično se izražavaju kroz klase, dok su kvantitativni numerički i mogu biti diskretni ili kontinualni, u zavisnosti od prirode fenomena koji se osmatra..

U realnim skupovima podataka skoro uvek postoje nedostajući podaci. U zavisnosti od uzroka njihovog pojavljivanja i načina na koji utiču na analizu mogu se podeliti u tri grupe. MCAR (*missing completely at random*) nastaju potpuno nasumično što znači da nema uzorka ili sistematičnosti u njihovom nastanku, kao ni povezanosti sa bilo kojom drugom varijablom u skupu podataka. Drugu grupu predstavljaju MAR (*missing at random*) kod kojih nedostajuće vrednosti zavise od poznatih informacija (razloga) u skupu podataka, ali ne i od samih nedostajućih vrednosti. Kao primer možemo dati skup podataka o merenjima koncentracija zagađujuće materije tokom jedne godine za koji nedostaju podaci za jedan mesec, gde bi razlog izostanka mogao biti kvar mernog uređaja. Treću grupu predstavljaju MNAR (*missing not at random*) koji nisu slučajni i zavise direktno od vrednosti koje nedostaju. Na primer, osoba sa visokim primanjima možda odluči da ne prijavi svoj prihod u anketi. Primer iz oblasti životne sredine mogao bi biti vezan za slučaj u kojem podaci o zagađenju nedostaju zato što visoke koncentracije zagađujućih materija direktno utiču na to da merenja nisu obavljena. Ova situacija je najteža za tretiranje, jer uzorak nedostajućih podataka može veoma uticati na rezultate analize. U fajlovima ili bazama podataka nedostajući podaci se označavaju konzistentno nekom od oznaka NA (*not available*), NaN (*not a number*), NULL, N/A (*not applicable*) ili kao prazno polje.

Struktura podataka

U smislu strukture, podaci se mogu podeliti na strukturane i nestrukturane podatke. Strukturirani podaci se organizuju u vidu tabela ili baza podataka, u kojima su jasno definisani redovi (rezultati pojedinačnih osmatranja ili uzorci) i kolone (varijable). Primeri uključuju podatke prikupljene kroz ankete ili vremenske serije, slika 6.1. Nestrukturirani podaci nemaju unapred definisanu strukturu i uključuju formate kao što su tekstualni dokumenti, slike, video zapisi ili podaci prikupljeni senzorima. Razvoj metoda analize nestrukturiranih podataka, uključujući veštačku inteligenciju, ima značajan potencijal u savremenim istraživanjima, posebno u naukama o životnoj sredini gde su podaci često upravo nestrukturirani.

Slika 6.1. Primer strukturiranih podataka iz oblasti životne sredine

Izvori podataka

Prikupljanje i analiza podataka u savremenom svetu predstavljaju složen zadatak zbog niza faktora koji utiču na kvalitet i dostupnost informacija. Prvi problem odnosi se na heterogenost i nepreciznost podataka. Podaci koji se prikupljaju iz različitih izvora često variraju po formatu, tačnosti i pouzdanosti. Ova varijabilnost može dovesti do teškoća u njihovoj integraciji i analizi, posebno kada je reč o velikim skupovima podataka koji zahtevaju precizno usklađivanje i validaciju. Na primer, podaci dobijeni iz satelitskih osmatranja mogu biti podložni greškama usled atmosferskih interferencija ili tehničkih ograničenja senzora, dok podaci prikupljeni sa terena mogu biti ograničeni na manja geografska područja ili određene vremenske periode što onemogućava generalizaciju.

Drugi problem je asimetričan pristup podacima. U mnogim slučajevima, određene grupe ili organizacije imaju privilegovani pristup informacijama, dok su drugi istraživači ili institucije ograničeni u svojim mogućnostima da pristupe

ili koriste te podatke. Ovakva neravnomerna distribucija podataka može otežati saradnju i razmenu informacija između različitih istraživačkih grupa, koja je ključna za napredak u nauci.

Nedostatak infrastrukture za rukovanje velikim skupovima podataka predstavlja dodatni problem. U situacijama kada postoji potreba za analizom veoma velikih skupova podataka, često je potrebna sofisticirana tehnološka infrastruktura koja omogućava skladištenje, obradu i analizu podataka u realnom vremenu. Nažalost, mnoge institucije, posebno u manje razvijenim regionima, nemaju pristup ovakvoj infrastrukturi, što ograničava njihovu sposobnost da se efikasno bave analizom podataka.

Dodatni problemi uključuju i nedovoljno znanja koje je utemeljeno u podacima. Iako prikupljanje podataka može biti opsežno, njihova analiza zahteva specijalizovane veštine i znanja koja nisu uvek dostupna. Ovo može dovesti do površnih ili netačnih zaključaka, što dalje otežava donošenje odluka utemeljenih u podacima. U tom kontekstu, potrebno je ulaganje u obuku i razvoj kapaciteta za analizu podataka.

Dalje, postoji minimalan broj globalnih studija koje se bave ovim problemima. Globalne studije su ključne za razumevanje šireg konteksta i identifikaciju globalnih trendova i obrazaca. Međutim, često su ograničene nedostatkom koordinacije, različitim standardima prikupljanja podataka i ograničenim finansijskim resursima.

Dodatni problem odnosi se na izrazitu heterogenost u metodama obrade podataka. Ova heterogenost može biti rezultat različitih softverskih alata, algoritama, statističkih metoda ili metoda veštačke inteligencije koje istraživači koriste za analizu podataka. Zbog toga rezultati dobijeni različitim metodama mogu biti teško uporedivi ili čak kontradiktorni, što može otežati donošenje zaključaka i formiranje preporuka. Na primer, obrada podataka iz laboratorijskih eksperimenata ili studija slučaja može se znatno razlikovati u zavisnosti od korišćenih metoda, što dodatno komplikuje integraciju rezultata.

Zatim, poseban problem leži u izrazitoj heterogenosti u pristupu bavljenja fenomenima. Ovaj problem se manifestuje u različitim načinima na koje istraživači pristupaju proučavanju određenih fenomena, što može uključivati različite teorijske okvire, metodološke pristupe i interpretacije rezultata. Takva varijabilnost može dovesti do nedoslednosti u razumevanju i interpretaciji podataka, što može ograničiti mogućnost poređenja i sinteze nalaza iz različitih studija.

Kompleksnost prikupljanja i analize podataka zahteva multidisciplinarni pristup, poboljšanje infrastrukture i ravnomerniji pristup informacijama. Ulaganje u istraživanje i razvoj, obuku kadrova i međunarodnu saradnju može značajno doprineti rešavanju ovih problema i unapređenju kvaliteta naučnih istraživanja u oblasti životne sredine. Zbog navedenih problema, važno je razvijati standardizovane metodologije i protokole za obradu podataka i pristup istraživanju fenomena. Osim toga, međunarodna saradnja i razmena znanja mogu doprineti smanjenju heterogenosti i poboljšanju kvaliteta naučnih istraživanja. Integrisani pristup, koji uključuje koordinisane napore u prikupljanju i obradi podataka, kao i u metodologiji istraživanja, može značajno doprineti rešavanju kompleksnih problema i unapređenju nauke o životnoj sredini.

Vrste analiza podataka

Analiza podataka obuhvata različite metode i tehnike koje se koriste za istraživanje, razumevanje, vizuelizaciju i interpretaciju podataka. U zavisnosti od cilja i prirode podataka, analize mogu biti deskriptivne, dijagnostičke, prediktivne ili preskriptivne. S druge strane, sa sve većim napretkom u oblasti numeričkog modeliranja i veštačke inteligencije, analize podataka dobijaju dodatnu dimenziju koja omogućava značajno detaljnije i preciznije studije ekoloških fenomena.

Deskriptivna statistika koristi statističke mere poput srednje vrednosti (proseka), medijane, moda, standardne devijacije i varijanse kako bi pružila sumarnu sliku o osnovnim karakteristikama skupova podataka. Ona koristi i različite vidove vizuelizacije kao što su histogrami, kutijasti (*box*) i violinski plotovi, dijagrami raspršenja (*scatter plot*) i mnogi drugi, koji igraju veoma važnu ulogu u komunikaciji rezultata.

Dijagnostička analiza ide korak dalje, istražujući uzroke koji dovode do uočenih fenomena identifikacijom ključnih faktora koji utiču na promene u podacima. Može uključivati različite statističke metode, kao što su korelaciona analiza ili različite implementacije analize varijanse (*analysis of variance* – ANOVA).

Prediktivna analiza koristi istorijske podatke s jedne, i statističke modele ili algoritme mašinskog učenja s druge strane, kako bi utvrdila međusobne odnose između varijabli i predvidela buduće događaje ili ponašanja. Ova vrsta analize oslanja se na različite vidove regresije (linearna i nelinearna) i različite oblike analize vremenskih serija. Na primer, prediktivni modeli mašinskog učenja mogu se koristiti za prognozu nivoa zagađenja svih medijuma životne sredine, predviđanje klimatskih promena ili uticaja promena u zakonodavstvu na stanje životne sredine.

Preskriptivna analiza ide korak dalje, pokušavajući da pomogne u donošenju optimalnih odluka na osnovu podataka s jedne, i rezultata prediktivne analize s druge strane. Ova vrsta analize koristi tehnike optimizacije i simulacije koje bi mogle dovesti do konkretnih akcija i strategija ili pak donošenja odluka u realnom vremenu. U suštini, preskriptivna analiza odgovara na pitanje šta treba učiniti kako bi se postigli najbolji mogući rezultati. Na primer, kao rezultat može predložiti mere poput optimizacije saobraćajne infrastrukture, ograničenja saobraćaja u određenim zonama, promovisanja korišćenja javnog prevoza ili podsticanja industrija na prelazak na čistije izvore energije u cilju redukcije zagađenja na određeni nivo.

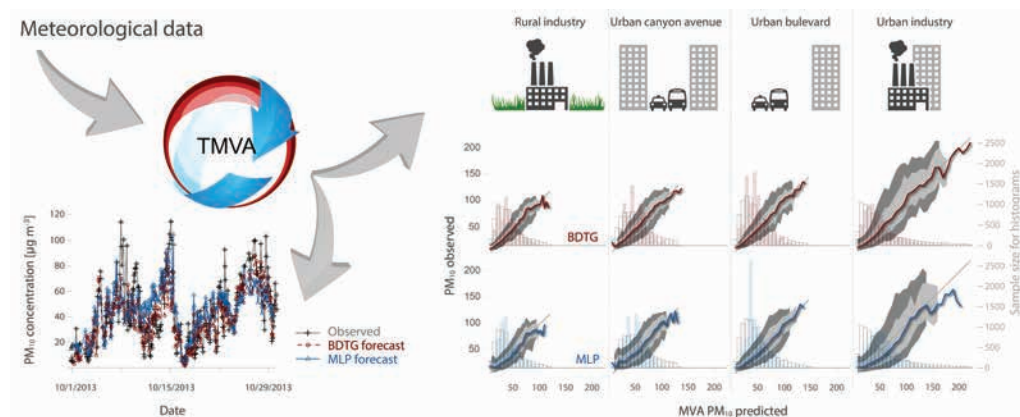
Numeričko modeliranje igra važnu ulogu u simulaciji složenih procesa kao što su atmosferska disperzija zagađujućih materija, hidrologija i klimatske promene. Numerički modeli kao što su *Weather research and forecasting model* (WRF) i *Community multiscale air quality model* (CMAQ) koriste numeričke metode za simulaciju interakcija između atmosferskih, hemijskih i bioloških procesa. Na primer, modeli disperzije zagađujućih materija mogu simulirati širenje čestičnog zagađenja ili organskih i neorganskih gasova pod različitim meteorološkim uslovima, što bi obezbedilo osnovu za donošenje odluka o upravljanju kvalitetom vazduha i strategijama smanjenja zagađenja.

Na kraju, primena veštačke inteligencije u analizi kompleksnosti životne sredine postaje sve važnija u analizi podataka iz ove oblasti iz razloga navedenih u prethodnom delu knjige, predstavljajući jedan od ključnih naučnih iskoraka poslednjih decenija. Sa sve većim porastom dostupnosti podataka i napretkom u razvoju računarskog hardvera i algoritama, mogućnosti analize ekoloških fenomena značajno su unapređene. Veštačka inteligencija, sa posebnim naglaskom na mašinsko učenje (*machine learning* – ML), duboko učenje (*deep learning* – DL), metaheuristike i metode interpretacije modela mašinskog učenja, omogućava nesamerljivo bolje razumevanje, predviđanje, čak i upravljanje složenim ekološkim sistemima, čime se podstiče održivi razvoj i zaštita životne sredine.

Mašinsko učenje predstavlja jedan od najvažnijih alata u analizi podataka o životnoj sredini. Njegova prednost leži u sposobnosti automatskog učenja iz velikih i složenih skupova podataka bez eksplicitnog programiranja. Algoritmi mašinskog učenja mogu analizirati istorijske podatke, otkrivati skrivene obrasce, kao i predviđati buduće promene u ekosistemima, atmosferskim i klimatskim procesima ili uticaju zagađenja na zdravlje ljudi. Na primer, korišćenjem metoda kao što su ansambl stabala odlučivanja ili neuronske mreže, modeli mašinskog učenja mogu predvideti koncentracije zagađujućih materija u zavisnosti od vremenskih i klimatskih uslova. Regresione metode mogu koristiti parametre

poput temperature, brzine vetra, vlažnosti i atmosferskog pritiska da predvide koncentracije zagađujućih materija u određenim vremenskim okvirima u najrazličitijim konfiguracijama okruženja životne sredine, slika 6.2. Ovi modeli ne samo da pružaju precizne prognoze, već omogućavaju i identifikaciju ključnih faktora koji doprinose zagađenju.

Slika 6.2. Primer kvaliteta prognoze koncentracija PM_{10} bazirane na meteorološkim parametrima u različitim konfiguracijama životne sredine



Duboko učenje, kao napredniji oblik mašinskog učenja, posebno je efikasno u analizi visokodimenzionalnih i nelinearnih podataka, kakvi su često prisutni u životnoj sredini. Koristi višeslojne neuronske mreže za automatsko izdvajanje složenih obrazaca i veza unutar podataka, što je posebno korisno u situacijama gde postoji veliki broj varijabli i nepoznatih faktora. Jedna od važnih primena dubokog učenja je analiza klimatskih promena. Primenom konvolutivnih neuronskih mreža (CNN) na satelitske snimke, moguće je analizirati promene u korišćenju zemljišta, detektovati širenje urbanih sredina ili pratiti gubitak biodiverziteta u realnom vremenu. S druge strane, rekurentne neuronske mreže (RNN) omogućavaju modeliranje vremenskih serija, što je veoma važno za analizu dugoročnih promena u koncentracijama zagađujućih materija, kao i za predviđanje potencijalnih ekoloških katastrofa kao što su požari, poplave ili suše.

Metaheuristike, kao što su genetski algoritmi (*genetic algorithms* – GA), roj čestica (*particle swarm optimization* – PSO), optimizacija kolonije mrava (*ant colony optimization* – ACO), optimizacija zasnovana na kolonijama pčela (*artificial bee colony* – ABC) i mnogi drugi, sve više se koriste u rešavanju složenih ekoloških problema. Ovi algoritmi omogućavaju globalnu optimizaciju rešenja

u visoko nelinearnim i dinamičkim sistemima, što je često neophodno u analizi kompleksnosti životne sredine. Pored optimizacije hiperparametara algoritama mašinskog učenja, primena metaheuristika u ekološkim naukama obuhvata širok spektar oblasti, uključujući upravljanje prirodnim resursima, planiranje u oblasti energetske efikasnosti, kao i dizajn i optimizaciju mreža za monitoring. Na primer, genetski algoritmi mogu se koristiti za optimizaciju rasporeda mernih stanica u urbanim sredinama, što omogućava efikasniju detekciju i praćenje zagađenja uz minimiziranje troškova. S druge strane, u analizi fenomena kao što su transport zagađujućih materija u atmosferi ili dinamika vodenih ekosistema, metaheuristike mogu optimizovati složene modele i pružiti rešenja za problem nesigurnosti u ulaznim parametrima. Ovi pristupi omogućavaju brzo istraživanje prostora mogućih rešenja i često se koriste u kombinaciji sa numeričkim modeliranjem i stohastičkim tehnikama.

Zbog svoje izrazite kompleksnosti i rezultata koje je teško ili najčešće nemoguće u potpunosti razumeti, algoritmi mašinskog učenja često funkcionišu kao takozvane „crne kutije“. Metode interpretacije modela mašinskog učenja imaju za cilj da omoguće bolje razumevanje unutrašnjih mehanizama donošenja odluka unutar samih modela i osiguraju da se predikcije mogu protumačiti na jasan i logičan način. Na primer, u ekologiji ove metode mogu pomoći u razumevanju ključnih faktora koji doprinose opterećenju životne sredine. Upotrebom SHAP vrednosti (*SHapley Additive exPlanations*) o kojima će biti reči u nastavku knjige, moguće je proceniti apsolutni ili relativni značaj različitih varijabli u modelima koji predviđaju koncentracije zagađujućih materija, identifikovati najkritičnije faktore (kao što su industrijske emisije, saobraćaj ili meteorološke prilike) i objasniti kako su oni doprineli specifičnim nivoima zagađenja u različitim ambijentima životne sredine.

6.4. PRETPROCESIRANJE PODATAKA

Pretprocesiranje podataka predstavlja početnu fazu u analizi podataka koja uključuje niz tehnika i metoda namenjenih za pripremu sirovih podataka za analizu. Ovaj korak je neophodan, jer sirovi podaci često sadrže greške, nedoslednosti, nedostajuće vrednosti i druge nepravilnosti koje se mogu negativno odraziti na tačnost i validnost rezultata analize. Pretprocesiranje podataka omogućava da se podaci očiste, transformišu i organizuju na način koji olakšava dalju obradu i analizu. Postupak obuhvata procese poput čišćenja podataka u koje spada identifikacija i uklanjanje grešaka i nedoslednosti u podacima. Takođe, obuhvata različite transformacije u smislu promene formata ili strukture podataka kako bi se poboljšala njihova konzistentnost i upotrebljivost. Zatim, nekada je potrebno izvršiti normalizaciju i standardizaciju koja predstavlja prilagođavanje podataka na jedinstvenu skalu kako bi se osiguralo da različite dimenzije i jedinice mere budu kompatibilne za analizu. Na kraju, pretprocesiranje podrazumeva i redukciju dimenzionalnosti, kao na primer uklanjanje redundantnih ili nerelevantnih varijabli iz podataka kako bi se smanjila složenost modela i povećala efikasnost obrade.

Pretprocesiranje podataka obično se sprovodi u nekoliko faza. Prva faza predstavlja prikupljanje podataka iz različitih izvora. Ovi izvori mogu uključivati senzore, baze podataka, simulacije, aplikacije i druge sisteme koji generišu ili skladište podatke. Podaci prikupljeni iz različitih izvora često dolaze u različitim formatima. Integracija podataka uključuje kombinovanje različitih izvora u jedinstvenu bazu podataka koja može pojednostaviti analizu. Zatim sledi čišćenje podataka tokom koje se iz podataka uklanjaju greške, nedoslednosti i nedostajuće vrednosti. Identifikovane greške se ispravljaju, a nedostajuće vrednosti se ili popunjavaju različitim tehnikama prikladnim za konkretnu situaciju ili eliminišu u zavisnosti od strategije koja se koristi. Čisti podaci se transformišu kako bi bili spremni za analizu. Transformacija može uključivati skaliranje podataka, normalizaciju, agregaciju i kreiranje novih varijabli na osnovu postojećih podataka. Kada se radi s velikim skupovima podataka sa mnogo varijabli, što će uvek biti slučaj ukoliko je kontekstualizacija fenomena iz oblasti životne sredine urađena na adekvatan način, može biti korisno redukovati broj dimenzija kako bi se dobijeni modeli pojednostavili, ali i smanjila mogućnost preteranog prilagođavanja modela.¹⁰

10 Preterano prilagođavanje modela (overfitting) je pojava u mašinskom učenju kada model postane previše prilagođen podacima iz skupa za trening, do te mere da gubi sposobnost generalizacije kada se primeni na nove, nepoznate podatke. To znači da model veoma precizno opisuje podatke za trening, uključujući i šum i određene specifičnosti koji se u njima pojavljuju, ali loše predviđa rezultate nad stvarnim podacima.

Statističko prilagođavanje podataka

Statističko prilagođavanje podataka odnosi se na modifikaciju vrednosti određenih varijabli kako bi se smanjile greške i nepreciznosti, što znači i povećala pouzdanost rezultata pri njihovoj analizi. Na primer, ovaj proces može uključivati metode normalizacije i standardizacije podataka koje se koriste za dovođenje različitih mera u zajednički referentni okvir.

Normalizacija podataka je proces prilagođavanja vrednosti podataka na zajedničku skalu, obično u opsegu od 0 do 1. To je korisno kada podaci imaju različite merne jedinice ili kada je potrebno da se vrednosti direktno porede. Često se koristi kada ne postoje pretpostavke o raspodeli podataka, ali je važno da svi podaci budu u istom rasponu zbog algoritama koji su osetljivi na različite skale podataka, poput algoritama klasterizacije podataka ili neuronskih mreža. Normalizacija se obično odnosi na tehniku skaliranja na minimalnu, odnosno maksimalnu vrednost:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

gde je X originalna vrednost, X_{min} minimalna vrednost u skupu podataka, X_{max} maksimalna vrednost u skupu podataka, a X_{norm} normalizovana vrednost.

Standardizacija uključuje transformaciju podataka na srednju vrednost od 0 i standardnu devijaciju od 1 što se svodi na računanje z-vrednosti (z-score). Ova tehnika je korisna kada se očekuje da podaci prate normalnu distribuciju ili kada se koristi za algoritme koji pretpostavljaju normalnu raspodelu podataka:

$$x_{std} = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

gde je X originalna vrednost, μ srednja vrednost skupa podataka, σ standardna devijacija skupa podataka, a x_{std} standardizovana vrednost.¹¹

Osim navedenog, statističko prilagođavanje podataka može uključivati transformacije podataka (logaritmovanje, kvadriranje, i tako dalje) radi smanjenja asimetrije raspodele ili prilagođavanja eksternim promenama kao što su sezonske varijacije.

11 Pojmovi z-vrednosti, srednja vrednost, standardna devijacija i ostali pojmovi navedeni u ovom poglavlju biće objašnjeni u nastavku knjige.

Identifikacija netipičnih vrednosti i njihov tretman

Netipične vrednosti (*outliers*) predstavljaju podatke koji značajno odstupaju od ostalih podataka u skupu i mogu značajno uticati na rezultate analize ako se ne tretiraju na primeren način. Značajno odstupanje može biti dvojako. U najjednostavnijem slučaju, netipične vrednosti mogu biti značajno više, odnosno niže od većine ostalih vrednosti. Za identifikaciju ove vrste netipičnih vrednosti mogu se koristiti različite statističke metode koje uključuju *z-score* analizu, interkvartilni raspon (IQR) i vizualizaciju poput *box* plotova.

S druge strane, netipične vrednosti ne moraju biti očigledne i mogu se naći unutar većine osmotrenih vrednosti. Uzmimo za primer merenje temperature tokom jedne godine. U Beogradu se poslednjih godina registruju sve više temperature, tako da možemo uzeti da se kreću u opsegu od -10 do 40°C. U tom smislu, reklo bi se da temperatura od 30°C ne predstavlja netipičnu vrednost. Međutim, zamislimo situaciju u kojoj je ova vrednost izmerena tokom zime, na primer prvog januara. Pošto klima u Republici Srbiji još uvek nije tropska, izmerena vrednost od 30°C u zimskom periodu očigledno predstavlja netipičnu vrednost za koju uzrok pojavljivanja najpre može biti pogrešno očitavanje termometra ili pogrešan unos u bazu podataka. Pošto smo izmerenoj vrednosti već dali kontekst – izmerena je tokom zime, metode analize podataka koje kontekstualizuju temperaturu makar nekim od faktora koji na nju utiču, što sezonalnost svakako jeste, mogu biti dobri kandidati za identifikaciju ovakve vrste netipičnih vrednosti. Postoji mnogo metoda iz oblasti mašinskog učenja koje se koriste za detekciju i identifikaciju ovih vrednosti. One se uključuju zbog sposobnosti da prepoznaju anomalije u podacima, unaprede tačnost modela i osiguraju njegovu robusnost. Neke od najčešće korišćenih metoda su izolaciona šuma (*isolation forest*), metoda potpornih vektora (*one-class support vector machine*), HDBSCAN (*hierarchical density-based spatial clustering of applications with noise*) i mnoge druge.¹²

Izolaciona šuma radi na principu stvaranja nasumičnih stabala odlučivanja i izolovanja pojedinačnih uzoraka podataka, gde su upravo netipične vrednosti one koje se mogu izolovati sa manje podela u stablu, za razliku od tipičnih koje zahtevaju veći broj podela. Metoda *one-class support vector machine* je metoda nadgledanog učenja koja se može koristiti za detekciju anomalija. Ona uči model koji klasifikuje većinu podataka kao tipične, dok ostatak koji odstupa od najvećeg broja podataka, identifikuje kao anomalije. HDBSCAN je metoda klasterizacije zasnovana na gustini tačaka koja može identifikovati netipične vrednosti kao one podatke koji se ne uklapaju u formirane klustere. Algoritam klasifikuje podatke u klustere na osnovu gustine tačaka u njihovom okruženju. Netipične vrednosti su one tačke koje se nalaze izolovano, van oblasti velike gustine.

¹² Neke od navedenih metoda u ovom i nekoliko narednih poglavlja biće obrađene u nastavku knjige.

Tretman netipičnih vrednosti je ključan za očuvanje integriteta analize, naročito u istraživanjima gde ovi podaci mogu biti indikatori posebnih slučajeva ili grešaka u merenju. Jednom kada su netipične vrednosti identifikovane, pristupa se njihovom tretmanu koji podrazumeva eliminaciju iz skupa podataka ili zamenu medijanom, srednjom vrednošću, određenom otežinjenom vrednošću ili predikcijom dobijenom primenom klasifikacije ili regresije u zavisnosti od tipa varijable čija se vrednost tretira.

Tretman izmerenih vrednosti ispod granice detekcije instrumenta

U mnogim oblastima nauke, podaci se često nalaze ispod granice detekcije mernih instrumenata o čemu je bilo reči u prethodnom delu knjige. Tretman vrednosti ispod granice detekcije predstavlja važan korak u preprocesiranju podataka, jer može značajno uticati na kvalitet analize. Kada je izmerena vrednost ispod granice detekcije, ona se smatra nepouzdanom i koristi se samo u slučajevima kada nema drugih dostupnih opcija, kao što je merenje osetljivijom metodom. Pravilna strategija tretmana vrednosti ispod granice detekcije zahteva pažljiv izbor metode u zavisnosti od specifičnog konteksta merenja i dostupnih podataka kako bi se greške u kasnijim fazama analize smanjile.

Jedan od pristupa u tretmanu je zamena ovih vrednosti alternativnim numeričkim vrednostima izračunatih primenom naprednih regresionih metoda. Drugi način zamene je korišćenje numeričke vrednosti koja odgovara granici detekcije. Međutim, ovaj pristup može dovesti do precenjivanja rezultata u daljim fazama analize, jer povećava vrednost veličine koja se meri. Alternativno, može se koristiti polovina vrednosti granice detekcije, što se preporučuje kada nije moguće pribaviti vrednost na drugi način, uz pomoć preciznijih metoda. Takođe, jedan od metoda je zamena vrednošću nula, za onu varijablu za koju nula predstavlja najmanju moguću vrednost. Ova zamena može, međutim, potceniti rezultate, jer umanjuje vrednost veličine koja se meri i samim tim može dovesti do pogrešnih zaključaka o nivou prisutnih zagađujućih materija ili parametara od interesa.

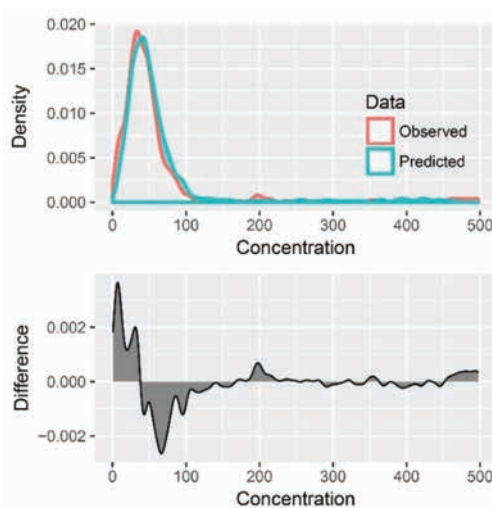
Tretman nedostajućih vrednosti

Nedostajuće vrednosti su česta pojava u gotovo svim skupovima podataka i mogu značajno uticati na rezultate analize ako se ne tretiraju na adekvatan način. Neke od metoda analize podataka dozvoljavaju prisustvo nedostajućih vrednosti, omogućavajući njihovo uključivanje u dalje analize bez menjanja osnovnog skupa podataka. S druge strane, postoje metode koje ih ne dozvoljavaju. U tim slučajevima, nedostajuće vrednosti se tretiraju na različite načine,

kao što je brisanje celih redova iz skupa podataka koji ih sadrže ili popunjavanje određenim vrednostima, na primer srednjom ili nekom drugom statistički relevantnom vrednošću.

Naprednije metode uključuju popunjavanje predikcijom dobijenom primenom klasterizacije, klasifikacije i regresije u zavisnosti od vrste varijable čija se nedostajuća vrednost popunjava. Verzija algoritma mašinskog učenja slučajne šume (*missForest*) omogućava preciznije popunjavanje nedostajućih vrednosti, jer nedostajuću vrednost izračunava u kontekstu svih ostalih varijabli. Na slici 6.3. dat je primer raspodele koncentracija neke zagađujuće materije pre i nakon popunjavanja izračunatim vrednostima. Razlika između njih je minimalna, što ukazuje na tačnost metode popunjavanja. Generalno, napredni pristupi poput navedenog omogućavaju bolje razumevanje i tretman nedostajućih podataka, čime se poboljšava tačnost i integritet rezultata analize podataka.

Slika 6.3. Primer evaluacije rezultata popunjavanja nedostajućih vrednosti



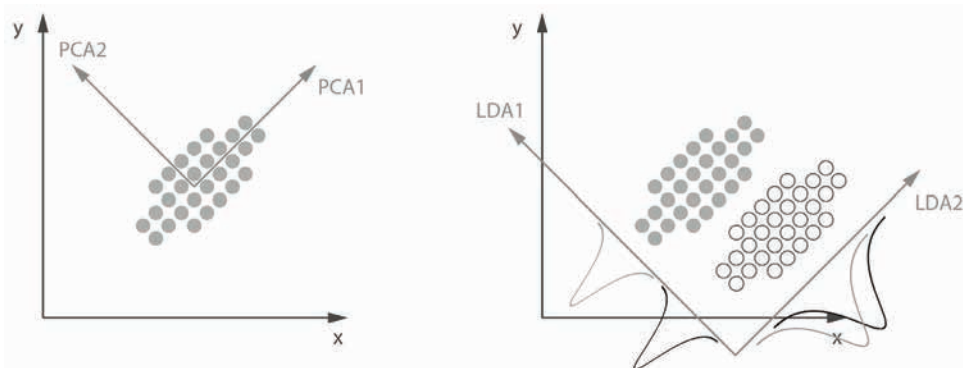
Redukcija dimenzionalnosti

Redukcija dimenzionalnosti predstavlja proces transformacije visokodimenzionalnih podataka (veliki broj varijabli) u niži broj dimenzija, koji pritom zadržava optimum informacija važnih za analizu. Visokodimenzionalni podaci često sadrže redundantne ili manje relevantne informacije koje mogu otežati analizu i vizualizaciju, zbog čega metode redukcije dimenzionalnosti doprinose njihovom pojednostavljivanju.

Metode redukcije dimenzionalnosti mogu biti linearne i nelinearne. Linearne metode podrazumevaju da se podaci mogu efikasno predstaviti linearnim odnosima između varijabli (dimenzija), dok nelinearne metode obuhvataju kompleksnije, nelinearne strukture podataka.

Analiza glavnih komponenti (*principal component analysis* – PCA) predstavlja jednu od najpoznatijih linearnih metoda redukcije dimenzionalnosti. Cilj ove metode je da transformiše podatke tako da novi skup dimenzija (glavne komponente) maksimizira varijansu podataka, pri čemu svaka nova dimenzija predstavlja pravac sa najvećom varijansom u podacima, slika 6.4, levo. Prva glavna komponenta nosi najviše informacija, a svaka naredna objašnjava sve manji deo varijanse. Analiza glavnih komponenti je posebno korisna kada su dimenzije međusobno povezane, jer omogućava smanjenje broja dimenzija dok se većina informacija zadržava.

Slika 6.4. Koncept analize glavnih komponenti (levo) i linearne diskriminantne analize (desno)



Linearna diskriminantna analiza (*linear discriminant analysis* – LDA) predstavlja još jednu linearnu metodu koja se koristi za redukciju dimenzionalnosti. Za razliku od analize glavnih komponenti, ova metoda fokusira se na maksimiziranje razdvajanja između klasa u skupu podataka, slika 6.4, desno. Koristi se pre svega u problemima klasifikacije, jer pomaže u identifikaciji dimenzija koje najbolje razlikuju, odnosno razdvajaju klase.

T-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) je nelinearna metoda za vizualizaciju visokodimenzionalnih podataka. Ova metoda redukuje dimenzionalnost transformacijom podataka u dvodimenzionalni ili trodimenzionalni prostor, zadržavajući lokalnu strukturu podataka. Koristi se za klasterizaciju podataka i vizualizaciju skrivenih struktura.

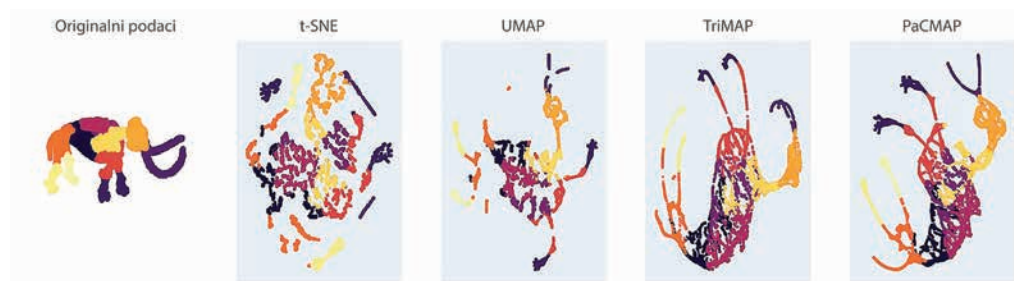
Uniform manifold approximation and projection (UMAP) predstavlja još jednu nelinearnu metoda redukcije dimenzionalnosti, veoma brzu i preciznu u otkrivanju složenih struktura u podacima. Zasniva se na teoriji mnogostrukosti i teoriji grafova. Koristi dva osnovna koraka: izgradnju grafova najbližih suseda i optimizaciju niskodimenzionalne reprezentacije podataka. Pored brzine i efikasnosti u radu sa velikim skupovima podataka, prednost UMAP u odnosu na t-SNE je u zadržavanju i globalne i lokalne strukture podataka.

Triangular map (TriMAP) je metoda redukcije dimenzionalnosti zasnovana na trojkama podataka. Osnovno ideja koncepta je da za klasterizaciju tačaka u velikim skupovima podataka nije dovoljno sagledavati samo susede tačaka, već je korisno razmatrati i odnose između tripleta tačaka. Ova tehnika se oslanja na očuvanje lokalne i globalne strukture podataka kreirajući trojke tačaka (*anchor point* i dve druge tačke), čije odnose koristi za minimiziranje gubitka informacija tokom transformacije podataka u niži broj dimenzija. Prednost ove metode leži u očuvanju globalne strukture podataka

Pairwise controlled manifold approximation projection (PaCMAP) je metoda redukcije dimenzionalnosti koja se fokusira na uravnoteženo održavanje relacija između susednih i udaljenijih tačaka koristeći parove podataka za kontrolu i balansiranje lokalnih i globalnih informacija. Ovo se postiže kroz nekoliko koraka koji uključuju analizu lokalnih veza (susedne tačke u originalnom prostoru ostaju susedne i u redukovanom prostoru), udaljenih veza (očuvanje strukture između tačaka koje su u srednjem rasponu udaljenosti), kao i udaljenih parova (očuvanje relacija između udaljenih tačaka).

Poređenje performansi nelinearnih metoda redukcije dimenzionalnosti prikazano je na slici 6.5. Kao što se može videti, algoritmi TriMAP i posebno PaCMAP u značajnoj meri odražavaju i globalnu i lokalnu strukturu originalnih podataka.

Slika 6.5. Poređenje performansi nelinearnih metoda redukcije dimenzionalnosti..



Kvantizacija podataka

Kvantizacija podataka je proces diskretizacije kontinualnih podataka u ograničen broj vrednosti ili nivoa. Na primer, ako rezultati merenja mogu imati bilo koju vrednost u opsegu od 0 do 10, kvantizacija će omogućiti da se ove vrednosti prikažu u određenom broju diskretnih koraka, npr. 0, 2, 4, 6, 8, 10. Kvantizacija može biti uniformna, kada se koristi konstantan interval između kvantizacionih nivoa, ili neuniformna, kada se koristi različit interval, pri čemu su finiji nivoi postavljeni u opsezima gde je gustina podataka veća, dok su grublji nivoi postavljeni u opsezima sa manjom gustinom podataka. Na primer, ovaj postupak je važan zbog kompresije podataka koji dolaze prvenstveno iz satelitskih osmatranja.

6.5. STATISTIČKE MERE

Statističke mere koriste se za procenu i opisivanje različitih karakteristika skupa podataka. Omogućavaju kvantifikaciju varijabilnosti i pouzdanosti rezultata, kao i identifikaciju potencijalnih grešaka u merenju. Razumevanje osnovnih statističkih mera, kao što su greška, nesigurnost, preciznost i tačnost, od suštinskog je značaja za interpretaciju rezultata i donošenje ispravnih zaključaka.

Greška

U statistici se pojam greške odnosi na razliku između izmerenih vrednosti i stvarne vrednosti. Postoje različiti tipovi grešaka koje mogu nastati u procesu merenja ili analize podataka. Slučajna greška nastaje zbog nepredvidljivih i nasumičnih varijacija u merenju. Ove greške su inherentne u svakom eksperimentalnom postupku i mogu biti uzrokovane brojnim faktorima, kao što su promenljivi uslovi spoljašnje sredine ili osetljivost mernih instrumenata. Slučajne greške obično slede normalnu raspodelu podataka¹³ i mogu se smanjiti povećanjem broja merenja. S druge strane, sistematska greška nastaje kada postoji dosledno odstupanje od stvarne vrednosti, uzrokovano greškama u konceptu merenja, mernim instrumentima ili uticajem spoljašnjih faktora koji nisu adekvatno sagledani i kontrolisani. Za razliku od slučajnih grešaka, sistematske greške se ne mogu smanjiti ponavljanjem merenja i zahtevaju korekcije svih nivoa koncepta merenja ili kalibraciju instrumenata.

13 Navedeni statistički pojmovi biće objašnjeni u nastavku knjige.

Nesigurnost

Nesigurnost merenja ili rezultata analize odnosi se na meru nepreciznosti koja je prisutna u svakom merenju i metodi analize podataka. Predstavlja opseg mogućih vrednosti koje mogu obuhvatiti stvarnu vrednost sa određenim nivoom poverenja. Mera nesigurnosti se često izražava pomoću intervala poverenja ili standardne devijacije.

Nesigurnost potiče od instrumentalne nesigurnosti, koja je u vezi sa ograničenjima i tačnošću upotrebljenih instrumenata, metodološke nesigurnosti, koja je u vezi sa konceptom i metodama korišćenim u eksperimentu ili analizi podataka, kao i subjektivne nesigurnosti, koja je u vezi sa procenama ili pretpostavkama koje analitičar donosi tokom analize.

Preciznost

Preciznost merenja odnosi se na stepen do kojeg ponovljena merenja pod istim uslovima daju iste rezultate. Visoka preciznost znači da su rezultati konzistentni i ponovljivi, bez obzira na to koliko su blizu stvarne vrednosti. Ponovljivost bi se mogla definisati kao mera slaganja rezultata pri merenjima ponovljenim pod istim uslovima u kratkom vremenskom periodu. S druge strane, reproducibilnost bi se mogla definisati kao mera doslednosti rezultata ponovljenih merenja.

Tačnost

Tačnost merenja odnosi se na meru bliskosti izmerene i stvarne, odnosno referentne vrednosti. Visoka tačnost znači da je merenje vrlo blizu stvarne vrednosti, čak i ako nisu sva merenja potpuno konzistentna. U ovom kontekstu definiše se pristrasnost (*bias*) kao sistematsko odstupanje merenja od stvarne vrednosti.

U idealnom slučaju, merenja bi trebalo da budu i precizna i tačna, ali u praksi, često se mora napraviti kompromis između ovih aspekata. Iz tog razloga, identifikacija izvora grešaka i nesigurnosti je veoma važna kako bi se smanjila i postigla najveća moguća tačnost i preciznost.

6.6. OSNOVNE STATISTIČKE METODE

Koncept univarijativne statističke analize obuhvata tehnike za testiranje skupa podataka sa jednom varijablom. Neke od njih biće objašnjene u nastavku knjige. Međutim, kontekstualizacija fenomena jasno implicira merenje velikog broja parametara koji ga određuju. Na primer, razmotrimo procenu kontaminiranosti kišnice na osnovu praćenja parametara kao što su koncentracije isparljivih organskih jedinjenja, pH, električna provodljivost i zamućenost, kako bi se razumeo uticaj padavina na kvalitet vazduha u nekom području. U ovom slučaju, za svaki uzorak potrebno je izmeriti sve parametre koji su, generalno govoreći unutar uzoraka međusobno veoma povezani. Nezavisnom analizom pojedinačnih varijabli međusobni odnosi između njih bili bi zanemareni, što bi dovelo do različite i gotovo sigurno pogrešne slike pa i interpretacije stvarnog ponašanja odabranih varijabli u prisustvu ostalih. Zbog toga, skupovi podataka sa više varijabli moraju se analizirati korišćenjem multivarijativnih metoda koje uzimaju u obzir i ove odnose.

Multivarijativne metode predstavljaju skup metoda koje mogu služiti različitim svrhama u oblasti nauke o životnoj sredini, uključujući različite oblike klasterizacije podataka u cilju prepoznavanja grupa sličnih osmatranja, analizu glavnih komponenti i faktorsku analizu kao metode redukcije dimenzionalnosti podataka bez gubitka važnih informacija, multivarijativnu analizu varijanse koja se koristi za statističko testiranje hipoteza na osnovu višedimenzionalnih podataka ili multivarijativnu regresionu analizu, koja se koristi za predviđanja zasnovana na odnosu između varijabli.

Raspodele podataka

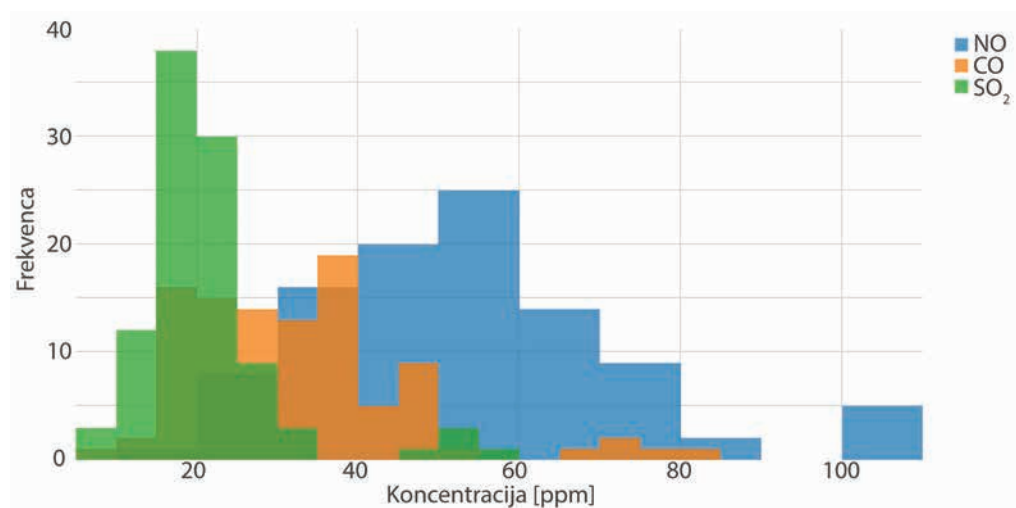
Krenimo od početka. Ako pogledamo izmerene vrednosti, rezultati merenja određene varijable iz životne sredine obično pokazuju manje ili veće varijacije. Izmerene vrednosti variraju zbog same prirode fenomena koja se posmatra i njegovog odnosa sa ambijentom u kome se pojavljuje, ali i niza nesigurnosti koje proističu iz mernih instrumenata ili njihove implementacije u merni sistem. Iz ovoga bi se moglo zaključiti da bi za adekvatno sagledavanje određenog fenomena bilo potrebno izmeriti što je moguće veći broj vrednosti svih varijabli koje ga kontekstualizuju. Međutim, svako merenje se iz različitih razloga svodi na merenje veoma ograničenog broja uzoraka, što nameće pitanje u kojoj meri se iz skupa izmerenih vrednosti mogu izvesti pouzdani zaključci o fenomenu koji se istražuje.

Izmerene vrednosti mogu doći iz dve vrste raspodele. Kada se vrednosti nalaze unutar kontinuiranog opsega, kaže se da je raspodela varijable kontinualna. Primer kontinualne raspodele mogu biti izmerene vrednosti temperature ili koncentracije neke zagađujuće materije. S druge strane, ako se mogu izmeriti samo određene, specifične vrednosti varijable, kaže se da je raspodela diskretna. Primer diskretne raspodele mogao bi biti smer vetra definisan prema sektorima kompasa koji mogu imati samo vrednosti sever, severoistok, istok, jugoistok, jug, jugozapad, zapad i severozapad.

Histogram

Histogram je grafički prikaz raspodele frekvenci kontinualne ili diskretne varijable. Konstruisan je tako što deli opseg podataka na uzastopne intervale (binove) i broja vrednosti iz skupa podataka koje se nalaze u svakom intervalu, slika 6.6. Dakle, širina pravougaonika u histogramu odgovara širini bina, dok njegova visina predstavlja broj podataka unutar datog intervala.

Slika 6.6. Primer histograma koncentracija zagađujućih materija

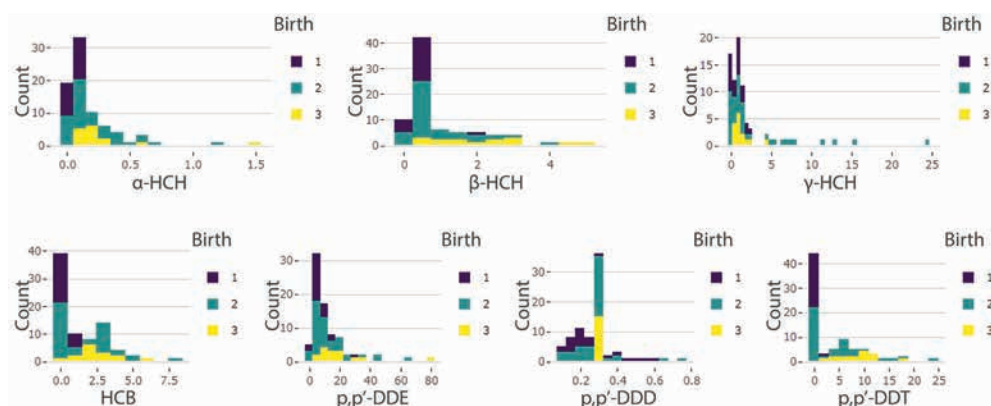


Histogrami mogu biti važan alat u statističkoj analizi, jer omogućavaju vizualizaciju oblika raspodele podataka, uključujući identifikaciju centralne tendencije, rasipanja, asimetrije, multimodalnosti, kao i potencijalnih odstupanja ili netipičnih vrednosti, o čemu će biti reči u nastavku.

PRIMER

Kao primer histograma možemo dati raspodelu koncentracija polihlorovanih bifenila u majčinom mleku za majke koje su rodile jedno, dvoje ili troje dece, slika 6.7.

Slika 6.7. Raspodela koncentracija polihlorovanih bifenila u majčinom mleku za majke koje su rodile jedno, dvoje ili troje dece



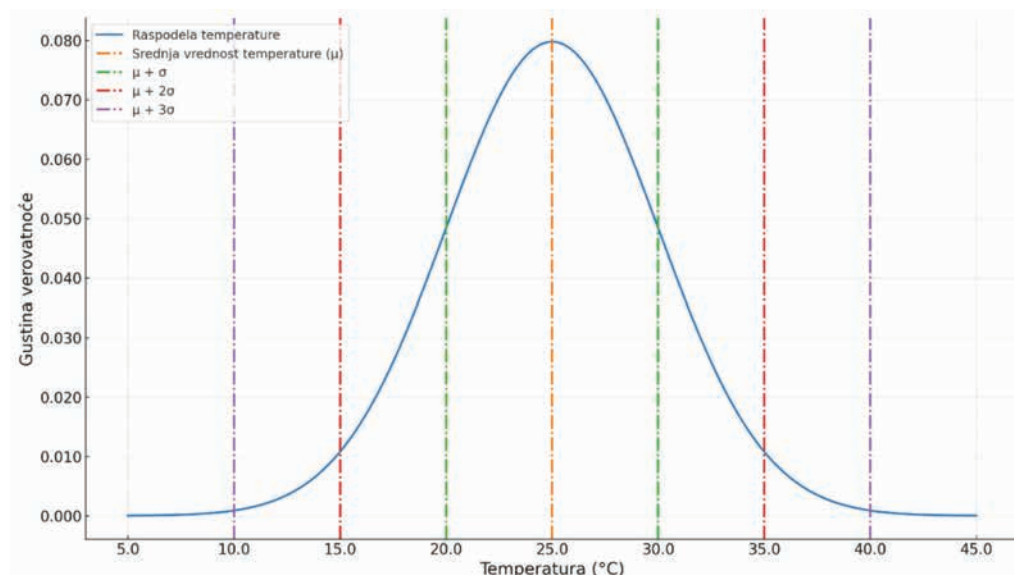
Gustina raspodele podataka

Posmatrano detaljnije, raspodele izmerenih vrednosti mogu se opisati pomoću dva statistička parametra, od kojih prvi predstavlja srednju vrednost (μ), a drugi standardnu devijaciju (σ), kao i pomoću funkcije gustine verovatnoće koja opisuje raspodelu izmerenih vrednosti upravo pomoću ova dva parametra (*probability density function* – PDF). Za datu raspodelu definiše se slučajna vrednost kao vrednost za koju je verovatnoća njenog pojavljivanja jednaka vrednosti funkcije gustine verovatnoće u toj tački.

Na primeru takozvane normalne raspodele prikazane na slici 6.8, izmerena vrednost temperature od 25°C je najverovatnija, dok će vrednosti izvan opsega od 10 do 40°C biti veoma retke. Uopšteno, za sve normalne raspodele, oko 67% vrednosti će se naći u opsegu $\mu \pm \sigma$, oko 95% u opsegu $\mu \pm 2\sigma$, dok će se oko 99,7% vrednosti naći u opsegu $\mu \pm 3\sigma$.¹⁴

¹⁴ Normalna raspodela sa vrednostima parametara $\mu = 0$ i $\sigma = 1$ ima poseban značaj. Naziva se standardna normalna raspodela, a njeni parametri z-vrednosti (*z-scores*). Mnoge statističke metode i testovi oslanjaju se na ovu vrstu raspodele, jer omogućava jednostavnije računanje verovatnoća i testiranje statističkih hipoteza. Takođe, standardna normalna raspodela je veoma važna u teoriji centralne granične teoreme po kojoj se zbir velikog broja nezavisnih i identično raspedeljenih slučajnih varijabli približava normalnoj raspodeli, bez obzira na prvobitnu raspodelu podataka.

Slika 6.8. Primer normalne gustine raspodele kontinualne varijable



Srednja vrednost kontinualne varijable predstavlja aritmetičku sredinu svih mogućih vrednosti koje varijabla može uzeti i predstavlja centar raspodele izmerenih vrednosti. Ako se iz velikog uzorka slučajnih vrednosti iz normalne raspodele izabere n vrednosti $x_1, x_2, \dots, x_n$ tada će njihova srednja vrednost:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

biti približno jednaka μ . Dakle, srednja vrednost uzorka, kao mera centralne tendencije, predstavlja procenu srednje vrednosti raspodele za slučajni uzorak iz date raspodele.

Dok se mera centralne tendencije dobija određivanjem srednje vrednosti, mera disperzije izmerenih vrednosti predstavlja stepen raspršenosti koji pokazuju merenja ili inherentnu varijabilnost unutar fenomena koji se posmatra. Mogu se definisati različite mere raspršenosti.

Varijansa, odnosno kvadrat standardne devijacije raspodele (σ^2), za velike uzorke mora biti približno jednak varijansi uzorka, definisane kao:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

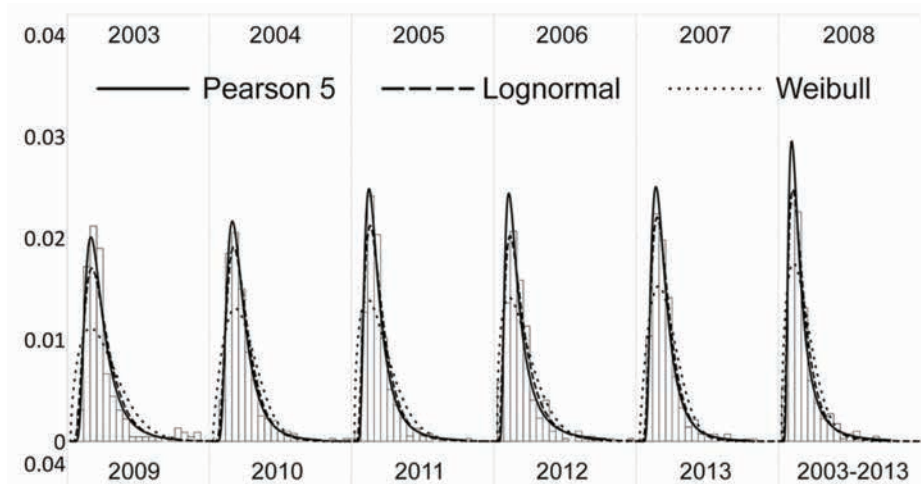
gde se zbir kvadrata odstupanja od srednje vrednosti normira na $n - 1$ umesto na n ne bi li se eliminisala tendencija potcenjivanja varijanse populacije.

Kvadratni koren varijanse uzorka (s) naziva se standardna devijacija uzorka i trebalo bi da bude približno jednak σ za velike uzorke. Dakle, s^2 predstavlja procenu varijanse, dok s predstavlja procenu standardne devijacije raspodele izračunate iz slučajnog uzorka.

PRIMER

U nauci o životnoj sredini funkcije gustine verovatnoće koriste se za analizu i interpretaciju podataka o različitim ekološkim i atmosferskim fenomenima, slika 6.9. Ove funkcije opisuju verovatnoću da kontinualna slučajna varijabla uzme određenu vrednost ili se nađe unutar određenog opsega vrednosti. Često se koriste za modeliranje i predviđanje obrazaca u podacima, kao što su koncentracije zagađujućih materija, promene temperature ili određene fizičko-hemijske karakteristike padavina. U to spada procena verovatnoće i broja prelaska određenih graničnih vrednosti zagađenja, procena pojave ekstremnih događaja ili procena neophodne redukcije emisije zagađenja za dostizanje propisanih standarda što je neophodno za procenu rizika po zdravlje ljudi i izradu strategija za kontrolu zagađenja.

Slika 6.9. Primena funkcija gustine raspodela u identifikaciji porekla čestičnog zagađenja vazduha u Beogradu

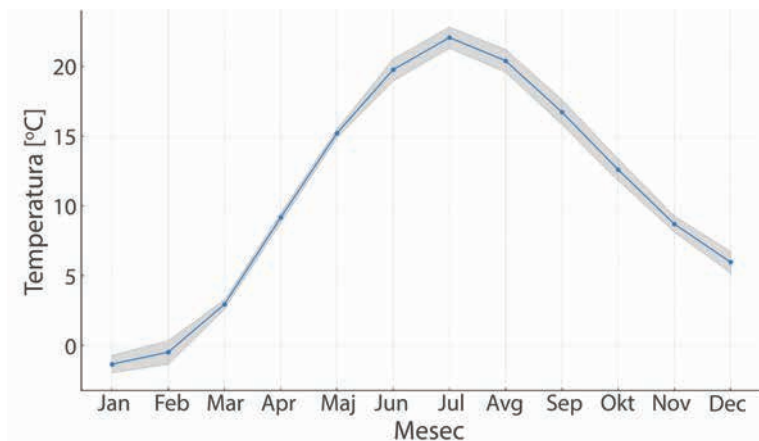


Različite vrednosti parametara funkcije gustine verovatnoće izračunate za svaku godinu odražavaju značajno različite stohastičke procese oko mernog mesta. Razlike u vrednostima parametra mogle bi biti povezane sa promenama u emisijama čestičnog zagađenja, pri čemu veće vrednosti parametra ukazuju na viši nivo emisije zagađujućih materija. Statistički testovi i informacioni kriterijumi¹⁵ ukazuju da Pirsonova 5 raspodela najbolje opisuje zagađenje koje uglavnom potiče od povećanih antropogenih emisija.

Interval poverenja

Granice poverenja za parametar raspodele daju opseg unutar koga se očekuje da će se njegova vrednost naći. Na primer, interval poverenja od 90% za srednju vrednost raspodele označava opseg unutar kojeg se očekuje da će se stvarna srednja vrednost populacije naći u 90% slučajeva ponovljenih uzorkovanja slučajne vrednosti iz raspodele. Dakle, interval poverenja predstavlja opseg unutar koga će se dati parametar naći sa unapred definisanom verovatnoćom. Koristeći primer temperature izmerene tokom desetogodišnjeg perioda, na slici 6.10 prikazan je interval poverenja srednje mesečne vrednosti ove varijable.

Slika 6.10. Srednja mesečna vrednost temperature sa intervalom poverenja 90%



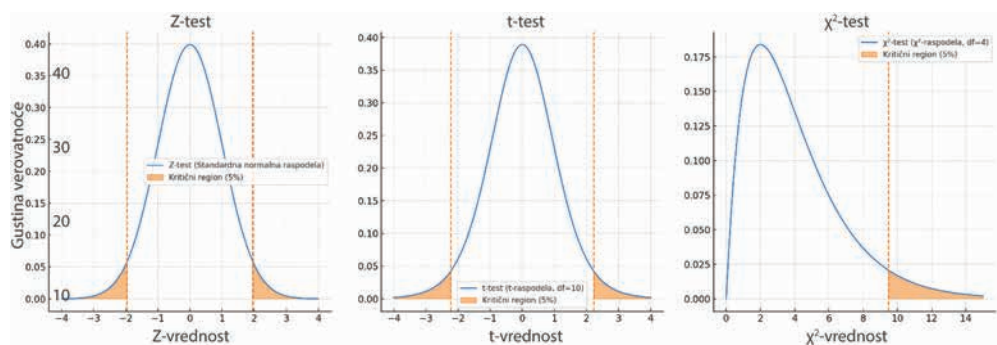
- 15 Informacioni kriterijumi u statistici su metričke metode koje se koriste za odabir najboljeg modela iz skupa kandidata, balansirajući između složenosti modela i njegove sposobnosti da adekvatno objasni podatke. Osnovni cilj ovih kriterijuma je da se izbegne prekomerno prilagođavanje modela podacima (overfitting) ili da se ne uzme u obzir dovoljno informacija (underfitting). Akaikeov informacioni kriterijum (AIC) zasniva se na maksimiziranju verovatnoće modela (verovatnoća da su opaženi podaci generisani određenim modelom) uz penalizaciju za složenost modela: $AIC = 2k - 2\ln(L)$, dok Bayesov informacioni kriterijum (BIC) koristi nešto drugačiju formulaciju: $BIC = k \ln(n) - 2\ln(L)$ pri čemu je k broj parametara u modelu, n veličina skupa podataka, a L verovatnoća modela.

Testovi značajnosti

Testovi značajnosti su jedan od najčešće korišćenih alata za procenu da li skup podataka može poticati od određene pretpostavke, poznate kao nulta hipoteza. Proces testiranja obuhvata nekoliko koraka. Naravno, prvo se definiše nulta hipoteza, obično kao izjava da neki parametar raspodele ima određenu vrednost. Zatim se odlučuje da li alternativa hipoteza, definisana suprotno od nulte, ukazuje na razliku. Sledeći korak je izbor odgovarajuće test statistike koja meri u kojoj meri podaci podržavaju nultu hipotezu. Nakon toga, određuje se raspodela test statistike pod pretpostavkom da je nulta hipoteza tačna i izračunava njena vrednost za posmatrane podatke. Verovatnoća dobijanja vrednosti (p-vrednost) jednako ekstremne ili ekstremnije od izračunate vrednosti test statistike se izračunava korišćenjem utvrđene raspodele, uzimajući u obzir alternativnu hipotezu. Dakle, p-vrednost predstavlja verovatnoću da se posmatrani rezultati dobiju slučajno, u slučaju da nema stvarnog efekta ili razlike. Standardni nivoi značajnosti koji se koriste su 0,05, 0,01 i 0,001, pri čemu se rezultati u različitim oblastima primene smatraju značajnim na nivou od 5, 1 ili 0,1%, respektivno. Na kraju, zaključuje se da postoji dokaz da nulta hipoteza nije tačna ako je p-vrednost dovoljno mala, odnosno da su posmatrani rezultati malo verovatni pod pretpostavkom nulte hipoteze i da postoji statistički značajna razlika ili efekat, što često vodi do odbacivanja nulte hipoteze. U suprotnom, zaključuje se da nema dovoljno dokaza protiv nulte hipoteze.

Primeri test statistika koje se često koriste uključuju z-test, t-test i χ^2 -test, slika 6.11. Z-test se koristi za testiranje hipoteza o srednjoj vrednosti populacije kada je poznata standardna devijacija populacije ili za testiranje proporcija u velikim uzorcima. T-test se koristi kada je standardna devijacija populacije nepoznata, a uzorak relativno mali. Postoji nekoliko varijacija ovog testa. Jednostrani t-test ispituje da li srednja vrednost uzorka značajno odstupa od poznate srednje vrednosti, dok dvostrani t-test upoređuje srednje vrednosti dva nezavisna uzorka kako bi se utvrdilo da li postoji značajna razlika između njih. χ^2 -test se koristi na primer za testiranje hipoteza o frekvencama u kategorijskim podacima, kao što su testovi nezavisnosti i testovi dobre usklađenosti.

Slika 6.11. Primeri test statistika: z-test prikazan za standardnu normalnu raspodelu, t-test za t-raspodelu sa nešto debljim krajevima u poređenju sa normalnom i χ^2 -test za nesimetričnu raspodelu pomerenu udesno. Osenčene oblasti predstavljaju kritične regione. Ukoliko se test statistika nađe u nekom od njih, nulta hipoteza se odbacuje.



Kvantili

Kvantili i kvartili predstavljaju statističke mere koje dele skup podataka na osnovu raspodele njihovih vrednosti. Kvantili predstavljaju vrednosti koje dele podatke na jednake, kontinuirane intervale. Na primer, procentni kvantili su vrsta kvantila koja deli podatke na 100 jednakih delova. Tako se može definisati deseti procentni kvantil kao vrednost ispod koje se nalazi 10% podataka. Kvartili su posebna vrsta kvantila koja deli skup podataka na četiri jednaka dela. Prvi kvartil (Q1) označava vrednost ispod koje se nalazi 25% podataka, drugi kvartil (Q2) je medijana i predstavlja vrednost ispod koje se nalazi 50% podataka, dok treći kvartil (Q3) označava vrednost ispod koje se nalazi 75% podataka.

PRIMER

Početak analize podataka obično prati deskriptivna statistika. Može biti korisna za površno sagledavanje varijabli i najjednostavnijih odnosa među njima. U tabeli 6.1 data deskriptivna statistika benzena, toluena, ksilena i etilbenzena izmerenih u Beogradu pre i tokom pandemije Kovid-19. Na primer, na osnovu promene srednje vrednosti može se zaključiti da je došlo da značajne redukcije koncentracije ovih jedinjenja. S jedne strane, koncentracije benzena su prepolovljene, dok su koncentracije ksilena i etilbenzena doživele nešto manji pad. Ako pogledamo promene maksimalne vrednosti ovih jedinjenja, možemo videti da su u periodu Kovida koncentracije ksilena i etilbenzena sporadično bile i veće u odnosu na prekovid period. Koji su razlozi ovakvih promena? Da li su i u kojoj

meri izmenjene aktivnosti ljudi usled pandemije doprinele ovoj promeni? Kakva je uloga meteoroloških prilika s obzirom na to da je uvođenje restrikcija dolazilo sa prelaskom u topliji deo godine kada su i emisije ovih zagađujućih materija niže? Kakva je i koliko uloga mera, poput policijskog časa ili obustave školske godine, koje je Vlada Republike Srbije sprovodila u cilju suzbijanja pandemije? Ovo su samo neka od veoma važnih pitanja čije odgovore ne treba tražiti u ovako jednostavnim opisu podataka. U nastavku ćemo naznačiti koncept pomoću koga je moguće doći do odgovora.

Tabela 6.1 Deskriptivna statistika benzena, toluena, ksilena i etilbenzena izmerenih u Beogradu pre i nekoliko meseci tokom pandemije Kovid-19

Varijabla	Jedinica	Prekovid/ Kovid period	Srednja vrednost	Standardna devijacija	Minimum	25% kvantil	50% kvantil	75% kvantil	Maksimum
Benzen	ppb		0,49/ 0,24	0,36/ 0,22	0,06/ 0,03	0,24/ 0,1	0,4/ 0,18	0,62/ 0,29	2,26/ 1,61
Toluen	ppb		0,27/ 0,16	0,44/ 0,31	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,1/ 0,03	0,25/ 0,13	2,85/ 3,62
Ksilen i etilbenzen	ppb		0,38/ 0,21	0,38/ 0,25	0,07/ 0,03	0,16/ 0,08	0,25/ 0,13	0,43/ 0,24	2,34/ 2,46

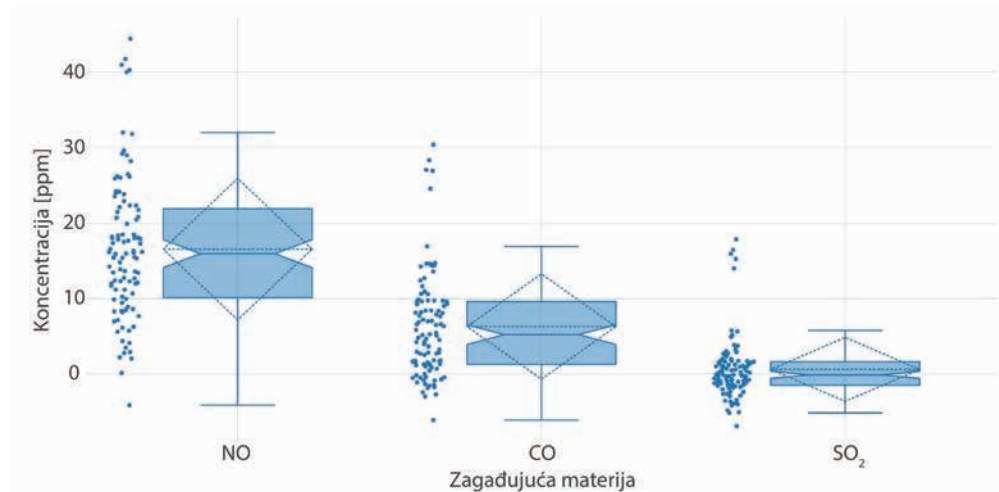
Box plot

Grafički prikaz, veoma koristan u prikazu osnovnih statističkih mera, pogotovo u poređenju dve ili većeg broja varijabli, predstavlja *box-plot* (*box-and-whiskers plot*), slika 6.12. Prikazuje statističke mere u sledećem redosledu odozdo nagore: minimum, donja granica, Q1, Q2, srednja vrednost, Q3, gornja granica i maksimum, a često sadrži i standardnu devijaciju (prikazana tačkastom linijom kao romb) i netipične vrednosti raspodele (prikazane kao tačke izvan opsega gornje i donje granice). Gornja (*upper fence*) i donja granica (*lower fence*) su termini koji se koriste za identifikaciju potencijalnih netipičnih vrednosti u skupu podataka. Definišu se kao:

$$\text{Gornja granica} = Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1)$$

$$\text{Donja granica} = Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1)$$

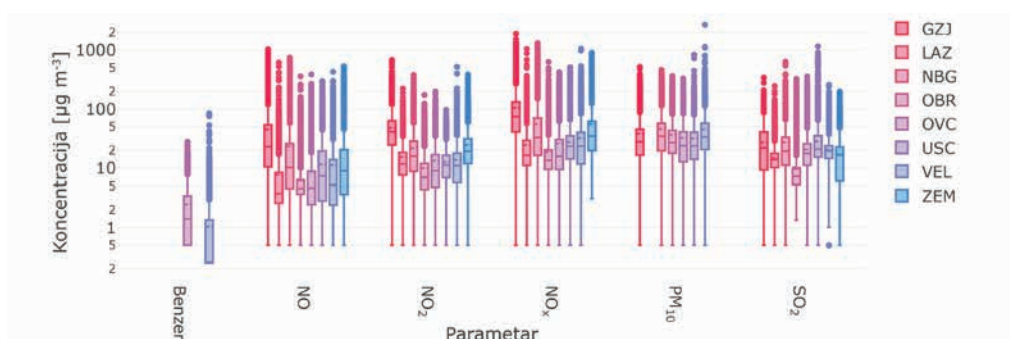
Slika 6.12. Primer prikaza *box plot*



PRIMER

Kao primer možemo uzeti raspodelu koncentracija zagađujućih materija u Beogradu izmerenih na većem broju mernih mesta u periodu od 2017. do 2019. godine, slika 6.13.

Slika 6.13. Deskriptivna statistika satnih koncentracija zagađujućih materija po mernim mestima u Beogradu za period od 2017. do 2019. godine



Sa slike se može videti da je najviša srednja vrednost koncentracije suspendovanih čestica zabeležena na mernom mestu u opštini Novi Beograd ($46 \mu\text{g m}^{-3}$), dok je najniža zabeležena na mernom mestu Ušće ($32 \mu\text{g m}^{-3}$). Najviše srednje vrednosti koncentracija azot monoksida, azot dioksida i ukupnih azotovih oksida tokom ovog perioda registrovane su na mernom mestu Gradski zavod za javno zdravlje Beograd ($45, 48$ i $105 \mu\text{g m}^{-3}$, respektivno). Azot monoksid se direktno emituje tokom sagorevanja fosilnih goriva i delimično oksiduje u azot dioksid u prizemnim slojevima atmosfere. Veza između ovih jedinjenja ukazuje na zajedničko poreklo i ulogu u fotohemijskim reakcijama koje stvaraju sekundarne organske zagađujuće materije. Najviša srednja vrednost koncentracija sumpor dioksida zabeležena je na mernim mestima Ušće i Gradski zavod za javno zdravlje Beograd (28 i $27 \mu\text{g m}^{-3}$), dok je najniža registrovana u Obrenovcu ($10 \mu\text{g m}^{-3}$). Benzen, kako je ranije naglašeno, je jedan od najvažnijih predstavnika lako isparljivih organskih jedinjenja zbog svojih izraženih toksičnih i kancerogenih svojstava. Izvori ovog jedinjenja dominantno su sagorevanje organske materije i upotreba u industriji. U Velikim Crljenima, srednja vrednost koncentracija ovog jedinjenja bila je relativno niska ($1,0 \mu\text{g m}^{-3}$), u Ovči nešto viša, ali svakako niža od $5 \mu\text{g m}^{-3}$, granične vrednosti propisane Uredbom o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha.

Violinski plot

Violinski plot je grafički prikaz koji se koristi za vizualizaciju raspodele skupa podataka i njihove varijabilnosti. Kombinuje elemente kao što je *box plot*, koji prikazuje najvažnije deskriptivne statistike poput medijane i kvartila, kao i procenu gustine verovatnoće kroz simetrične oblike slične violini, čija širina odražava gustinu podataka na datoj vrednosti.

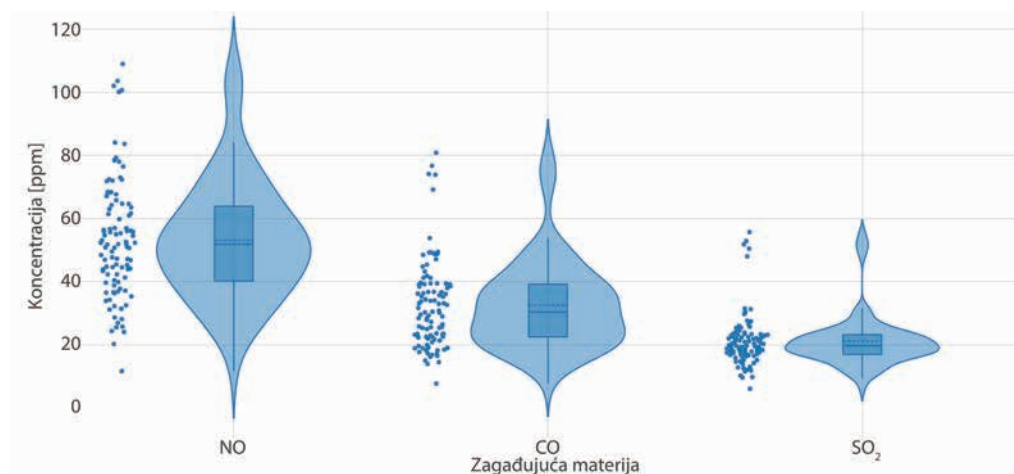
Za procenu gustine verovatnoće kontinualne slučajne varijable koristi se *kernel density plot* (KDE). Za razliku od histograma, koji deli podatke u diskretne binove, KDE računa kontinualnu raspodelu podataka koristeći kernel funkcije. Ove funkcije su simetrične, glatke krive, najčešće Gausove raspodele, koje se centriraju na svakoj tački podataka. Osnovni parametar KDE je širina pojasa (*bandwidth*), koja kontroliše glatkoću procene: manja širina otkriva više detalja u podacima, dok veća širina daje jednostavniju procenu raspodele. KDE je posebno koristan za vizualizaciju raspodele podataka bez gubitka informacija koje se mogu javiti kod binovanja, omogućavajući detaljnije razumevanje osnovnih obrazaca i potencijalne multimodalnosti ili asimetrije u raspodeli. Multimodalnost označava raspodelu koja ima više od jednog maksimuma ili moda, što ukazuje na prisustvo više grupa ili klastera unutar podataka. Na primer, bimodalna raspodela ima dva lokalna maksimuma, što sugerise da postoje dve

različite grupe, odnosno populacije u podacima. S druge strane, asimetrija se odnosi na neravnomernu raspodelu podataka oko centralne vrednosti. Ako raspodela ima dugi rep na jednoj strani, kaže se da je asimetrična. Raspodela sa dugim repom na desnoj strani je pozitivno asimetrična (*skewed right*), dok je raspodela sa dugim repom na levoj strani negativno asimetrična (*skewed left*). Razumevanje multimodalnosti i asimetrije u podacima je veoma važno za pravilnu analizu i interpretaciju statističkih rezultata.

PRIMER

Na slici 6.14 prikazane su gustine raspodela koncentracija zagađujućih materija u vidu violinskog plot. Na osnovu oblika raspodela vidi se da su najčešće izmerene vrednosti azot monoksida oko 50 ppm, ugljen monoksid nešto preko 20, odnosno blizu 40 ppm, dok su najčešće izmerene koncentracije sumpor dioksida oko 20 ppm. Činjenica da su za ugljen monoksid zabeležene dve oblasti grupisanja koncentracija, ukazuje na dva zasebna izvora ovog jedinjenja. Takođe, sve tri raspodele izmerenih vrednosti prati i pojava grupa ekstremnijih vrednosti koje su jasno izdvojene u opsezima najviših koncentracija svakog jedinjenja.

Slika 6.14. Primer violinskog plot



Korelaciona analiza

Korelaciona analiza je statistička metoda koja se koristi za ispitivanje i kvantifikaciju jačine i pravca veze između dve varijable. Numerička vrednost linearne veze između dve kvantitativne varijable X i Y naziva se kovarijansa i izračunava se kao prosečna vrednost proizvoda njihovih odstupanja od odgovarajućih srednjih vrednosti:

$$s_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Kovarijansa je veća kada postoji jača linearna veza između varijabli u smislu viših ili nižih vrednosti od srednjih vrednosti.

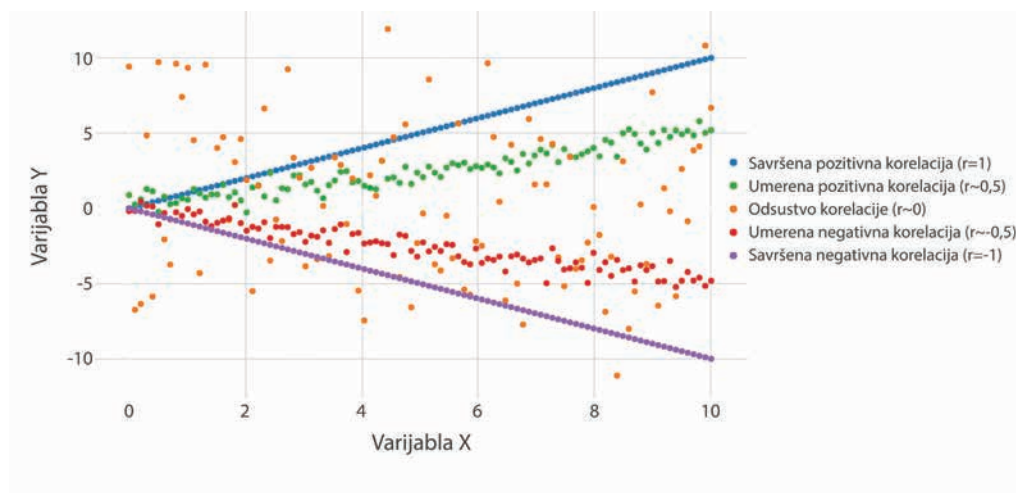
Ako se kovarijansa podeli standardnim devijacijama obe varijable (s_x i s_y), dobija se bezdimenziona mera linearne veze između varijabli koja se naziva Pirsonov koeficijent korelacije (r_{XY}):

$$r_{XY} = \frac{1}{ns_x s_y} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Ukoliko se izmerene vrednosti prikažu kao *scatter plot*, ako sve izmerene vrednosti leže na pravoj liniji oblika $Y=aX+b$, gde su a i b koeficijent pravca prave i odsečak na y -osi, postižu se granične vrednosti koeficijenta korelacije -1 ili 1, slika 6.15. Pozitivan koeficijent a ukazuje na pozitivnu linearnu vezu, gde visoke vrednosti jedne varijable odgovaraju visokim vrednostima druge. Nasuprot tome, negativan koeficijent pravca a ukazuje na negativnu linearnu vezu, gde visoke vrednosti jedne varijable odgovaraju niskim vrednostima druge.

Slika 6.15. Primeri korelacije podataka



Kada se govori o korelacionoj analizi, važno je napomenuti nekoliko stvari. Pre svega, koeficijent korelacije meri samo intenzitet i pravac linearne veze. Ako odnosi varijabli, prikazani na *scatter* plotu, na primer, pokazuju eksponencijalnu ili neku drugu nelinearnu vezu između varijabli, potrebne su posebne transformacije podataka, poput logaritmovanja ili korenovanja, pre primene korelacione analize. Takođe, nulti ili veoma nizak koeficijent korelacije znači odsustvo linearne povezanosti ili drugačiji tip veze, a ne nezavisnost varijabli.

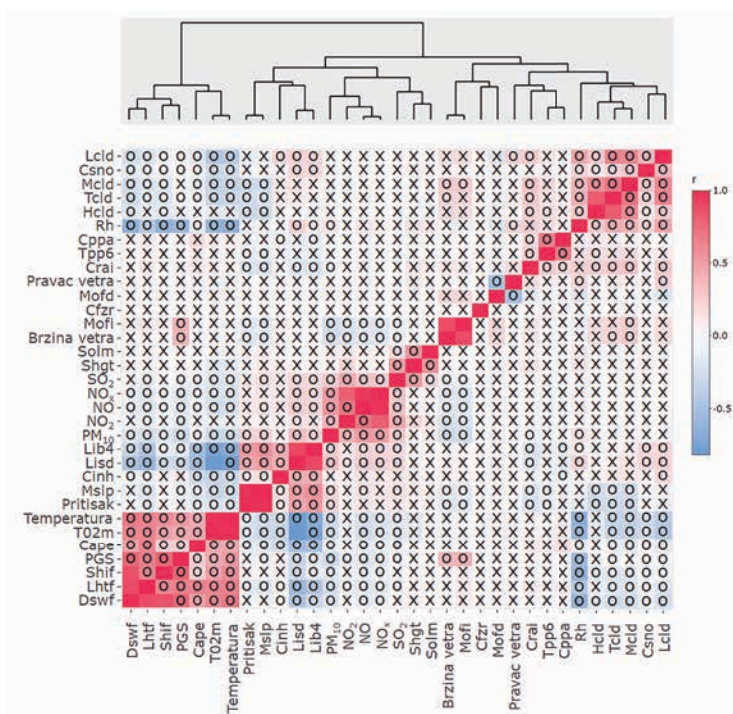
Zatim, koeficijent korelacije ukazuje samo na postojanje veze između dve varijable, ali ne i na kauzalnost, odnosno uzročno-posledičnu vezu. U nekim slučajevima postoje jasne naznake kauzalnosti, kao na primer povećanje koncentracije zagađujućih materija tokom noći zbog spuštavanja visine graničnog sloja mešanja. Međutim, u većini slučajeva se ne može izvesti takav zaključak čak i kada postoji jaka pozitivna ili negativna korelacija, jer dve varijable mogu biti povezane zbog zajedničke povezanosti sa trećom varijablom, a ne zbog fizičke veze između prve dve. Uzimajući isti primer, povećanje koncentracija zagađujućih materija iz saobraćaja tokom dana, kada dolazi do povećavanja visine graničnog sloja mešanja, ne znači kauzalnu vezu između ovih varijabli. Naprotiv, povećanje visine graničnog sloja mešanja korelira sa povećanjem intenziteta saobraćaja tokom dana koje dovode do povećanih emisija iz ovog izvora zagađenja. Na kraju, prisustvo netipičnih vrednosti može značajno uticati na koeficijent korelacije.

Pored Pirsonovog, postoje i drugi tipovi korelacionih koeficijenata. Na primer, Spirmanov korelacioni koeficijent (ρ) koristi se za merenje monotonih veza između dve varijable. Za razliku od Pirsonovog, Spirmanov koeficijent ne zahteva da veza između varijabli bude linearna i ne zavisi od raspodele podataka. On se računa na osnovu rangova podataka, a ne stvarnih numeričkih vrednosti. Takođe, Spirmanov koeficijent je manje osetljiv na netipične vrednosti i pogodan je za upotrebu kada je veza između varijabli nelinearna, ali monotona (tj. varijable se kreću u istom smeru, ali ne nužno linearno).

PRIMER

Korelaciona analiza može se upotopniti i drugim vrstama statističke analize poput hijerarhijske klasterizacije,¹⁶ kada linearne veze između parametara životne sredine postaju još uočljivije, slika 6.16. Kao primer možemo dati određivanje međusobne povezanosti zagađujućih materija u vazduhu sa meteorološkim parametrima izračunatim iz baze podataka GDAS (*global data assimilation system*). Visoke vrednosti Pirsonovog korelacionog koeficijenta u intervalu 0,89-0,97 ukazuju na povezanost koncentracija azotovih oksida NO i NO_x, dok korelacioni koeficijent između azotovih oksida NO_x i NO₂ ima nešto niže vrednosti od 0,81 do 0,90. Ne uočava se značajna linearna veza između koncentracija azotovih oksida i sumpor dioksida, azotovih oksida i PM₁₀, sumpor dioksida i PM₁₀ što upućuje na prisustvo različitih vrsta i intenziteta izvora ovih jedinjenja.

Slika 6.16. Korelacije parametara kvaliteta vazduha i meteoroloških parametara – primer mernog mesta Gradski zavod za javno zdravlje Beograd za period od 2017. do 2019. godine



16 Hijerarhijska klasterizacija je metoda grupisanja podataka u hijerarhijsku strukturu u kojoj su podaci predstavljeni kao niz ugnjeđenih klastera. Ova tehnika je posebno korisna kada je potrebno razumeti veze i strukturu podataka na različitim nivoima, jer omogućava vizuelizaciju klastera na različitim skalama.

Analiza varijanse

Postoji skup metoda analize varijanse koje se koriste u cilju ispitivanja razlika između grupa podataka ili uslova u eksperimentima ili istraživanjima. ANOVA je metoda za ispitivanje razlika u srednjim vrednostima između dve ili više grupa podataka. Koristi se u situacijama u kojima postoji jedna kontinualna zavisna varijabla i jedna ili više kategorijskih nezavisnih varijabli i daje procenu da li su razlike između grupa statistički značajne ili su rezultat slučajnih varijacija. Kao primer možemo uzeti analizu broja rođene dece na koncentraciju jednog organohlornog jedinjenja u mleku majke.

MANOVA (*multivariate analysis of variance*) predstavlja proširenje ANOVA koja se koristi u slučajevima kada postoji više zavisnih varijabli, što omogućava njihovu simultanu analizu kako bi se ispitalo da li postoje značajne razlike između grupa po kombinaciji zavisnih varijabli. Kao primer možemo uzeti analizu uticaja broja rođene dece i godina majke na više tipova organohlornih jedinjenja u mleku.

ANCOVA (*analysis of covariance*) predstavlja kombinaciju ANOVA i regresione analize za ispitivanje razlika između grupa dok kontroliše efekte jedne ili više varijabli (kontinualnih varijabli koje nisu glavni faktor interesovanja, ali mogu uticati na ishod). Metoda uklanjanja varijaciju u zavisnoj varijabli koja je uzrokovana drugim varijablama, čime se efekti nezavisnih varijabli mogu preciznije proceniti. Primer analize moglo bi biti ispitivanje uticaja broja rođene dece na koncentraciju organohlornih jedinjenja, uz kontrolu nad godinama majke.

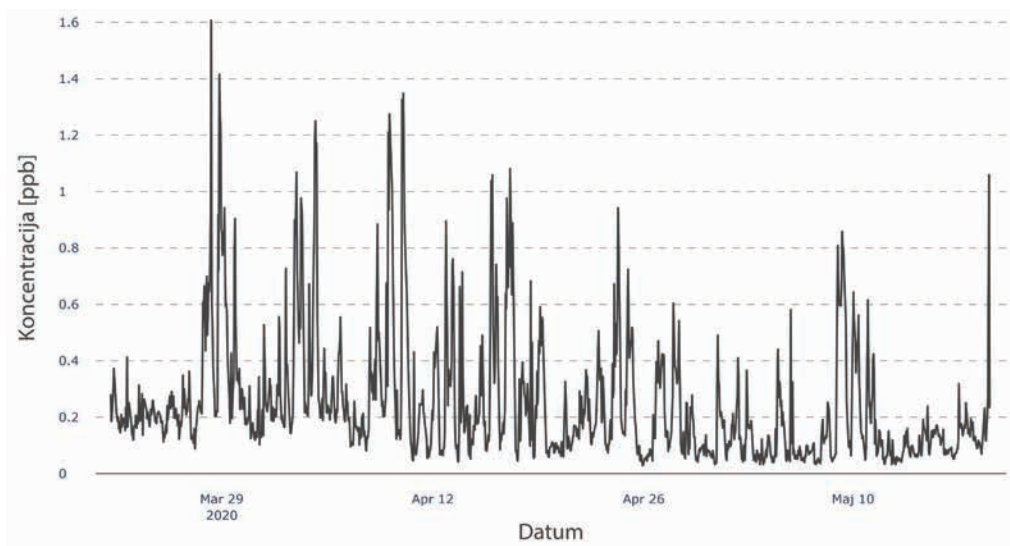
MANCOVA (*multivariate analysis of covariance*) predstavlja proširenje ANCOVA za slučajeve sa više zavisnih varijabli i jednom ili više varijabli. Metoda kontroliše efekte varijabli, procenjujući razlike između grupa za više zavisnih varijabli. Kao primer možemo uzeti analizu uticaja broja rođene dece na koncentraciju različitih organohlornih jedinjenja u mleku majki uz kontrolu godina majke.

Pored navedenih postoje i druge vrste metoda analize varijanse. U njih spadaju Kruskal-Wallis ANOVA, Fridmanova ANOVA, Repeated measures ANOVA i mešovita ANOVA.

6.7. STATISTIČKA ANALIZA VREMENSKIH SERIJA

Vremenska serija predstavlja niz podataka koji su prikupljeni ili zabeleženi u redosledu njihovog pojavljivanja u vremenu, dakle, podatke organizovane hronološki. Ove serije su ključne u analizi mnogih fenomena jer omogućavaju praćenje promena zabeleženih u podacima. Primer vremenske serije može biti niz dnevnih merenja temperature, koncentracija zagađujućih materija u vazduhu ili godišnjih nivoa reka, slika 6.17.

Slika 6.17. Primer vremenske serije satnih koncentracija benzena u Beogradu tokom perioda vanrednog stanja izazvanog pandemijom Kovid-19



Ono što je specifično za vremenske serije jeste to da vrednosti podataka zavise ne samo od drugih faktora reprezentovanih kroz varijable, već i od prethodnih vrednosti unutar same serije, čineći ih međusobno povezanim kroz vreme. Analiza vremenskih serija podrazumeva različite pristupa poput prepoznavanja obrazaca, sezonskih varijacija, dugoročnih trendova i cikličnih promena. Potpuno prirodno, neki od naprednih pristupa, naročito mašinsko učenje, mogu se koristiti i za prognozu budućih vrednosti na osnovu raspoloživih podataka iz prošlosti.

Varijacije vremenskih serija

Godišnje, sezonske, mesečne, nedeljne i dnevne varijacije parametara životne sredine, koje pored koncentracija zagađujućih materija uključuju i mnoge druge varijable koje su potrebne za kontekstualizaciju fenomena koji se istražuje, obezbeđuju naznaku potencijalnih faktora koji utiču na stanje životne sredine. Godišnje varijacije odražavaju dugoročne promene koje mogu biti povezane sa klimatskim uslovima, industrijskim aktivnostima i aktivnostima ljudi, ali i politikama zaštite životne sredine. Sezonske varijacije često prate promene u temperaturi, vlažnosti, količini padavina, generalno govoreći vremenskim uslovima, kao i specifične aktivnosti poput grejanja zimi ili smanjenih emisija tokom leta. Mesečne varijacije omogućavaju praćenje kratkoročnih fluktuacija koje se mogu pojaviti zbog specifičnih lokalnih događaja ili vremenskih prilika. Nedeljne varijacije su obično povezane sa promenama u aktivnostima ljudi tokom radnih dana i vikenda, što može uticati na nivo zagađenja, dok dnevne varijacije prate cikluse saobraćajnih špiceva, industrijskih aktivnosti, ali i Sunca u smislu fotohemijskih reakcija ili meteoroloških uslova, kao što su temperatura, vetar, vlažnost tla ili stabilnost atmosfere. Razumevanje ovih varijacija je važno za efikasno upravljanje kvalitetom životne sredine i za smanjenje uticaja zagađenja na zdravlje ljudi i ekosisteme.

Svaka od ovih varijacija izračunava se kao srednja vrednost za dati period. Pored srednje vrednosti najčešće se prikazuje i interval poverenja od 95%.

PRIMER

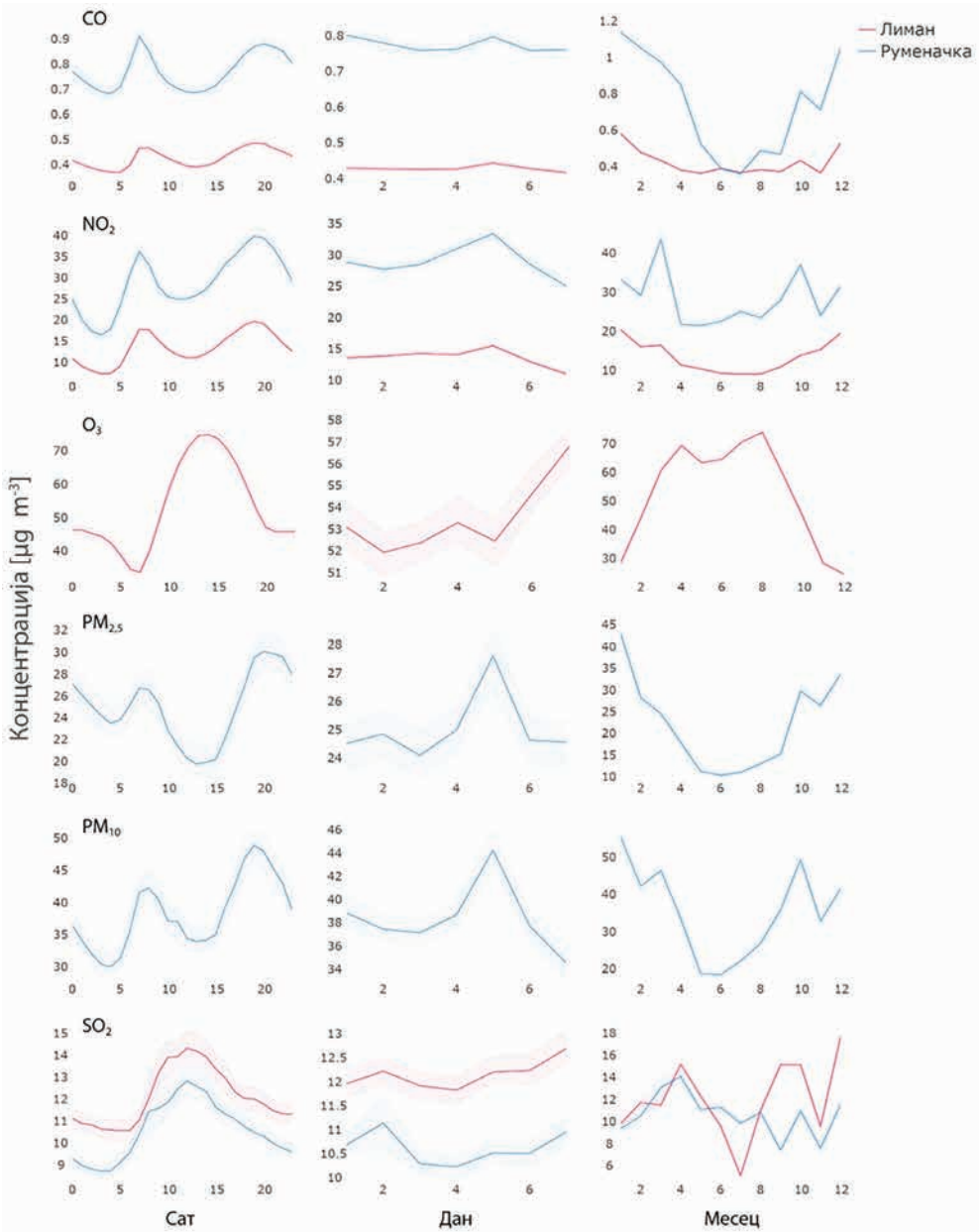
Analizirajmo dinamiku dnevnih, nedeljnih i mesečnih koncentracija zagađujućih materija u vazduhu u Novom Sadu u periodu od 2018. do 2020. godine, slika 6.18. Srednje mesečne koncentracije za većinu zagađujućih materija pokazuju izraženu sezonsku zavisnost, sa znatno nižim vrednostima tokom toplijeg dela godine i maksimalnim vrednostima u jesenjim i zimskim mesecima. Ova dinamika je rezultat meteoroloških uslova tokom jeseni i zime, koji podrazumevaju slabo strujanje vazduha i nizak granični sloj mešanja što pogoduje zadržavanju zagađujućih materija, kao i intenzivnijih emisija u hladnijem periodu godine.

Što se mesečnih varijacija tiče, maksimalne vrednosti suspendovanih čestica zabeležene su u januaru ($44,2 \mu\text{g m}^{-3}$ i $55,9 \mu\text{g m}^{-3}$), dok su minimalne srednje vrednosti zabeležene u junu (manje od $20 \mu\text{g m}^{-3}$ za obe frakcije). CO i NO₂ variraju na sličan način tokom sezona na oba merna mesta, s tim što su na lokaciji Liman zabeležene značajno niže koncentracije. Međutim, analiza srednjih mesečnih vrednosti ukazuje na različitu dinamiku na ovim lokacijama, verovatno zbog uticaja različitih izvora emisije. Tokom grejne sezone, na lokaciji Liman koncentracije SO₂ su značajno više, verovatno zbog korišćenja fosilnih goriva za potrebe grejanja. Na ove koncentracije mogu uticati i drugi faktori, poput blizine reke ili hemijskih transformacija u kojima SO₂ učestvuje. Srednje mesečne koncentracije ozona dostižu maksimum od aprila do avgusta, kada meteorološki uslovi pogoduju fotohemijskim reakcijama koje ga stvaraju kao sekundarnu zagađujuću materiju.

Analiza nedeljnih varijacija ukazuje na to da su koncentracije suspendovanih čestica, CO i NO₂ najviše petkom i opadaju tokom vikenda zbog smanjenih saobraćajnih i industrijskih aktivnosti. S druge strane O₃ i SO₂ imaju visoke vrednosti upravo tokom vikenda, što ukazuje na različite izvore emisije.

Dnevni ciklusi pokazuju da suspendovane čestice, CO i NO₂ imaju pikove u jutarnjim i popodnevrim satima, zbog intenzivnog saobraćaja i male visine graničnog sloja mešanja tokom večernjih sati, dok su minimalne vrednosti registrovane oko podneva usled smanjenja emisija iz saobraćaja i povećanja visine graničnog sloja. Tokom dana, fotohemijske reakcije pod dejstvom ultraljubičastog zračenja dovode do stvaranja ozona. Njegove koncentracije su najviše od 10 do 18 časova. S druge strane, SO₂ dostiže maksimalne koncentracije u jutarnjim i ranim popodnevrim satima, ali njegova uloga u fotohemijskim reakcijama je manja u poređenju sa azotnim oksidima.

Slika 6.18. Dinamika dnevnih, nedeljnih i mesečnih koncentracija zagađujućih materija u Novom Sadu u periodu od 2018. do 2020. godine



Ispitivanje periodičnosti

Lomb-Scargle metod je vrlo efikasan algoritam za detekciju periodičnosti, čak i one veoma slabo izražene u vremenskim serijama koje imaju ravnomerne ili neravnomerne intervale uzorkovanja. Ovaj metod je posebno pogodan za analizu zagađujućih materija i relevantnih parametara, gde su nepravilni intervali uzorkovanja česta pojava. Diskretan skup podataka (D) modelira se kao otežinjena suma sinusoida predstavljena matricom A pomoću frekvenci koje se progresivno određuju korišćenjem standardne linearne regresije ili metode najmanjih kvadrata.¹⁷ Ova tehnika omogućava precizno izdvajanje frekvencijskih komponenti, čak i u prisustvu šuma i nepravilnog uzorkovanja:

$$D = Ax$$

gde je broj sinusoida manji ili jednak broju podataka, dok se izbor frekvenci vrši na taj način da se skup ostataka minimizira.

Dakle, postupak se svodi na minimiziranje sume kvadratnih odstupanja koja aproksimira D , izračunavanjem odgovarajućeg težinskog vektora x :

$$x = (A^T A)^{-1} A^T D$$

Umesto direktne upotrebe skalarnog proizvoda podataka i sinusoida, prvo se izračunava fazni pomeraj, odnosno vreme τ koje osigurava ortogonalnost para sinusoida u trenutku uzorkovanja t_j . Ovo omogućava da sinusoidi budu međusobno nezavisni u trenutku uzorkovanja, što se može matematički opisati kao:

$$\tan 2\omega\tau = \frac{\sum_j \sin 2\omega\tau_j}{\sum_j \cos 2\omega\tau_j}$$

Zatim se izračunava periodogram na frekvenci ω :

$$P_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\left[\sum_j (X_j - \bar{X}) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_j (X_j - \bar{X}) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right)$$

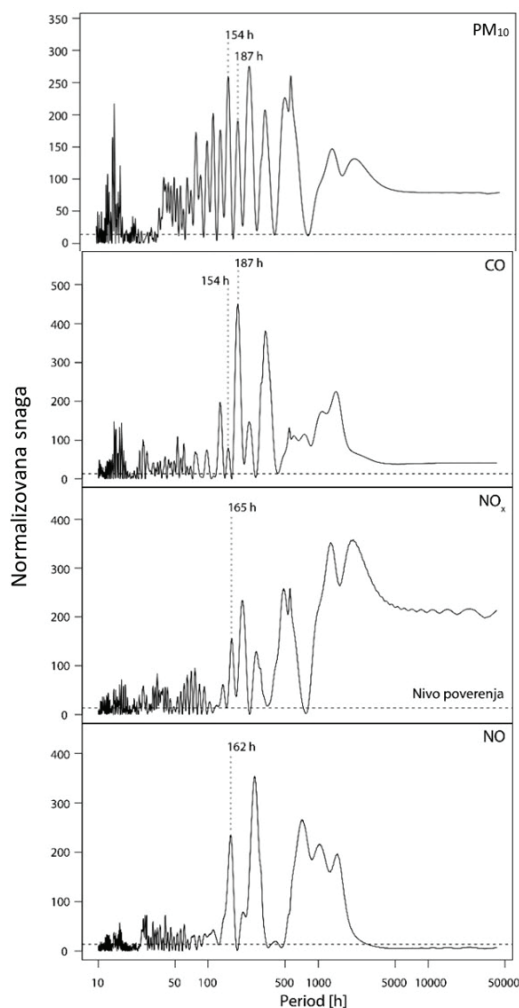
Imenilac ovog izraza, koji je u suštini jednak standardnoj varijansi, omogućava procenu statističkog značaja svakog pika na periodogramu. Maksimalna vrednost $P_x(\omega)$ javlja se za onu frekvencu za koju je suma kvadratnih odstupanja između posmatranih podataka i sinusoidnog modela minimalna.

¹⁷ O linearnoj regresiji i metodi najmanjih kvadrata biće reči u nastavku knjige.

PRIMER

Primer *Lomb-Scargle* periodograma dat je na slici 6.19. Analiza satnih vrednosti PM_{10} za period od 2011. do 2014. godine pokazuje izražene pikove na 6,4 i 7,8 dana, što odgovara sedmodnevnim ciklusima (vikend efekat), potvrđujući značajan doprinos saobraćaja. Ovu tezu podržava i izražena sedmodnevna periodičnost CO, NO_x i NO, veoma zastupljenih produkata izduvnih gasova motora sa unutrašnjim sagorevanjem.

Slika 6.19. *Lomb-Scargle* periodogram satnih koncentracija osnovnih zagađujućih materija godine u Beogradu u periodu od 2011. do 2014. godine



Analiza strukturnih osobina vremenskih serija

Zagađujuće materije koje se emituju iz različitih prirodnih i antropogenih izvora opstaju u životnoj sredini od nekoliko sati do nekoliko godina, u zavisnosti od lokalnih meteoroloških uslova, sklonosti jedinjenja ka hemijskim i fizičkim transformacijama, taloženju, spiranju i mnogih drugih faktora. Navedeni faktori značajno utiču na fluktuacije i dinamiku koncentracija zagađujućih materija tokom vremena, a samim tim i na zagađenje životne sredine. Za ispitivanje fluktuacija zagađujućih materija, odnosno njihovih vremenskih serija, dve važne karakteristike predstavljaju samosličnost i nepromenljivost. Ova strukturna svojstva vremenskih serija zagađujućih materija mogu se koristiti za procenu njihove trenutne dinamike, ali i za predviđanje budućih obrazaca korišćenjem fraktalne i multifraktalne analize. Ove analize se temelje na pretpostavci da pojave i dinamičko ponašanje sistema poseduju osobinu samosličnosti (*self-similarity*), što znači da obrasci sistema na jednoj skali, liče na one na drugim skalama.

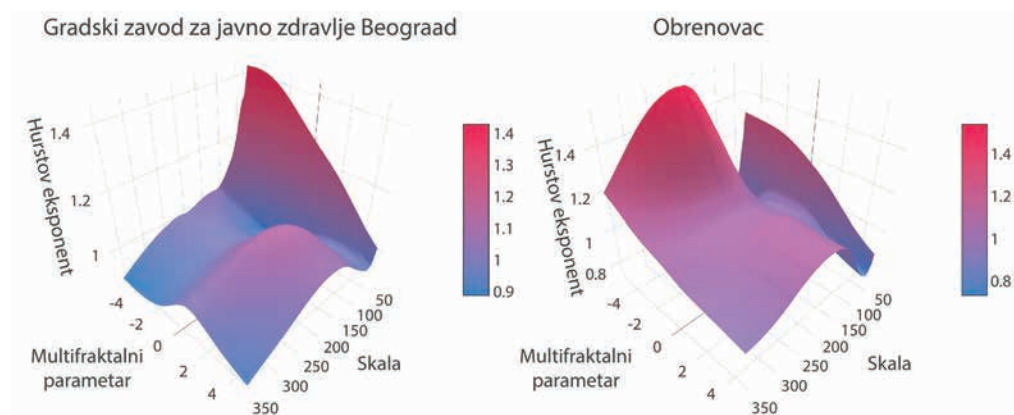
Za opisivanje samosličnosti fraktalnih karakteristika vremenskih serija zagađujućih materija koristi se Hurstov eksponent (*Hurst exponent* – H). Ukoliko je $H < 0,5$, postoji negativna korelacija između intervala u vremenskoj seriji. To znači da će promena koja se dešava u narednom trenutku imati suprotan karakter u odnosu na prethodnu, a sistem imati tendenciju oscilovanja. Proces sa $H = 0,5$ su slučajni i slični Braunovom kretanju, bez ikakve korelacije između inkrementalnih pomeraja u vremenskoj seriji. Kada je $0,5 < H < 1,5$, postoji pozitivna korelacija između inkrementalnih pomeraja, što znači da će promene u narednom trenutku pokazivati slične tendencije kao prethodne, a vremenska serija poseduje svojstva samosličnosti. Ova osobina je izraženija što je vrednost H bliža 1. Kada je $H > 1,5$, vremensku seriju karakterišu neusklađeni i nekorelirani intervali.

Osim Hurstovog eksponenta, za procenu fraktalnih svojstava može se koristiti multifraktalni parametar, koji može imati i negativne i pozitivne vrednosti. Veće vrednosti ovog parametra ukazuju na veći stepen fluktuacija, dok odsustvo fluktuacija dovodi do vrednosti multifraktalnog parametra od 0, što predstavlja monofraktalno ponašanje.

PRIMER

Kao primer multifraktalne analize, možemo navesti karakterizaciju vremenskih serija koncentracija PM_{10} u Beogradu, slika 6.20. Na mernom mestu Gradski zavod za javno zdravlje Beograd, vrednosti Hurstovog indeksa varirale su u rasponu od 0,93 do 1,43. Najveće varijacije i maksimalne vrednosti indeksa H (1,30 do 1,43) nalaze se u domenu niskih fluktuacija (vrednost multifraktalnog parametra od -5 do 0) i na kratkim vremenskim skalama do 45 sati. Fluktuacije koncentracija PM_{10} na ovim malim skalama uglavnom zavise od intenziteta lokalnih emisija, kao i od meteoroloških uslova koji utiču na procese kondenzacije i nukleacije suspendovanih čestica, kao i na fizičko-hemijske transformacije gasova i formiranje sekundarnih aerosola.

Slika 6.20. Strukturne karakteristike vremenske serije koncentracija PM_{10} na mernim mestima Gradskog zavoda za javno zdravlje Beograd i Obrenovac za period od 2017. do 2019. godine



Nakon dostizanja zabeleženih maksimuma, vrednosti Hurstovog indeksa naglo opadaju do vrednosti 1 u oblastima malih i velikih fluktuacija, kao i na vremenskim skalama do 120 sati. Ovo ukazuje na stabilnu fraktalnu strukturu vremenskih serija PM_{10} sa dugotrajnim korelacijama, odnosno postojanje „dugotrajne memorije” u dinamici zagađujućih materija. Ovaj obrazac se uglavnom nastavlja i na vremenskim skalama od 150 do 350 sati, uz epizode izraženih fluktuacija (multifraktalni parametar od -0,5 do 1,8) između 130 i 245 sati, pri čemu vrednosti Hurstovog indeksa ostaju ispod 1,13.

Varijabilnost koncentracija PM_{10} , okarakterisana vrednostima Hurstovog indeksa od 0,73 do 1,54 i multifraktalnim parametrima od -5 do 5, prikazana je na mernom mestu Obrenovac na istoj slici desno. U oblasti manjih fluktuacija (multifraktalni parametar oko -5), izdvajaju se dva značajna pika: jedan sa $H > 1,5$ između 165 i 240 sati, i drugi sa $H = 1,3$ na vremenskoj skali do 30 sati. Vremenske serije sa Hurstovim indeksom većim od 1,5 karakterišu neusklađeni i nekorelirani intervali, što sugerise povremena intenziviranja emisija u regionima sa dominantnim industrijskim aktivnostima ili uticaje udaljenih izvora zagađenja uz povoljne smerove i veće brzine vetra. Na lokaciji Obrenovac, dominantni uticaji mogu se pripisati emisijama iz termoelektrane „Nikola Tesla“, kao i građevinskim radovima na autoputu A2 u posmatranom periodu. Nakon dostignutih maksimuma, uočavaju se nagli padovi u vrednostima Hurstovog indeksa u domenima manjih i većih fluktuacija na vremenskim skalama do 350 sati (H do 1,03) i 75 sati (H do 0,72), respektivno. Ovi rezultati ukazuju na smanjenje varijabilnosti vremenskih serija suspendovanih čestica kada uticaj faktora životne sredine opada, kao i na postojanje pozitivne korelacije između vremenskih intervala sa sličnim dinamičkim karakteristikama.

Dekompozicija vremenskih serija

Dekompozicija vremenskih serija je tehnika koja se koristi za razdvajanje vremenskih serija na njihove osnovne komponente kako bi se bolje razumele strukture i obrasci unutar podataka. Ova metoda tipično deli vremensku seriju na tri glavne komponente: trend, sezonsku i slučajnu (rezidualnu) komponentu. Trend pokazuje dugoročne promene ili obrasce u podacima, sezonska komponenta predstavlja periodične fluktuacije koje se ponavljaju u određenim intervalima (na primer, mesečno ili kvartalno), dok slučajna komponenta obuhvata varijacije koje se ne mogu objasniti trendom ili sezonskim efektima. Dekompozicija vremenskih serija omogućava da se izolacijom ovih komponenti bolje razumeju osnovni pokretači u sistemu koji se analizira, kao i da se preciznije predvide buduće vrednosti.

Najčešće korišćene statističke metode za dekompoziciju vremenskih serija uključuju pokretni prosek (*moving average*) i eksponencijalno izravnavanje (*exponential smoothing*), koje omogućavaju precizno razdvajanje trendova i sezonskih komponenti u podacima. Pored njih, Furierova analiza predstavlja nešto napredniju tehniku, naročito efikasnu za identifikaciju i analizu periodičnih obrazaca u vremenskim serijama.

Pokretni prosek izračunava se kao prosečna vrednost skupa podataka u okviru određenog vremenskog prozora, koji se pomera kroz vremensku seriju podataka. Na primer, u jednostavnom pokretnom proseku, svaka nova tačka u vremenskoj seriji se izračunava kao srednja vrednost poslednjih n vrednosti. Za vremensku seriju $x_1, x_2, \dots, x_n$, pokretni prosek za prozor veličine k na tački t definisan je kao:

$$MA_t = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k+1}^t x_i$$

gde je MA_t pokretni prosek na tački t , x_i vrednosti varijable i k veličina prozora.

Eksponencijalno izravnavanje koristi otežinjani prosek prethodnih podataka iz vremenske serije kako bi se izračunala predikcija budućih vrednosti. Osnovna karakteristika ove metode je da novi podaci dobijaju veći značaj – težinu, dok težina prethodnih podataka eksponencijalno opada kako sa udaljavanjem u prošlost. Ovaj pristup omogućava brzo prilagođavanje modela na promene u podacima, što ga čini efikasnim za predviđanje u slučajevima kada se trendovi i obrasci često menjaju. Može se definisati kao:

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) S_{t-1}$$

gde je S_t uglačana (smooth) vrednost u trenutku t , x_t stvarna vrednost vremenske serije u trenutku t , α koeficijent izravnavanja ($0 < \alpha \leq 1$), a S_{t-1} uglačana vrednost u trenutku $t-1$. Metoda se može proširiti na dvostruko eksponencijalno izravnavanje za vremenske serije u kojima je zastupljena komponenta trenda i trostruko eksponencijalno izravnavanje (*Holt-Winters* metoda) za serije kod kojih su zastupljene komponenta trenda i sezonska komponenta.

Furijev pristup u dekompoziciji vremenskih serija podrazumeva razlaganje vremenske serije na njene osnovne sinusoidne komponente. Pristup se zasniva na Furijeovoj transformaciji, koja vremensku seriju transformiše iz vremenskog domena u frekventni domen. Na taj način dolazi do identifikacije različitih frekvencijskih komponenti koje čine vremensku seriju. Ovaj pristup omogućava da se složena, potencijalno šumovita vremenska serija predstavi kao zbir sinusoidnih funkcija, od kojih svaka ima određenu amplitudu, frekvencu i fazu. Nalaženje ovih karakteristika je posebno korisno za identifikaciju i analizu periodičnih obrazaca ili ciklusa unutar podataka, kao što su sezonski efekti, dnevni obrasci ili bilo koji ponavljajući trendovi.

Diskretna Furijeova transformacija je definisana za vremensku seriju sa N podataka kao:

$$X(f) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) e^{-i2\pi f t}$$

gde je $X(f)$ Furijeova transformacija vremenske serije na frekvenci f , $x(t)$ vrednost iz vremenske serije u trenutku t , a $e^{-i2\pi ft}$ kompleksna eksponencijalna funkcija koja razlaže seriju na njene sinusoidne komponente.

Pored statističkog pristupa, u kontekstu mašinskog učenja, rekurentne neuronske mreže (RNN), a posebno LSTM (*long short-term memory*) postaju sve popularnije zbog svoje sposobnosti da detektuju i nauče sofisticirane, složene i nelinearne obrasce u vremenskim serijama, uključujući i dugoročne zavisnosti. Ovi pristupi su posebno korisni za rad sa velikim skupovima podataka ili sa podacima koji poseduju složene sezonske komponente ili složen trend, koje je teško modelirati pomoću tradicionalnih statističkih pristupa. Detalji u vezi sa neuronskim mrežama prevazilaze okvir ove knjige.

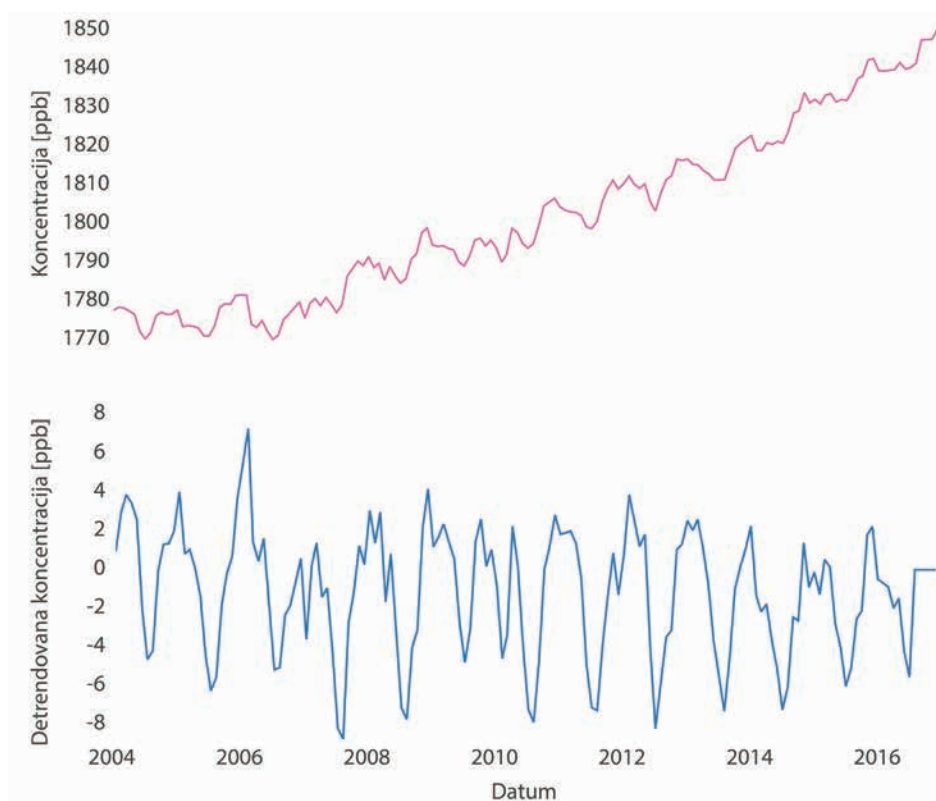
Desezonalizacija je statistički proces koji se koristi za uklanjanje efekata sezonskih obrazaca iz vremenskih serija. Sezonski obrasci su redovne, predvidljive promene koje se ponavljaju tokom određenih perioda, kao što su dani, nedelje, meseci ili kvartali, često zbog klimatskih uslova, aktivnosti ljudi ili drugih cikličnih faktora. Desezonalizacija pomaže u identifikaciji osnovnih trendova i obrazaca koji su skriveni sezonskim fluktuacijama.

Desezonalizovane koncentracije su koncentracije zagađujućih materija iz kojih su uklonjeni sezonski efekti. Njihova analiza omogućava jasniji uvid u dugoročne promene i uticaje koji nisu vezani za sezonske varijacije. Na primer, u analizi kvaliteta vazduha, sezonski efekti poput grejanja zimi ili povećanja intenziteta saobraćaja u određenim mesecima mogu prikriti stvarne promene u osnovnim koncentracijama zagađujućih materija. Desezonalizacijom podataka, mogu se preciznije analizirati trendovi zagađenja i doneti utemeljenije odluke o upravljanju kvalitetom vazduha.

PRIMER

Na slici 6.21 prikazane su vremenska serija koncentracija i detrendovanih koncentracija metana [ppb]. Kao što se može videti, izbacivanje komponente trenda iz izmerenih koncentracija metodom pokretnog proseka omogućava detaljniju analizu fluktuacija koncentracija na nivou godišnjih doba. Izuzev nekoliko odstupanja, fluktuacija metana je praktično konstantna i iznosi oko 5 ppb.

Slika 6.21. Vremenska serija koncentracija (gore) i detrendovanih koncentracija (dole) metana [ppb]



Analiza trenda

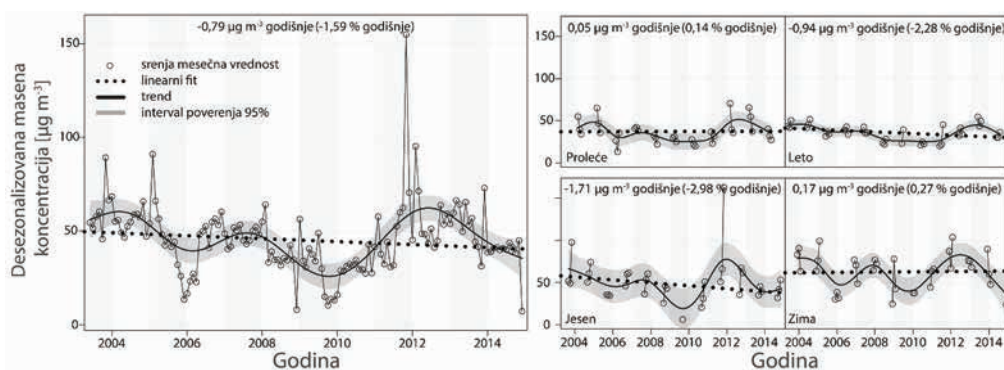
Utvrđivanje trenda koncentracija zagađujućih materija predstavlja jedan od važnih zadataka u analizi zagađenja životne sredine. Dobijeni podaci mogu pružiti osnovni uvid u promene koncentracija u dužim vremenskim intervalima.

Od mnogo metoda koje se mogu iskoristiti za ovu svrhu, može se spomenuti *Theil-Sen*. *Theil-Sen* je statistička metoda bazirana na izračunavanju medijane nagiba svih mogućih parova tačaka u skupu podataka. Daje precizan nivo poverenja bez obzira na tip raspodele, čak i u prisustvu netipičnih vrednosti. Ovaj pristup osigurava da krajnje vrednosti u podacima imaju minimalan uticaj na konačni rezultat, što povećava tačnost procene trenda.

PRIMER

Kao primer primene analize trenda, može se navesti da je na osnovu desezonalizovanih masenih koncentracija PM_{10} utvrđen globalni trend opadanja koncentracija od približno $0,8 \mu g m^{-3}$ godišnje (1,6% godišnje) u periodu od 2004. do 2014. godine. Ovaj pad je uglavnom uzrokovan smanjenjem koncentracija tokom jeseni (3,0% godišnje) i leta (2,3% godišnje) (slika 6.22). Na koncentracije PM_{10} dominantno utiču velike varijacije tokom jeseni i zime, ali je prisutan i relativno stabilan opadajući trend tokom leta (2,3%), čije uzroke nije jednostavno utvrditi.

Slika 6.22. Trend masenih koncentracija PM_{10} sa procenom stope promene za period od 2003. do 2014. godine primenom metode *Theil-Sen*



Nažalost, ako se sagleda kasniji period na široj teritoriji Beograda (2017-2019. godina), na mernim mestima Ušće, Obrenovac i Gradski zavod za javno zdravlje Beograd, zabeležen je rast koncentracija PM_{10} , sa godišnjim povećanjem u rasponu do 42%.

6.8. STATISTIČKA KARAKTERIZACIJA IZVORA ZAGAĐENJA

6.8.1. Karakterizacija dominantnih izvora zagađenja

Identifikacija izvora emisije predstavlja jedan od ključnih koraka u razumevanju porekla i intenziteta zagađenja vazduha. Nakon utvrđivanja izvora (uključujući njihov broj, tip, sastav, doprinos, dinamiku ili prostornu raspodelu), moguće je pristupiti formiranju standarda i zakonskih regulativa koje će kontrolisati nivo emisija, poboljšati kvalitet životne sredine i smanjiti uticaj značajnih zagađivača.

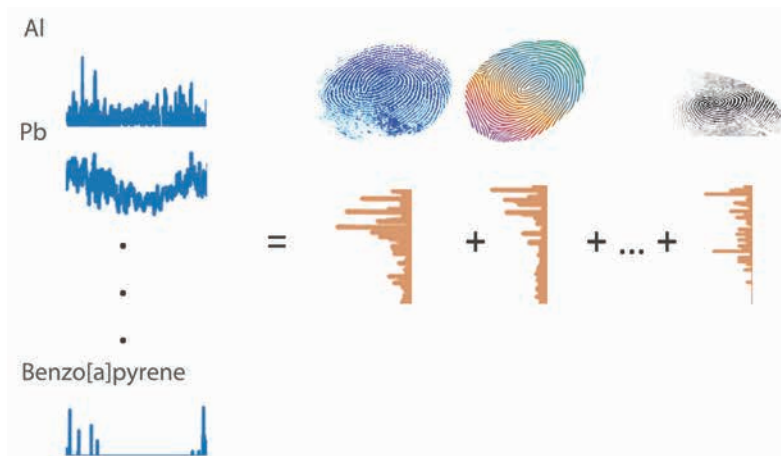
U zavisnosti od medijuma životne sredine, veza između izvora emisije i izmerenih koncentracija zagađujućih materija može se ustanoviti primenom različitih disperzionih i receptorskih modela. Glavni problem u primeni disperzionih modela u analizi kvaliteta vazduha je nepoznavanje svih izvora sa značajnim uticajem na merno mesto, kao i nedostatak adekvatne baze podataka o intenzitetu emisije. S druge strane, receptorski modeli zahtevaju različite nivoe informacija o izvorima, od potpunih informacija (*chemical mass balance* – CMB) do delimičnih informacija sa poznavanjem karakterističnih indikatora ili trasera (*principal component analysis* – PCA, *Unmix*, *positive matrix factorization* – PMF).

Receptorski modeli rešavaju problem linearne smeše nereaktivnih hemijskih vrsta na osnovu zakona očuvanja mase. Za izmerene koncentracije m vrsta u n uzoraka na mestu receptora, zakon očuvanja mase može se izraziti formulom:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^N a_{ik} s_{kj}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n$$

gde je C_{ij} koncentracija i -te vrste u uzorku j , a_{ik} udeo i -te vrste u sastavu izvora k , S_{kj} ukupna masa iz izvora k u uzorku j , a N ukupni broj izvora. Iako jedinstveno rešenje ove jednačine ne postoji, čak i uz ograničenja da negativan sastav ili doprinos izvora nisu mogući, postoje metode za procenu najverovatnijeg broja izvora, njihovog sastava i doprinosa ukupnoj smeši, slika 6.23.

Slika 6.23. Koncept receptorskog modeliranja



Unmix

Za razliku od drugih modela, Unmix ne zahteva prethodno znanje o profilima izvora. Umesto toga, identifikuje broj izvora, njihov hemijski sastav i njihove doprinose analizom same strukture koncentracija zagađujućih materija. Kao i kod drugih receptorskih modela, Unmix pretpostavlja da su izmerene koncentracije zagađujućih materija linearne kombinacije profila izvora i njihovih doprinosa.

Svako merenje koncentracija može se predstaviti tačkom u m -dimenzionom prostoru, gde su koordinate određene koncentracijama hemijskih vrsta. Ako postoji N izvora, prostor podataka može se redukovati na $N-1$ dimenzija, pod pretpostavkom da za svaki izvor postoji tačka (ivična tačka) gde je njegov doprinos minimalan u poređenju sa ostalim izvorima. Fitovanjem hiperpovrši kroz ove tačke dobija se skup podataka u kojima određeni izvor nije zastupljen. Kada postoji N izvora, $N-1$ hiperpovrši se seku u tački koja predstavlja sastav tog izvora. Da bi se smanjila dimenzionalnost podataka i olakšala identifikacija izvora, Unmix vrši redukciju matrice koncentracija $C_{n \times m}$ primenom singularne dekompozicije matrice:

$$C = UDV^T$$

gde je $D_{n \times m}$ nenegativna dijagonalna matrica sa singularnim vrednostima, a $U_{n \times n}$ i $V_{m \times m}$ ortogonalne matrice.

Za određivanje broja faktora koji predstavljaju izvore emisije zagađujućih materija, Unmix koristi algoritam NUMFACT koji je baziran na analizi svojstvenih vrednosti i svojstvenih vektora matrice podataka. Kako bi procenio broj značajnih izvora koji doprinose izmerenim koncentracijama, svojstveni vektori sa visokim odnosom signal-šum (većim od 2) se zadržavaju, što pruža pouzdanu procenu broja izvora i njihovih doprinosa.

PRIMER

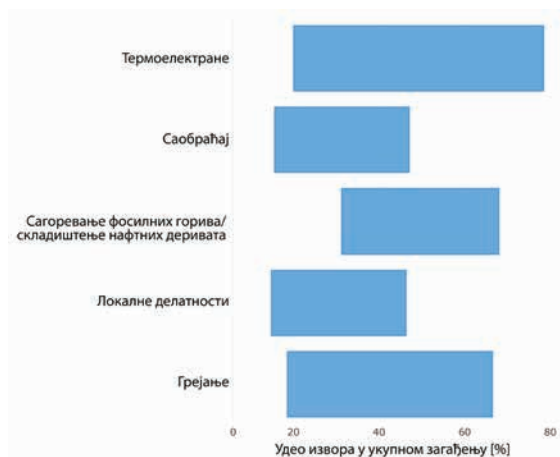
Primer identifikacije izvora za jedno merno mesto u Beogradu na kome se mere dnevne koncentracije NO_2 , As, Cd, Ni, Pb, benzo[a]piren i benzen analizirano za potrebe Plana kvaliteta vazduha u aglomeraciji Beograd dat je u tabeli 6.2. Identifikacija izvora emisije vrši se analizom procentualne zastupljenosti jedinjenja u odgovarajućem faktoru. Kao što se može videti, na tom mernom mestu dominiraju emisije iz lokalnih delatnosti (31,6% udela u ukupnim emisijama), grejanja (28,2%) i saobraćaja (26,2%), dok su emisije iz sagorevanja uglja slabije zastupljene (14%).

Tabela 6.2. Profili dominantnih izvora [%] emisije na mernom mestu KBC „Dr Dragiša Mišović“ u Beogradu u periodu od 2017. do 2019. godine

<i>Zagađujuća materija</i>	<i>Sagorevanje uglja</i>	<i>Grejanje</i>	<i>Lokalne delatnost</i>	<i>Saobraćaj</i>	<i>r²</i>
<i>NO₂</i>	7,8	3,2	12,0	77,0	0,49
<i>As</i>	0,8	42,4	32,8	24,0	0,75
<i>Cd</i>	0,4	9,0	68,4	22,2	0,63
<i>Ni</i>	86,0	0	4,4	9,6	0,96
<i>Pb</i>	0	10,0	90,0	0	0,86
<i>B[a]P</i>	0	100	0	0	0,99
<i>Benzen</i>	2,8	32,5	13,9	50,8	0,56
<i>Srednji doprinos [%]</i>	14,0	28,2	31,6	26,2	

Saznanje o izvorima emisije se može i proširiti, donekle i generalizovati. Ukoliko je na raspolaganju veći broj mernih mesta, kao na primer u Beogradu, za svako merno mesto moguće je uraditi ovu vrstu analize i dati raspone uticaja izvora emisije, slika 6.24. Tako se pokazuje da u nekim delovima grada postoji značajan uticaj izvora povezanih sa emisijama iz sagorevanja uglja i drugih energenata za grejanje, gde učešće ovog tipa emisije varira od 17% do 64%. Saobraćajne aktivnosti, koje u urbanom okruženju prati i resuspenzija čestica sa saobraćajnica, imaju udeo od 13% do 42%. Lokalni izvori emisije, koji mogu biti povezani sa malom privredom ili spaljivanjem otpada u blizini mernih mesta, imaju udeo od 12% do 42%. Sagorevanje fosilnih goriva uz skladištenje naftnih derivata, što se takođe može povezati sa saobraćajnim aktivnostima, ima najveće učešće od 49%, dok je u Zemunu, na mernom mestu Tošin bunar, učešće nešto manje sa 34%. Uticaj intenzivnih emisija iz termoelektričnih postrojenja identifikovan je sa udelom od 19% do 78% u ukupnim emisijama u Beogradu.

Slika 6.24. Opsezi učešća dominantnih izvora zagađenja vazduha u Beogradu u periodu od 2017. do 2019. godine na mernim mestima na kojima su evidentirani



S druge strane, receptorske modele moguće je primeniti i na druge medijume životne sredine. U istraživanju odnosa polihlorovanih bifenila i organohlorinih jedinjenja u majčinom mleku, Unmix je diferencirao četiri grupe uzoraka mleka, sa visokim koeficijentima determinacije ($> 0,90$) i korelacije ($> 0,90$), tabela 6.3. Prvu i drugu grupu karakteriše najviši doprinos β -HCH (78%) i HCB (67%), odnosno γ -HCH (73%), koji uglavnom nastaju kao nusproizvodi lindana.

Najveći ukupni udeo (oko 30%) dodeljen je trećoj i četvrtoj grupi. Treća grupa uzoraka uključuje teže hekso- do heptahlorirane kongenere kao što su: PCB-180 (83%), PCB-170 (81%), PCB-156 (59%), PCB-153 (54%) i PCB-138 (53%), koji imaju duže vreme poluživota u odnosu na lakše, zbog čega je njihov doprinos ovoj grupi umeren. Četvrta grupa prepoznata je kao metabolički put p,p'-DDT, s najvišim udelima p,p'-DDD (93%), p,p'-DDE (53%) i delimično uključuje lakše tetra- do pentahlorirane kongenere PCB-a (oko 46%).

Tabela 6.3. Profili grupa uzoraka majčinog mleka (Grupe 1-4)

Jedinjenje	Grupa 1	Grupa 2	Grupa 3	Grupa 4	Sr.vr	Greška	Nagib	Odsečak	r ²	Izuzetak
<i>α</i> -HCH	10.1	36.1	39.8	14.1	0	0	0.97	0.01	0.95	1
<i>β</i> -HCH	79.6	0	0	20.4	0	0.19	0.97	0.02	0.96	1
<i>γ</i> -HCH	11.7	72.9	13.6	0	0	0.47	1	0	0.98	0
HCB	67.5	23.4	8.1	1	-0.01	0.23	0.99	0.02	0.97	0
p,p'-DDE	13.3	33	53.3	0	1.68	7.57	1.24	-4.88	0.72	1
p,p'-DDD	0	0	6.4	93.6	0.01	0.09	0.65	0.09	0.52	1
PCB – 138	0	0	52.9	9.7	0.42	1.29	0.86	0.89	0.98	0
PCB – 153	7.4	5	53.8	33.7	0.03	1.7	1	-0.07	0.94	1
PCB – 180	4.4	1.3	8.8	8.9	0.03	0.87	1	-0.07	0.92	0
PCB – 105	10.6	14.3	28.8	46.4	-0.01	0.12	0.98	0.02	0.94	0
PCB – 118	18.3	8.4	28.8	29.7	0	0.17	0.98	0	0.96	1
PCB – 156	11.8	4.1	58.6	3.3	-0.02	0.13	0.96	0.13	0.93	0
PCB – 167	12.3	12.8	28.8	44.5	0	0.08	1	0.01	0.98	0
PCB – 74	15.2	51.5	5	28.3	0.03	0.27	1.02	-0.05	0.95	1
PCB – 170	0	4.7	80.6	14.7	0	0.56	0.96	0.04	0.98	0
Srednji doprinos	16.9	15.8	34.6	32.6	0.09	0.56	0.96	0.04	0.98	0

Pozitivna faktorizacija matrica

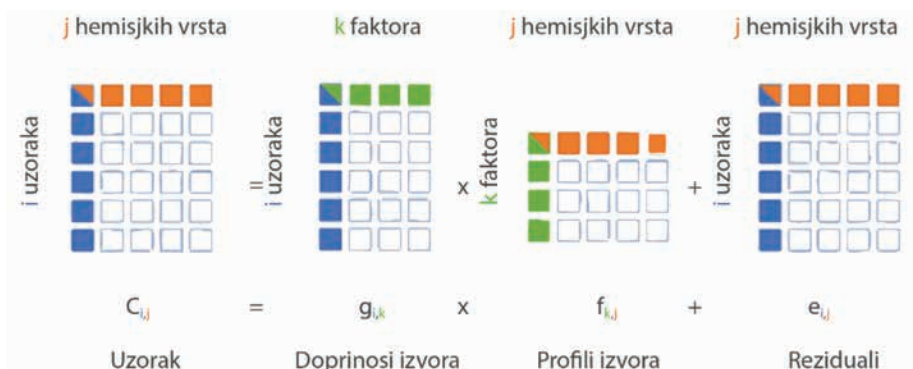
Pozitivna faktorizacija matrice (*Positive Matrix Factorisation* – PMF) je statistička metoda koja se koristi za rešavanje problema identifikacije izvora zagađenja primenom metode najmanjih kvadrata sa određenim ograničenjima. Cilj metode je dekompozicija izmerenih koncentracija zagađujućih materija na doprinose pojedinačnih izvora, uz uslov da su svi doprinosi i profili izvora pozitivni.

Matematički, pozitivna faktorizacija matrice može se predstaviti jednačinom:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^N g_{ik} f_{kj} + e_{ij}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$$

gde je C_{ij} koncentracija na mestu receptora j -te vrste u uzorku i , g_{ik} doprinos k -tog izvora u uzorku i , f_{kj} udeo j -te vrste u sastavu izvora k , e_{ij} ostatak j -te vrste u uzorku i , slika 6.25.

Slika 6.25. Koncept pozitivne faktorizacije matrice



Cilj modela PMF je minimiziranje ciljne funkcije:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \left(\frac{C_{ij} - \sum_{k=1}^N g_{ik} f_{kj}}{\varepsilon_{ij}} \right)$$

uz ograničenja da svi faktori g_{ik} i f_{kj} moraju biti nenegativni.

Ovaj pristup omogućava preciznu procenu doprinosa različitih izvora zagađenja, čak i kada postoje greške u merenju. Uračunavanjem grešaka pojedinačnih merenja i iterativnim procesom otežinjavanja, uticaj nereprezentativnih podataka moguće je svesti na minimum, kada je:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \left(\frac{e_{ij}}{h_{ij} \varepsilon_{ij}} \right)^2$$

gde je

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & |e_{ij} / \varepsilon_{ij}| \leq a \\ \frac{|e_{ij}|}{\varepsilon_{ij}}, & |e_{ij} / \varepsilon_{ij}| > a \end{cases}$$

Na slici 6.26. dati su profili izvora dobijeni primenom metoda Unmix i PMF. Kao i u primeru modela Unmix, identifikacija izvora emisije vrši se analizom zastupljenosti jedinjenja u odgovarajućem faktoru. Na primer, značajni udeli benzena, toluena, o-ksilena, mp-ksilena i etilbenzena u profilima, zajedno sa neorganskim gasovima, ukazuju na povezanost sa procesima sagorevanja. Za razliku od benzinskih emisija, dizel emisije su povezane sa 15 puta manjom koncentracijom CO, sedam puta većom koncentracijom NOx i 10-14 puta manjom koncentracijom jedinjenja iz BTEX grupe. Udeli CO i NOx su u istom opsegu, što uz značajne udele benzena, toluena i izrazito visoke koncentracije o-ksilena, mp-ksilena i etilbenzena, sugerise da ove zagađujuće materije pretežno potiču iz sagorevanja benzina, barem u neposrednoj blizini mernog mesta.

Slika 6.26. Profili izvora zagađenja vazduha u Beogradu dobijeni primenom metoda Unmix i PMF



Izračunavanje grešaka rešenja modela

Izračunavanje grešaka rešenja modela Unmix i PMF se vrši korišćenjem *bootstrap* metode, koja uključuje višestruko pokretanje modela sa modifikovanim skupovima podataka kreiranim uzorkovanjem sa ponavljanjem. Ovaj pristup pomaže u smanjenju efekta autokorelacije među originalnim podacima i omogućava procenu stabilnosti i varijabilnosti osnovnog rešenja.

6.8.2. Identifikacija lokalnih izvora zagađenja vazduha

Zavisnost varijabli od pravca i brzine vetra

Zavisnost koncentracija od pravca i brzine vetra, prikazana u polarnom sistemu sa gradijentom boja koji odgovara nivoima koncentracija, efikasno identifikuje potencijalne izvore emisije u blizini mernog mesta. Podaci su podeljeni u binove, a za svaki bin izračunata je prosečna koncentracija, što smanjuje broj podataka bez uticaja na rezultat. Kod analize višemesečnih ili višegodišnjih podataka, zbog slučajnih odstupanja izmerenih vrednosti pravca vetra, usrednjavanje je poželjno kako bi se izbegla difuznost prikaza.

Komponente brzine vetra računaju se na uobičajen način kao:

$$u = \bar{u} \sin\left(\frac{2\pi}{\theta}\right)$$

$$v = \bar{u} \cos\left(\frac{2\pi}{\theta}\right)$$

gde je θ – pravac, a $\bar{u}$ – brzina vetra.

Funkcija koristi fleksibilan okvir za fitovanje površine dat u *generalized additive model* (GAM) koji je naročito pogodan za analizu nelinearnih veza između podataka. Primenom ovog modela koncentracija u datom binu je data sa:

$$\sqrt{C_i} = s(u, v) + e_i$$

gde je s funkcija fita, a e_i ostatak.

Polarna klaster analiza

Polarna klaster analiza je metoda za određivanje grupa sličnih elemenata koja koristi algoritam k-srednjih vrednosti. Nasumično odabranih k tačaka predstavlja inicijalnu grupu centroida, dok se ostale tačke pridružuju sebi najbližem. Nakon što su sve tačke pridružene, pozicije centroida se ponovo izračunavaju biranjem novih tačaka. Ovaj proces se ponavlja dok centriodi ne prestanu da se pomeraju, što označava optimalno razdvajanje podataka na klastere u kojima su elementi unutar klastera bliži jedni drugima nego elementima iz drugih klastera.

Rastojanje u Euklidovom sistemu definisano je kao:

$$d_{xy} = \left(\sum_{j=1}^J (x_j - y_j)^2 \right)^{1/2}$$

gde je J dimenzija vektora, koja se u trodimenzionalnom slučaju u i v komponenti vetra i koncentracije računa kao standardizovana:

$$x_j = \left(\frac{x_j - \bar{x}}{\sigma_x} \right)^2$$

pošto se radi o varijablama različitih vrsta i vrednosti.

Funkcija uslovne verovatnoće

Funkcija uslovne verovatnoće (*Conditional Probability Function* – CPF) koristi se za identifikaciju potencijalnih izvora u relativnoj blizini mernog mesta, kao i njihovu karakterizaciju. Njena vrednost se definiše kao:

$$CPF = \frac{m_{\theta}}{n_{\theta}}$$

gde je m_{θ} broj podataka u sektoru pravca vetra θ većih od unapred definisane vrednosti koncentracije, a n_{θ} ukupan broj podataka koji pripada istom sektoru. Vrednost daje verovatnoću doprinosa određenih koncentracija iz datog pravca. Na CPF može se primeniti princip predstavljanja u zavisnosti od pravca i brzine vetra u polarnom sistemu, kada se govori o *conditional bivariate probability function* (CBPF):

$$CBPF = \frac{m_{\theta,j}}{n_{\theta,j}}$$

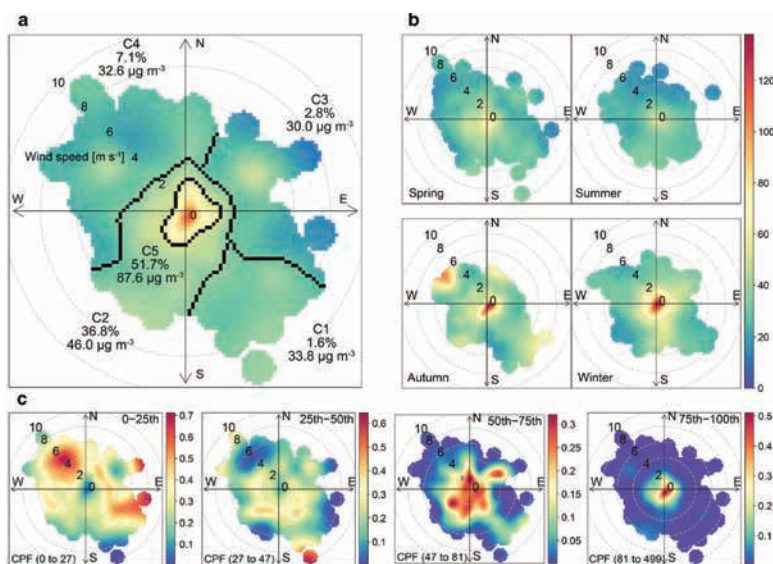
gde se m i n odnose na sektor θ i opseg brzina vetra j .

Variranjem kriterijuma za odabir koncentracije moguće je utvrditi lokacije i verovatnoće sa kojima izvori emisije manjeg i umerenog intenziteta učestvuju u izmerenim vrednostima, koji bi inače bili ekranirani jakim izvorima.

PRIMER

Zbirni primer identifikacije lokalnih izvora zagađenja vazduha analizom zavisnosti od pravca i brzine vetra u Beogradu na mernom mestu u užem gradskom jezgru prikazan je na slici 6.27. Kao što se na slici može videti, približno 54,7% opterećenja čestičnim zagađenjem povezano je sa lokalnim izvorima emisije iz okoline mernog mesta (identifikovani pri malim brzinama vetra). Funkcija uslovne verovatnoće u opsegu kvantila od 25 do 50 otkriva relativni doprinos zagađenih perjanica iz područja severa/severoistoka, što se može pripisati Luci Beograd i prigradskom području sa brojnim industrijskim postrojenjima, kao i uticaju južnog dela grada sa čestim saobraćajnim gužvama tokom dana. Izvori srednjeg intenziteta raspoređeni oko mernog mesta mogu se povezati sa izduvnim gasovima vozila i emisijama iz termoelektrana, dok dijagram 75% kvantila otkriva dominaciju emisija vezanih za lokalni saobraćaj, koje verovatno nastaju ponovnim podizanjem čestica sa tla (resuspenzija) i sagorevanjem čvrstih goriva u domaćinstvima.

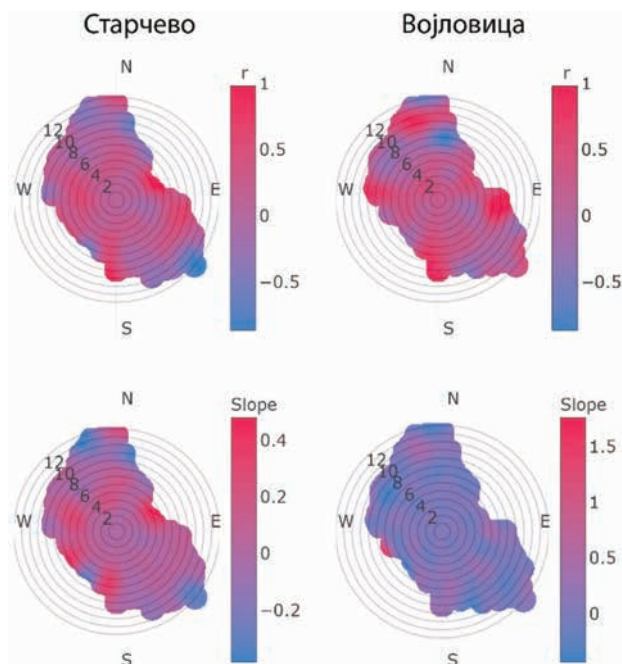
Slika 6.27. Odnos između masenih koncentracija PM_{10} i karakteristika vetra: polarni klaster plot (učestalost (%) i prosečan doprinos ($\mu g m^{-3}$)) (a), sezonske varijacije ($\mu g m^{-3}$) (b) i funkcija uslovne verovatnoće u četiri opsega kvantila (c)



Ostale vrste polarnih analiza zavisnosti od komponenti vetra

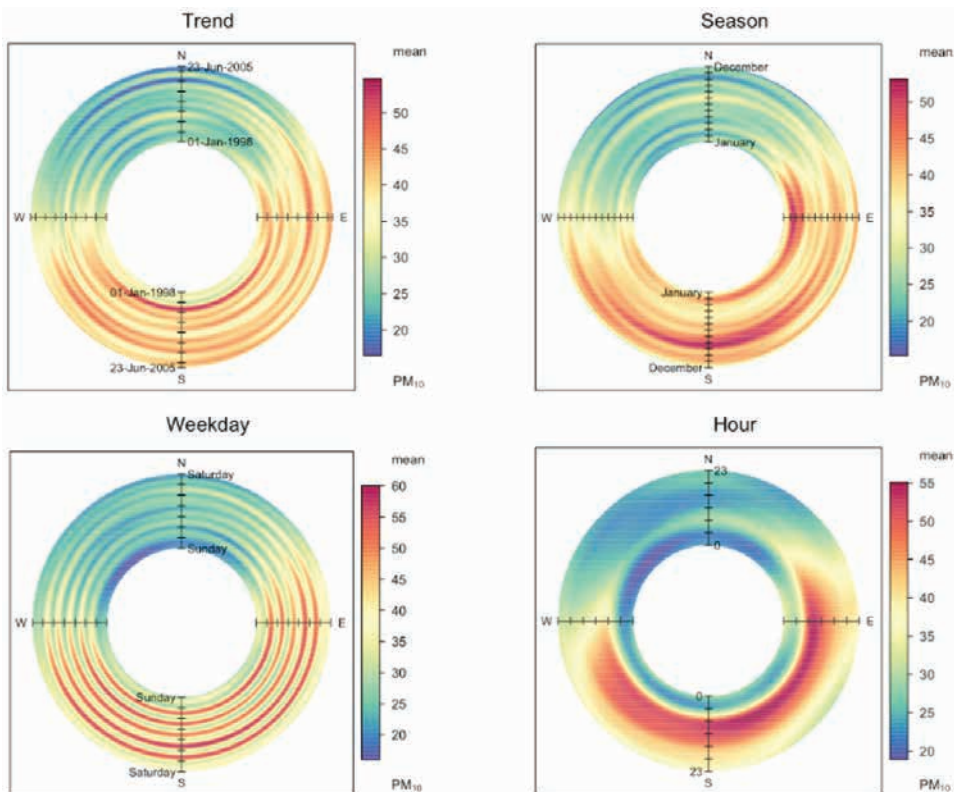
Analiza zavisnosti od komponenti vetra može se proširiti na razmatranje odnosa dve zagađujuće materije primenom odgovarajućih statistika, što može osvetliti detalje u vezi sa izvorima emisije. Statistike koje se mogu uzeti u obzir uključuju korelacioni koeficijent (Pirsonov ili Spirmanov) ili gradijent (koeficijent pravca, *slope*) dobijen iz linearne regresije između dve zagađujuće materije. Na primer, može se dogoditi da su SO_2 i PM_{10} prilično slabo korelisani na celom skupu podataka, ali da se veoma jaka korelacija javlja u specifičnim intervalima brzine i pravca vetra, što ukazuje na specifičan izvor emisije, slika 6.28.

Slika 6.28. Zavisnost korelacije između SO_2 i PM_{10} u odnosu na pravac i brzinu vetra u Pančevu za period od 2016. do 2020. godine



Postojećim metodama može se dodati i pristup koji zavisnosti koncentracija od pravca vetra dodaje i vremensku komponentu. Prestavlja način za vizualizaciju dnevnih, nedeljnih i sezonskih varijacija i godišnjih, slika 6.29.

Slika 6.29. Primer zavisnosti koncentracija PM_{10} od pravca vetra i godišnjih, sezonskih, nedeljnih i dnevnih varijacija



6.8.3. Identifikacija udaljenih izvora zagađenja vazduha

Identifikacija doprinosa pozadinskih nivoa zagađenja vazduha, lokalnih izvora, kao i transportnih procesa koncentracijama zagađujućih materija na mestu receptora, jedan je od najvažnijih problema u analizi zagađenja vazduha.

6.8.3.1. Trajektorije cirkulacije vazduha

HYSPLIT (*HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*) je napredni model za izračunavanje trajektorija cirkulacije vazduha, disperzije i depozicije zagađujućih materija. Ovaj sistem kombinuje Lagranžev pristup za praćenje transporta čestica vazduha u kome se advekcija i difuzija izračunavaju prateći kretanje pojedinačnih delića vazduha, sa Ojlerovim pristupom za računanje koncentracija zagađujućih materija u fiksnoj mreži.

Trajektorije kretanja vazduha formiraju se od krajnjih tačaka (*endpoints*) koje definišu položaj delića vazduha (geografska širina i dužina) u svakom trenutku. Pozicija delića vazduha računa se na osnovu početne pozicije (P , vektorska veličina) i prve pretpostavljene pozicije (P') dobijene na osnovu polja brzine vetra (U):

$$P(t+dt)=P(t)+0,5[U(P(t))+U(P'(t+dt))]dt$$

$$P'(t+dt)=P(t)+U(P(t))dt$$

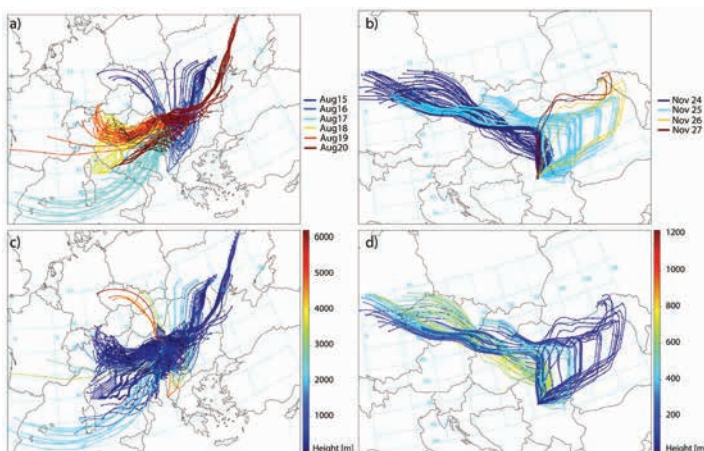
uz vremenski korak integracije $U_{max} dt < 0,75$.

PRIMER

Lako isparljiva organska jedinjenja su u atmosferi raspodeljena između gasne, tečne i čvrste faze. U njihovom biogeohemijskom ciklusu atmosferska voda igra značajnu ulogu.

Koncentracije ovih jedinjenja u različitim oblicima atmosferske vode zavise od različitih faktora, uključujući njihove ambijentalne gasne koncentracije, rastvorljivost u vodi, Henrijeve konstante, učestalost i intenzitet padavina, interakcije na površini između gasne i tečne faze, sadržaj i koncentracije drugih supstanci u vodi, kao i poreklo vazdušnih masa. Potencijalni udaljeni izvori koji bi mogli uticati na koncentracije jedinjenja u kišnici tokom nekoliko letnjih i jesenjih kišnih dana u Beogradu, identifikovani su korišćenjem 72-časovnih trajektorija cirkulacije vazduha izračunatih unazad od mesta receptora pomoću modela HYSPLIT, slika 6.30.

Slika 6.30. Trajektorije cirkulacije vazduha tokom leta (a) i jeseni (b), kao i odgovarajuće visine trajektorija (c, d)



Vazdušne mase tokom kišnih dana dolazile su iz različitih oblasti sa različitim visina. Uz dodatne analize, pokazalo se da su tokom leta vazdušne struje iz svih pravaca povezane sa značajnim varijacijama fizičko-hemijskih svojstava kišnice, dok su vazdušne mase sa severa i severoistoka tokom jeseni bile povezane sa ujednačenijim sastavom kišnice. Gasne koncentracije lako isparljivih organskih jedinjenja, posebno benzena, bile su relativno stabilne tokom padavina, što se može objasniti činjenicom da su lokalni izvori ovih jedinjenja dominantni u neposrednoj okolini mernog mesta.

Klasterizacija trajektorija

Grupisanje trajektorija koje su slične po poreklu i pravcu dolaska do mesta receptora, kao i na osnovu međusobnog rastojanja, može ukazivati na dominantne puteve transporta prekograničnog zagađenja vazduha. Ono se može izvršiti klaster analizom tako da je razlika između trajektorija unutar jedne grupe minimalna, dok je razlika između različitih grupa maksimalna. Ugaono rastojanje između dve trajektorije definisano sa mesta receptora može se izraziti kao:

$$d_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^{-1} \left(0,5 \frac{A_i + B_i - C_i}{\sqrt{A_i B_i}} \right)$$

gde je n ukupan broj krajnjih tačaka trajektorije, dok A_i i B_i predstavljaju rastojanja između i -te krajnje tačke dve trajektorije i mesta receptora, a C_i međusobno rastojanje segmenata dato kao:

$$\begin{aligned} A_i &= (X_1(i) - X_0)^2 + (Y_1(i) - Y_0)^2 \\ B_i &= (X_2(i) - X_0)^2 + (Y_2(i) - Y_0)^2 \\ C_i &= (X_2(i) - X_1(i))^2 + (Y_2(i) - Y_1(i))^2 \end{aligned}$$

Prostorna varijansa (SV) je računata između svake dve krajnje tačke k trajektorije j koja pripada klasteru i kao:

$$SV_{i,j} = \sum_k (P_{j,k} - M_{i,k})^2$$

gde su P i M vektori položaja trajektorije, odnosno klastera. Tada je prostorna varijansa klastera suma prostornih varijansi trajektorija koje mu pripadaju:

$$CSV_i = \sum_j SV_{i,j}$$

a ukupna prostorna varijansa (*total spatial variance* – TSV) suma prostornih varijansi svih klastera:

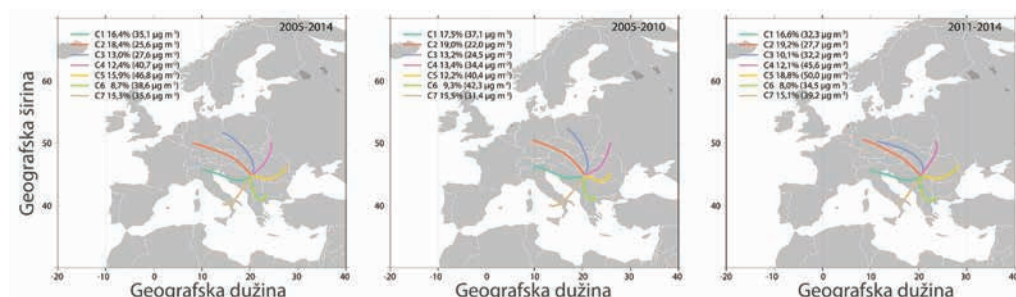
$$TSV = \sum_i CSV_{i,k}$$

Klasterizacija je iterativni proces u kom svaka trajektorija na početku predstavlja zaseban klaster. U sledećim iteracijama, najbliži klasteri se sukcesivno spajaju sve dok svi klasteri na kraju ne budu spojeni u jedan. Tokom svake iteracije, računa se ukupna prostorna varijansa (TSV) prilikom dodavanja trajektorija iz klastera 1 pojedinačno svim ostalim klasterima (2, 3, itd.). U sledeću iteraciju prenosi se kombinacija sa minimalnom vrednošću TSV. Početna vrednost TSV naglo raste kada se spoje klasteri koji su suštinski različiti, tako da tačka neposredno pre tog porasta označava optimalan broj klastera.

PRIMER

Klaster analiza trajektorija u periodu do 2010. i od 2011. godine pokazuje da dominantna promena udela transporta PM_{10} na teritoriji Beograda potiče od značajnog povećanja učestanosti i odgovarajućih doprinosa izmerenim koncentracijama klastera C4 i C5 koji dolaze sa istoka i severoistoka, a neznatna i od klastera C3 koji dolazi sa severa, slika 6.31. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da je promena meteoroloških uslova na regionalnom nivou u periodu posle 2011. godine doprinela povećanju koncentracija PM_{10} u Beogradu za oko $4 \mu g m^{-3}$.

Slika 6.31. Srednja vrednost udela u izmerenim masenim koncentracijama PM_{10} i učestanost pristizanja vazдушnih masa pridružene odgovarajućim klasterima trajektorija



Sektorska analiza trajektorija

Ukupne koncentracije zagađujućih materija na određenoj lokaciji predstavljaju zbir emisija iz lokalnih izvora, transportnih procesa i pozadinskog nivoa zagađenja, slika 6.32. Razdvajanje ovih doprinosa jedan je od najvažnijih izazova u analizi zagađenja.

Slika 6.32. Raspodela ukupnog nivoa zagađenja

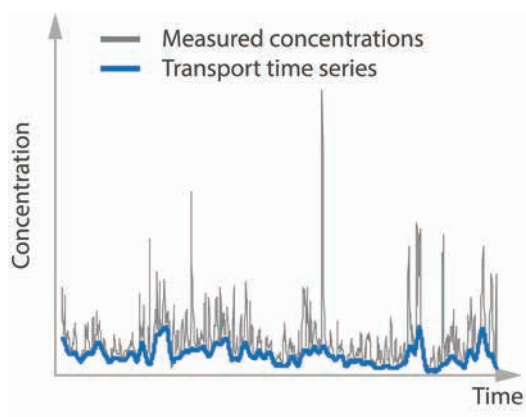


Lokalne emisije zagađujućih materija u neposrednoj blizini mernog mesta, karakterišu kratkotrajni i visoki pikovi u vremenskoj seriji, koji su superponirani na širi šum koji se znatno sporije menja tokom vremena, slika 6.33. Možemo pretpostaviti da ovaj šum predstavlja zbir doprinosa transporta i pozadinskog nivoa, stoga je njegovo izdvajanje na osnovu izmerenih koncentracija od suštinske važnosti.

Dobijanje bazne linije može se izvršiti na različite načine.¹⁸ Jedan od načina predstavlja modifikaciju tehnike procesiranja digitalnih fotografija putem nelinearnog digitalnog filtriranja (izoštavanja). Ova metoda može se opisati kao matematički ekvivalent kotrljanja lopte ispod vremenske serije koncentracija zagađujućih materija kako bi se odredio nivo šuma, odakle i potiče njen naziv – *rolling ball*. Ova metoda je posebno efikasna kada je interval integracije rezultata merenja jedan sat ili kraći.

18 Neke od metoda izdvajanja bazne linije su *asymmetric least squares*, *iteratively reweighted least squares*, *low pass filtering*, *median window*, *modified polynomial fitting*, *random forest baseline*, *tangent angle projection* i mnoge druge.

Slika 6.33. Primer izdvajanja bazne linije koja odgovara sumi transportovanog i pozadinskog nivoa zagađenja



Dalje razdvajanje doprinosa transporta i lokalnog pozadinskog nivoa moguće je postići sektorskom analizom trajektorija (*trajectory sector analysis* – TSA). Ceo prostor, sa centrom na mestu receptora, može se podeliti na određeni broj sektora. Za svaki sektor j može se odrediti srednja koncentracija (C_j), kao i relativni doprinos koji iz njega potiče ($\%C_j$) na osnovu jednačina:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^N C_i f_{ij}}{N_j}, \quad N_j = \sum_{i=1}^N f_{ij}, \quad \%C_j = \frac{C_j N_j}{\sum_{j=1}^8 C_j N_j} 100$$

gde je N ukupan broj trajektorija, C_i koncentracija određena baznom linijom duž i -te trajektorije, f_{ij} vreme koje i ta trajektorija provede u sektoru j , a N_j ukupno vreme koje sve trajektorije provedu u sektoru j .

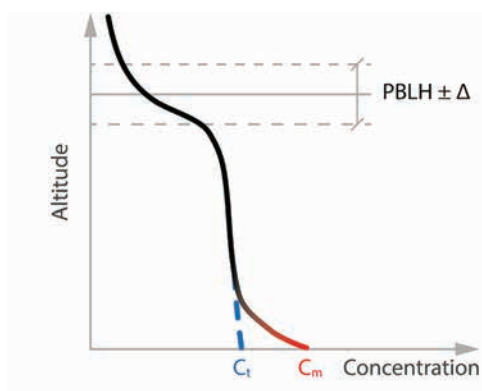
Doprinos najmanje zagađenog sektora može se uzeti za pozadinski nivo, a doprinos transporta iz ostalih, oduzimanjem ove vrednosti od C_j .

PRIMER

Konvencionalni pristup modeliranju prekograničnog transporta ima nekoliko nedostataka. Koncept ove vrste modeliranja procenjuje relativnu važnost transportnih procesa bez uvažavanja razlika između pozadinskih i urbanih lokacija receptora. U prethodnom poglavlju već smo razmotrili urbane lokacije koje karakteriše veliki broj lokalnih izvora emisije čiji se doprinos mora isključiti da bi procena uloge transporta bila adekvatno procenjena.

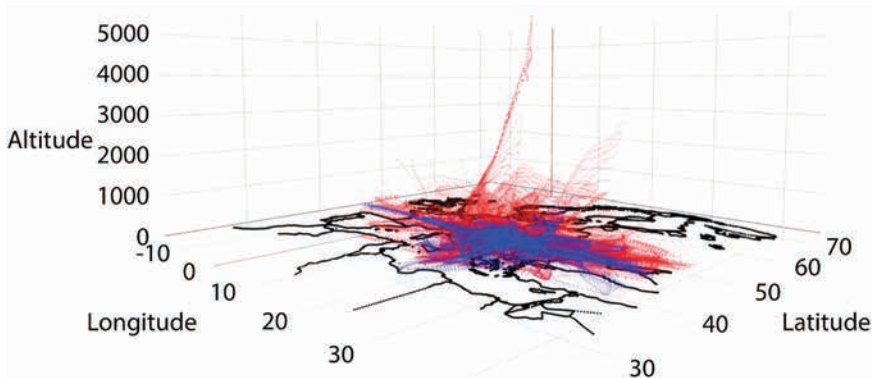
Sledeći nedostatak konvencionalnog pristupa predstavlja izračunavanje trajektorija za unapred definisane, proizvoljno odabrane visine na lokaciji receptora koji ne mora nužno dati realističan prikaz putanja transporta zagađujućih materija. Ovaj pristup zanemaruje činjenicu da se preraspodela emitovanih zagađujućih vrsta dominantno odvija u nekoliko najnižih stotina do nekoliko hiljada metara atmosfere, delu poznatom kao granični sloj mešanja. Koncentracije zagađujućih materija značajno se smanjuju sa visinom, jer su vrste emitovane ili generisane blizu tla uglavnom zarobljene i koncentrisane unutar graničnog sloja, dok su koncentracije u slobodnoj atmosferi niske, slika 6.34. Ispostavlja se da je koncentracija oko polovine visine graničnog sloja mešanja dobra aproksimacija pozadinskog nivoa zagađenja

Slika 6.34. Promena koncentracije zagađujuće materije sa visinom



Iako je transport zagađujućih materija izvan ovog sloja moguć, trajektorije koje se celom dužinom nalaze unutar graničnog sloja mogu se smatrati relevantnim za analizu transporta zato što se samo one mogu povezati sa izmerenim koncentracijama na tlu. Slika 6.35 daje nagoveštaj odnosa broja krajnjih tačaka trajektorija koje otpadaju iz analize.

Slika 6.35. Reprezentativne (plavo) i nereprezentativne (crveno) krajnje tačke trajektorija cirkulacije vazduha



6.8.3.2. Hibridni receptorski modeli

Identifikacija potencijalnih izvora emisije na regionalnom nivou, kao i njihov doprinos izmerenim koncentracijama zagađujućih materija na mestu receptora, može se odrediti pomoću hibridnih receptorskih modela kao što su funkcija potencijalnih doprinosa izvora emisije (*potential source contribution function* – PSCF) i trajektorije otežinjene koncentracijama (*concentration weighted trajectory* – CWT). Oba modela koriste trajektorije kretanja vazdušnih masa računate unazad počev od mesta receptora.

Funkcija potencijalnih doprinosa izvora

Funkcija potencijalnih doprinosa izvora se zasniva na analizi trajektorija cirkulacije vazduha, povezujući trajektorije sa izmerenim koncentracijama zagađujućih materija na mestu receptorima. Cilj ove analize je utvrđivanje geografske oblasti koje najverovatnije doprinose zagađenju na datoj lokaciji. Za izračunavanje funkcije potencijalnih doprinosa izvora geografska oblast se može podeliti mrežom jednakih ćelija čija se veličina određuje u odnosu na konkretan problem. Ako se pretpostavi da su zagađujuće materije emitovane u ćeliji sa koordinatama (i, j) prenete do receptora duž određene trajektorije, kako i da je ukupan broj krajnjih tačaka svih trajektorija u toj ćeliji n_{ij} , tada je kumulativna verovatnoća koja određuje potencijalni transport iz date ćelije data sa:

$$P[A_{ij}] = \frac{n_{ij}}{N}$$

gde je A_{ij} koncentracija izmerena na mestu receptora, a N ukupan broj svih krajnjih tačaka u svim ćelijama mreže. Među n_{ij} koncentracija zagađujućih materija na mestu receptora, nalazi se m_{ij} onih B_{ij} koje premašuju unapred zadatu vrednost (srednja vrednost ili 90 procentni kvantil), za koje je verovatnoća koja određuje transport jednaka:

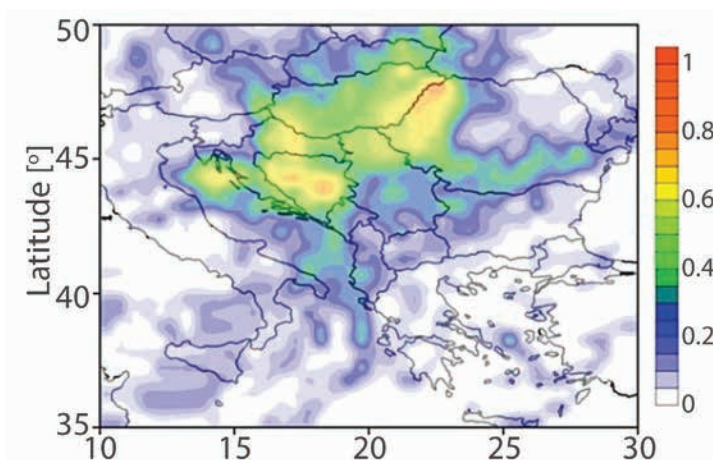
$$P[B_{ij}] = \frac{m_{ij}}{N}$$

pa je uslovna verovatnoća koja opisuje prostornu raspodelu najverovatnijih geografskih položaja izvora, odnosno funkcija potencijalnih doprinosa izvora definisana kao:

$$PSCF_{ij} = P[B_{ij} | A_{ij}] = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}$$

Ćelije povezane sa visokim vrednostima PSCF predstavljaju potencijalne oblasti izvora emisije, slika 6.36.

Slika 6.36. Primer identifikacije potencijalnih izvora emisije

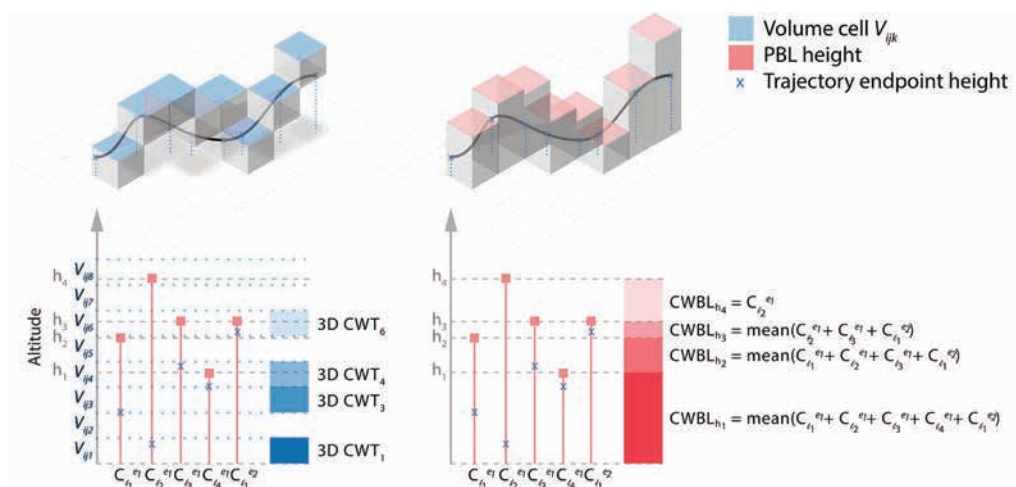


Trodimenzionalna funkcija potencijalnih doprinosa izvora

Doprinos određenog izvora koncentracijama zagađujućih materija na mestu receptora smatra se direktno proporcionalnim vremenu zadržavanja vazdušne mase iznad regiona u kojem se izvor nalazi. Krajnje tačke duž trajektorije razdvojene određenim vremenskim periodom koriste se za izračunavanje vremena zadržavanja vazdušne mase za svaku ćeliju mreže. Uopšteno, u trodimenzionalnoj mreži, vertikalna raspodela funkcije potencijalnih doprinosa izvora može se definisati kao odnos podskupa m_{ijk} krajnjih tačaka u k -toj zapreminskoj ćeliji v_{ijk} unapred definisane visine (slika 6.37) za koje odgovarajuće trajektorije stižu na mesto receptora kada doprinos transporta izmerenim koncentracijama prelazi unapred zadatu kriterijumsku vrednost i ukupnog broja krajnjih tačaka u i -toj ćeliji mreže (n_{ij}):

$$PSCF_{ijk} = \frac{P[B_{ijk}]}{P[A_{ij}]} = \frac{m_{ijk}}{n_{ij}}$$

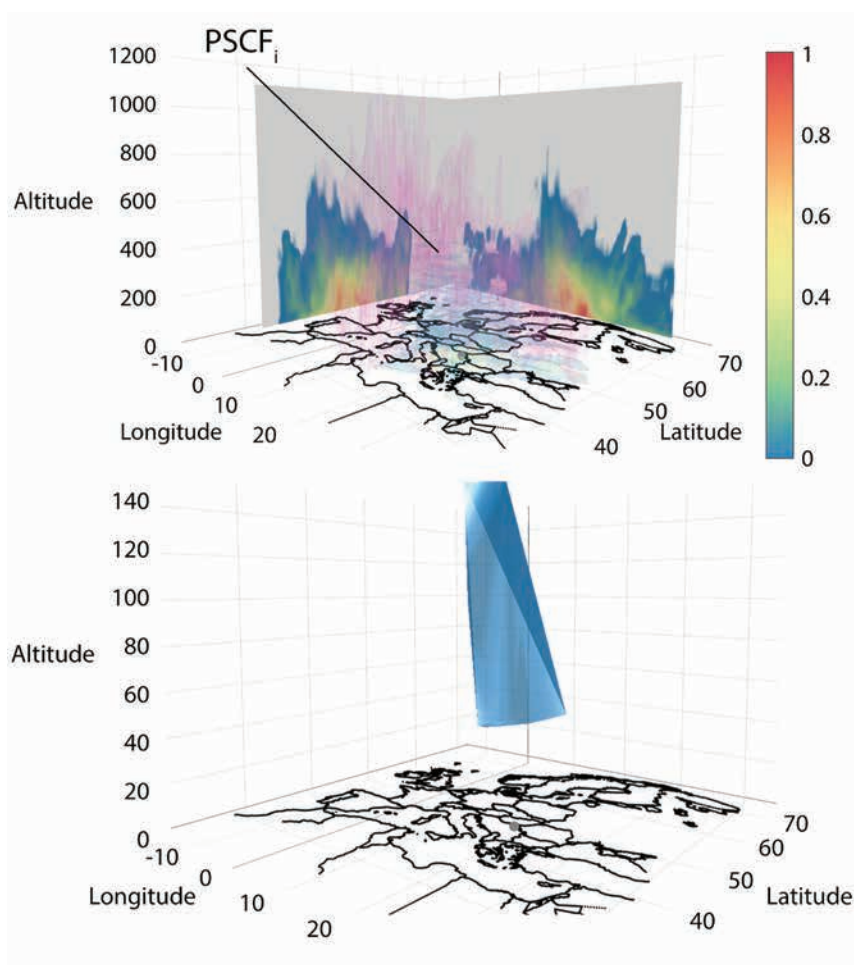
Slika 6.37. Koncept trodimenzionalne PSCF i CWT analize (a) i CWBL analize (b) i grafička interpretacija 3D CWT_k (c) i CWBL (d)



PRIMER

Kao primer trodimenzionalne funkcije potencijalnih doprinosa izvora $PM_{2,5}$ izmerenim koncentracijama ove materije u Beogradu, možemo dati mapu prikazanu na slici 6.38. gore. Oblast najveće verovatnoće potencijalnih izvora data je na slici 6.38, dole. Prikazani su $PSCF_i$ preseki na unapred definisanim visinama od 50 metara iznad tla. Vertikalne ravni prikazuju normalizovanu raspodelu potencijalnih izvora $PM_{2,5}$ po visini, dok je zapremina kroz koju su trajektorije cirkulacije vazduha prolazile prikazana roze bojom.

Slika 6.38. 3D PSCF mapa potencijalnih izvora $PM_{2,5}$ u Evropi (gore), oblast najveće verovatnoće potencijalnih izvora $PM_{2,5}$ (dole)



Trajektorije otežinjene koncentracijama

Jedan od najvažnijih nedostataka funkcije potencijalnih doprinosa izvora predstavlja mogućnost da dve ćelije mogu imati istu vrednost PSCF bez obzira na nivo emisije koji iz njih potiče, što onemogućava razlikovanje umerenih i dominantnih izvora. Relativni značaj izvora moguće je odrediti pomoću modela trajektorija otežinjenih koncentracijama, koji svakoj ćeliji trajektorije koja dolazi do receptora pridružuje otežinjenu koncentraciju (odgovara srednjoj vrednosti izmerenih koncentracija na mestu receptora) kao:

$$CWT_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk}}{\sum_{k=1}^M \tau_{ijk}}$$

gde je M ukupan broj trajektorija, C_k izmerena koncentracija na mestu receptora koja odgovara trajektoriji k , a τ_{ijk} broj krajnjih tačaka trajektorije.

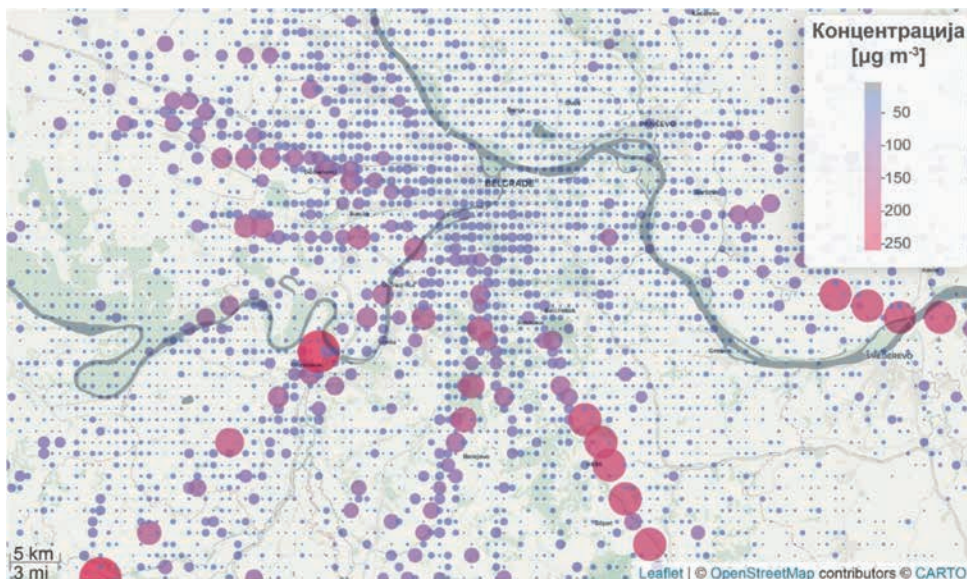
PRIMER

Kao primer možemo dati raspodelu izvora emisije čestičnog zagađenja u Beogradu, slika 6.39. Na slici su prikazane identifikovane oblasti emisije čestičnog zagađenja na široj teritoriji Beograda. Kao što se može videti, rezultati analize pokazuju da je područje Beograda izloženo uticaju regionalnih izvora emisije čestica koji se nalaze južno, jugozapadno i jugoistočno od grada, kao i nešto manjem uticaju izvora lociranih u oblastima zapadno i istočno od analiziranog područja. Značajni regionalni izvori emisija u jugozapadnim oblastima na periferiji aglomeracije mogu se povezati sa termoelektranom „Nikola Tesla“ u blizini Obrenovca, kao i sa nešto udaljenijim rudarskim basenima u blizini Velikih Crljena. Osim toga, regionalni izvor u jugoistočnoj oblasti koji utiče na urbanu zonu Beograda može se pripisati gradskoj deponiji u Vinči, dok se nekoliko identifikovanih izvora na levoj obali Dunava izvan aglomeracije mogu povezati sa poljoprivrednim aktivnostima u Banatu.

Regionalni izvori suspendovanih čestica, čiji je uticaj procenjen kao značajan i koji se nalaze jugoistočno na većoj udaljenosti, mogu se povezati sa železarnom u Smederevu, kao i sa termoelektranom i rudnikom uglja „Kostolac“. U regionu zapadno od Beograda, duž međunarodnog autoputa E-70, identifikovani su izvori emisije nešto manjeg intenziteta, koji se mogu pripisati saobraćajnim aktivnostima. Takođe, treba imati u vidu da je na ovom području poslednjih godina izgrađen veliki broj objekata malih privrednih delatnosti (proizvodni pogoni, prerada i skladištenje robe), čije emisije takođe doprinose zagađenju

vazduha. Takođe, mogu se uočiti i izvori emisije PM_{10} koji su locirani južno od Beograda i koji najverovatnije predstavljaju doprinos udaljenijih oblasti ili čak deo trase prekograničnog transporta sa velike udaljenosti.

Slika 6.39. Raspodela regionalnih izvora emisije PM_{10} na teritoriji Beograda i susednih opština u periodu od 2017. do 2019. godine



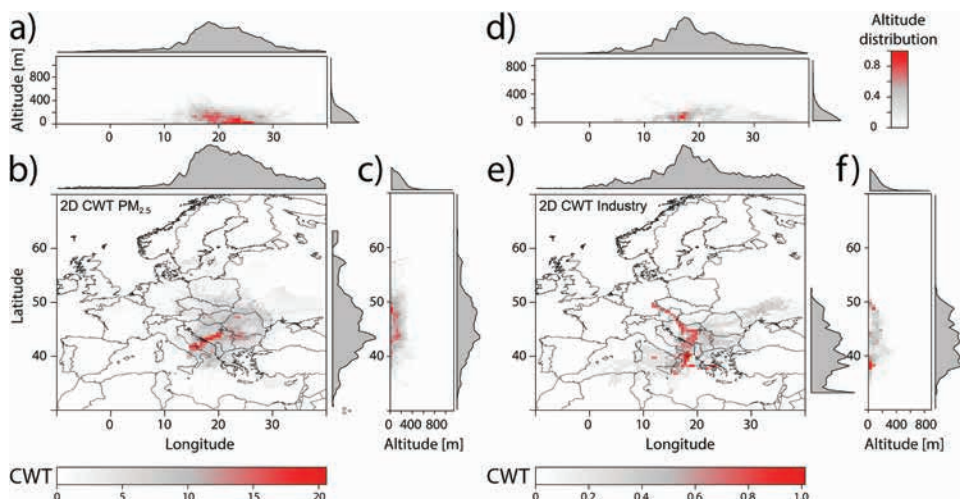
Trodimenzionalni model trajektorija otežinjenih koncentracijama

U CWT analizi, svaka ćelija mreže (i,j) dobija otežinjenu koncentraciju koja se dobija usrednjavanjem procenjenog doprinosa transporta na mestu receptora, a koji odgovara trajektorijama koje prolaze kroz tu ćeliju. Dodavanjem visine, CWT za svaku zapreminsku ćeliju v_{ijk} može se definisati kao:

$$CWT_{ijk} = \frac{\sum_{l=1}^L C_l \tau_{ljk}}{\sum_{l=1}^L \tau_{ljk}}$$

gde je C_l koncentracija zagađujuće materija koja odgovara dolasku trajektorije l , τ_{ljk} broj krajnjih tačaka segmenata trajektorija u ćeliji mreže (i,j) za trajektoriju l , τ_{ljk} broj krajnjih tačaka segmenata trajektorija u k -toj zapreminskoj ćeliji v_{ijk} za trajektoriju l , a L ukupan broj trajektorija. Kao rezultat, zbir vrednosti 3D CWT za svaku ćeliju ij jednak je rezultatu dobijenom korišćenjem konvencionalnog 2D CWT rešenja. Primer rezultata modela dat je na slici 6.40.

Slika 6.40. Mapa izvedena iz 2D CWT za $PM_{2.5}$ [$\mu g\ m^{-3}$] (b) i emisije isparljivih organskih jedinjenja iz industrije (e), kao i 3D CWT raspodela zagađujućih materija tokom transporta unutar graničnog sloja mešanja (a, c, d, e)



Granični sloj otežinjen koncentracijama

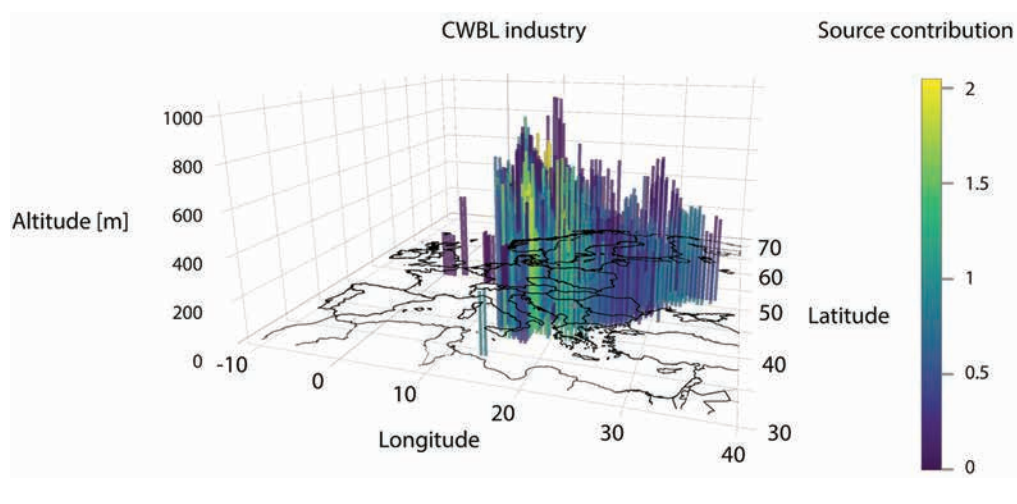
Dok se trodimenzionalni hibridni receptorski modeli mogu koristiti za identifikaciju potencijalnih prekograničnih izvora emisije definisanih prema geografskoj dužini, širini i nadmorskoj visini, oni nisu pogodni za analizu vertikalne raspodele koncentracija zagađujućih materija duž putanje transporta (slika 6.37.a, c). Zato je razvijen hibridni receptorski model granični sloj otežinjen koncentracijama (*concentration weighted boundary layer* – CWBL), koji koristi dvodimenzionalnu mrežu i visinu planetarnog graničnog sloja kao referentni okvir za izračunavanje vertikalnog profila koncentracija zagađujućih materija iznad svake ćelije mreže.

Metoda se zasniva na činjenici da koncentracije zagađujućih materija ne pokazuju značajne varijacije unutar većeg dela graničnog sloja mešanja, osim na samom vrhu i dnu sloja, pri čemu na donji sloj značajno utiču emisije sa tla (slika 34, C_m). Procenjeni doprinos transporta koncentracijama zagađujućih materija izmerenim na mestu receptora se pripisuje svim zapreminskim ćelijama unutar graničnog sloja mešanja na svakoj krajnjoj tački duž odgovarajuće trajektorije koja stiže do mesta receptora (slika 6.37.b).

PRIMER

Primer rezultata modela CWBL dat je na slici 6.41, koja prikazuje kontinualnu raspodelu izvora emisije poreklom iz industrije po visini, kako iznad lokacije mesta receptora, tako i iznad udaljenih oblasti izvora emisije, počevši od nivoa tla do maksimalne visine graničnog sloja mešanja u svakoj ćeliji mreže dvodimenzionalne mreže po geografskoj širini i dužini.

Slika 6.41. Mapa raspodele emisije isparljivih organskih jedinjenja poreklom iz industrije



Druge vrste hibridnih receptorskih modela

Residence time weighted concentration

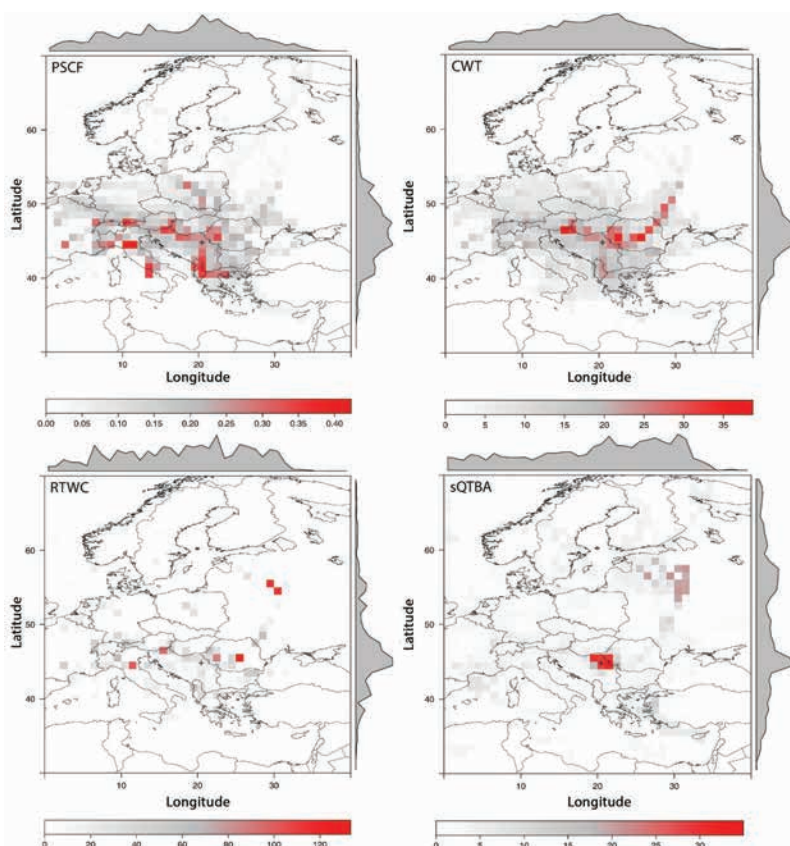
Residence time weighted concentration model (RTWC) zasnovan je na istim osnovama kao i CWT, ali predstavlja njegovo unapređenje. Redistribucija koncentracija, koje su rezultat CWT, vrši se uz pretpostavku da se ćelije kroz koje prolaze trajektorije sa niskim i visokim koncentracijama ne mogu smatrati područjima značajnih izvora zagađenja. Takva područja bi trebalo da se nalaze isključivo na putu trajektorija sa visokim koncentracijama.

U ovom modelu, varijacija sugerise da se svaka trajektorija m podeli na n segmenata, gde su X_{mn} prosečne koncentracije u segmentu n poreklom od trajektorije m . Redistribucija početnog polja koncentracija unutar RTWC modela je iterativni proces koji se ponavlja unapred zadati broj puta ili dok se ne ispuni određeni kriterijum za konvergenciju.

Simplified quantitative transport bias analysis

Osnovni princip modela *simplified quantitative transport bias analysis* (sQTBA) je pokušaj da se prevaziđu nesigurnosti u proračunu trajektorija prikazivanjem položaja trajektorije pomoću Gausove raspodele. Korišćenjem Gausove raspodele računa se funkcija prirodnog potencijala transporta na osnovu udaljenosti od mesta receptora. Model zanemaruje uticaj depozicije i hemijskih transformacija tokom transporta, dok je složen empirijski filter za otežinjavanje trajektorija zamenjen jednostavnom težinskom funkcijom. U jednačini se pojavljuje i funkcija prirodnog potencijala transporta (*natural transport potential function*), koja predstavlja parametar sa određenom vrednošću za svaku ćeliju mreže. Poređenje rezultata primene većeg broja modela u cilju razumevanje uticaja udaljenih izvora dato je na slici 6.42.

Slika 6.42. Potencijalni izvori PM₁₀ identifikovani korišćenjem PSCF (verovatnoća), CWT, TRCW i sQTBA modela ($\mu\text{g m}^{-3}$)



6.8.4. Disperzija zagađujućih materija

Kretanje zagađujućih materija u graničnom sloju u velikoj meri zavisi od stabilnosti atmosfere, brzine vetra, procesa transformacije zagađujućih materija, kao i od načina njihovog uklanjanja. Temperaturna stratifikacija u atmosferi značajno kontroliše vertikalno kretanje zagađenja. Tokom sunčanih i letnjih dana, kada je izražena atmosferska nestabilnost, dolazi do konvekcije, što omogućava idealne uslove za vertikalnu difuziju zagađujućih materija. Suprotno tome, najnepovoljniji uslovi za difuziju postoje tokom inverzije u graničnom sloju, koja praktično eliminiše vertikalno kretanje i značajno utiče na povećanje nivoa zagađenja.

Atmosferska strujanja mogu razrediti i transportovati zagađujuće materije. Ako je veličina vrtloga manja od oblaka zagađenja ili perjanice, dolazi do njihovog razređenja, dok u suprotnom slučaju dolazi do transporta.

Difuzija zagađujućih materija se javlja i pri duvanju vetra. Veća brzina vetra dovodi do smanjenja koncentracija zagađujućih materija. Vetar utiče i na forsiranu konvekciju koja se stvara u graničnom sloju zbog unutrašnjeg trenja između slojeva vazduha i između vazduha i elemenata površinske hrapavosti. Pravac i brzina vetra ključni su za transport zagađujućih materija. Jaki vetrovi mogu transportovati zagađenje na velike udaljenosti, ali će izmerene koncentracije biti zanemarljive. Zbog toga najveći potencijal za zagađenje postoji pri slabim vetrovima, jer su turbulentni transport i difuzija ograničeni.

Atmosfera se čisti od zagađujućih materija na različite načine, među kojima su gravitaciono taloženje, suva depozicija i ispiranje padavinama. Gravitaciono taloženje je osnovni mehanizam za uklanjanje čestica prečnika većih od 1 μm , dok se čestice drugih dimenzija uklanjaju putem suve depozicije i ispiranja. Suva depozicija (površinska adsorpcija) je proces turbulentnog prenosa u kojem je vertikalni fluks zagađujućih materija F opisan izrazom:

$$F = K_f \frac{\partial \bar{X}}{\partial Z}$$

gde je K_f atmosferska difuzivnost ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), a $\frac{\partial \bar{X}}{\partial Z}$ vertikalni gradijent srednje koncentracije zagađenosti ($\mu\text{gm}^{-3} \text{m}^{-1}$).

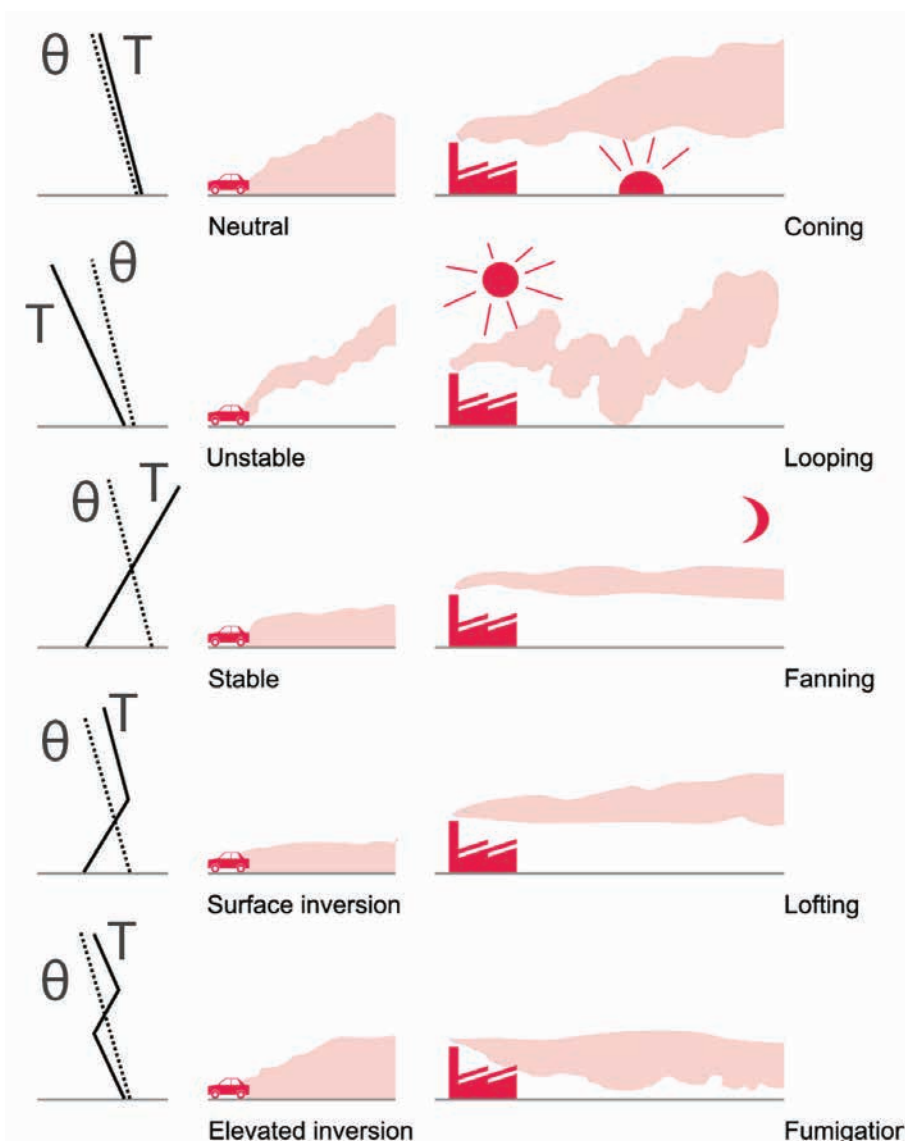
Proces depozicije opisuje se fluksom usmerenim ka podlozi koja deluje kao ponor za zagađujuće materije. Step depozicije zavisi od intenziteta turbulencije i karakteristika podloge. Najbolji način za ilustraciju disperzije zagađujućih materija u atmosferi je posmatranje perjanice dima iz uzdignutog, kontinuiranog tačkastog izvora. Način širenja zagađujućih materija u atmosferi zavisice od dominantnih meteoroloških uslova, kao što su brzina vetra i temperaturni gradijent.

Nakon inicijalnog rasta, oblik perjanice će zavisiti od dominantne strukture turbulencije. Koristeći stabilnost atmosfere kao zamenu za turbulenciju, karakteristični oblici perjanice dima mogu se klasifikovati u pet osnovnih tipova, slika 6.43.

Luping je oblik perjanice dima tipičan za letnje dane s jakim atmosferskom nestabilnošću, gde dominiraju velike vrtložne strukture slobodne konvekcije, što perjanici daje sinusoidni oblik i omogućava kontakt sa tlom na kratkim rastojanjima, uz visoke koncentracije zagađujućih materija. Perjanica u obliku konusa nastaje pri neutralnim uslovima stabilnosti i vetrovitim ili oblačnim danima, gde mali vrtlozi forsirane konvekcije uzrokuju ravnomerno širenje perjanice, omogućavajući da dosegne tlo na većim udaljenostima. Lepezasti oblik je karakterističan za stabilne atmosferske uslove s inverzijom, često se javlja noću i može ostati stabilan na velikim udaljenostima, uz potencijalno zagađenje blizu tla. Tavanica se javlja predveče, kada stabilan sloj ispod perjanice sprečava njen transport ka tlu. Zadirmljavanje, suprotno od tavanice, nastaje kada inverzija iznad perjanice sprečava vertikalnu disperziju, omogućavajući mešanje zagađujućih materija do samog tla. Na većim udaljenostima, perjanice gube svoj oblik i doprinose homogenoj kontaminaciji graničnog sloja.

Zagađenje emitovano u atmosferu može se prenositi na velike udaljenosti i mešati sa vazduhom kroz turbulenciju, što predstavlja složen proces zbog prisustva vrtloga različitih veličina. Atmosferski disperzioni modeli su matematičke simulacije koje opisuju transport, disperziju i transformaciju zagađujućih materija u atmosferi, koristeći podatke o stopi emisije, karakteristikama izvora, topografiji i meteorološkim uslovima. Najčešće korišćeni su Gausovi modeli perjanice, ali postoje i sofisticiraniji modeli koji koriste jednačine za opisivanje atmosferskih stanja, omogućavajući bolju procenu u kompleksnim uslovima terena ili pri velikim udaljenostima transporta. Meteorološki faktori su ključni za disperziju, a modeli se koriste za procenu koncentracija zagađujućih materija u različitim vremenskim intervalima, planiranje izgradnje objekata, određivanje visine dimnjaka, upravljanje emisijama, projektovanje monitoring mreža, identifikaciju zagađivača, prognozu zagađenja i procenu rizika od ispuštanja opasnih materija. Iako ni najkompleksniji modeli ne mogu precizno predvideti lokaciju, veličinu i trajanje prizemnih koncentracija, njihova tačnost se poboljšala, ali ostaje ograničena zbog nepredvidljivosti fizičkih procesa i nepreciznosti ulaznih podataka. Tačnost rezultata zavisi od pogodnosti modela, tačnosti informacija o izvoru i dostupnosti preciznih meteoroloških podataka.

Slika 6.43. Karakteristični oblici disperzije u različitim uslovima stabilnosti atmosfere



Modeli zagađenja vazduha mogu biti deterministički, statistički i fizički, zavisno od načina na koji se izračunavaju koncentracije zagađujućih materija. Deterministički modeli koriste jednačine koje opisuju relevantne fizičke procese za izračunavanje koncentracija. Statistički modeli se oslanjaju na postojeće empirijske veze između izmerenih koncentracija i varijabli, dok fizički modeli simuliraju procese u laboratorijskim uslovima.

S obzirom na to da polje vetra varira kako u horizontalnoj, tako i u vertikalnoj ravni, rast i razvoj oblaka zagađujućih materija ne može se adekvatno predstaviti jednom trajektorijom. Stoga simulacija disperzije mora uključivati veliki broj delića vazduha.

Postoje dva pristupa modeliranju: prvi pretpostavlja širenje oblaka (*puff model* – trodimenzionalni cilindar sa određenom raspodelom koncentracije u horizontalnoj i vertikalnoj ravni) unutar ćelije meteorološke mreže sve dok ne pređe njenu granicu, kada se deli na više novih oblaka. Drugi pristup podrazumeva širenje oblaka u horizontalnoj ravni, uz disperziju čestica (tačkasta masa zagađujuće materije) u vertikalnoj ravni.

Disperzioni model HYSPLIT

HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model*) koristi meteorološku mrežu podataka za računanje kretanja delića vazduha unapred ili unazad u odnosu na mesto receptora, dok se brzina disperzije izračunava na osnovu vertikalnih profila meteoroloških parametara, smicanja vetra i horizontalne deformacije polja vetra. Pretpostavlja se da je raspodela čestica zagađujućih materija unutar oblaka Gausova ili uniformna, ili da je broj čestica fiksni.

Pozicija čestica određuje se na osnovu advekcije, što u suštini predstavlja računanje trajektorije korišćenjem polja brzine, a zatim se koriguje na osnovu turbulencije:

$$P(t+dt) = P_{srednje}(t+dt) + U'(t+dt)dt$$

Horizontalna turbulentna komponenta brzine vetra u trenutku $U(P'(t+dt)) = U'(t+dt)$ računa se na osnovu prethodne vrednosti $U'(t)$:

$$U'(t+dt) = R(dt) U' dt + U''(1-R(dt)^2)^{1/2}$$

gde je R auto-korelacioni koeficijent:

$$R(dt) = e^{-dt/T_L}$$

T_L Lagranževa vremenska skala, a U'' Gausova slučajna komponenta dobijena na osnovu brzine vetra i stabilnosti:

$$U'' = \sigma_u \lambda$$

u kojoj je λ slučajni broj, a σ_u standardna devijacija brzine vetra koja se koristi i za određivanje brzine širenja oblaka u horizontalnoj ravni σ_h :

$$\frac{d\sigma_h}{dt} = \sigma_u$$

Pod pretpostavkom da se masa 3D čestice (m) svaki put podeli pri prelasku u novu ćeliju mreže, koncentracije zagađujućih materija u vazduhu mogu se izračunati kao:

$$dc = m(dx dz dz)^{-1}$$

Za Gausovu i uniformnu raspodelu koncentracije se izračunavaju kao:

$$dc = m(2\pi\sigma_h^2 dz) e^{-\frac{1}{2}x^2/\sigma_h^2}$$

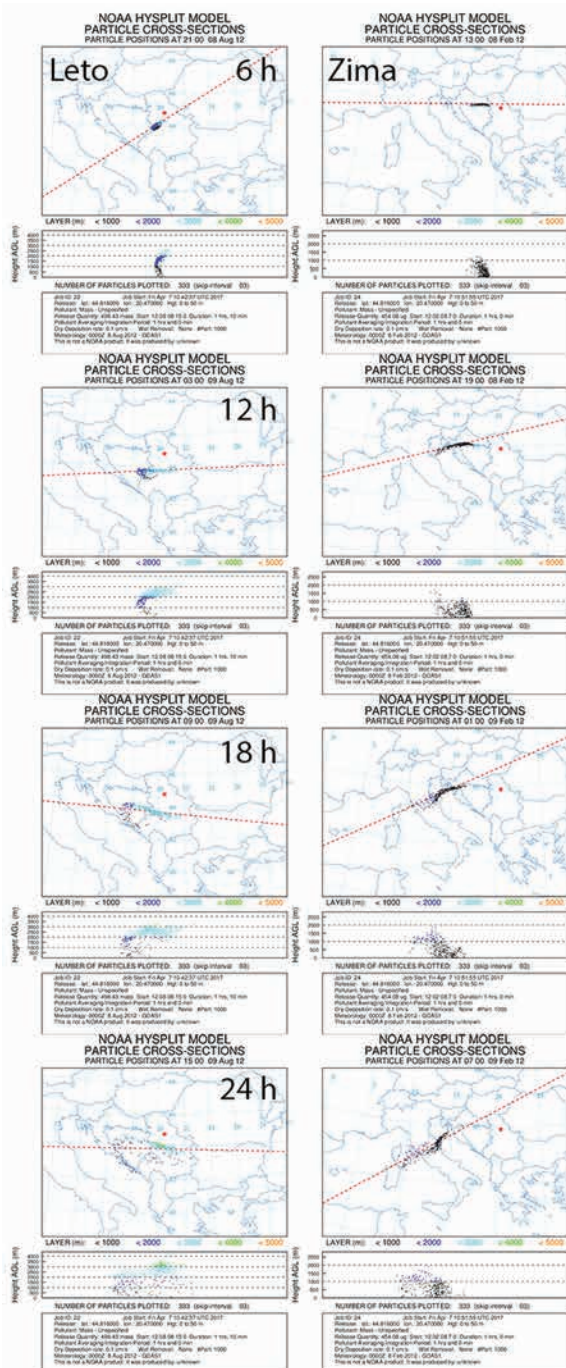
$$dc = m(\pi r^2 dz)^{-1}$$

Ovaj postupak se ponavlja za svaku komponentu brzine vetra, dok se za vertikalnu komponentu koristi dodatni član koji kompenzuje akumulaciju čestica u uslovima slabog vetra i slabo izražene turbulencije, koji se javljaju u neposrednoj blizini tla.

PRIMER

Na slici 6.44 prikazane su koncentracije PM_{10} u sloju od 0 do 100 m dobijene pomoću modela HYSPLIT za 8. avgust 2012. godine u 15 h (letnji period) i 8. februar u 7 h (zimski period). Ovi dani su izabrani pošto su tada zabeležene najveće koncentracije čestičnog zagađenja. Integracija je vršena svakog sata. Za letnji period koncentracije su prikazane na svakih sat vremena, dok su za zimski period prikazane na svakih šest sati.

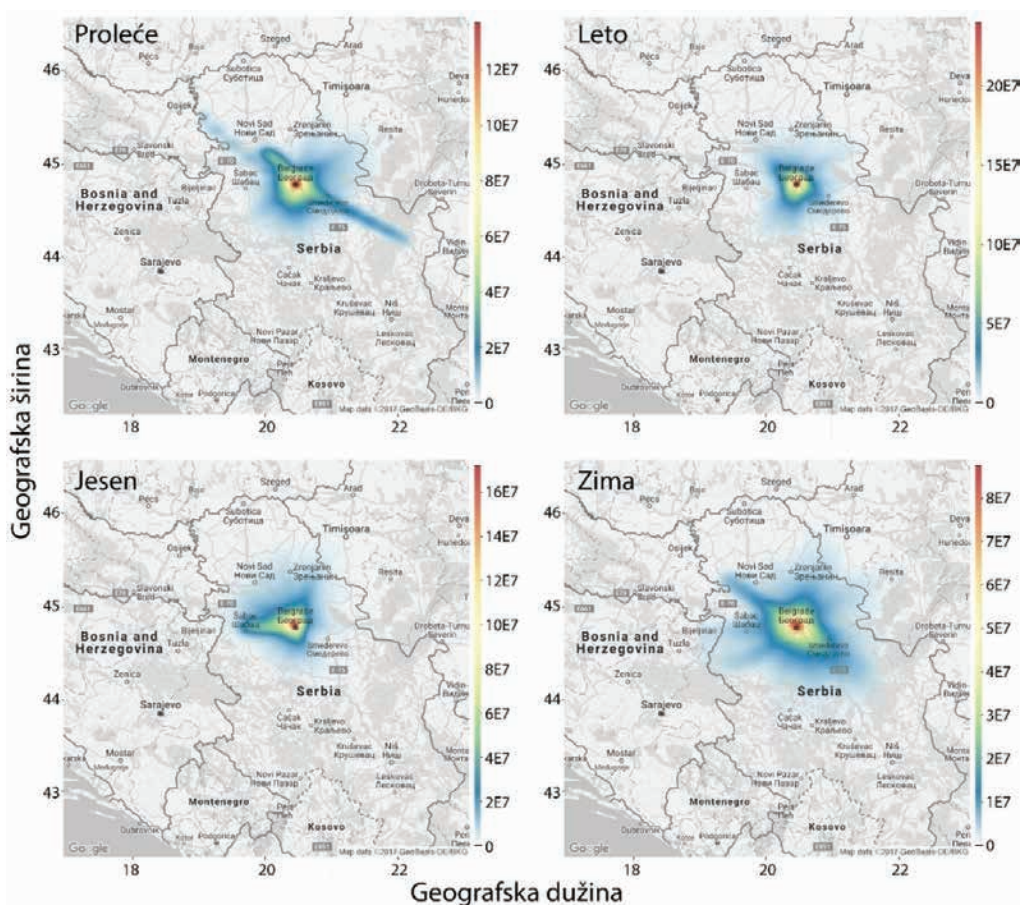
Slika 6.44. Horizontalna i vertikalna raspodela disperzije PM_{10} u sloju od 0 do 100 m za 8. avgust (levo) i 8. februar (desno) 2012. godine



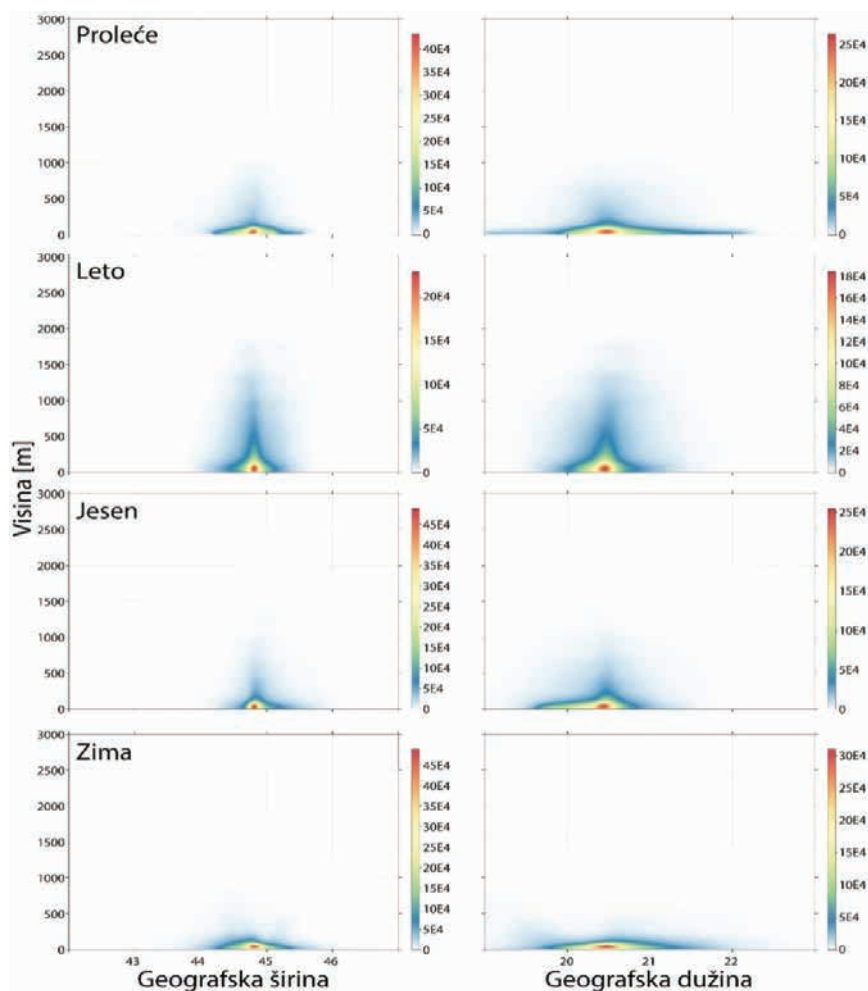
U letnjem periodu, pri visini graničnog sloja od oko 1500 m, čestice dostižu visine do 3500 m, dok pri visini graničnog sloja od oko 600 m, zimi ostaju u sloju do 1500 m. Letnja konvekcija tokom sunčanih dana i izražene nestabilnosti omogućava vertikalnu difuziju, dok zimska inverzija u graničnom sloju ograničava vertikalno kretanje, povećavajući nivo zagađenja.

Različita gustina čestica prikazana na slici 6.45 rezultat je različitog širenja zagađujućih materija tokom leta i zime. Leti, zbog veće nestabilnosti i zagrevanja, čestice dospevaju na veće visine, dok zimi ostaju u tanjem sloju, šireći se više horizontalno, što se jasno uočava na slici 6.46. U takvim uslovima, kada je disperzija zagađujućih materija veća u horizontalnom nego u vertikalnom pravcu, prizemne koncentracije mogu značajno porasti.

Slika 6.45. Horizontalni presek disperzije PM_{10} po sezonama



Slika 6.46. Vertikalni presek disperzije PM_{10} u zavisnosti od geografske širine (levo) i geografske dužine (desno)



Weather research and forecasting model

Weather research and forecasting model (WRF) je napredni numerički model razvijen za atmosfersko modeliranje, koji se koristi za istraživanje i operativnu prognozu vremena. Dizajniran je kao fleksibilan, skalabilan model sposoban za simulaciju atmosferskih procesa na različitim prostornim skalama, od nekoliko metara do hiljada kilometara, kao i na različitim vremenskim skalama, od nekoliko minuta do nekoliko nedelja. Model je moguće koristiti za širok spektar primena, koje uključuju kratkoročne prognoze vremena, regionalne klimatske simulacije, istraživanje atmosferske dinamike i simulacije disperzije zagađujućih materija.

WRF podržava više fizičkih parametarizacija koje omogućavaju izbor različitih opcija za simulaciju procesa poput mikrofizike oblaka, zračenja, turbulentnog mešanja, interakcija sa površinama i drugih relevantnih atmosferskih fenomena. Ključne komponente modela uključuju simulaciju dinamiku atmosfere primenom nelinearnih jednačina koje opisuju cirkulaciju vazduha, prenos toplote, vlage i momenta u atmosferi, kao i parametrizaciju fizičkih procesa za simulaciju oblaka, padavina, zračenja, turbulentnog mešanja i drugih procesa. Zbog svojih performansi i fleksibilnosti, WRF je široko prihvaćen u naučnoj zajednici i često se koristi za napredne atmosferske studije, istraživanje klimatskih promena, razvoj novih tehnika za prognozu vremena i procenu uticaja zagađenja vazduha na zdravlje ljudi i životnu sredinu.

6.9. STATISTIČKA ANALIZA UTICAJA FAKTORA ŽIVOTNE SREDINE NA ZDRAVLJE LJUDI I MORTALITET

Uticaj životne sredine na zdravlje ljudi veoma je teško modelirati. I životna sredina i čovek su kao nezavisni sistemi izuzetno kompleksni. Na njih se nado-vezuje i njihov odnos koji dodaje neverovatan broj međusobnih interakcija, kao i interakcije sa drugim sistemima.

Postoji mnogo pristupa modeliranju ovih veza, od kojih u ovoj knjizi ilustrujemo dva. Prvi predstavlja opšti, veoma pojednostavljen i grub pristup za procenu zdravstvenih rizika agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (US/Cal EPA). Opšte odnose pa i uticaje u kompleksnim sistemima veoma je teško modelirati, tako da je pitanje u kojoj meri rezultate ovakvog pristupa treba uzimati i kao indikatore. Drugi pristup predstavlja sofisticiraniji model konkretizovan na utvrđivanje uticaja temperature na stopu smrtnosti uz uključivanje odloženih efekata i uticaja zagađenja vazduha. Najsoficiraniji pristup morao bi pre svega da uključi veoma široku kontekstualizaciju uticaja uključivanjem veoma velikog broja varijabli koje opisuju stanje životne sredine s jedne, kao i stanje zdravlja ljudi, s druge strane, a zatim i primenu najsoficiranijih metoda veštačke inteligencije za modeliranje i interpretaciju dobijenih rezultata.

6.9.1. Procena zdravstvenih rizika

US EPA i CalEPA predstavljaju metode za izračunavanje kancerogenog i nekancerogenog zdravstvenog rizika usled prisustva zagađujućih materija u vazduhu.

Kancerogeni zdravstveni rizik

Kancerogeni zdravstveni rizik može se kvantifikovati vrednostima ILCR (*incremental lifetime cancer risk*, US EPA) ili CR (*cancer risk*, CalEPA). Oba parametra predstavljaju verovatnoću da pojedinac razvije kancerogeno oboljenje kao rezultat izloženosti jednoj kancerogenoj materiji. Može se definisati i CCR (*cumulative cancer risk*) koji predstavlja izloženost većem broju zagađujućih materija ili putem više načina izloženosti.

Izloženost zagađenju može se izraziti parametrom CDI (*chronic daily intake*) kao:

$$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

gde je C koncentracija zagađujuće materije u vazduhu (ng m^{-3}), IR prosečna količina udahnutog vazduha ($20 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$), EF učestalost izloženosti (350 dana godišnje), ED trajanje izloženosti (30 godina), BW prosečna telesna masa (70 kg) i AT prosečan životni vek (70 godina).

Na osnovu vrednosti CDI i kancerogenog potencijala zagađujuće materije SF (*slope factor*), ILCR se može izračunati kao:

$$ILCR = CDI \times SF \times 10^{-6}$$

Vrednost ILCR od 10^{-6} označava verovatnoću da jedan od milion ljudi oboli od kancera, što se smatra minimalnim rizikom, dok se nivo iznad 10^{-4} smatra visokim i potencijalno štetnim.

CalEPA naglašava kancerogeni efekat zagađujućih materija na različite starosne grupe, sa posebnim fokusom na osetljive populacije. Ona uzima u obzir faktore poput količine udahnutog vazduha i osetljivosti u odnosu na godine za šest starosnih grupa: poslednje tromesečje trudnoće, 0-2 godine, 2-9, 2-16, 16-30 i 16-70 godina. Kancerogeni rizik za ove grupe izračunava se kao:

$$CR = DI \times CP \times ASF \times FAH \times \frac{ED}{AT}$$

gde su *DI* dnevni unos zagađujuće materije, *CP* kancerogeni potencijal, *ASF* faktor osetljivosti, *FAH* vreme provedeno u zatvorenom prostoru, *ED* trajanje izloženosti i *AT* prosečan životni vek.

Ukupni kancerogeni rizik (TCR) za populaciju izračunava se sabiranjem vrednosti CR za svaku starosnu grupu.

Vrednosti potrebnih parametara za izračunavanje mogu se preuzeti iz baza IRIS (US EPA *Integrated Risk Information System*), RAIS (*Risk Assessment Information System*) i CalEPA (*CalEPA chemical toxicity databases*).

Nekancerogeni zdravstveni rizik

Potencijalni nekancerogeni efekti se u obe primenjene metode mogu opisati vrednošću HQ (*hazard quotient*). Ovaj parametar predstavlja odnos između izmerene koncentracije zagađujuće materije u vazduhu i koncentracije za koju je na osnovu epidemioloških studija poznato da ne izaziva štetne efekte. Vrednosti HQ veće od jedan ukazuju na to da je koncentracija date zagađujuće materije iznad prihvatljivog nivoa, što može imati negativan uticaj na zdravlje.

Kada se analiziraju efekti više zagađujućih materija ili različiti oblici izloženosti (udisanje, oralno, dermalno), zbir pojedinačnih HQ vrednosti izražava se kao HI (*hazard index*). Granična vrednost ovog indeksa je takođe jedan. Vrednosti veće od jedan ukazuju na povećan rizik od štetnih efekata.

6.9.2. Procena stope smrtnosti

Uticaj na zdravlje ljudi koji izazivaju ekstremni temperaturski događaji i zagađenje vazduha, predstavljaju značajan problem za društvo, posebno za sve veći broj stanovnika u urbanim sredinama širom sveta. Dok većina studija koje istražuju negativne zdravstvene efekte zagađenja vazduha uzima u obzir temperaturu kao konfaunder¹⁹, efekti zagađenja u studijama koje se bave odnosom između temperature i smrtnosti su veoma retko uključeni. S obzirom na aktuelne klimatske promene i projekcije globalnog zagrevanja između 1,8 i 4,0°C do 2100. godine, društvu je neophodna nesamerljivo bolja procena zavisnosti smrtnosti od temperature.

19 Konfaunder predstavlja varijablu koja je povezana i sa nezavisnom i sa zavisnom promenljivom, a pritom može narušiti ili maskirati stvarni odnos između varijabli.

Da bi se ispitili odnosi između ekoloških stresora i smrtnosti, potrebno je uključiti temperaturu i druge faktore koji utiču na smrtnost, poput godišnjeg doba ili dana u nedelji, ali i zagađujuće materije, poput PM_{10} , NO_2 , SO_2 i čađi. Takođe, uticaj temperature na smrtnost pokazuje kašnjenje u vremenu (*lag*) zbog efekta žetve (*harvesting effect*), pri kom dolazi do privremenog porasta smrtnosti kod najranjivijih populacija, nakon čega sledi period njenog smanjenja. Za modeliranje navedenih odnosa koriste se distribuirani lag nelinearni modeli i kvazi-Poasonova regresija, prilagođeni da uključe i odložene efekte.

Distribuirani lag nelinearni model

Distribuirani lag nelinearni model (*distributed lag nonlinear model* – DLNM) predstavlja okvir za modeliranje složenih odnosa između izloženosti određenim faktorima životne sredine (kao što je temperatura) i zdravstvenih ishoda (poput smrtnosti), u kojima su efekti nelinearni i odloženi u vremenu. Model određuje nelinearnu vezu između prediktora (temperature) i ishoda (smrtnosti) u dva pravca: u rasponu vrednosti izloženosti koncentracijama zagađujućih materija i kašnjenju ispoljavanja efekata u vremenu. Najvažniji elementi modela uključuju kvadratne B-splajнове korišćene za modeliranje veze između temperature i smrtnosti, sa čvorovima postavljenim na 10, 75 i 90% kvantil raspodele temperature, zatim prirodni kubni B-splajnovi korišćeni za modeliranje kašnjenja pri čemu su čvorovi jednako raspoređeni na logaritamskoj skali, što omogućava praćenje odloženog efekta temperature tokom maksimalnog kašnjenja, kao i *cross-basis* funkcije koja omogućava istovremeno procenjivanje nelinearnog efekta temperature i njegovog odloženog uticaja na smrtnost, pružajući sveobuhvatan uvid u to kako njene promene utiču na zdravlje tokom vremena. Takođe, model uključuje i kontrolu sezonskih i dugoročnih efekata putem prirodnih kubnih splajnova vremena, sa 8 stepeni slobode godišnje, kao i kategorijske varijable za dan u nedelji.

Kvazi-Poasonova regresija

Kvazi-Poasonova regresija koristi se za procenu dnevne stope smrtnosti uzimajući u obzir temperaturu, vreme i dan u nedelji, u slučajevima prekomerne disperzije podataka, kada je varijansa veća od srednje vrednosti podataka. Osnovni Kvazi-Poasonov model u kome temperatura predstavlja varijablu od interesa sa prilagođavanjem dugoročnim trendovima, sezonalnosti i danu u nedelji, specificira se kao:

$$E(Y_t) = e^{a + \beta T_t + NS(time, df) + \lambda DOW_t}$$

gde je $E(Y_t)$ očekivana dnevna stopa smrtnosti na dan t , α odsečak, $T_{t,l}$ matrica varijabli dobijena transformacijama srednje dnevne temperature, β vektor koeficijenata za $T_{t,l}$, l lag, $NS(time, df)$ prirodni kubni splajn vremena, DOW_t i λ varijable koje reprezentuju dan u nedelji i odgovarajući vektor koeficijenata.

Finalni model dobija se kroz iterativni postupak koji uključuje procenu odloženih i kumulativnih efekata zagađujućih materija na smrtnost. Polazeći od osnovnog, u narednim koracima model se proširuje uključivanjem relativnog rizika koji potiče od zagađujućih materija u različitim vremenskim okvirima korišćenjem jednostavnog pokretnog proseka (SMA). Kako bi se identifikovali periodi tokom kojih zagađujuće materije imaju najveći uticaj na smrtnost, SMA se procenjuje za svaku materiju u dužem periodu (do 60 dana, na primer). Kada zagađujuća materija dovede do povećanja smrtnosti, sledeće smanjenje smrtnosti nastaje zbog efekta žetve, kada su najranjiviji pojedinci već stradali. Zagađujuća materija sa najjasnijim obrascem ovog efekta uključuje se u model sa dve SMA vrednosti (*min*, *max*) koje opisuju kumulativne efekte konkretne zagađujuće materije u različitim vremenskim okvirima. Identifikovane vrednosti predstavljaju prosečne koncentracije zagađujućih materija u danima kada je njihov efekat na smrtnost bio najizraženiji. Na primer, $SMA(SO_2)_{t,19}$ predstavlja kumulativni efekat koncentracije SO_2 u periodu od 19 dana.

Finalni model bi za dve zagađujuće materije, na primer SO_2 i PM_{10} mogao specificirati kao:

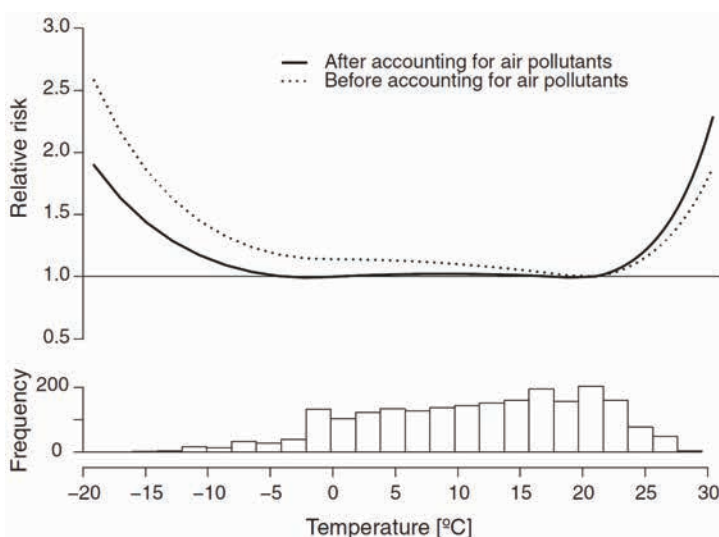
$$E(Y_t) = e^{\alpha + \beta T_{t,l} + NS(time, df) + \lambda DOW_t + \gamma_1 SMA(SO_2)_{t, minlag_{SO_2}} + \gamma_2 SMA(SO_2)_{t, maxlag_{SO_2}} + \gamma_3 SMA(PM_{10})_{t, minlag_{PM_{10}}} + \gamma_4 SMA(PM_{10})_{t, maxlag_{PM_{10}}}}$$

gde γ_1 do γ_4 predstavljaju koeficijente koji određuju jačinu i pravac efekta zagađujuće materije u specifičnom vremenskom okviru.

Dakle, DLNM i Kvazi-Poasonova regresija imaju komplementarne uloge u analizi stope smrtnosti. DLNM se koristi za modeliranje odloženih i nelinearnih efekata temperature na smrtnost, dok Kvazi-Poasonov model rešava prekomernu disperziju u podacima o smrtnosti. Kombinacija ova dva modela pruža robusni okvir za istraživanje smrtnosti povezane sa temperaturom, uzimajući u obzir potencijalne konfaundere poput zagađujućih materija u vazduhu. Takođe, ova kombinacija kvantifikuje razlikuju kratkoročnih akutnih efekata, kao što su toplotni talasi, od dugoročnih kumulativnih efekata, poput stalne izloženosti zagađenju, pružajući detaljniji uvid u doprinos ekoloških faktora stopi smrtnosti u urbanim sredinama.

Nakon prilagođavanja za kumulativne efekte zagađenja vazduha, može se pokazati da je procenjeni rizik od smrtnosti povezan sa temperaturom značajno smanjen, odnosno da je optimalni temperaturni raspon relativno širok, što naglašava važnost uzimanja u obzir zagađenja vazduha prilikom procene uticaja temperature na zdravlje, slika 6.47.

Slika 6.47. Kumulativna kriva izloženost-odgovor nakon uračunavanja efekata zagađenja vazduha i raspodele temperature



6.10. REGRESIJA

Regresija je statistička metoda koja se koristi za modeliranje odnosa između zavisne varijable (ciljne promenljive) i jedne ili više nezavisnih varijabli (prediktora). Njome se utvrđuje zavisnost promene ciljne promenljive u zavisnosti od promena prediktora. Postoji nekoliko vrsta regresionih analiza, od kojih su najpoznatije linearna regresija i logistička regresija koje ćemo nešto detaljnije razmotriti.

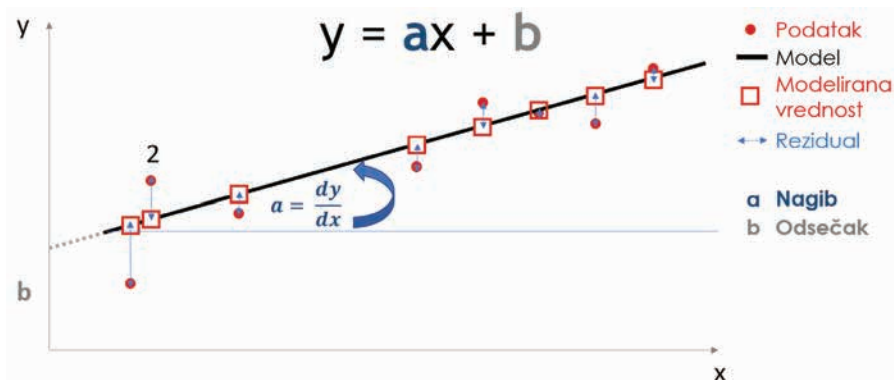
Linearna regresija

Linearna regresija predstavlja najjednostavniji i najčešće korišćeni model u statistici. Ova metoda pretpostavlja linearnu vezu između zavisne varijable Y i nezavisnih varijabli X . Model linearne regresije za jednu nezavisnu varijablu može se zapisati kao:

$$Y=aX+b+\epsilon$$

gde je a koeficijent pravca prave (nagib), b odsečak na y-osi kada je $X=0$, a ϵ greška modela (rezidual), slika 6.48.

Slika 6.48. Koncept linearne regresije



Cilj linearne regresije predstavlja izračunavanje optimalne vrednosti parametara a i b , tako da model minimizira grešku. U tu svrhu najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata:

$$m \sum_{i=1}^n (Y_i - (aX_i + b))^2$$

gde je n broj podataka.

Ovaj model se može generalizovati i na k nezavisnih varijabli (višestruka linearna regresija) kao:

$$Y=a_1X_1+a_2X_2+\dots+a_kX_k+b+\epsilon$$

Iako je primena linearne regresije moguća praktično nad svim numeričkim podacima iz oblasti životne sredine, kompleksnost fenomena i ambijenata u kome se oni odigravaju nameće upotrebu drugih oblika regresije koji su u stanju da utvrde nelinearne odnose između varijabli.

Logistička regresija

Logistička regresija koristi se kada je ciljna promenljiva binarna, tj. može imati samo dve vrednosti, najčešće 0 i 1. Dok linearna regresija modelira kvantitativne podatke, logistička regresija je pogodna za kategorijske i koristi u klasifikacionim problemima. Umesto direktnog modeliranja ciljne promenljive kao linearne funkcije prediktora, logistička regresija modelira verovatnoću da ciljna promenljiva pripada jednoj od kategorija, na primer, verovatnoću da Y pripada klasi 1. Matematički se može izraziti kao:

$$P(Y = 1|X) = \frac{1}{1 + e^{-(aX+b)}}$$

Ovaj izraz predstavlja logističku funkciju, koja osigurava da je predviđena vrednost verovatnoća i da se nalazi u intervalu između 0 i 1. Funkcija se može transformisati u oblik *logit* funkcije:

$$\log\left(\frac{P(Y = 1|X)}{1 - P(Y = 1|X)}\right) = aX + b$$

gde $\left(\frac{P}{1-P}\right)$ predstavlja logaritam odnosa verovatnoće da je $Y=1$ i verovatnoće da je $Y=0$.

Cilj logističke regresije predstavlja izračunavanje parametara a i b koji maksimiziraju verovatnoću (*likelihood*) posmatranih vrednosti ciljne promenljive. Ova optimizacija se obično postiže korišćenjem metode maksimalne verodostojnosti (*maximum likelihood estimation* – MLE).

Kao i linearna regresija, logistička regresija može biti proširena na više nezavisnih varijabli:

$$P(Y = 1|X) = \frac{1}{1 + e^{-(a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_kX_k + b)}}$$

Ako govorimo o potencijalnoj primeni ove metode, kao i u slučaju linearne regresije, logistička regresija nije u stanju da utvrdi nelinearne veze kompleksnih fenomena u životnoj sredini i ambijenata u kojima se odigravaju.

Nelinearna regresija

Nelinearna regresija koristi se kada odnos između ciljne promenljive i prediktora nije linearan, a može se opisati nelinearnim funkcijama, kao što su polinomi, eksponencijalne, logaritamske i trigonometrijske funkcije. Opšti oblik nelinearne regresije može se prikazati kao:

$$Y=f(X,\beta)+\epsilon$$

gde je $f(X, \beta)$ nelinearna funkcija koja zavisi od parametra β .

Nelinearna funkcije se može izraziti u obliku polinoma stepena k kao:

$$Y=\beta_0+\beta_1x+\beta_2x^2+\beta_3x^3+\beta_kx^k+\epsilon$$

ili u obliku segmentiranih polinoma (*spline*), gde se prostor, podeljen na čvorove, modelira posebnim polinomom u svakom segmentu:

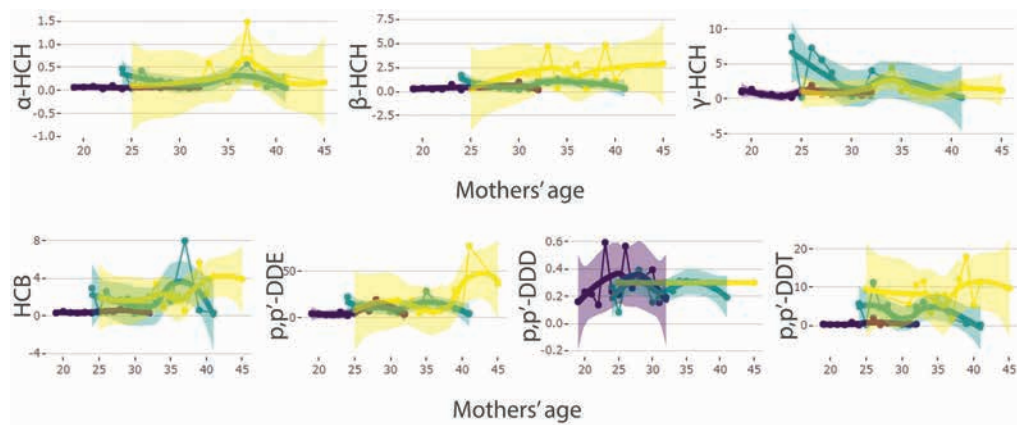
$$Y = \sum_{i=1}^k B_i(X) \beta_i + \epsilon$$

gde su $B_i(x)$ odgovarajući polinomi unutar segmenata.

Ova činjenica omogućava fleksibilniji model od polinomske regresije, pošto se odnosi u podacima menjaju u različitim intervalima, dok model ostaje gladak.

Bez ulaska u detalje, nelinearna funkcije se može izraziti u obliku mnogih drugih veza, poput logaritamske (*Poisson regression*), različitih oblika funkcija koje koriste takozvanu penalizaciju (*ridge regression*, *lasso regression*, *elastic net regression*), funkcija koje prilagođavaju model podacima u svakom lokalnom delu skupa podataka (*locally estimated scatterplot smoothing – loess*, *lowess*, *quadratic loess*, *robust loess*, *multivariate loess* i *kernel loess*), kao i nelinearnih funkcija za svaki od prediktora (*generalized additive models – GAM*). Na slici 6.49 dat je primer loess regresije.

Slika 6.49. Primer procene nivoa organohlorinih jedinjenja u majčinom mleku za jedno (ljubičasta), dva (zeleno) i tri (žuta) rođena deteta



6.11. VEŠTAČKA INTELIGENCIJA

U ovoj knjizi je mnogo puta naglašeno da je razumevanje određenog fenomena neraskidivo povezano sa sagledavanjem konteksta u kojem se pojavljuje. Veštačka inteligencija može imati ključnu ulogu u svim oblastima životne sredine u kojima se prikupljaju velike količine podataka visokog kvaliteta na naučno utemeljen način, omogućavajući adekvatno oslikavanje konteksta iz različitih uglova. Posebno je izražena njena primena u oblasti kvaliteta vazduha, gde podaci obuhvataju dovoljnu prostorno-vremensku rezoluciju, što podrazumeva veliki broj mernih mesta sa satnom rezolucijom merenja. Ovi podaci uključuju koncentracije zagađujućih materija, meteorološke parametre, podatke o mobilnosti ljudi, kao i brojne političke i ekonomske pokazatelje koji odražavaju dinamiku društva i njen uticaj na kvalitet vazduha. S druge strane, ogroman napredak u obradi slika i uvođenje takozvanih *multiheaded* modela otvara vrata primeni i nad podacima koji nisu tabelarni.

Primarni nivo primene veštačke inteligencije u oblasti životne sredine obuhvata kontekstualizaciju fenomena, kao što je koncentracija određenih zagađujućih materija u vazduhu, na primer, korišćenjem algoritama mašinskog učenja. Na ovaj način, dobijeni modeli omogućavaju prepoznavanje obrazaca i identifikaciju ključnih faktora koji utiču na promene u kvalitetu vazduha. Za objašnjenje dobijenih modela primenjuju se metode interpretacije koje omogućavaju uvid

u faktore koji su doprineli konačnim rezultatima. Nakon toga slede različiti pristupi brušenja i generalizacije rezultata poput redukcije dimenzionalnosti i klasterizacije rezultata metoda interpretacije.

Srednji nivo primene podrazumeva simulacije putem virtuelnih eksperimenata što omogućava razvoj scenarija i preskripciju. Na taj način može se obezbediti osnova za preventivu ili planski nastup u cilju smanjenja koncentracija zagađujućih materija.

Finalni nivo obuhvata integraciju podataka, rezultata i njihovih interpretacija sa pretreniranim jezičkim modelima. Ova integracija omogućava ne samo naprednije istraživanje kroz interaktivnu komunikaciju na prirodnom jeziku, već i mogućnost da se složeni nalazi generalizuju, pojednostave i prilagode potrebama donosioca odluka. Na ovaj način, složene analize i predikcije postaju pristupačnije ne samo naučnicima i analitičarima, već i širem krugu korisnika, omogućavajući bolje razumevanje i primenu u okviru politika zaštite životne sredine i upravljanja resursima.

6.11.1. Mašinsko učenje

Mašinsko učenje predstavlja oblast veštačke inteligencije koja se bavi razvojem algoritama sposobnih da uče iz podataka, identifikuju obrasce i donose odluke bez eksplicitnog programiranja. Ova oblast je značajno evoluirala tokom poslednjih decenija, delimično zahvaljujući ekspanziji snage računara, delimično i zbog dostupnosti velikih skupova podataka za obučavanje, generisanih u različitim sferama. U kontekstu nauke o životnoj sredini, mašinsko učenje pruža velike mogućnosti za analizu kompleksnih, široko kontekstualizovanih fenomena, obezbeđujući precizne modele za predikciju, optimizaciju i donošenje odluka.

Vrste mašinskog učenja

Mašinsko učenje može se klasifikovati u četiri osnovne kategorije: nadgledano, nenadgledano i polunadgledano učenje, kao i učenje potkrepljivanjem. Ove kategorije predstavljaju različite načine na koje algoritmi pristupaju analizi podataka i rešavanju problema.

Nadgledano učenje (*supervised learning*) vrši se na osnovu označenog skupa podataka. Ovi skupovi sadrže ulazne podatke u paru sa odgovarajućim izlazima (ciljna varijabla, tj. oznaka) koji predstavljaju cilj predikcije. Dakle, ishod procesa obučavanja jeste nalaženje veze između njih kako bi se na osnovu poznatih ulaza mogli predvideti izlazi u novom skupu podataka.

Problem predikcije ciljne promenljive može se postaviti u kontekstu regresije, kada je ciljna promenljiva neprekidna, ili klasifikacije, kada je ciljna promenljiva kategorijska. Teorijski, zadatak nadgledanog učenja predstavlja minimiziranje rizika, gde rizik predstavlja očekivanu grešku modela, odnosno razliku između predikcije i stvarnih vrednost za sve moguće kombinacije ulaza i izlaza. Proces minimiziranja greške izborom parametara modela predstavlja prilagođavanje modela podacima. Primer klasifikacije mogla bi biti predikcija prekoračenja granične vrednosti čestičnog zagađenja u vazduhu, dok bi primer regresije moglo biti predviđanje koncentracije toluena u padavinama na bazi fizičko-hemijskih karakteristika kišnice i meteoroloških parametara. U složenijim scenarijima, izlaz može biti višedimenzionalan ili se ulazi i izlazi ne predstavljaju numerički, već sekvencama ili grafovima.

S druge strane, nenadgledano učenje (*unsupervised learning*) podrazumeva da ulazni podaci nemaju unapred definisane oznake. U tom smislu, željeni rezultat je nepoznat, a cilj obučavanja predstavlja identifikacija struktura, obrazaca ili grupa unutar podataka. Ovaj pristup koristi se za klasterizaciju i redukciju dimenzionalnosti.

Polunadgledano učenje (*semi-supervised learning*) predstavlja koncept mašinskog učenja koji kombinuje mali skup označenih sa velikim skupom neoznačenih podataka kako bi se performanse modela poboljšale. Model koristi informacije iz malog broja označenih primera za obučavanje, dok neoznačeni podaci pomažu u poboljšanju generalizacije i tačnosti predikcija. U osnovi, pretpostavlja se da su slični podaci prostorno bliži i pripadaju istoj klasi, što omogućava korišćenje i označenih i neoznačenih podataka za pronalaženje granica između klasa. Postoji nekoliko metoda polunadgledanog učenja, kao što je *self-training*, u kojoj se model prvo obučava na označenim podacima, a zatim koristi sopstvene predikcije na neoznačenim podacima kako bi proširio svoj skup označenih podataka. Generativni modeli dodeljuju verovatnoće klasama na osnovu statističkih modela, dok druga vrsta obučavanja generalizuje klasifikator na neoznačene podatke, pretpostavljajući grupisanje podataka unutar klasa. Na primer, ova vrsta učenja nalazi primenu u analizi podataka o kvalitetu vazduha, kada se mali broj tačaka sa označenim podacima o zagađenju koristi za obučavanje modela, dok se neoznačeni podaci sa drugih senzora uključuju u proces za bolju generalizaciju.

Učenje potkrepljivanjem (*reinforcement learning*) koristi se kada je potrebno rešiti problem kroz niz akcija koje dovode do rešenja. Sistem koji se obučava, agent, opaža stanje okruženja, preduzima akcije i dobija nagrade u vidu numeričkih vrednosti, pri čemu prelazi u novo stanje. Cilj obučavanja je naučiti

optimalnu politiku, odnosno preslikavanje stanja u akcije koje maksimiziraju dugoročnu nagradu. Ključna razlika u odnosu na nadgledano učenje je ta što nije unapred poznato koja akcija je bila ispravna. Na primer, kod autonomne vožnje agent opaža saobraćaj i donosi odluke o smeru i brzini automobila, nagrađujući se za pređeni put ili izbegnute nesreće, dok uči optimalne akcije iz iskustva.

Broj načina realizacije ovih koncepata u vidu konkretnih algoritama je ogroman. U nastavku knjige biće izloženi samo neki od osnovnih ili onih koji se zbog svojih performansi često primenjuju.

6.11.11. Najbliži susedi

K-nearest neighbors

K-nearest neighbors (k-NN) je metoda mašinskog učenja koja spada u klasu nadgledanog učenja i koristi se za kako za klasifikaciju, tako i za regresiju. Za svaki novi podatak algoritam pronalazi k najbližih tačaka u prostoru podataka na osnovu izabrane metrike udaljenosti (euklidska, na primer). Zatim se klasifikacija vrši prema većinskoj klasi najbližih suseda. U slučaju regresije, predviđena vrednost je prosečna vrednost k najbližih suseda. Metod je jednostavan za implementaciju, ali zahteva veliku računarsku snagu za skupove podataka sa velikim brojem dimenzija, pošto izračunava udaljenost između svakog para podataka. Takođe, osetljiv je na izbor parametra k , jer premali može rezultirati prekomernim prilagođavanjem.

Fuzzy nearest neighbor

Fuzzy nearest neighbor (Fuzzy-NN) je proširenje standardnog k-NN koje uključuje fuzzy logiku za donošenje odluka o klasifikaciji. Svaki podatak ne pripada tačno jednoj klasi, već može biti deo većeg broja klasa sa određenim stepenom verovatnoće ili pripadnosti, što predstavlja ključni koncept fuzzy logike. Dakle, svaki sused unosi doprinos klasifikaciji u skladu sa svojom udaljenošću od tačke koja se klasifikuje. Umesto da svaka tačka bude strogo pridružena jednoj klasi, svaka klasa dobija težinu ili verovatnoću zasnovanu na tome koliko je tačka blizu nje. Ovaj pristup omogućava bolju obradu podataka koji nisu jasno razgraničeni između klasa, što je često slučaj u skupovima sa visokom dimenzionalnošću.

6.11.12. Stabla odlučivanja

Stabla odlučivanja predstavljaju vrstu algoritama nadgledanog mašinskog učenja koja se koristi za klasifikaciju i regresiju. Njihova osnovna karakteristika je hijerarhijska struktura koja se sastoji od korenskog čvora, grana i listova, pri čemu svaki unutrašnji čvor predstavlja uslov, a svaki list krajnji rezultat, odnosno predikciju. Stabla odlučivanja imaju važnu ulogu u analizi podataka jer omogućavaju lako interpretiranje odluka i pomažu u identifikaciji ključnih karakteristika koje utiču na finalni ishod.

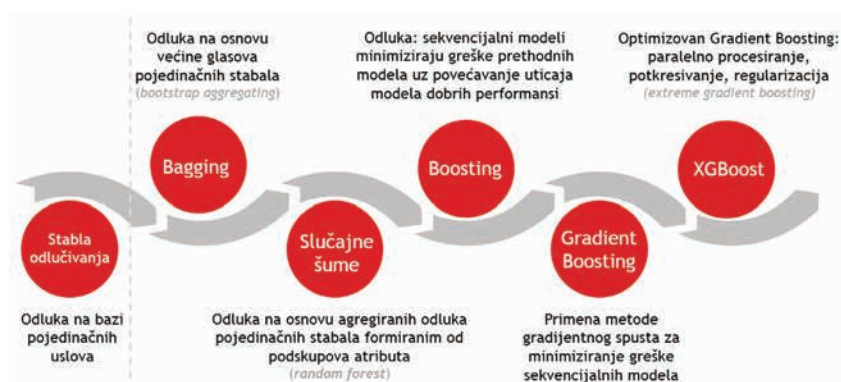
Stablo odlučivanja funkcioniše na principu rekurzivne podele skupa podataka u sve homogenije podskupove na osnovu uslova. Ova podela zasniva se na merama homogenosti kao što su varijansa (u regresiji), odnosno entropija ili Gini koeficijent (u klasifikaciji).

Kada je reč o regresiji, stablo odlučivanja koristi varijansu kao kriterijum za grananje. Varijansa u ovom kontekstu meri disperziju stvarnih vrednosti ciljne promenljive unutar svakog podskupa. Cilj algoritma je izbor onog grananja koje minimizira varijansu, odnosno smanjuje grešku predikcije.

6.11.13. Ansambli stabala odlučivanja

Ansambli stabala odlučivanja predstavljaju pristup koji kombinuje više stabala odlučivanja za poboljšanje performansi modela u odnosu na pojedinačno stablo, slika 6.50. Osnovna ideja je da kombinovanjem više stabala, ansambl može smanjiti prekomerno prilagođavanje i grešku, a ujedno povećati robusnost modela. Postoje različite tehnike udruživanja stabala odlučivanja, koje uključuju *bagging*, *boosting* i *stacking*.

Slika 6.50. Primer ansambala stabala odlučivanja



Bagging

Jedna od najpoznatijih tehnika udruživanja u ansambl je *bagging* (*bootstrap aggregating*). Ova tehnika podrazumeva da se više stabala odlučivanja obučava na različitim podskupovima podataka, a krajnja predikcija formira kao srednja vrednost predikcija (u regresiji) ili većinska odluka (u klasifikaciji) svih stabala. Algoritam slučajna šuma (*random forest*) predstavlja najpoznatiji primer ove tehnike, gde se u procesu obučavanja uz podskupove uzoraka koristi i podskup varijabli kako bi se dodatno smanjila korelacija između stabala ansambla.

Extreme trees (Extra trees)

Extreme trees predstavljaju metodu sličnu metodi slučajnih šuma, uz razliku u načinu podele pri grananju. Za razliku od metode slučajne šume koja bira podelu u čvoru optimizacijom, *extreme trees* je bira nasumično. Ova slučajnost može pomoći u smanjenju varijanse i povećanju brzine obučavanja, posebno kada se radi sa velikim skupovima podataka.

Boosting

Boosting predstavlja tehniku udruživanja u ansambl koja obučava stabla sekvencijalno, pri čemu se svako naredno stablo obučava tako da ispravi greške prethodnog. Ovako dobijeni modeli poznati su po svojoj tačnosti i performansama, posebno u situacijama kada je potrebno modelirati složene odnose u podacima.

Gradient boosting

Gradient boosting (GBM) kombinuje slabije modele za kreiranje snažnijeg prediktivnog modela. Osnovni koncept sastoji se u tome da se slabiji modeli iterativno obučavaju, gde svaki novi model pokušava da ispravi greške prethodnih modela. Na taj način, konačni model postaje neuporedivo tačniji i robusniji. *Gradient boosting* koristi gradijent greške, što znači da se tokom svakog koraka ažuriraju parametri modela kako bi se minimizirala greška predikcije, dok gradijent određuje smer i veličinu promene koja je potrebno učiniti kako bi se greška smanjila.

Model počinje jednostavnom predikcijom, na primer srednjom vrednošću ciljne promenljive u slučaju. U svakoj iteraciji izračunava se greška između stvarnih vrednosti i predikcija trenutnog modela. Zatim se na osnovu gradijenta funkcije gubitka (prvi izvod) određuje kako i koliko model treba prilagoditi. Novo stablo odlučivanja obučava se na greškama (reziduali) prethodnog modela, pokušavajući da predvidi preostale greške i poboljša tačnost modela. Nakon dodavanja novog stabla, model se ažurira uzimanjem u obzir novih predikcija

koje se prethodnim predikcijama dodaju uz malu težinu (*learning rate*). Ovaj proces se iterativno ponavlja dok se ne postigne zadovoljavajuća tačnost modela ili se dostigne unapred određeni broj iteracija.

Light gradient boosting machine

Light gradient boosting machine (LightGBM) predstavlja verziju boosting algoritma koja koristi metode bazirane na histogramima za ubrzavanje procesa obučavanja. Ovaj algoritam je efikasan za analizu velikih skupova podataka, jer smanjuje zahteve za upotrebom memorije računara i ubrzava proces obučavanja, posebno nad skupovima sa velikim brojem varijabli. Algoritam koristi tehniku *leaf-wise growth* za rast stabla tako da se na svakom koraku gradi čvor sa najvećom redukcijom greške, što omogućava bržu konvergenciju u poređenju sa tradicionalnim *level-wise* algoritmima.²⁰

Extreme gradient boosting

Extreme gradient boosting (XGBoost) je jedan od najpopularnijih i najkorišćenijih boosting algoritama. Zasniva se na gradient boosting tehnici sa dodatnim optimizacijama kao što su regularizacija (L1 i L2),²¹ paralelizacija i mogućnost ranog zaustavljanja (*early stopping*). Koristi određene aproksimacije kako bi ubrzao izračunavanje gradijenta, što algoritam čini veoma efikasnim za velike i kompleksne skupove podataka. Takođe, implementira mehanizme za rukovanje nedostajućim podacima i koristi različite funkcije gubitaka, što ga čini pogodnim za širok spektar problema primene.

CatBoost

CatBoost predstavlja još jednu varijantu *gradient boosting* algoritma, koja je posebno pogodna za podatke sa kategorijskim varijablama. Tradicionalni boosting algoritmi zahtevaju preprocesiranje kategorijskih varijabli primenom tehnika *label* ili *one-hot encoding*, na primer, dok *CatBoost* koristi poseban algoritam za njihovo uključivanje direktno u proces obučavanja. *CatBoost* koristi *ordered boosting*, koja eliminiše prekomerno prilagođavanje do kojeg može doći obučavanjem na malim skupovima podataka.

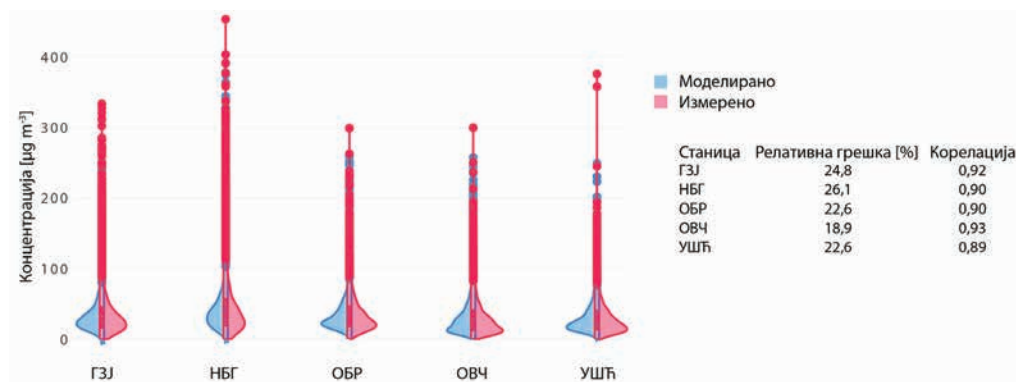
20 Osnovna karakteristika *level-wise* algoritama je da sistematski pretražuju svaki nivo hijerarhije pre dubljeg ulaska u strukturu.

21 L1 i L2 su tehnike regularizacije koje se koriste u mašinskom učenju i statistici za sprečavanje prekomernog prilagođavanja modela, odnosno situacije u kojoj model ima dobre performanse na podacima koji se koriste za obučavanje, ali loše generalizuje u slučaju novih, nepoznatih podataka. Oba tipa regularizacije dodaju kaznu (penal) funkciji greške modela kako bi se smanjila složenost modela, ali na različite načine. L1 dodaje kaznu koja je proporcionalna sumi apsolutnih vrednosti težina parametara modela, dok L2 dodaje kaznu proporcionalnu sumi kvadrata težina modela. Neke od metoda kombinuju obe tehnike regularizacije.

PRIMER

Kao ilustraciju primene ansambala stabla odlučivanja može se dati analiza zavisnosti koncentracija suspendovanih čestica, s jedne strane, i koncentracija zagađujućih materija (SO_2 , NO, NO_2 , NO_x i benzen), modeliranih meteoroloških parametara, trenda, kao i dnevnih i vikend varijacija, s druge strane. Analiza je izvršena primenom regresione metode mašinskog učenja XGBoost za nekoliko mernih mesta u Beogradu za potrebe Plana kvaliteta vazduha u aglomeraciji Beograd, slika 6.51. Opsezi relativnih grešaka i korelacioni koeficijenti između modeliranih i izmerenih koncentracija PM_{10} po stanicama nalaze se u opsezima 19-26% i 0,89-0,93. Najniža relativna greška i najveći korelacioni koeficijent dobijeni su za merno mesto Ovča, dok su najveće razlike između modeliranih i izmerenih vrednosti zabeležene na mernim mestima Novi Beograd i Gradski zavod za javno zdravlje Beograd. Rezultati modeliranja nisu zadovoljavajući za merno mesto Veliki Crljeni (relativna greška veća 30% i korelacija manja 0,8), što ukazuje na to da dinamika izvora emisije PM_{10} na toj stanici slabo zavisi od koncentracija ostalih zagađujućih materija i meteoroloških parametara koji su bili na raspolaganju u ovom istraživanju. U ranijim studijama, koje su uključivale i izmerene vrednosti meteoroloških parametara i koncentracije većeg broja zagađujućih materija, dobijene su nešto niže relativne greške, čak i jednocifrene. Naime, uključivanje izmerenih vrednosti meteoroloških parametara doprinosi boljoj reprezentaciji uslova specifičnih za datu lokaciju, dok uključivanje drugih zagađujućih materija omogućava preciznije povezivanje sa izvorima koji ih emituju, kao i sa hemijskim reakcijama u atmosferi u kojima učestvuju. Na osnovu dosadašnjih istraživanja, može se zaključiti da bi uključivanje što većeg broja faktora životne sredine u analizu, primena najsavremenijih metoda veštačke inteligencije i korišćenje receptorski orijentisanih modela predstavljali dobru osnovu za preciznu prostorno-vremensku prognozu koncentracija zagađujućih materija na nekom području, uključujući i lokacije koje nisu pokrivene stanicama za regulatorni monitoring.

Slika 6.51. Evaluacija regresionih modela za čestično zagađenje za merna mesta u Beogradu



6.11.1.4. Klasterizacija

Klasterizacija predstavlja tehniku mašinskog učenja koja se koristi za grupisanje podataka na osnovu sličnosti njihovih karakteristika, pri čemu se očekuje da elementi unutar jednog klastera budu sličniji jedni drugima nego elementima u ostalim klasterima. Drugim rečima, klasterizacija je postupak deljenja skupa ulaznih podataka na fiksni broj podskupova u kojima su podaci blisko povezani.

K-means

K-means je verovatno jedan od najpoznatijih algoritama, koji se koristi za grupisanje podataka u unapred određen broj klastera (k). Ovaj algoritam minimizira varijabilnost unutar klastera, maksimizirajući varijabilnost između klastera. Identično konceptu iznetom u klasterizaciji polarnih plotova zavisnosti koncentracija od komponenti vetra, proces počinje nasumičnim izborom k centroida, koji predstavljaju središta klastera. Zatim se svaki podatak pridružuje najbližem centru na osnovu udaljenosti. Kada su svi podaci pridruženi klasterima, centriodi se ponovo izračunavaju kao srednja vrednost svih podataka unutar svakog klastera. Ovaj proces se iterativno ponavlja dok se ne postigne stabilnost, kada se promene u pridruživanju podataka klasterima više ne dešavaju.

Najveće ograničenje ove metode predstavlja izbor broja klastera, što može biti veliki problem u složenim skupovima podataka. Takođe, algoritam je osetljiv na početni izbor centroida i može dati različite rezultate za različite inicijalizacije.

Pored originalne implementacije postoje i druge, poput *C-means* i *F-means* (*fuzzy*) koje koriste nešto drugačije pristupe pridruživanju tačaka klasterima.

Spectral clustering

Spectral clustering koristi informacije iz spektralnih svojstava podataka, kao što su svojstvene vrednosti (*eigenvalues*) i svojstveni vektori (*eigenvectors*) Laplasijan matrice, da bi identifikovao klaster u podacima. Algoritam se oslanja na teoriju grafova što ga čini posebno efikasnim u otkrivanju nepravilnih i nelinearnih struktura u podacima. Efikasan je u situacijama kada klasteri nisu sferični ili kada imaju složene granice, što tradicionalni algoritmi često nisu u stanju da otkriju.

Gaussian mixture models

Gaussian mixture models (GMM) je probabilistički model koji predstavlja skup podataka kao mešavinu Gausovih raspodela. Svaki klaster modelira se kao Gaussian sa sopstvenim parametrima raspodele koji određuju verovatnoću da podatak pripada određenom klasteru. Veoma je efikasan u situacijama kada podaci dolaze iz višestrukih raspodela koje se preklapaju.

Pored navedenih metoda klasterizacije, a koje bi trebalo opisati, o konceptu HDBSCAN bilo je reči u poglavlju o identifikaciji netipičnih vrednosti, dok je o hijerarhijskoj klasterizaciji bilo reči poglavlju o osnovnim statističkim metodama.

6.11.1.5. Neuronske mreže

Neuronske mreže predstavljaju jedan od ključnih koncepata mašinskog učenja. Nalaze primenu u brojnim oblastima, uključujući prepoznavanje obrazaca, analizu podataka, generisanje slika, zvuka i teksta, kao i u autonomnim sistemima. Inspirisane strukturom i funkcionisanjem ljudskog mozga, sastoje se od velikog broja povezanih čvorova – neurona, koji međusobno komuniciraju kako bi obradili informacije i identifikovali obrasce u podacima. Osnovni elementi neuronskih mreža uključuju slojeve neurona raspoređenih u slojeve. Ulazni sloj prima podatke, jedan ili više skrivenih slojeva transformiše informacije koje se u njima nalaze, dok izlazni sloj generiše konačne rezultate. Obučavanje neuronskih mreža postiže se podešavanjem težina između neurona kroz proces poznat kao propagacija greške, koja može koristiti gradijentni spust²² radi minimiziranja greške modela.

22 Gradijentni spust (*gradient descent*) je optimizacioni algoritam koji se koristi za minimiziranje funkcija, posebno u kontekstu obučavanja modela u mašinskom učenju. Osnovna ideja algoritma je iterativno ažuriranje parametara modela u suprotnom smeru od gradijenta funkcije greške u odnosu na parametre. Proces započinje nasumičnim vrednostima parametara modela (koeficijenti ili težine). Zatim se izračunava funkcija greške, koja određuje grešku modela u odnosu na stvarne vrednosti. Nakon toga se izračunava gradijent, koji predstavlja vektor parcijalnih izvoda funkcije greške po svakom parametru modela, čime pokazuje smer najvećeg povećanja funkcije greške. Na kraju dolazi do ažuriranja parametara modela u suprotnom smeru od vrednosti gradijenta kako bi se greška minimizirala.

Postoji mnogo različitih vrsta neuronskih mreža, od kojih su najpoznatije višeslojne perceptronske mreže (*multilayer perceptron* – MLP), konvolutivne neuronske mreže (*convolutional neural networks*), rekurentne neuronske mreže (*recurrent neural networks*), kao i njihovi moderni derivati poput *long short-term memory* i *gated recurrent unit* (GRU). Konvolutivne mreže posebno su korisne za obradu slika i video zapisa zbog svoje sposobnosti da prepoznaju prostorne odnose u podacima, dok su rekurentne neuronske mreže i *long short-term memory* primarno primenljive u analizi vremenskih serija i obradi prirodnog jezika, jer su efikasne u prepoznavanju sekvencijalnih obrazaca.

Jedna od najnovijih i najmoćnijih arhitektura je Transformer, koji se pokazao kao ključan za velike jezičke modele i duboko učenje. Transformeri koriste *attention* mehanizme za identifikaciju relevantnih informacija unutar velikih skupova podataka, omogućavajući mrežama da bolje shvate kontekstualne veze u sekvencijalnim podacima. *Attention* mehanizam zapravo znači selektivno fokusiranje pažnje na relevantne delove ulaznih podataka, umesto podjednake obrade svih informacija.

Takođe, u poslednje vreme dolazi do značajnog razvoja i primene *multiheaded* algoritama u situacijama u kojima je potrebno istovremeno izvršiti više različitih, a povezanih zadataka, uz deljenje zajedničkih karakteristika ulaznih podataka. Za ove namene koriste se Transformeri, kao i rekurentne i konvolutivne mreže. Na primer, može se zamisliti situacija u kojoj je istovremeno potrebno modelirati satne koncentracije PM_{10} (regresija), uz verovatnoću prekoračenja propisane osmočasovne granične vrednosti ozona (klasifikacija).

6.11.2. Metaheuristike

Algoritmi mašinskog učenja razvijaju se ogromnom brzinom, postajući sve moćniji, ali i kompleksniji. Da bi njihova primena ostvarila svoj puni kapacitet i dala modele najviših performansi u smislu tačnosti, robusnosti i generalizacije, za svaki pojedinačni skup podataka potrebno je prilagoditi njihove hiperparametre na odgovarajući način.

Tradicionalne metode za optimizaciju, poput različitih tipova pretrage prostora hiperparametara, iako efikasne za jednostavne probleme, često pokazuju ozbiljna ograničenja kod složenih algoritama, jer zahtevaju mnogo računarske snage i vremena. U takvim situacijama primenjuju se aproksimativni algoritmi, koji problem rešavaju približno. Ovi algoritmi dele se na heurističke i metaheurističke.²³ U poslednjih nekoliko decenija razvijeni su brojni metaheuristički algoritmi inspirisani prirodnim procesima, koji su efikasni u rešavanju složenih optimizacionih problema.²⁴

Optimizacija se može definisati kao proces pronalaženja najboljeg mogućeg rešenja za određeni problem, u okviru zadatih ograničenja. Svaki optimizacioni problem ima tri osnovne komponente koje ujedno određuju i njegovu klasu: varijable odlučivanja, funkciju cilja i ograničenja. Varijable odlučivanja mogu biti diskretne, kontinualne ili mešovite. Funkcija cilja, koja može biti jednociljna ili višeciljna, predstavlja vrednost koju treba minimizirati ili maksimizirati. Ograničenja definišu uslove, koji mogu biti ograničeni ili neograničeni, koje moraju ispuniti varijable odlučivanja kako bi rešenje bilo izvodljivo.

Druge vrste klasifikacije problema obuhvataju linearnosti i odvojivosti²⁵ funkcija cilja. Zatim, optimizacioni problemi mogu biti deterministički (daju uvek isti rezultat) ili stohastički (daju različite rezultate prilikom svakog izvršavanja), pri čemu su stohastički i hibridni algoritmi (paralelna ili distribuirana implementacija više algoritama) često efikasniji za složene probleme.

Metaheuristički algoritmi vrše optimizaciju u dve faze. U fazi eksploracije (diverzifikacija), algoritam istražuje prostor pretrage globalno, generišući različita rešenja. U fazi eksploatacije (intenzifikacija), algoritam se fokusira na lokalni region blizu najboljih rešenja, pokušavajući da pronađe optimalno rešenje.

23 Na grčkom: meta – izvan, heuristika – istraživanje, odnosno otkrivanje strategija za rešavanje problema.

24 NP-težak problem (nondeterministic polynomial time – NP-hard problem) je problem koji spada u klasu veoma složenih problema i odnosi se na probleme za koje se rešenje može proveriti u polinomijalnom vremenu, ali se ne zna da li postoji efikasan algoritam koji ih može rešiti u tom vremenu.

25 Odvojivost funkcija ukazuje na to da li se funkcija cilja ili ograničenja može razložiti na više manjih funkcija koje zavise od različitih skupova varijabli.

Algoritmi inspirisani prirodom mogu se podeliti na evolutivne algoritme (*evolutionary algorithm* – EA) i algoritme inteligencije roja (*swarm intelligence* – SI). Kod evolutivnih algoritama operator mutacije uvodi male promene na jednoj jedinki (*bitflip*, slučajna, delta i Gausova mutacija). Zatim, operator ukrštanja kombinuje informacije od dva roditelja za stvaranje nove jedinke, koristeći metode poput ukrštanja sa jednom ili više tačaka i uniformnog ukrštanja. Strategija zamene predstavlja proces selekcije koji odlučuje koje jedinke iz trenutne populacije, zajedno sa novonastalim jedinkama, prelaze u sledeću generaciju. Naravno, cilj je zadržati najbolje ili najperspektivnije jedinke, čime se osigurava napredak populacije ka optimalnom rešenju. U najpopularnije algoritme spadaju genetski algoritmi (GA), *differential evolution* (DE), *evolution strategy* (ES) i *genetic programming* (GP).

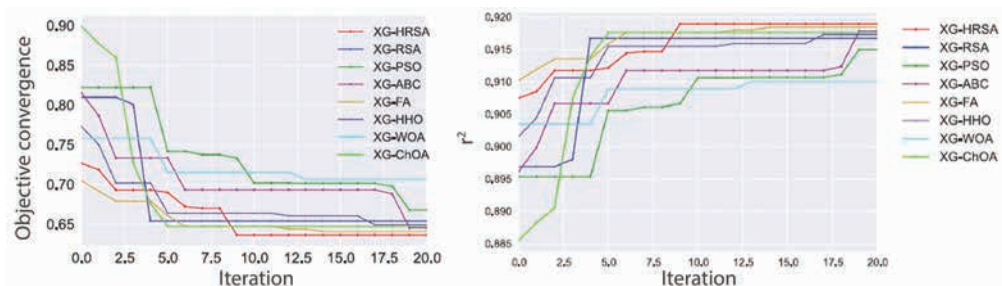
S druge strane, algoritmi inteligencije roja inspirisani su kolektivnim ponašanjem iz prirode, gde pojedinci, iako sami po sebi neinteligentni, kroz međusobne interakcije stvaraju inteligentne globalne postupke. Primeri uključuju ponašanje pčela u košnicama, mrava u kolonijama ili ptica u jatima. U ovim algoritmima u prostoru rešenja se populacija pojedinaca nasumično inicijalizuje, dok randomizacija pomaže u izbegavanju zaglavljivanja u lokalnim optimumima. Tokom svake iteracije, pojedinci se pomeraju na osnovu vrednosti ciljne funkcije, tražeći najbolje rešenje, čime algoritam konvergira ka globalnom optimumu. U najpopularnije algoritme spadaju *particle swarm optimization* (PSO), *ant colony optimization* (ACO), *artificial bee colony* (ABC) i *bat algorithm* (BA)

Na kraju, hibridizacija metaheurističkih algoritama podrazumeva kombinaciju više algoritama u cilju iskorišćavanja njihovih prednosti. Ovaj pristup koristi različite komponente optimizacije ili veštačke inteligencije za stvaranje sinergije i unapređivanje performansi. Hibridni algoritmi često postižu bolju brzinu konvergencije i kvalitet rešenja, što ih čini efikasnijim za rešavanje složenih problema. Ključni problem u dizajnu ovih algoritama je postizanje ravnoteže između globalne pretrage (diverzifikacije) i lokalne pretrage (intenzifikacije). Previše usmerena pretraga može dovesti do zaglavljivanja u lokalnim optimumima, dok veća raznolikost poboljšava istraživanje prostora rešenja. U najpopularnije algoritme spadaju *hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization* (GA-PSO), *hybrid ant colony optimization and differential evolution* (ACO-DE), *hybrid genetic algorithm and simulated annealing* (GA-SA) i *hybrid PSO and tabu search*.

PRIMER

Na slici 6.52 prikazano je unapređenje performansi modela toluena u atmosferi urbane sredine u Beogradu dobijenog primenom algoritma XGBoost optimizovanog pomoću osam metaheuristika.

Slika 6.52. Unapređenje performansi XGBoost modela toluena u atmosferi urbane sredine u Beogradu primenom metaheuristika



6.11.3. Metode interpretacije modela mašinskog učenja

Ispostavlja se da su savremeni algoritmi mašinskog učenja superiorni u mnogim zadacima u odnosu na ljude, jer su brži, pouzdaniji i lakše se skaliraju na određene probleme. Iako dobijeni modeli mogu obezbediti visoku tačnost, metrički pokazatelji, poput greške ili osetljivosti, često nisu dovoljni za sticanje poverenja u model. Na primer, potreba za interpretabilnošću zavisi od konteksta. U situacijama sa niskim rizikom, nije posebno važno zašto je određena odluka doneta. Međutim, u situacijama s visokim rizikom, kao što je vođenje autonomnih automobila, razumevanje razloga donošenja odluka je ključno za izgradnju poverenja i otkrivanje potencijalnih grešaka ili pristrasnosti.

Nažalost, unutrašnji mehanizmi donošenja odluka složenih modela često ostaju skriveni, što ih čini delimično ili potpuno neinterpretabilnim (crne kutije – *black box*), naročito kada nastaju primenom kompleksnih algoritama poput dubokih neuronskih mreža ili ansambala. Za razliku od njih, interpretabilni algoritmi (bele kutije – *white box*) predstavljaju modele čije se ponašanje i parametri mogu jasno objasniti, kao što su linearni modeli ili kratka, pojedinačna stabla odlučivanja.

Šta je zapravo interpretabilnost? Interpretabilnost bi se mogla definisati kao stepen u kom čovek može razumeti uzrok odluke modela ili dosledno predvideti njegov rezultat.

Postoje dve osnovne strategije za interpretaciju modela. S jedne strane, to je korišćenje interpretabilnih algoritama, s druge strane korišćenje model-specifičnih ili model-agnostičkih alata. Model-specifični alati ograničeni su na određene tipove modela, dok model-agnostički tretiraju sve modele kao crne kutije i mogu se primeniti na bilo koji od njih. Sami model-agnostički alati spadaju u klasu *post hoc* metoda koje modele interpretaciju nakon njihovog obučavanja analizom dobijenih rezultata. Ovi alati se dalje dele na globalne, koji opisuju celokupno, prosečno ponašanje modela, i lokalne, koji objašnjavaju pojedinačne predikcije.

Domen interpretabilnosti mašinskog učenja

Opseg interpretabilnosti mašinskog učenja može se analizirati na različitim nivoima počev od transparentnosti algoritma, do interpretacije pojedinačnih predikcija.

Transparentnost algoritma odnosi se na način na koji se kreira model, odnosno vrstu odnosa u podacima koje može naučiti. Na primer, kod konvolutivnih neuronskih mreža može se objasniti da algoritam u najnižim slojevima mreže uči prepoznavanje ivica u satelitskim snimcima, što iako pruža uvid u način rada algoritma, ne objašnjava specifičan model, niti pojedinačne predikcije.

Globalna interpretabilnost odnosi se na razumevanje donošenja odluka u celini. Da bi se ovo postiglo, potrebni su podaci, algoritam i izračunat model. Međutim, ovu vrstu interpretabilnosti veoma je teško postići u praksi zato što modeli sa velikim brojem parametara prevazilaze kognitivne kapacitete ljudi.

Iako je globalna interpretabilnost često nedostižna, moguće je razumeti delove modela na modularnom nivou. Na primer, težine u linearnim modelima ili podele u stablima odlučivanja mogu se interpretirati. Nažalost, interpretacija jednog dela modela može biti zavisna od ostalih delova pa interpretacija težina u linearnim modelima ili podela u stablima odlučivanja uvek zavise od drugih varijabli.

Lokalna interpretabilnost stavlja fokus na pojedinačne predikcije i objašnjenje odluke modela za jedan podatak. Iako model u opštem slučaju može biti složen, lokalno ponašanje modela može biti jednostavnije. Na primer, predikcija može zavisiti linearno ili monotono od određenih varijabli što u mnogome olakšava interpretaciju.

Predikcije modela za više instanci podataka mogu se objasniti korišćenjem globalnih metoda interpretacije modela na modularnom nivou ili objašnjenjima pojedinačnih instanci. Globalne metode mogu se primeniti tako što se grupa instanci tretira kao celokupni skup podataka, dok se lokalne metode interpretacije mogu koristiti za svaku instancu posebno, a zatim agregirati²⁶ za celu grupu.

Metode interpretacije povezuju vrednosti varijabli sa predikcijama modela obezbeđujući objašnjenja razumljiva ljudima. Osobine pojedinačnih objašnjenja uključuju niz poželjnih karakteristika kao što su: tačnost (meri kvalitet predviđanja za podatke koje nisu bili dostupni u procesu obučavanja), vernost (meri kvalitet aproksimacije predikcije modela ponuđenim objašnjenjem), konzistentnost (meri sličnost objašnjenja između modela obučavanih sa istim ciljem), stabilnost (meri sličnost objašnjenja za slične skupove podataka), razumljivost (meri stepen razumljivosti objašnjenja ljudima), izvesnost (određuje meru u kojoj objašnjenje odražava sigurnost modela u predikciju), reprezentativnost (meri broj instanci podataka koje objašnjenje pokriva) i druge.

6.11.3.1. Model-agnostičke metode

Model-agnostičke metode interpretacije imaju nekoliko prednosti u odnosu na model-specifične metode, pre svega zbog svoje fleksibilnosti, zbog čega će biti u fokusu razmatranja u ovoj knjizi. Najvažnija prednost ove vrste metoda je mogućnost primene na bilo koji model mašinskog učenja, što omogućava i međusobno poređenje modela. Pored ovoga, karakteristike model-agnostičkog sistema objašnjenja uključuju fleksibilnost u radu sa različitim modelima, prilagodljivost različitim oblicima objašnjenja i mogućnost upotrebe različitih reprezentacija u objašnjenju, nezavisno od modela koji se koristi.

Model-agnostička interpretabilnost uvodi dodatni nivo koji pomaže ljudima da shvate modele mašinskog učenja, ali i njihove predikcije. Proces interpretabilnosti može se posmatrati kao niz od više karika koji počinje od domena, tj. identifikacije fenomena koji se analizira koji uključuje i kontekst u kom se pojavljuje. Drugu kariku čine podaci koji digitalizuju domen kako bi se informacije koje dolaze iz njega mogle analizirati. Na osnovu ovih podataka obučavaju se algoritmi mašinskog učenja koji stvaraju kariku crnih kutija. Narednu kariku čine metode interpretacije dobijenih modela, vodeći je do poslednje – do ljudi, kao krajnjeg korisnika celokupnog postupka.

26 Agregacija predstavlja proces objedinjavanja ili sažimanja podataka u jedan skup ili jednu veličinu, obično kako bi se dobio pregledni, sveobuhvatni rezultat ili sažetak. Primer agregacije može biti srednja vrednost.

6.11.3.2. Globalne model-agnostičke metode

Globalne metode interpretacije modela mašinskog učenja opisuju prosečno ponašanje modela, često kroz očekivane vrednosti bazirane na raspodeli podataka. Ove metode su korisne za razumevanje opštih mehanizama modela ili otkrivanje grešaka.

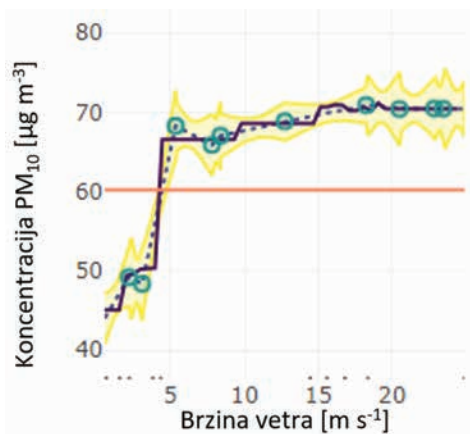
Funkcija parcijalnih zavisnosti

Funkcija parcijalnih zavisnosti (*partial dependence plot* – PDP) prikazuje marginalni efekat prediktora na predikciju, utvrđujući odnos sa ciljnom promenljivom uz uvažavanje interakcija s ostalim prediktorima. Spada u grupu globalnih metoda zato što analizira sve instance podataka, dajući pregled globalnog odnosa između prediktora i predikcije ciljne promenljive. U slučaju regresije, funkcija parcijalne zavisnosti predstavlja očekivanu vrednost predikcije za jedan ili dva prediktora uz marginalizovanje ostalih prediktora. U slučaju klasifikacije, funkcija prikazuje verovatnoću za određenu klasu u zavisnosti od vrednosti prediktora.

Na osnovu parcijalne funkcije zavisnosti može se definisati i mera značajnosti prediktora, gde veća varijacija u funkciji znači da je prediktor značajniji. Međutim, ova mera zahteva pažljivu interpretaciju pošto ne uzima u obzir interakcije između prediktora.

Na slici 6.53 dat je oblik parcijalne zavisnosti koncentracija PM_{10} od brzine vetra u Beogradu.

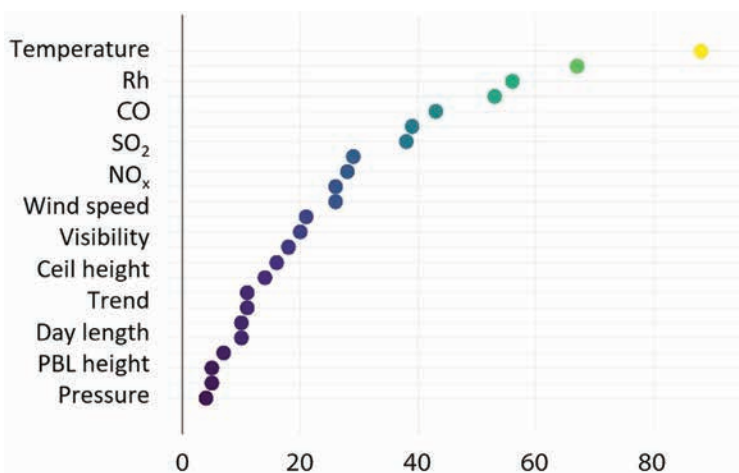
Slika 6.53 Parcijalna zavisnost koncentracija PM_{10} od brzine vetra u Beogradu dobijena za model Gradient boosting



Permutaciona značajnost prediktora

Permutaciona značajnost prediktora (*permutation feature importance*) meri povećanje greške u predikciji modela nakon što se vrednosti određenog prediktora permutuju, čime se narušava veza između prediktora i predikcije. Ako permutacija značajno povećava grešku, prediktor se može smatrati važnim i obrnuto, ako greška ostane nepromenjena, prediktor se može smatrati nevažnim. Prednosti ove metode uključuju jednostavnu interpretaciju i globalni uvid u ponašanje modela. Takođe, metoda uzima u obzir interakcije prediktora, jer permutacija uništava njihove zajedničke efekte. Nedostatak metode je oslanjanje na grešku modela, što može dovesti do nepraktičnih rezultata kada su prediktori korelisani, kada dolazi do stvaranja nerealnih podatke prilikom permutacije. Primer rezultata ove metode dat je na slici 6.54.

Slika 6.54. Primer značajnosti varijabli za predikciju PM_{10} u Beogradu



Pored navedenih, u najčešće korišćene metode za analizu globalne značajnosti prediktora spadaju *accumulated local effects* koja prikazuje prosečan uticaj prediktora na predikciju modela, predstavljajući alternativu parcijalnim funkcijama zavisnosti koje imaju problem kada su prediktori korelisani, *functional decomposition* koja razlaže složenu funkciju modela na sumu efekata pojedinačnih prediktora i njihovih interakcija čineći predikcije modela lakšim za razumevanje i vizualizaciju, kao i *global surrogate model* koji inicijalni model interpretira formiranjem interpretabilnih surogat modela.

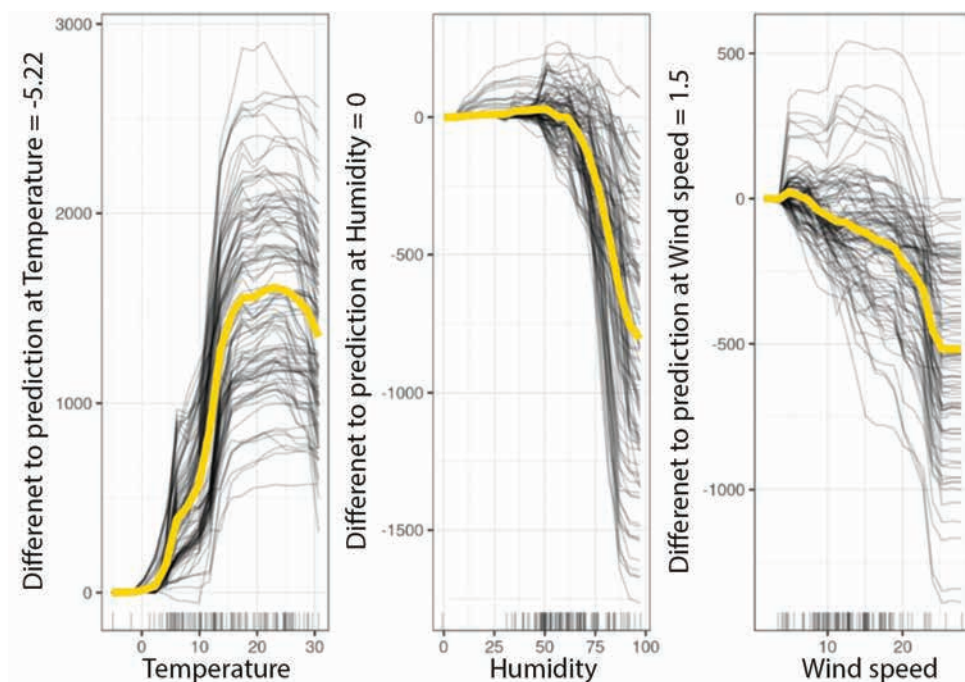
6.11.3.3. Lokalne model-agnostičke metode

Lokalne metode interpretacije objašnjavaju pojedinačne predikcije modela mašinskog učenja. U ovoj knjizi fokus će biti stavljen na osnovne.

Individualna uslovna očekivanja

Individualna uslovna očekivanja (*individual conditional expectation* – ICE) prikazuju promenu predikcije za jednu instancu u zavisnosti od promene određenog prediktora. Dok parcijalne funkcije zavisnosti prikazuju prosečan uticaj prediktora na predikciju, ICE plotovi daju liniju za svaku instancu podataka, čime se otkrivaju varijacije u ponašanju modela između pojedinačnih instanci. Parcijalna funkcija zavisnosti zapravo predstavlja srednju vrednost linija koje ICE prikazuje za sve instance. ICE plotovi su korisni za razumevanje reakcije modela na promene u prediktorima za specifične instance, posebno u slučajevima kada su interakcije između prediktora prisutne. Na slici 6.55 dat je primer primene ICE plota. Slika prikazuje predviđeni broj bicikala u zavisnosti od vremenskih uslova, pri čemu svaka linija prikazuje razliku u predikciji u poređenju sa predikcijom za minimalnu vrednost posmatranog prediktora.

Slika 6.55. Primer primene ICE plota



Lokalni surogat modeli

Lokalni surogat modeli (*local interpretable model-agnostic explanations* – LIME) predstavljaju interpretabilne modele koji se koriste za interpretaciju pojedinačnih predikcija. Umesto obučavanja globalnog surogat modela, LIME se fokusira na obučavanje lokalnih surogat modela za interpretaciju pojedinačnih predikcija. To znači da algoritam kreira jednostavan, interpretabilan model koji može da aproksimira ponašanje složenog modela u blizini određene instance podataka, umesto da pokušava da objasni ponašanje modela u celini. Objašnjenje predikcije za jednu instancu podataka vrši se analizom promene predikcije kada se vrednosti prediktora koji joj odgovaraju u manjoj meri izmene. Novi skup podataka, koji se generiše perturbacijom prediktora originalne instance, koristi se za obučavanje jednostavnog, interpretabilnog modela.

Pored navedenih, u najčešće korišćene metode za analizu lokalne značajnosti prediktora spadaju *counterfactual explanations* koji opisuje kako bi se predikcija promenila kada bi se određene vrednosti prediktora promenile, pokazujući uzročno-posledične veze između ulaznih podataka i ishoda modela ili *scoped rules (anchors)* koji objašnjava predikcije pronalazeći pravila koja osiguravaju da promene u drugim prediktorima ne menjaju rezultat, koristeći jednostavna pravila za lakšu interpretaciju modela. Zbog svoje velike primene u interpretaciji modela mašinskog učenja, posebna pažnja je stavljena na metodu koja proističe iz teorije igara, a zasnovana je na Šeprijevim vrednostima.

6.11.3.4. Kooperativna teorija igara i Šeprijeva vrednost

Kooperativna teorija igara predstavlja granu matematike koja se bavi analizom situacija u kojima veći broj igrača sarađuje u postizanju zajedničkog cilja. Teorija se fokusira na formiranje koalicija igrača koje donose veću dobit u poređenju sa pojedinačnim delovanjem svakog od njih. Cilj analize je pronaći pravedan (fer) način da se ukupna dobit raspodeli među članovima koalicije, uzimajući u obzir doprinos svakog člana zajedničkom uspehu.

Jedan od ključnih pojmova u kooperativnoj teoriji igara predstavlja funkcija vrednosti, koja svakoj koaliciji pridružuje vrednost jednaku dobiti koju koalicija može ostvariti zajedničkim delovanjem. Pitanje koje se postavlja jeste kako ovako ostvarenu dobit raspodeliti među članovima koalicije na fer način.

Najpoznatije rešenje ovog problema jeste Šeprijeva vrednost, koja predstavlja metod zasnovan na teoriji pravedne raspodele. Šeprijeve vrednosti uzimaju u obzir doprinos svakog igrača u svim mogućim koalicijama. Zasnivaju se na četiri

osnovna aksioma: efikasnost, simetrija, neutralnost i aditivnost. Efikasnost predstavlja činjenicu da ukupna dobit koju koalicija ostvari mora biti potpuno raspodeljena među igračima. Dakle, suma pojedinačnih doprinosa svih igrača mora biti jednaka ukupnoj dobiti koalicije, odnosno nijedan deo dobiti ne sme ostati neraspodeljen ili biti izgubljen. Simetrija znači da ako dva igrača doprinose svim koalicijama na isti način, udeo u dobiti mora biti isti. Neutralnost znači da ako igrač ne doprinosi nijednoj koaliciji, tj. ako njegov doprinos ne menja ishod igre, ne dobija deo dobiti. Na kraju, aditivnost znači da u dve odvojene igre sa različitim vrednostima dobiti za koalicije, Šeplijeva vrednost za kombinovanu igru predstavlja zbir Šeplijevih vrednosti iz svake od pojedinačnih igara.

Na slici 6.56 dat je jednostavan primer kooperativne igre. Posle proslave, tri drugarice treba da se taksijem odvezu kućama. Cena taksija do kuće prve je 10, do kuće druge 50, a do kuće treće drugarice 100 evra. Ukoliko ne žele da sarađuju, svaka od njih može pozvati taksi i sama otići svojoj kući. Suma koju u tom slučaju plaćaju je 160 evra. Ukoliko odluče da sarađuju i zajedno odu kućama tako što će pozvati jedan taksi koji bi odvezao prvo onu koja živi najbliže, a na kraju onu koja živi najdalje, pre svega platiće ukupno 100 evra za istu stvar – doći će kući. S druge strane, raspodela plaćanja prema fer podeli bila bi redom 5, 25 i 70 evra, što je za 50, 50, odnosno 30% manje u odnosu na situaciju u kojoj ne žele da sarađuju.

Slika 6.56. Primer kooperativne igre



Kooperativna teorija igara nalazi široku primenu u različitim oblastima, uključujući interpretaciju modela mašinskog učenja, gde prediktori igraju ulogu igrača, a njihov doprinos predikciji procenjuje se kako bi se objasnio model. Šeplyjeve vrednosti određuju pravednu raspodelu dobiti (predikcija) među prediktorima (igrači). Ova vrednost za jedan prediktor predstavlja prosečan marginalni doprinos tog prediktora kroz sve moguće koalicije svih prediktora. Drugim rečima, Šeplyjeve vrednosti procenjuju koliko bi predikcija modela bila drugačija ako bi se izostavio određeni prediktor u različitim kombinacijama sa ostalim prediktorima.

Nažalost, kako se broj prediktora povećava, vreme potrebno za izračunavanje Šeplyjevih vrednosti eksponencijalno raste. Zbog toga su razvijene njihove aproksimacije za globalnu i lokalnu interpretaciju modela mašinskog učenja.

Shapley additive explanations

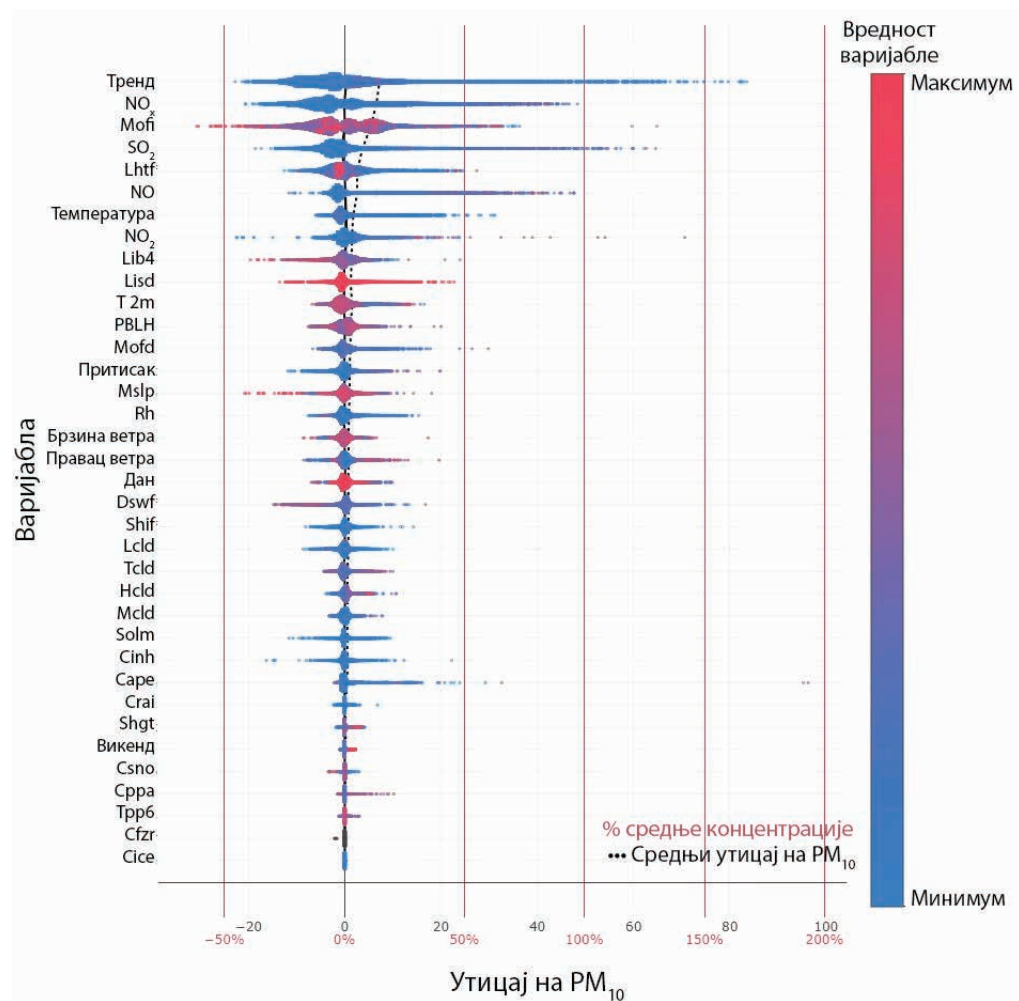
Shapley additive explanations (SHAP) predstavlja metod objašnjavanja predikcije pojedinačnih instanci u modelima mašinskog učenja primenom aproksimacije Šeplyjevih vrednosti. Inovacija koju donosi leži u predstavljanju Šeplyjevih vrednosti kao aditivnih doprinosa prediktora predikciji modela, što praktično znači da je objašnjenje predstavljeno kao linearni model. Upravo ova činjenica povezuje LIME, koja se fokusira na lokalno interpretabilne modele, i Šeplyjeve vrednosti, omogućavajući sistematsku analizu doprinosa prediktora.

Jedno od najvažnijih dostignuća algoritma SHAP je smanjenje kompleksnosti izračunavanja Šeplyjevih vrednosti primenom *Monte Carlo* metode uzorkovanja iz koalicija prediktora, specijalizovanih algoritama za različite klase modela, kao i same postavke principa aditivne strukture za svaki predikcioni model. Ova unapređenja omogućavaju približno izračunavanje Šeplyjevih vrednosti u linearnom vremenu, uz zadržavanje visoke preciznosti u objašnjavanju doprinosa svakog prediktora predikciji modela.

PRIMER

Različite vizuelizacije SHAP vrednosti omogućavaju veoma detaljnu analizu uticaja prediktora. Na slici 6.57 data je analiza uticaja najvažnijih prediktora na koncentracije suspendovanih čestica na teritoriji Beograda.

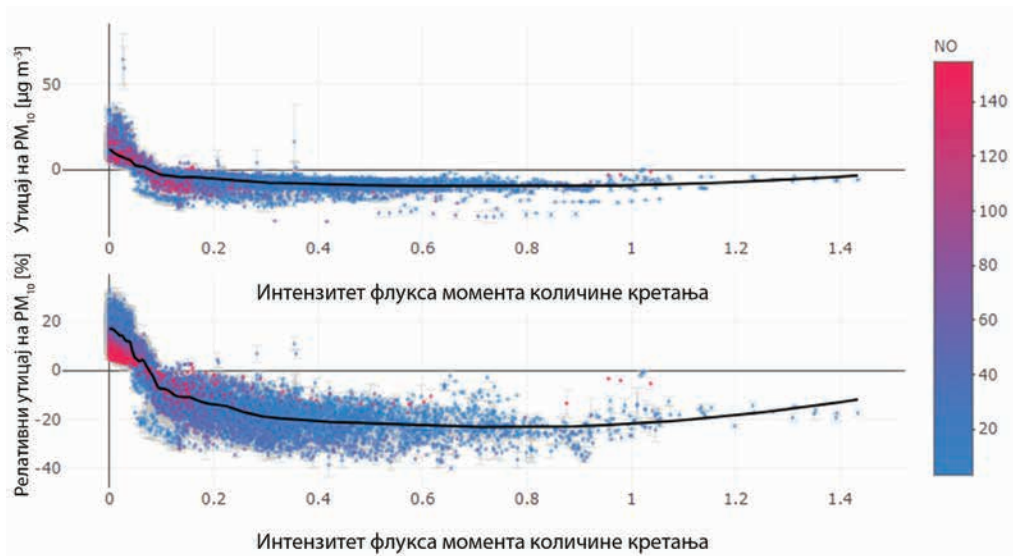
Slika 6.57. Raspodela uticaja parametara životne sredine na koncentracije PM_{10} na mernom mestu Gradski zavod za javno zdravlje Beograd za period od 2017. do 2019. godine

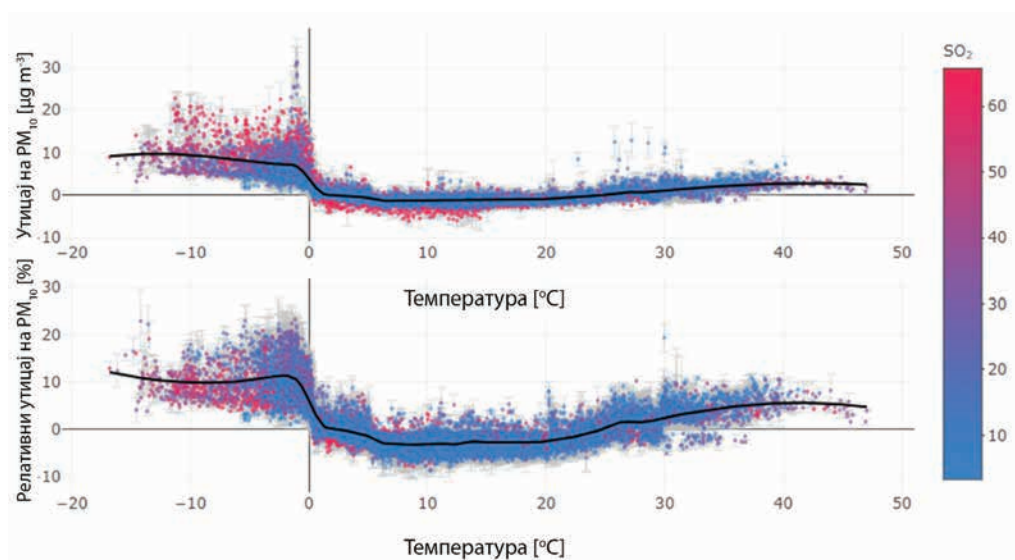


Kao što se može videti, među 5 najvažnijih varijabli koje opisuju dinamiku suspendovanih čestica na teritoriji Beograda nalaze se meteorološki parametri Mofi (*momentum flux intensity* – intenzitet fluksa momenta količine kretanja), Lisd (*standard lifted index* – indeks podizanja), Solm (volumetrijski sadržaj vlage u zemljištu), temperatura, kao i zagađujuće materije benzol, NO, NO_x i SO₂.

Detaljnija analiza uticaja intenziteta fluksa momenta količine kretanja data je na slici 6.58, gore. Za prognozu i procenu meteoroloških i klimatskih uslova, intenzitet fluksa momenta količine kretanja se najčešće posmatra zajedno sa brzinom vetra. Ovaj parametar pruža ključne informacije za razumevanje protoka vazduha u vertikalnoj strukturi atmosfere, što je važno za procenu stabilnosti vazдушnih strujanja u planetarnom graničnom sloju, kao i za identifikaciju turbulentnih prenosa i vrtloga. U stabilnim uslovima, vrednosti ovog parametra ostaju relativno konstantne od površine prema višim slojevima atmosfere i obično su niže u poređenju sa turbulentnim uslovima. Visoke SHAP vrednosti, koje odgovaraju povećanju koncentracija suspendovanih čestica, kao i do nekoliko desetina $\mu\text{g m}^{-3}$ pri nižim vrednostima fluksa (<0.2), ukazuju na značajan uticaj vertikalnih kretanja na dinamiku PM₁₀ i drugih zagađujućih materija (poput NO) kada su prisutne u visokim koncentracijama u vazduhu.

Slika 6.58. Uticaj intenziteta fluksa momenta količine kretanja i NO_x (gore), kao i temperature i SO₂ (dole) na PM₁₀ i na mernom mestu Gradski zavod za javno zdravlje Beograd za period od 2017. do 2019. godine





S druge strane, intenzivno sagorevanje fosilnih goriva tokom hladnog vremena, kada su temperature ispod nule, povećava koncentraciju PM_{10} čestica u vazduhu za oko $10 \mu g m^{-3}$, slika 6.58, dole. U slučaju korišćenja goriva sa visokim sadržajem sumpora, ovo povećanje može dostići i $20 \mu g m^{-3}$. Kada su temperature između nekoliko stepeni iznad nule i $25^{\circ}C$, uticaj temperature na koncentracije suspendovanih čestica je neznatan. Međutim, pri temperaturama iznad $25^{\circ}C$, resuspenzija čestica doprinosi blagom povećanju koncentracija, u proseku za oko $4 \mu g m^{-3}$.

Shapley additive global importance

Shapley additive global importance (SAGE) takođe koristi Šeplijeve vrednosti za globalno objašnjenje uticaja svakog prediktora. Cilj algoritma jeste kvantifikacija značaja svakog prediktora merenjem uticaja njegovog izostavljanja iz skupa podataka na performanse modela. Ako izostavljanje određenog prediktora drastično smanjuje performanse modela, taj prediktor dobija visoku SAGE vrednost.

Ovaj algoritam se razlikuje od tradicionalnih metoda poput permutacionih testova, jer ispituje veće podskupove prediktora i uzima u obzir zavisnosti među prediktorima koristeći njihovu uslovnu raspodelu, a ne marginalnu. Ovakav pristup obezbeđuje precizniju ocenu stvarnog značaja prediktora, posebno onih koje se nalaze u međusobnoj korelaciji.

SHAP i SAGE predstavljaju dva moćna koncepta koji se koriste za različite svrhe interpretacije modela mašinskog učenja. SHAP se fokusira na lokalnu interpretaciju i objašnjava pojedinačne predikcije raspodeljujući vrednost predikcije na relevantne prediktore. SAGE, s druge strane, pruža globalnu sliku time što kvantifikuje doprinos svakog prediktora ukupnoj performansi modela.

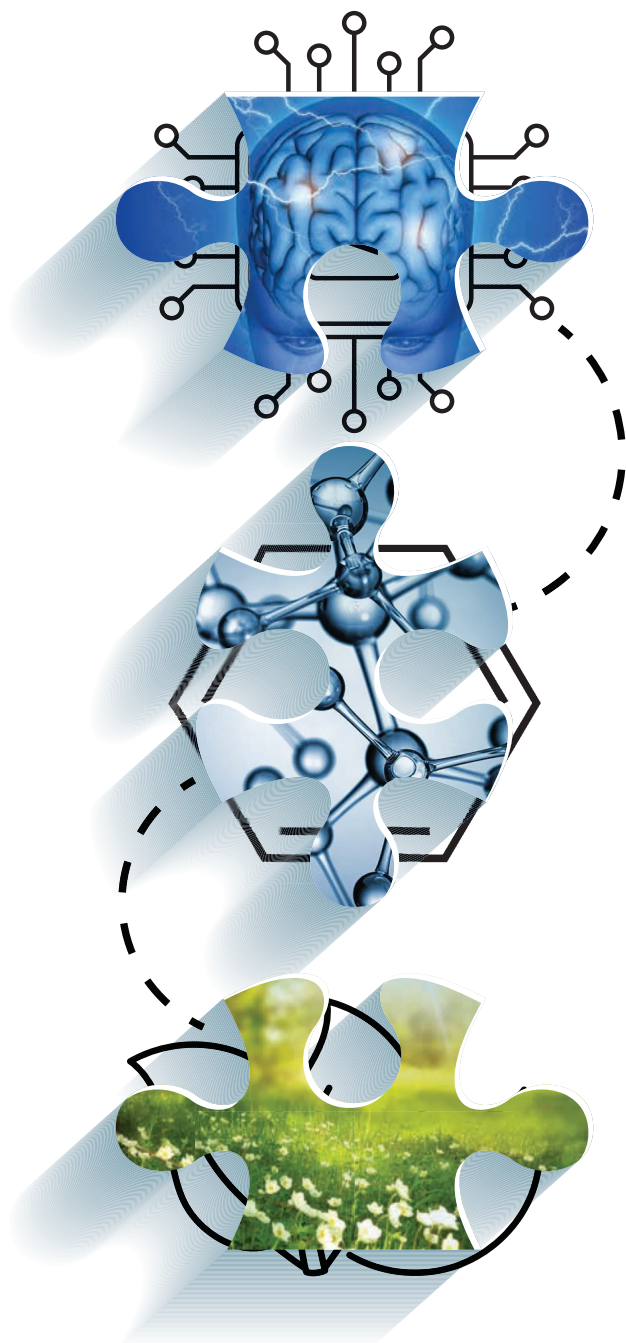
Iako ne postoji jednostavna direktna veza između SHAP i SAGE vrednosti, one su povezane kroz takozvani LossSHAP. LossSHAP vrednosti daju objašnjenje koliko svaki prediktor doprinosi tačnosti određene predikcije, koristeći igru koja meri gubitak za određene podskupove prediktora. Prediktori koji poboljšavaju tačnost predikcije imaju pozitivne, dok oni koje smanjuju tačnost imaju negativne LossSHAP vrednosti. Dakle, veza između SHAP i SAGE je u tome što se SAGE vrednosti mogu posmatrati kao očekivanja LossSHAP vrednosti nad celim skupom podataka. To znači da se globalno objašnjenje dobijeno primenom metode SAGE može dobiti kao srednja vrednost velikog broja lokalnih objašnjenja dobijenih primenom metode LossSHAP nad celim skupom podataka.

PRIMER

Na slici 6.59. prikazana je raspodela uticaja nekoliko najznačajnijih prediktora na koncentracije benzena tokom vanrednog stanja izazvanog pandemijom Kovid-19. Kao što se može videti, koncentracije benzena dominantno određuju veze sa drugim lako isparljivim organskim jedinjenjima, osnovnim zagađujućim materijama, meteorološkim parametrima, ali i varijablama koje kvantifikuju mobilnosti ljudi ili broj umrlih, odnosno novozaraženih u realnom vremenu ili kroz odložene efekte.

6.12. VIZUELIZACIJA PODATAKA I REZULTATA ANALIZA

Zaključujući poglavlje o analizi podataka, čitalac je imao prilike da se susretne sa velikim brojem tipova vizuelizacija, prikladno odabranih i na adekvatan način opisanih u odnosu na nivo i probleme koje predstavljaju. Generalno govoreći, vizualizacija podataka, bilo da se radi o sirovim podacima ili rezultatima sofisticiranih analiza, igra jednu od ključnih uloga u naučnom istraživanju, jer omogućava relativno jednostavan uvid u odnose između prikazanih veličina. Ističući njenu važnost u izdvojenom poglavlju, zbog osnovnog cilja ove knjige, autori se njome posebno neće baviti.



ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE

7. ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE

Briga o životnoj sredini predstavlja sveobuhvatan skup aktivnosti i postupaka usmerenih na sprečavanje štetnih uticaja na prirodne resurse i očuvanje prirodne ravnoteže. Očuvana životna sredina, zdravlje ljudi, kvalitet života i socijalni uslovi u kojima čovek živi, deo su kompleksnog sistema čiji elementi funkcionišu u stalnoj međusobnoj interakciji. U tom kontekstu, zaštita svakog od ovih pod-sistema treba da bude prioritet savremenog društva, jer je ona osnova za očuvanje ekosistema, biološke raznovrsnosti, plodnosti zemljišta, prirodnih lepota i kulturne baštine.

Ciljevi očuvanja životne sredine usmereni su na zaštitu ljudskog zdravlja, unapređenje kvaliteta ekosistema, očuvanje biljnog i životinjskog sveta, kao i racionalno i održivo upravljanje prirodnim resursima. Pored toga, ključno je smanjenje rizika i opasnosti po životnu sredinu koji proizlaze iz intenzivne ljudske aktivnosti, industrijalizacije i urbanizacije, što dodatno ugrožava prirodne sisteme i resurse.

7.1. TEHNOLOGIJE ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE

U savremenom svetu, zagađenje vazduha, vode i tla, kao i rastuće količine otpada koji nastaje usled industrijske i domaće potrošnje, postali su glavni izazovi u očuvanju ekološke ravnoteže. Ovi procesi ozbiljno ugrožavaju zdravlje ekosistema i ljudi, zahtevajući primenu naprednih metoda za prečišćavanje i tretman zagađenja. Prečišćavanje vazduha obuhvata mehaničke, hemijske i biološke metode za uklanjanje štetnih gasova i čestica iz atmosfere. Slično tome, tretman otpadnih voda uključuje fizičko-hemijske i biološke procese koji omogućavaju povratak prečišćene vode u ekosistem. Remedijacija zemljišta koristi se za dekontaminaciju tla, vraćajući mu prirodnu plodnost i funkcionalnost, dok reciklaža otpada igra ključnu ulogu u smanjenju količine otpada i ponovnom korišćenju materijala.

Sve ove metode neophodne su za postizanje održivog razvoja i očuvanje zdravlja planete, ali njihova uspešnost zavisi od integrisanog pristupa, naučnih istraživanja i primene naprednih tehnologija. U narednim poglavljima biće detaljnije razmotreni ključni principi i tehnologije koje se koriste u prečišćavanju vazduha, tretmanu voda, remedijaciji tla i reciklaži otpada, kao i njihov značaj za očuvanje životne sredine i budućnosti ekosistema.

7.1.1. Prečišćavanje vazduha

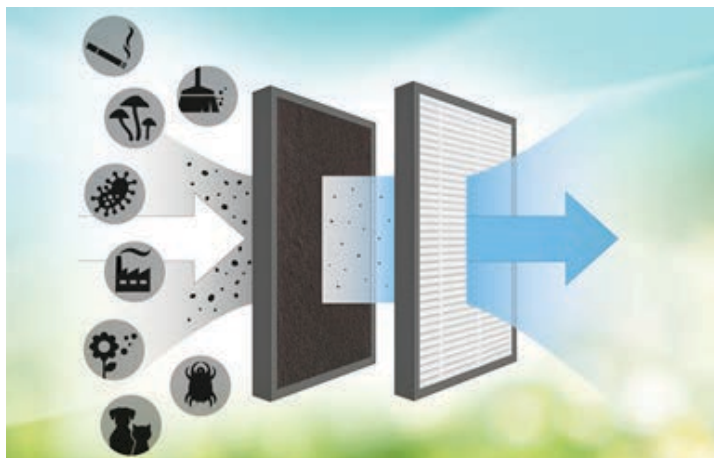
Prečišćavanje vazduha postaje sve značajnija tema u modernom svetu zbog rastuće zagađenosti uzrokovane industrijskim razvojem, saobraćajem i sve većim brojem stanovnika. Zagađenje vazduha predstavlja ozbiljan problem po zdravlje ljudi i životnu sredinu, jer sadrži štetne čestice, gasove i mikroorganizme koji mogu uzrokovati respiratorne bolesti, pogoršanje klimatskih uslova i oštećenje ekosistema. Zbog toga su razvijene različite metode i tehnologije za prečišćavanje vazduha, kako na individualnom nivou, tako i na nivou velikih industrijskih sistema.

Primarni ciljevi prečišćavanja vazduha su smanjenje koncentracija zagađujućih materija na nivoe koji nisu štetni po zdravlje i životnu sredinu, kao i uklanjanje neprijatnih mirisa. Efikasnost prečišćavanja zavisi od vrste zagađujućih materija, tehnoloških rešenja i specifičnih uslova okruženja.

Metode za prečišćavanje vazduha

Mehanički filteri predstavljaju metodu koja se najčešće koristi za prečišćavanje vazduha. Ovi filteri funkcionišu na principu fizičkog zadržavanja čestica u materijalu kroz koji prolazi vazduh. Najpoznatiji tipovi filtera su:

- **HEPA filteri** (*High Efficiency Particulate Air*) koji mogu ukloniti preko 99% čestica veličine do $0,3\mu\text{m}$, što ih čini efikasnim za uklanjanje čestica fine prašine, polena, dima i bakterija. Koriste se u bolnicama, laboratorijama, kao i u uređajima za domaćinstva;
- **pre-filteri** se koriste za uklanjanje čestica većih dimenzija, poput prašine i dlaka; osnovna namena ove vrste filtera je prefiltracija koja omogućava bolji rad i produžava vek trajanja pomenutim HEPA filterima (slika 7.1);
- **elektrostatički precipitatori** čiji rad se bazira na principu naelektrisanja čestica u vazduhu radi njihovog efikasnijeg uklanjanja; precipitatori generišu električno polje koje vrši naelektrisanje čestica u vazduhu, koje potom privlače naelektrisane ploče ili žice i na taj način se uklanjaju iz vazduha. Ova metoda je veoma efikasna u industrijskim postrojenjima, naročito tamo gde se vrši sagorevanje fosilnih goriva, za uklanjanje dima i finih čestica.

Slika 7.1. Dva nivoa mehaničkog filtriranja vazduha (*pre-filter* i *HEPA filter*)

Adsorpcioni filteri, poput onih koji koriste aktivni ugljenik, efikasni su u uklanjanju gasovitih zagađujućih materija i neprijatnih mirisa. Aktivni ugljenik ima visoku poroznost koja omogućava molekulima gasova da se "vežu" za površinu ugljenika. Ovi filteri se često koriste u kombinaciji sa mehaničkim filterima kako bi se obezbedilo veća efikasnost u prečišćavanju vazduha.

Fotokatalitički uređaji koriste UV zračenje u kombinaciji sa fotokatalizatorima kao što je titanijum-dioksid (TiO_2) kako bi razgradili organska jedinjenja, gasove i mikroorganizme. UV zračenje deluje na štetne materije, najčešće velike organske molekule, u vazduhu, razgrađujući njihove hemijske veze i pretvarajući ih u bezopasna jedinjenja poput vode i ugljen-dioksida. Pored toga UV zračenje je toksično za većinu mikroorganizama, pa se na ovaj način iz vazduha eliminišu i bakterije, virusi i drugi patogeni organizmi. Ova tehnologija se često koristi u medicinskim ustanovama za dezinfekciju vazduha.

Jonizatori stvaraju negativne jone koji se vezuju za zagađujuće čestice u vazduhu, čineći ih negativno naelektrisanim kako bi se lakše lepile i taložile na površine. Iako su efikasni za uklanjanje čvrstih čestica i neprijatnih mirisa, postoji zabrinutost oko stvaranja ozona kao nusproizvoda, što može imati štetne posledice po zdravlje. Ozon je specifičan jer ulazi u reakcije sa drugim jedinjenjima prisutnim u vazduhu, čime se stvara mogućnost da se upotrebom jonizatora generišu sekundarne zagađujuće materije koje mogu imati štetne uticaje na zdravlje i životnu sredinu.

Katalitički sistemi koriste **plazma tehnologiju** za neutralizaciju zagađujućih materija bilo da se radi o gasovima ili česticama u vazduhu. Visokonaponska plazma utiče na kidanje molekulskih veza, gde kao produkti reakcija najčešće nastaju voda i ugljen-dioksid. Katalitički sistemi mogu ukloniti širok spektar zagađujućih materija, uključujući VOC, bakterije, viruse i druga organska i neorganska jedinjenja koja emituju neprijatne mirise.

U praksi se često koriste kombinovani sistemi za prečišćavanje vazduha koji uključuju više tehnologija kako bi se postigla veća efikasnost. Na primer, uređaji za prečišćavanje vazduha mogu kombinovati HEPA filtere sa UV zračenjem i ugljeničnim filterima kako bi uklonili čestice, gasove, mikroorganizme i neprijatne mirise istovremeno.

Sistemi za prečišćavanje vazduha u industrijskim postrojenjima

U **industrijskim postrojenjima** primenjuju se sofisticirane metode prečišćavanja vazduha, uključujući elektrostatičke filtere, adsorpcione sisteme sa aktivnim ugljenikom, katalitičke reaktore i druge tehnologije za efikasno uklanjanje štetnih gasova i suspendovanih čestica emitovanih tokom proizvodnih procesa. Efikasnost i izbor metode prečišćavanja zavisi od specifične prirode industrijske delatnosti i tipa zagađujućih materija koje se oslobađaju u atmosferu. Na primer, različiti sistemi su optimizovani za eliminaciju specifičnih zagađujućih materija poput isparljivih organskih jedinjenja (VOC), teških metala ili fine prašine. U daljem tekstu biće razmotreni najzastupljeniji sistemi prečišćavanja u industriji. S obzirom na to da emisija štetnih materija u industrijskim procesima može predstavljati ozbiljan ekološki i zdravstveni problem, neophodna je primena naprednih tehnologija za minimizaciju zagađenja vazduha kako bi se obezbedila adekvatna zaštita zdravlja zaposlenih i očuvanje životne sredine.

Mehaničko filtriranje predstavlja jednu od najčešće primenjivanih metoda za efikasno uklanjanje čvrstih čestica iz vazduha u industrijskim postrojenjima. Ova tehnologija se koristi za separaciju suspendovanih zagađujućih materija, kao što su prašina, dim i aerosoli, čime se obezbeđuje čistiji izlazni vazduh i smanjenje rizika od zagađenja i zdravstvenih problema kod radnika. Efikasnost mehaničkog filtriranja u industriji varira u zavisnosti od tipa filtera i vrste čestica koje se uklanjaju.

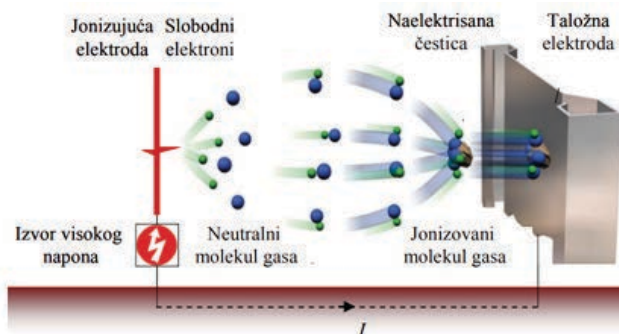
- **filteri sa tkaninama** (vrećasti filteri) predstavljaju jedan od najefikasnijih uređaja za uklanjanje sitnih čestica iz protoka vazduha. Princip rada ovih filtera zasniva se na prolasku zagađenog vazduha kroz specijalizovane tkanine, koje služe kao medijum za hvatanje prašine i drugih čestica. Čestice

se talože na površini tkanine, dok čist vazduh prolazi dalje. Vrećasti filteri su izuzetno efikasni u industrijama koje proizvode ili obrađuju cement, metale, hemikalije i druge materijale, gde postoji visoka koncentracija finih čestica. Ovi filteri mogu zadržati čestice i do veličine nekoliko μm ;

- **cikloni** funkcionišu na principu korišćenja centrifugalnih sila za separaciju čvrstih čestica iz protoka vazduha. Zagađeni vazduh ulazi u ciklon pod uglom, gde se stvara vrtložni tok koji tera teže čestice prema spoljnim zidovima ciklona, nakon čega one padaju u sakupljač na dnu uređaja. Ova tehnologija je posebno pogodna za industrije koje generišu veće čestice, kao što su drvna industrija, mlinovi, industrija građevinskog materijala i postrojenja za preradu rudnih materijala. Cikloni su jednostavni za održavanje i koriste se kao predtretman pre finijih filtera;
- **multicikloni** predstavljaju naprednu varijaciju standardnih ciklona, s time što koriste veći broj manjih ciklona unutar jednog uređaja kako bi se postigla veća efikasnost u uklanjanju čestica. Korišćenje više jedinica omogućava bolju separaciju finih čestica koje standardni cikloni ne mogu efikasno ukloniti. Ovi uređaji su naročito korisni u postrojenjima gde se generišu visoke koncentracije prašine i gde je potrebna kontinuirana filtracija velikih količina vazduha. Multicikloni su posebno korisni u aplikacijama kao što su elektrane na fosilna goriva, cementare i postrojenja za preradu sirovina, jer omogućavaju efikasnije uklanjanje manjih čestica iz vazduha.

Elektrostatički filteri (ESF) predstavljaju jednu od najefikasnijih tehnologija za uklanjanje suspendovanih čvrstih i tečnih čestica iz protoka vazduha u industrijskim postrojenjima, zasnovanu na korišćenju elektrostatičke interakcije za separaciju zagađivača. Ovi uređaji su posebno pogodni za postizanje visokog stepena prečišćavanja u industrijama koje emituju velike količine dima, prašine, čađi i aerosola, čime se značajno smanjuje zagađenje atmosfere i unapređuje kvalitet vazduha. Elektrostatički precipitatori funkcionišu na principu kreiranja snažnog električnog polja koje omogućava naelektrisanje zagađujućih čestica, koje se potom privlače i zadržavaju na naelektrisanim kolektorima, čime se uklanjaju iz gasnog toka.

Slika 7.2. Principa rada elektrostatičkog filtera



Rad elektrostatičkih filtera zasniva se na stvaranju visokog napona između elektroda unutar uređaja, što generiše električno polje (slika 7.2). Kada zagađeni vazduh prolazi kroz ovo polje, čestice u vazduhu postaju naelektrisane, obično dodavanjem elektrona, što ih čini negativno ili pozitivno naelektrisanim, u zavisnosti od tipa precipitatora. Naelektrisane čestice se zatim kreću prema pločama ili žicama unutar uređaja koje imaju suprotan naboj, gde se privlače i zadržavaju. Ploče se periodično čiste putem mehaničkih vibracija ili strugača kako bi se uklonjene čestice mogle sakupljati i odlagati na siguran način. Ovaj proces omogućava kontinuiranu filtraciju velikih količina vazduha sa minimalnim otporom protoka, što ESF uređaje čini izuzetno efikasnim za industrijske primene.

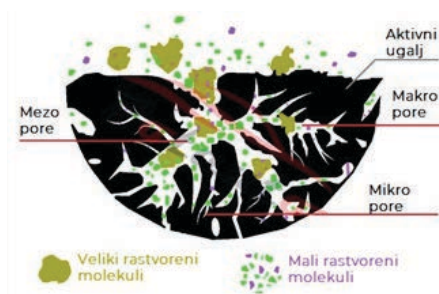
Elektrostatički filteri su izuzetno korisni u industrijama koje generišu značajne količine čestica i aerosola, kao što su termoelektrane (slika 7.3), cementare, postrojenja za preradu metala i postrojenja za spaljivanje otpada. U termoelektrama na fosilna goriva, ESF se koristi za uklanjanje pepela iz dimnih gasova, čime se smanjuje emisija u atmosferu. U cementarama, ovi uređaji efikasno uklanjaju čestice prašine koje nastaju tokom proizvodnje, smanjujući zagađenje i štiteći radnu okolinu. U postrojenjima za spaljivanje otpada, ESP uređaji uklanjaju čađ i druge čestice nastale tokom sagorevanja otpada, čime se obezbeđuje visok nivo zaštite životne sredine. Ova vrsta prečišćavanja vazduha prilagođena je za rad u ekstremnim uslovima, uključujući visoke temperature i korozivne atmosfere, što ESF čini fleksibilnim rešenjem za širok spektar industrijskih primena. Njihova visoka efikasnost u kombinaciji sa niskim operativnim troškovima i dugim vekom trajanja čini ih preferiranim izborom za postrojenja koja teže smanjenju emisija i usklađivanju sa ekološkim standardima i propisima.

Slika 7.3. Elektrostatički filteri na termoelektrani Kostolac



Adsorpcija predstavlja jednu od najsavremenijih i najefikasnijih metoda za uklanjanje gasovitih zagađujućih materija iz vazduha, posebno kada su u pitanju isparljiva organska jedinjenja i neprijatni mirisi. Ova tehnologija je široko primenjena u industrijskim postrojenjima, gde se koriste materijali poput aktivnog ugljenika zbog njegove izuzetne sposobnosti da adsorbuje molekule zagađujućih materija na svoju površinu. Aktivni ugljenik je, zbog svoje visoko porozne strukture i velike specifične površine, idealan za proces adsorpcije organskih gasova, omogućavajući njihovu efikasnu separaciju iz industrijskih gasova.

Slika 7.4. Princip adsorpcije na porama aktivnog ugljenika



Aktivni ugljenik funkcioniše na osnovu procesa fizičke i hemijske adsorpcije, pri čemu molekuli iz vazduha dolaze u kontakt sa njegovom visoko poroznom površinom i vezuju se za aktivne centre na ugljeniku (slika 7.4).

Fizička adsorpcija se odvija putem Van der Valsovih sila, gde se molekuli zagađujućih materija privlače i zadržavaju na površini čvrstog medijuma. Hemijska adsorpcija podrazumeva formiranje hemijskih veza između molekula zagađujuće materije i adsorbenta, što omogućava efikasniju separaciju. Zbog svoje izuzetno razvijene porozne strukture, aktivni ugljenik ima veliku sposobnost da apsorbuje čak i najmanje molekule. Kako kontaminirani vazduh prolazi kroz sloj aktivnog ugljenika, zagađujuće materije se hvataju na površini adsorbenta, dok prečišćeni vazduh izlazi iz filtera. Efikasnost ovog procesa zavisi od faktora poput temperature, koncentracije zagađujuće materije i protoka vazduha.

Adsorpcija sa aktivnim ugljenikom se koristi u industrijama koje emituju visok nivo isparljivih organskih jedinjenja i drugih gasovitih zagađujućih materija. Ova metoda je posebno pogodna za postrojenja za farbanje, gde VOC nastaju kao nusproizvod isparavanja rastvarača iz boja i lakova, kao i u hemijskoj industriji, gde se emituju isparljivi proizvodi hemijskih reakcija. Takođe, aktivni ugljenik se primenjuje u rafinerijama nafte za uklanjanje VOC i sumpornih jedinjenja iz gasova, čime se smanjuje emisija zagađujućih materija u atmosferu. U postrojenjima za preradu hrane, aktivni ugljenik se koristi za eliminaciju neprijatnih mirisa i gasova nastalih tokom obrade i skladištenja proizvoda.

Ova tehnologija je posebno efikasna jer može ukloniti širok spektar jedinjenja, uključujući VOC, kiseline, baze, sumporna jedinjenja, kao i određene metalne pare. Takođe, adsorpcija ima prednost u tome što ne proizvodi sekundarna zagađenja, kao što je to slučaj sa nekim drugim metodama prečišćavanja, zbog čega je ekološki prihvatljivija opcija. Međutim, kapacitet adsorbenta se s vremenom smanjuje, pa je periodična zamena ili regeneracija aktivnog ugljenika neophodna kako bi se održala optimalna efikasnost sistema.

Aktivni ugljenik je samo jedan od mnogih materijala koji se koriste za adsorpciju, ali se ističe zbog svoje dostupnosti, niske cene i mogućnosti regeneracije, što ga čini idealnim za široku industrijsku primenu u prečišćavanju gasova. Zbog ovih karakteristika, adsorpcija ostaje jedna od ključnih metoda za kontrolu emisija gasovitih zagađujućih materija u različitim industrijskim sektorima.

Katalitička i termička oksidacija su napredne tehnologije za prečišćavanje vazduha, koje se široko koriste u industriji radi efikasnog uklanjanje ugljovodonika i drugih gasovitih zagađujućih materija. Obe metode su zasnovane na principu oksidacije zagađujućih materija, ali se razlikuju u načinima na koje ostvaruju taj cilj, kao i u temperaturnim režimima i specifičnim primenama.

Katalitička oksidacija predstavlja sofisticiran metod oksidacije gasovitih zagađujućih materija koji koristi katalizatore za ubrzavanje hemijskih reakcija, omogućavajući pretvaranje ugljovodonika i drugih štetnih jedinjenja u bezopasne produkte poput ugljen-dioksida (CO_2) i vode (H_2O). Ova tehnologija je visoko efikasna pri nižim temperaturama u poređenju sa termičkom oksidacijom, zahvaljujući prisustvu katalizatora koji omogućava reakcije oksidacije na energetskom nivou nižem od uobičajenog.

Proces katalitičke oksidacije zasniva se na prolasku kontaminiranog vazduha kroz komoru koja sadrži **katalizator**, najčešće baziran na **plemenitim metalima** kao što su platina ili paladijum. Katalizatori igraju ključnu ulogu u snižavanju energije aktivacije potrebne za oksidaciju zagađujućih materija, omogućavajući da se ugljovodonici efikasno oksidišu na temperaturama znatno nižim nego što bi to bilo moguće u termičkoj oksidaciji. Na primer, dok termička oksidacija zahteva temperature od 700°C do 1200°C , katalitička oksidacija može biti efikasna na temperaturama između 300°C i 500°C , što rezultira smanjenom potrošnjom energije. Katalizatori omogućavaju ubrzanje reakcija oksidacije, čime se VOC i drugi gasovi transformišu u inertne materijale poput CO_2 i H_2O , a emisija štetnih materija se značajno smanjuje.

Katalitička oksidacija se široko koristi u industrijama koje proizvode ili emituju značajne količine VOC, kao što su postrojenja za proizvodnju boja, lakova, plastike i drugih organskih materijala. Zbog niske potrošnje energije i visoke efikasnosti pri nižim temperaturama, ova tehnologija se koristi u slučajevima kada je važno smanjiti operativne troškove, kao i u procesima gde je potrebno očuvati stabilnost materijala na višim temperaturama. Dodatno, katalitička oksidacija je pogodna za industrijske procese sa kontinualnim tokom emisija VOC, čime se postiže stalno smanjenje zagađenja atmosfere. Specifična je primena katalizatora u eliminacije ugljovodonika i azotnih oksida iz izduvnih gasova automobila. U katalitičkim konvertorima, ugljovodonici se oksiduju u prisustvu kiseonika, čime nastaju ugljen-dioksid (CO_2) i voda (H_2O), dok se azotni oksidi redukuju na azot (N_2) i kiseonik (O_2). Ova tehnologija značajno smanjuje emisije zagađujućih materija iz automobila, što doprinosi smanjenju zagađenja vazduha i ispunjavanju ekoloških standarda, kao što su norme automobilskih motora Euro 6.

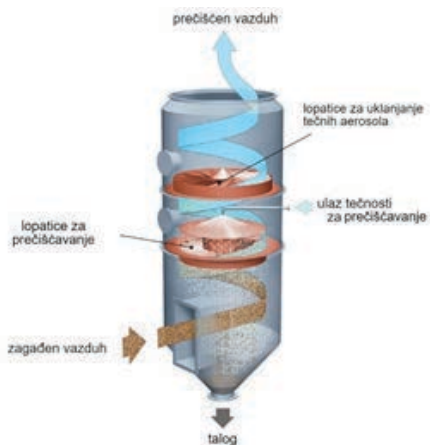
Termička oksidacija je metoda prečišćavanja vazduha koja se zasniva na sagorevanju gasovitih zagađujućih materija na vrlo visokim temperaturama, pri čemu se ugljovodonici i druge zagađujuće materije oksiduju u manje štetne ili inertne molekule, kao što su voda i ugljen-dioksid. Ova metoda je naročito pogodna za uklanjanje VOC i drugih organskih zagađujućih materija koji se javljaju u visokim koncentracijama u industrijskim postrojenjima.

U procesu termičke oksidacije, kontaminirani vazduh prolazi kroz **komoru za sagorevanje** u kojoj se zagreva na temperature između 700°C i 1.200°C . Na ovim temperaturama, VOC i drugi gasovi se razlažu na jednostavnije pretežno vodu (H_2O) i ugljen-dioksid (CO_2). Visoke temperature ne samo da oksiduju zagađujuće supstance, već omogućavaju brzu i potpunu razgradnju čak i najkompleksnijih organskih molekula. Da bi se održala stabilnost procesa i obezbedila maksimalna efikasnost, sistemi termičke oksidacije često koriste sekundarne izvore energije, kao što su prirodni gas ili drugi gorivi materijali, kako bi se postigla potrebna temperatura za sagorevanje. Ovaj metod se često kombinuje sa sistemima za rekuperaciju toplote (RTO), gde se deo generisane toplote koristi za predzagrevanje ulaznog vazduha, čime se smanjuje ukupna energetska potrošnja.

Termička oksidacija je pogodna za industrije sa visokom emisijom VOC i drugih zagađujućih gasova, kao što su rafinerije nafte, hemijska postrojenja i industrije za proizvodnju boja i lakova. Zbog visokih temperatura koje se koriste, ova tehnologija je naročito efikasna za uništavanje postojanih organskih jedinjenja, uključujući one koji su otporni na druge metode prečišćavanja.

Skruberi su sofisticirani uređaji za prečišćavanje vazduha koji koriste tečne medijume, najčešće vodu ili specifične hemikalije, kako bi efikasno uklonili gasovite zagađujuće materije i suspendovane čestice iz industrijskog gasnog toka. Ova metoda je izuzetno pogodna za uklanjanje gasova poput sumpor-dioksida (SO_2), vodonik-sulfida (H_2S), amonijaka (NH_3) i kiselih isparenja, koji mogu predstavljati značajnu opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi. Skruberi imaju visoku efikasnost, a često se koriste kao deo integrisanih sistema za kontrolu emisija, posebno u industrijskim postrojenjima koja emituju korozivne ili otrovne gasove.

Slika 7.5. Primer industrijskog skrubera (levo) i šematski prikaz načina rada (desno)



Skruberi funkcionišu na osnovu kontakta između zagađenog vazduha i tečnosti u obliku kapljica ili filma (slika 7.5). Kada zagađeni gasni tok prolazi kroz komoru uređaja, on dolazi u direktan kontakt sa tečnošću, pri čemu dolazi do fizičkih i hemijskih procesa koji omogućavaju uklanjanje zagađujućih materija. Štetni gasovi se rastvaraju u tečnosti putem apsorpcije ili hemijskih reakcija, pri čemu se formiraju manje štetne ili neutralne supstance. Na primer, sumpor-dioksid se često neutralizuje reakcijom sa alkalnim rastvorima, formirajući sulfatne ili sulfidne soli, dok se amonijak apsorbuje u vodi ili kiselinskim rastvorima, smanjujući njegovu koncentraciju u izlaznom gasu. Čvrste čestice se takođe hvataju u tečnosti i ispiraju iz gasnog toka, čime se dodatno smanjuje ukupna količina zagađujućih materija koja izlazi u atmosferu. Skruberi mogu biti dizajnirani da obuhvate više faza prečišćavanja, uključujući neutralizaciju kiselih gasova, oksidaciju ili redukciju specifičnih zagađujućih materija i eliminaciju mirisa.

Skruberi se široko koriste u industrijama koje emituju agresivne gasove, kao što su termoelektrane na fosilna goriva, postrojenja za preradu ruda, cementare i petrohemijska postrojenja. U termoelektranama, skruberi su ključni za uklanjanje sumpor-dioksida (SO_2), koji je glavni uzročnik kiselih kiša. Ovi uređaji se takođe koriste u industrijama gde je prisutan vodonik-sulfid (H_2S), kao što su postrojenja za preradu nafte i prirodnog gasa, jer omogućavaju uklanjanje ovog toksičnog i korozivnog gasa iz emisija. U postrojenjima za preradu metala i rudarskim industrijama, skruberi se koriste za uklanjanje kiselih isparenja, kao što su hlorovodonična (HCl) ili sumporna kiselina (H_2SO_4), koja nastaju tokom procesa obrade ruda i metala. Njihova primena je posebno važna u industrijskim postrojenjima gde se primenjuju mere za kontrolu emisija zagađujućih materija kako bi se ispunili međunarodni standardi i propisi.

Skruberi predstavljaju fleksibilnu i visoko prilagodljivu tehnologiju za prečišćavanje gasova, jer mogu biti prilagođeni specifičnim potrebama različitih industrijskih procesa. Efikasnost uređaja zavisi od parametara kao što su brzina protoka vazduha, vrsta zagađujućih materija, hemijski sastav tečnosti i specifični uslovi procesa. Kombinovanjem skrubera sa drugim metodama za kontrolu emisija, kao što su elektrostatički precipitatori ili filteri sa tkaninama, može se postići optimalan stepen prečišćavanja industrijskih gasova, čime se obezbeđuje značajno smanjenje zagađenja vazduha i zaštita životne sredine.

Biološko prečišćavanje vazduha predstavlja naprednu tehnologiju koja koristi mikroorganizme za razgradnju organskih zagađujućih materija, iz industrijskih emisija. Ova metoda se zasniva na prirodnim procesima biodegradacije, gde mikroorganizmi, poput bakterija, gljivica i aktinomiceta, metabolišu organska jedinjenja, pretvarajući ih u jednostavnije i neškodljive produkte kao što su

voda, ugljen-dioksid i inertne soli. Biološko prečišćavanje je održivo i ekološki prihvatljivo rešenje za smanjenje emisija organskih zagađivača, jer se zasniva na prirodnim ekosistemima, a njegova primena ne zahteva upotrebu hemijskih reagensa ili visokih temperatura.

Osnovni princip biološkog prečišćavanja vazduha uključuje prolazak kontaminiranog vazduha kroz filtere ispunjene biološkim medijumima, koji mogu biti mešavina zemlje, treseta, komposta, drvnih iverja ili specijalno dizajniranih sintetičkih materijala. Ovi mediji su kolonizovani mikroorganizmima koji koriste organske materije kao izvor energije i hrane za svoj rast i razmnožavanje. Kada gasovite zagađujuće materije, poput VOC ili jakih, neprijatnih mirisa, prođu kroz sloj biološkog materijala, mikroorganizmi ih apsorbuju i razgrađuju kroz metaboličke procese. Tokom ovog procesa, organska jedinjenja oksiduju do jednostavnijih jedinjenja, pretežno ugljen-dioksida (CO_2) i vode (H_2O), dok se inertni nusprodukti skladište unutar medijuma. Efikasnost biološkog prečišćavanja zavisi od nekoliko faktora, uključujući vrstu zagađujuće materije, koncentraciju organske materije, vlažnost, pH vrednost i temperaturne uslove, kao i od pravilnog održavanja biološkog medijuma.

Biološko prečišćavanje vazduha je naročito efikasno u industrijama koje emituju visoke koncentracije, kao što su postrojenja za preradu hrane, pogoni za preradu otpada, fabrike za preradu kože i industrije za preradu papira (slika 7.6). U postrojenjima za preradu hrane, ova tehnologija se koristi za uklanjanje emisija koje nastaju tokom fermentacije, sušenja i termičke obrade hrane. U postrojenjima za preradu otpada, biološki sistemi su ključni za smanjenje neprijatnih mirisa i razgradnju organskih materija iz otpada, čime se smanjuje štetan uticaj na okolinu i zdravlje. U industriji kože, biološko prečišćavanje se koristi za razgradnju otpadnih gasova koji sadrže amonijak, sumporne jedinjenja i druge organske zagađivače nastale tokom obrade sirovih koža.

Slika 7.6. Primer industrijskog postrojenja za biološki tretman zagađenog vazduha



Dodatno, biološki sistemi za prečišćavanje vazduha često se primenjuju u kombinaciji sa drugim tehnologijama, poput hemijskih skrubera ili fizičkih filtera, kako bi se postigla optimalna efikasnost prečišćavanja u kompleksnim industrijskim procesima. Prednosti biološkog prečišćavanja uključuju niske operativne troškove, minimalnu potrošnju energije i odsustvo toksičnih ostataka, što ovu tehnologiju čini ekološki prihvatljivom alternativom za prečišćavanje industrijskih gasova. Međutim, neophodna je kontinuirana kontrola uslova unutar bioreaktora, kako bi se održala optimalna mikrobiološka aktivnost i osigurao dugoročni učinak sistema.

Plazma tehnologija za prečišćavanje vazduha predstavlja inovativnu i naprednu metodu za uklanjanje širokog spektra zagađujućih materija koje se u gasovitom obliku emituju u vazduh. Zasnovana je na upotrebi visokoenergetskih čestica koje se nalaze u obliku **plazme** (visoko jonizovano stanje gasa, koje se formira pod uticajem električnih ili elektromagnetnih polja). Plazma, kao četvrto agregatno stanje materije, sadrži slobodne elektrone, jone, atome i radikale koji zajedno omogućavaju visoko reaktivno okruženje, efikasno za razgradnju kompleksnih zagađujućih vrsta kakva su isparljiva organska jedinjenja (VOC), azotni oksidi (NO_x), sumpor-dioksid (SO₂), neprijatni mirisi i mikroorganizmi. Ova tehnologija pruža visok stepen fleksibilnosti i efikasnosti u različitim industrijskim aplikacijama, posebno kada su u pitanju zagađujuće materije otporne na konvencionalne metode prečišćavanja.

Plazma tehnologija u prečišćavanju vazduha koristi visokofrekventna električna polja ili mikrotalasne izvore energije za generisanje nisko-temperaturne plazme. Kada kontaminirani vazduh prolazi kroz plazma reaktor, energija električnog polja dovodi do jonizacije gasova i stvaranja slobodnih elektrona i jona. Ove visokoenergetske čestice iniciraju hemijske reakcije koje razgrađuju zagađujuće materije na njihove osnovne komponente. Na primer, VOC mogu razložiti na manje molekule, kao što su ugljen-dioksid (CO₂) i voda (H₂O), dok NO_x mogu biti redukovani na azot (N₂) i kiseonik (O₂).

Proces prečišćavanja pomoću plazme odvija se kroz tri glavne faze:

- **generisanje plazme:** u izvoru plazme, pod uticajem električnog polja dolazi do jonizacije gasova, pri čemu se formiraju slobodni elektroni, joni i visoko reaktivni radikali, poput hidroksilnih ($\text{OH}\cdot$) i kiseoničnih radikala ($\text{O}\cdot$);
- **reakcija sa zagađujućim materijama:** visokoenergetske čestice reaguju sa jedinjenjima u vazduhu, razbijajući hemijske veze u složenim molekulima i pretvaraju ih u jednostavnije i manje štetne supstance;
- **neutralizacija:** nakon što su zagađujuće materije razgrađene, proizvodi reakcije se neutralizuju i eliminišu iz vazduha; neretko se sekundarne reakcije koriste za dalju razgradnju proizvoda koji nastaju tokom primarnog procesa prečišćavanja.

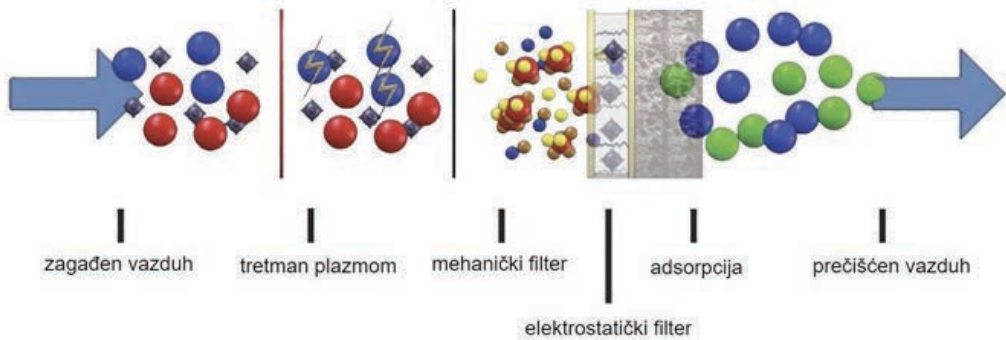
Jedna od glavnih prednosti plazma tehnologije je mogućnost rada na sobnim temperaturama, što eliminiše potrebu za visokim temperaturama karakterističnim za termičke metode prečišćavanja, čime se štedi energija i smanjuju operativni troškovi. Takođe, plazma tehnologija može se koristiti kao samostalna metoda ili u kombinaciji sa drugim tehnologijama, kao što su adsorpcija, katalitička oksidacija ili filteri, kako bi se postigla sinergija u prečišćavanju kompleksnih gasnih emisija.

Plazma tehnologija nalazi primenu u različitim industrijskim sektorima zbog svoje sposobnosti da efikasno razgradi širok spektar gasovitih zagađujućih materija. Neke od ključnih industrija u kojima se plazma tehnologija koristi su:

- **industrija prerade otpada:** plazma reaktori se koriste za razgradnju VOC i drugih gasova koji nastaju tokom prerade organskog otpada; ova tehnologija omogućava smanjenje neprijatnih mirisa i emisije štetnih materija u atmosferu;
- **hemijska industrija:** u hemijskoj industriji, plazma tehnologija se primenjuje za uklanjanje VOC i toksičnih gasova koji se emituju tokom različitih procesa, uključujući sintezu i preradu hemikalija;
- **elektrane na fosilna goriva:** u termoelektranama, plazma tehnologija se koristi za uklanjanje NO_x i SO_2 iz dimnih gasova, čime se smanjuje njihov uticaj na zagađenje vazduha i formiranje kiselih kiša;
- **farmaceutska industrija:** u farmaceutskoj proizvodnji, plazma se koristi za eliminaciju VOC i mikrobioloških zagađivača iz vazduha, čime se obezbeđuje čistija radna sredina i smanjuje ekološki otisak.

Osim navedenih prednosti, plazma reaktori su relativno kompaktni, što omogućava jednostavnu instalaciju i integraciju u postojeće sisteme za prečišćavanje vazduha u industrijskim postrojenjima (slika 7.7).

Slika 7.7. Šematski prikaz višestepenog tretmana zagađenog vazduha



Prilikom korišćenja plazma tehnoloogija, jedan od glavnih izazova je formiranje nusproizvoda tokom procesa prečišćavanja, kao što je ozon (O_3), koji može biti štetan u visokim koncentracijama. Da bi se rešio ovaj problem, plazma reaktori se često kombinuju sa dodatnim tehnologijama koje omogućavaju neutralizaciju ozona i drugih nusproizvoda pre nego što se vazduh vrati u atmosferu.

7.1.2. Prečišćavanje voda

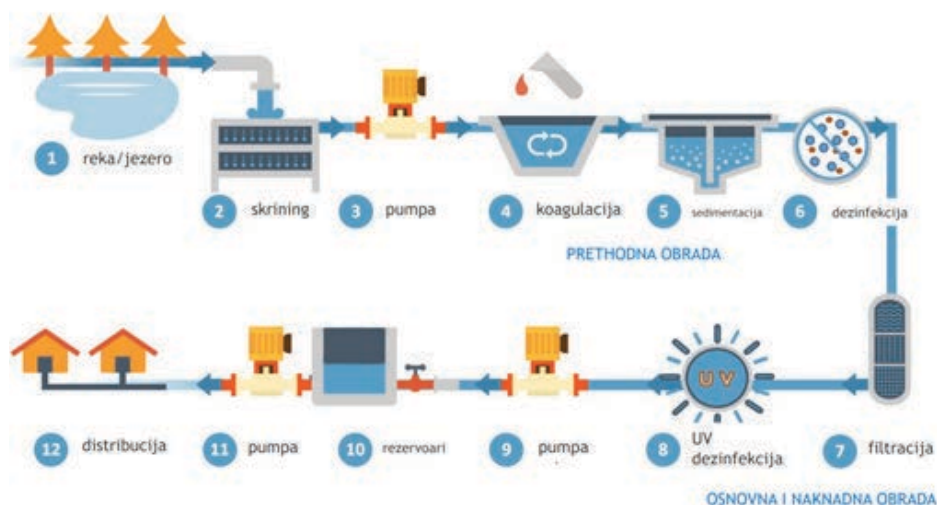
Prečišćavanje voda se sprovodi u zavisnosti od karakteristika otpadne vode, kvaliteta koji je potrebno postići, namene vode (za piće, za navodnjavanje, vode u industrijskim procesima) i stepena zagađenja. Količina, fizičko-hemijske osobine, reakcije i toksičnost voda razlikovaće se kod otpadnih voda koje nastaju na različite načine (tabela 7.1). Najviši kvalitet prečišćavanjem, identičan kvalitetu vode za piće, bi trebalo postići kod procesnih voda u prehrambenoj industriji i farmaciji dok se najniži kvalitet očekuje kod vode koja se primenjuje u metalurgiji.

Tabela 7.1. Primeri karakteristika otpadnih voda koje nastaju kao posledica komunalnih i industrijskih aktivnosti

Karakteristika	Otpadne vode naselja	Otpadne vode industrije
Nastanak	Delatnosti u domaćinstvu; fekalije	U pogonima zbog uklanjanja otpada; rastvori sirovina i proizvoda
Količina	Uslovljena životnim standardom; ograničeno varira	Uslovljena vrstom industrije; jako varira
Fizičke osobine	Ujednačena	Jako variraju
Hemijski sastav	Ujednačen; preovlađuju biorazgradive supstance	Veoma različit; od biorazgradivih, nerazgradivih do toksičnih
Reakcija	Neutralna ili slabo bazna	Jako se razlikuje
Toksičnost	Nije karakterističan	Različit stepen
Postupak prečišćavanja	Biološki sa dezinfekcijom	Veoma različiti (mehanički, hemijski, biološki, kombinovano)

Prečišćavanje voda se sprovodi u skladu sa najbolje dostupnim tehnikama (*Best Available Techniques*, BAT). Termin **najbolje dostupne/raspoložive tehnike** označava dostupne tehnike koje su procenjene kao najbolje za sprečavanje ili svođenje na minimum emisija i uticaja na životnu sredinu. Pod tehnikom se podrazumeva i tehnologija koja se koristi, kao i način na koji je instalacija/postrojenje projektovano, izgrađeno, održavano i stavljeno u upotrebu. Primeri postrojenja su: rafinerija, fabrika hrane ili farma.

Slika 7.8. Primer ciklusa za prečišćavanje zagađene vode



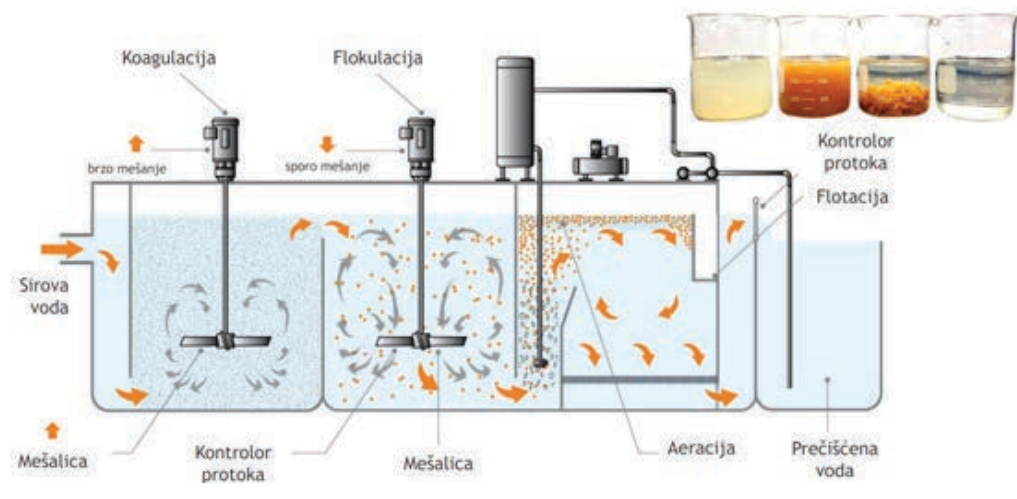
Metode za prečišćavanje voda su određene hemijskim osobinama zagađujućih materija i fizičkom veličinom nečistoća i obuhvataju:

1. prethodnu obradu: flokulacija, koagulacija, aeracija, sedimentacija, flotacija i filtracija;
2. osnovnu obradu: jonska izmena, hemijske metode, membranska filtracija i elektrodijaliza; i
3. naknadnu obradu: ozonoliza, hlorisanje, radijacija (slika 7.8).

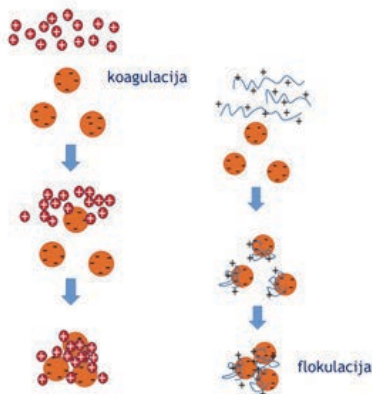
Prethodna obrada vode obuhvata nekoliko procesa. Odvajanje čvrstog materijala u koloidnom obliku, koji se najčešće pojavljuju kao zamućenje u vodi, se zasniva na procesima taloženja i vrši primenom koagulacije i flokulacije (slika 7.9). Zagađenoj vodi se najpre dodaju koagulant koji dovode do destabilizacija koloida smanjivanjem odbojnih sile između čestica koloida (slika 7.10). Najčešće korišćeni koagulant su: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, u količini od 10 do 150 g m^{-3} , FeCl_3 , u količini od 5 do 150 g m^{-3} , i $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, u količini od 10 do 250 g m^{-3} . Koagulant jonizuju, katjoni Al i Fe se adsorbuju na površini koloida. Ovaj proces je veoma brz, odvija se za manje od 0,1 s i zahteva veliku energiju. Zato se koagulant dodaju tokom brzog mešanja u tanku sa kratkim vremenom zadržavanja. Nakon adsorpcije katjona koloidi više nisu stabilni, ali privlače jedni druge vodoničnim vezama. U sledećem koraku se dodaju flokulanati koji se vezuju ili adsorbuju na koloidne čestice koje se međusobno privlače, pa pospešuju stvaranje flokula (slika 7.10).

Flokule postaju mnogo veće od početnih koloidnih, pa mogu biti uklonjene taloženjem. Adsorpcija flokulanata zahteva znatnu energiju, pa se oni dodaju uz energično mešanje, ali se mora voditi računa jer formirane flokule mogu da se unište prekomernom brzinom. Za fazu rasta flokula koristi se tank u kome je sporije mešanje nakon čega sledi odvajanje sedimentacijom. Kao flokulanti koriste se aktivirani silika-gel ili polielektroliti (dugački lančani ugljovodonici sa nekoliko katjonskih i anjonskih grupa, primer su amonijum kvaternarni joni, poliakrilna kiselina).

Slika 7.9. Primeri procesa prethodne obrade vode



Slika 7.10. Vezivanje čestica koloida sa koagulantima i flokulantima u vodi

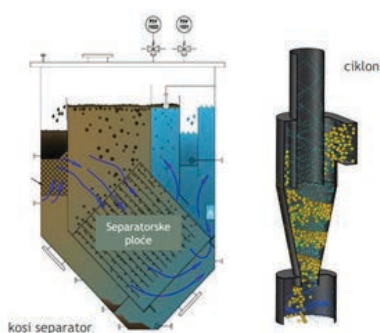


U sirovoj vodi koja sadrži gasove kao što su: O_2 , CO_2 , N_2 , H_2S , CH_4 i NH_3 primenjuje se i **aeracija** kao postupak prethodne obrade vode (slika 7.9). U toku aeracije, vazduh se ubacuje pod pritiskom u vodeni tok preko difuzera koji rasipa vazduh u obliku finih mehurića. Voda se uvodi na dnu posude, koja je ispunjena poroznim medijumom, kako bi se povećala dodirna površina između vazduha i vode. Višak vazduha se izdvaja iz vode na vrhu posude i ispušta u atmosferu. Nakon aeracije, voda prolazi kroz peščani filter kako bi se istaložile komponente poput Fe ili Mn. Neorganski joni (npr. Fe^{2+}) se oksiduju do oblika koji je moguće uklanjati u obliku taloga (jon Fe^{3+}).

Za uklanjanje čvrstih čestica koriste se **flotacija** i **sedimentacija** koje se zasnivaju na razlici u specifičnoj masi čvrstih komponenti i vode. Prilikom spontane flotacije čestice se podižu prema površini jer je specifična masa čestica manja od specifične mase vode i sa zatim se uklanjaju. Izazvana/podstaknuta flotacija podrazumeva dodatak vazduha u vodu. Na ovaj način vazduh prijanja na čestice i stvara „gasovite čestice“, koje imaju manju gustinu nego voda, pa se podižu na površinu, odakle ih je moguće ukloniti. Razlikuju se tehnika rastvorenog vazduha i elektroflotacija. Kod tehnike rastvorenog vazduha, vazduh se rastvara u vodi pod pritiskom. Kada se nakon povećanja, pritisak smanji, vazduh u obliku „mikromehurića“ (prečnika između 40 i 70 μm) napušta rastvor. Ti mehurići i čvrste materije formiraju gasne tvorevine koje se podižu prema površini vode. Pri primeni elektroflotacije, elektrolizom vode se proizvode H_2 i O_2 koji se vezuju za čestice.

Taloženjem (sedimentacijom) dolazi do razdvajanja dve faze zbog razlike u gustini. Na brzinu taloženja utiču: razlika u gustini, viskozitet okolne tečnosti, i prečnik čestica koje se odvajaju. Da bi došlo do taloženja čestica neophodno je da se voda u taložniku zadržava dovoljno dugo. Odvajanje pod uticajem sile gravitacije se može odvijati u pločastim i centrifugalnim separatorima, i hidro-ciklonima (slika 7.11).

Slika 7.11. Kosi pločasti separator i ciklon za sedimentaciju

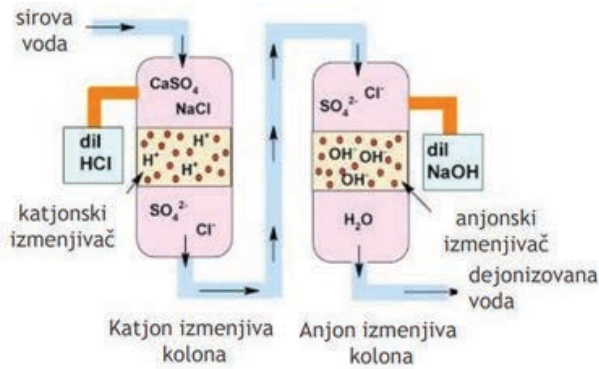


U kosim pločastim separatorima fluid prolazi između niza kosih ploča, pri čemu uzak prostor između ovih ploča skraćuje put česticama. Vreme odvajanja kod pločastih separatora je mnogo kraće nego kod konvencionalnih tankova. Odvajanju čestica ubrzava protok vode nagore kroz separator. Primer ovakvog prečišćavanja je odvajanja ulja iz vode. U centrifugalnim separatorima primenju se rotacija velikom brzinom (5000 g). Čvrste komponente se kreću prema rubu kugle, a izbistrena voda se zadržava u centru kugle. U hidrociklonima čestice veće gustine nego što je voda se kreću pod uticajem gravitacione sile prema spoljnim zidovima ciklona, a voda se zadržava u centralnom delu.

Nakon flotacije i sedimentacije primenjuje se **filtracija**. Najčešće se koriste filteri silaznog toka, koji imaju jedan, dva ili tri sloja. Kapacitet za odvajanje suspendovanih čestica je veći kod višeslojnih filtera. Pojedinačni slojevi/filteri su različite gustine; često primenjivana kombinacija je: pesak (0,5–1,5 mm), antracit (2–3 mm) i plastika (3–5 mm). Čestice se hvataju u filterskom sloju, a filter se čisti protokom vode u suprotnom pravcu, tzv. „povratnim pranjem“. Ako se primeni aeracija za povratno pranje pospešuje se uklanjanje nakupljenih čvrstih nečistoća u filtracionom sloju, smanjuje potrošnja vode i skraćuje vreme procesa pranja.

Postupci osnovne obrade vode uključuju: jonsku izmenu, hemijske metode, membransku filtraciju i elektrodijalizu. **Izmena jona** podrazumeva zamenu neželjenih jona u vodi sa jonima vodonika i/ili hidroksilnim jonima (slika 7.12). Za jonsku izmenu koriste se kolone koje su ispunjene poroznim zrcima smole prečnika 0,3 do 1,2 mm sa aktivnim anjonskim ili katjonskim grupama. Najčešće korišćen materijal je polimer polistirena (divinil-benzen) ili poliakrilata. Aktivni centri u koloni sadrže elektrostatičke aktivne grupe katjona ili anjona koji obrazuju veze sa jonima iz vode. Prilikom **katjonske izmene**, jednovalentni joni K^+ , Na^+ ili H^+ će se kao aktivna mesta u smoli zameniti dvovalentnim jonima Ca^{2+} ili Mg^{2+} koji su prisutni u vodi dok se u **anjonskoj izmeni** jednovalentni Cl^- ili OH^- izmenjuju sa dvovalentnim anjonima prisutnim u vodi (npr. SO_4^{2-}).

Slika 7.12. Jonska izmena

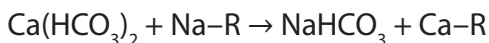
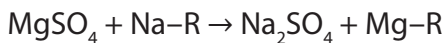
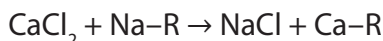


Sposobnost izmenjivača da lakše oduzima i bolje veže neke jone na sebe naziva se **jonska selektivnost**. Jonski izmenjivači su selektivniji za veće jone, a njihova sposobnost da preuzmu jone uvek zavisi od ravnoteže koja je uslovljena koncentracijom jona u smoli, kao i koncentracijom u okolnoj tečnosti. Na primer, izmenjivači za omekšavanje i demineralizaciju vode imaju veću sposobnost apsorbovanja dvovalentnih jona nego jednovalentnih. Helatni izmenjivači vezuju metalne jone u komplekse dok su ostali joni zanemareni.

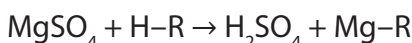
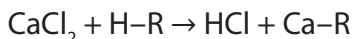
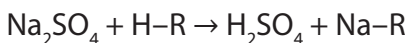
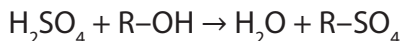
Jonoizmenjivačke smole se moraju regenerisati pre nego što sloj postane potpuno zasićen neželjenim jonima u vodi, u suprotnom može doći do prolaska istih u obrađenu vodu. Regeneracija smole zavisi od: ravnoteže koja određuje maksimalnu količinu jona koja se može apsorbovati; brzine koja određuje proces apsorpcije i otpor prenosa; i koncepcije postupka, koji određuje maseni bilans u postupku. Sadržaj jona rastvora za regeneraciju zavisice od aktivnog oblika smole. Rastvor NaCl se koristi za regeneraciju Na^+ katjonskih smola, i Cl^- anjonskih smola. Za regeneraciju smola koje imaju H^+ koriste se kiseli rastvori, a rastvor NaOH za regeneraciju anjonskih smola sa OH^- . Koncentracija rastvora za regeneraciju je obično od 1 do 10 %. Posle regeneracije izmenjivač jona retko zadržava početni kapacitet. Step en gubitka kapaciteta je teško ili čak nemoguće predvideti.

Primeri upotrebe jonska izmene su:

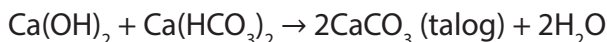
- omekšavanje vode za šta se koristi smola (R) sa slabo kiselim grupama karboksilne kiseline (COOH) ili jako kiselim grupama sulfonske kiseline (SO₃H):



- uklanjanje bikarbonata,
- potpuna dejonizacija: katjonska i anjonska izmena. Za katjonsku izmenu se mogu koristiti iste smole kao za omekšavanje vode, a za anjonsku izmenu se koriste smole sa jako bazni ostatkom, kvaternarni amonijum jon (R-N-(CH₃)₃), ili sa slabo baznim ostatkom kao što su amini (R-NH₂):

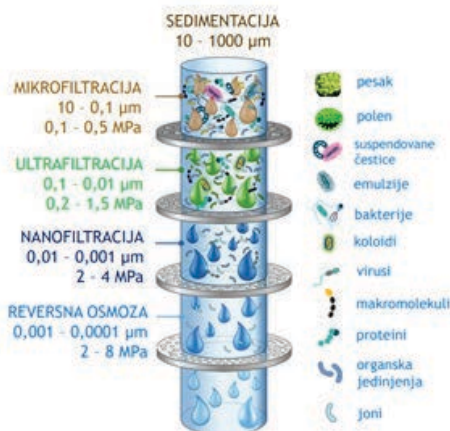


Hemijske metode obuhvataju reakcije taloženja, neutralizacije, oksidacije i redukcije. Vodi se dodaju rastvorljivi reagensi za obrazovanje nerastvorljivih nepoželjnih jedinjenja koja se uklanjanju koagulacijom, flokulacijom, sedimentacijom i/ili filtracijom. Primer reakcije taloženja je uklanjanje prolazne tvrdoće vode:

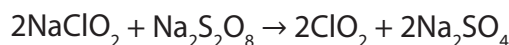
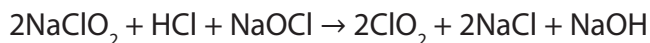


Primenom **membranske filtracije**, voda se potiskuje kroz polupropustljivu membranu pod pritiskom. Niskomolekulske frakcije prolaze kroz membranu, a visokomolekulska jedinjenja se zadržavaju i koncentrišu (slika 7.13). Granicu propustljivosti određuje molekulska masa najmanjih molekula koji se zadržavaju na poledini membrane.

Slika 7.13. Primeri nivoa u membranskoj filtraciji



Naknadnom obradom voda vrši se dezinfekcija odnosno uklanjanje patogenih mikroorganizama. Od fizičkih metoda primenjuju se: zagrevanje (na 100°C većina mikroorganizama će biti uništena, a ostaju spore), mikrofiltracija i radijacija (UV zračenje na 254 nm daje najbolji efekat protiv mikroorganizama). Hemijska **obrada hlorisanjem** uključuje dodavanje hlora, natrijumhipohlorita, hlordioksida, vodonikperoksida ili ozona. Hemikalije, nasuprot fizičkim metodama i nakon obrade imaju uticaj, jer se zadržavaju u vodi. Kada se doda u vodu, hlor daje hipohloritne jone (ClO^-), kao i zagađujuća hlorovana organska jedinjenja (trihlormetane i hlorfenole) pa je oprez neophodan pri njegovoj upotrebi za dezinfekciju. Hlordioksid (ClO_2) se proizvodi direktno zbog eksplozivnosti i nestabilnosti; deluje mnogo brže i ima trajnije dejstvo nego sam hlor i prilikom njegove upotrebe ne nastaju trihlormetani i hlorfenoli. Proizvodnja ClO_2 se može predstaviti reakcijama:



Uobičajena procedura **ozonolize** podrazumeva: stvaranje O_3 u reaktoru uz izvor kiseonika/vazduha iz rezervoara ili iz generatora; rastvaranje O_3 uključujući reakcioni tank; i razgradnja O_3 kako bi se sprečilo njegovo ispuštanje u atmosferu (na 350°C). Koncentracija O_3 u gasu iz reaktora je od 2 do 12% u zavisnosti da li se koristi vazduh ili čisti kiseonik. Oko 80 do 90 % O_3 se može rastvoriti u vodi, a ostatak se mora razgraditi pre ispuštanja u atmosferu. Ozon je jak oksidans,

reaguje sa organskim i neorganskim supstancama; oksiduje Fe i Mn, omogućava njihovo uklanjanje filtracijom ili sedimentacijom. Takođe, ozon se koristi za eliminaciju stranog ukusa, odnosno mirisa iz vode i smanjenje boje, naročito u UV oblasti.

7.1.3. Remedijacija zemljišta

Remedijacija zemljišta je proces koji obuhvata niz tehničkih, hemijskih, bioloških i fizičkih metoda usmerenih ka uklanjanju, smanjenju ili neutralisanju zagađujućih materija prisutnih u zemljištu kako bi se postigao održivi kvalitet životne sredine. Ova metoda se često koristi u industrijskim oblastima, lokacijama zagađenim toksičnim otpadom, hemijskim akcidentima, kao i u poljoprivrednim područjima gde je zagađenje pesticidima i teškim metalima značajno narušilo kvalitet zemljišta. Remedijacija ima ključnu ulogu u sanaciji zagađenih prostora, obnovi ekosistema, očuvanju poljoprivrednog potencijala i zaštiti ljudskog zdravlja.

Metode remedijacije zemljišta uključuju različite tehnike i strategije koje se biraju na osnovu vrste i stepena zagađenja, tipa zemljišta i specifičnih ekoloških uslova lokacije. Ove metode mogu se klasifikovati u *in situ* i *ex situ* tehnike.

In situ remedijacije se primenjuju direktno na lokaciji zagađenja, bez potrebe za iskopavanjem ili transportom zemljišta, čime se smanjuju troškovi i narušavanje životne sredine. Među *in situ* tehnikama, izdvajaju se:

- bioremedijacija, koja koristi mikroorganizme (bakterije, gljivice) ili biljke (fitoremedijacija) za razgradnju ili apsorpciju zagađujućih materija; mikroorganizmi metabolišu organska jedinjenja, pretvarajući ih u bezopasne proizvode poput ugljen-dioksida (CO_2) i vode (H_2O); fitoremedijacija uključuje upotrebu specifičnih biljaka koje apsorbuju teške metale ili organska jedinjenja iz tla;
- fizičko-hemijske metode koje uključuju procese kao što su ispiranje zemljišta (tehnike gde se zagađujuće materije rastvaraju i uklanjaju iz tla upotrebom hemikalija ili vode);
- elektrokinetička remedijacija (primena električnih polja za mobilizaciju i izvlačenje zagađujućih materija) i vaporizacija (iskorišćavanje toplote za uklanjanje isparljivih zagađujućih materija).

Ex situ remedijacije zahtevaju iskopavanje kontaminiranog zemljišta i njegovo transportovanje na mesto gde se vrši tretman. Najviše korišćene metode u ovom tipu remedijacije su:

- termička desorpcija, gde se koriste visoke temperature za isparavanje i uklanjanje organskih zagađujućih materija iz zemljišta; termička desorpcija je posebno efikasna u slučajevima kontaminacije naftnim derivatima, pesticidima i VOC; zagađivači isparavaju i dalje se prerađuju u gasovitom stanju;
- hemijska oksidacija u kojoj se oksidacioni agensi (npr. vodonik-peroksid, ozon) koriste za hemijsku transformaciju zagađujućih materija u zemljištu u manje toksične ili bezopasne supstance. Ova tehnika je efikasna kod razgradnje organskih jedinjenja, poput naftnih derivata i pesticida;
- stabilizacija i solidifikacija kod koji se zagađujuće materije iz zemljišta tretiraju hemijskim ili fizičkim procesima kako bi se vezali za stabilne komponente tla, čime se smanjuje njihova pokretljivost i biološka raspoloživost; ova metoda se uglavnom koristi kod teških metala i radionuklida.

Faktori koji utiču na izbor metode remedijacije su pre svih vrsta zagađujućih materija, karakteristike zemljišta (sastav zemljišta, njegova propustljivost, organski sadržaj i pH vrednost), obim i dubina kontaminacije (dubina na kojoj su locirane zagađujuće materije određuje primenu *in situ* ili *ex situ* metoda), ekološki i zakonski zahtevi (regulatorni okviri mogu zahtevati specifične tehnike koje obezbeđuju dugoročne koristi po životnu sredinu).

Slika 7.14. Različiti koraci u procesu remedijacije zemljišta



Remedijacija zemljišta donosi brojne koristi, uključujući obnovu ekosistema, smanjenje rizika po ljudsko zdravlje i vraćanje zemljišta u produktivnu upotrebu. Na slici 7.14 prikazani su različiti koraci u procesu remedijacije zemljišta i pripreme terena za izgradnju. U gornjem levom uglu, prikazano je mehaničko iskopavanje zemljišta unutar zatvorenog objekta, u gornjem desnom uglu industrijsko postrojenje za termičku obradu zagađenog zemljišta (termalna desorpcija), dok su u na donjim slikama prikazane metode postavljanja geotekstila i geomembrana u cilju zaštite tla od ponovnog zagađenja i pripreme zemljišta za dalje korišćenje.

Ova metoda prečišćavanja kontaminiranog zemljišta omogućava industrijskim lokacijama da postanu sigurne za ponovnu upotrebu, smanjujući potrebu za eksploatacijom novih zemljišta. Međutim, postoje i brojni izazovi u procesu remedijacije kao što su **ekonomska isplativost** i **vremenska efikasnost**. Mnoge metode, posebno *ex situ* tehnike, mogu biti skupe i zahtevaju dug vremenski period za postizanje željenih rezultata. Osim toga, neretko problem može biti i održavanje mikrobiološke aktivnosti, jer je u slučaju bioremedijacije neophodno održavati optimalne uslove za rast i aktivnost mikroorganizama, što može biti kompleksno, posebno u ekstremnim uslovima ili u zemljištima sa niskom organskom materijom. Takođe, neke od remedijacionih metoda, kao što su termičke tehnike, mogu dovesti do stvaranja sekundarnih zagađujućih materija, kao što su gasovi koji zahtevaju dodatne tretmane.

7.1.4. Integralni sistem upravljanja otpadom

Upravljanje otpadom predstavlja ključni aspekt u zaštiti životne sredine, jer se bavi holističkim pristupom prema generisanju, tretmanu i odlaganju otpada. Integralni sistem obuhvata sve faze upravljanja otpadom – od njegovog nastanka, preko sakupljanja, obrade i reciklaže, do konačnog odlaganja na kontrolisan način, kako bi se minimizirao negativni uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Implementacija integralnog sistema zahteva koordinaciju različitih metoda i tehnologija, kao i usklađivanje sa nacionalnim i međunarodnim ekološkim standardima, u cilju postizanja održivog upravljanja resursima i smanjenja ekološkog otiska.

Integralni sistem upravljanja otpadom obuhvata složen niz delatnosti i aktivnosti koje su osmišljene kako bi se osigurao održiv, efikasan i ekološki odgovoran pristup upravljanju otpadnim materijalima. Ovaj sistem obuhvata sledeće ključne komponente:

- **prevencija nastajanja otpada** predstavlja prvi i najvažniji korak u integralnom sistemu upravljanja otpadom i podrazumeva strategije usmerene ka smanjenju proizvodnje otpada na izvoru; ove strategije uključuju smanjenje potrošnje resursa, optimizaciju proizvodnih procesa, unapređenje tehnologija i uvođenje cirkularne ekonomije, gde se proizvodi dizajniraju s ciljem da se minimizira stvaranje otpada tokom njihovog životnog ciklusa;
- **smanjenje količine otpada i njegovih opasnih karakteristika** nakon prevencije zavređuje posebnu pažnju, jer ova aktivnost uključuje proces razdvajanja otpada na mestu nastanka, zamenu opasnih materijala sigurnijim alternativama, kao i tehnologije za tretman opasnih supstanci, čime se smanjuje njihova toksičnost i štetan uticaj na životnu sredinu;
- **tretman otpada** obuhvata fizičke, hemijske i biološke procese usmerene na smanjenje zapremine otpada, promenu njegovih svojstava ili pretvaranje u korisne materijale; tehnike tretmana uključuju mehaničku separaciju, termičku obradu (spaljivanje, pirolizu), reciklažu i kompostiranje, kao i napredne metode poput plazma tehnologije ili bioremedijacije za opasne i industrijske otpade; tretman otpada je ključan za smanjenje opterećenja na deponije i omogućava iskorišćavanje resursa iz otpada;
- **planiranje i kontrola procesa upravljanja otpadom** obuhvata strateško planiranje i upravljanje celokupnim procesom; uključuje kreiranje planova upravljanja otpadom, procenu rizika, usklađivanje sa zakonskim propisima i normama, kao i implementaciju sistema upravljanja kvalitetom i bezbednošću; planiranje omogućava optimizaciju svih faza upravljanja otpadom, smanjenje troškova i smanjenje negativnih ekoloških uticaja;

- **transport otpada** je važan segment u lancu upravljanja, jer omogućava efikasno premeštanje otpada sa mesta nastanka do postrojenja za tretman, reciklažu ili odlaganje; ovaj proces zahteva specijalizovana vozila, tehničku opremu i poštovanje bezbednosnih protokola kako bi se sprečili negativni uticaji na životnu sredinu tokom prevoza;
- **uspostavljanje, rad, zatvaranje i održavanje postrojenja za tretman otpada** koja podrazumevaju postrojenja za reciklažu, kompostiranje, spaljivanje i deponovanje otpada; tokom svih faza rada postrojenja, neophodno je osigurati maksimalnu efikasnost i minimizaciju štetnih emisija u vazduh, vodu i tlo;
- **stalni monitoring procesa i postrojenja za tretman otpada** je ključan kako bi se obezbedilo da svi sistemi funkcionišu u skladu sa postavljenim standardima i regulativama; monitoring uključuje praćenje emisija, kontrolu kvaliteta vode, vazduha i zemljišta, kao i nadzor nad procesima obrade i odlaganja otpada; cilj je osiguranje zaštite životne sredine i prevencija eventualnih ekoloških incidenata;
- **savetovanje i obrazovanje u vezi sa upravljanjem otpadom** podrazumeva edukaciju i podizanje svesti svih aktera uključenih u proces, uključujući zaposlene u sistemu, menadžere, državne institucije i širu javnost; edukacija je ključna za razumevanje principa održivog upravljanja otpadom, značaja reciklaže i smanjenja otpada, kao i pravilnog odlaganja opasnih materijala.

Integralni sistem upravljanja otpadom predstavlja sveobuhvatan i sistematičan pristup koji se fokusira na smanjenje otpada na izvoru, reciklažu, bezbedan tretman i odlaganje (slika 7.15), kao i na kontinuirano poboljšanje procesa kroz monitoring i obrazovanje.

Slika 7.15. Piramida hijerarhije upravljanja otpadom



Reciklaža otpada

Reciklaža otpada predstavlja ključnu fazu u integralnom sistemu upravljanja otpadom, i značajan proces u savremenom sistemu održivog upravljanja resursima. Reciklaža omogućava ponovno korišćenje materijala iz otpadnih proizvoda, čime se smanjuje pritisak na prirodne resurse, minimizuje količina otpada na deponijama i doprinosi smanjenju štetnih uticaja na životnu sredinu.

Proces reciklaže obuhvata **sakupljanje, separaciju, obradu i transformaciju otpadnih materijala** kao što su plastika, staklo, papir, metali i organski otpad, u nove proizvode ili sirovine koje mogu biti upotrebljene u proizvodnim procesima. Reciklaža ne samo da smanjuje potrebu za eksploatacijom sirovina, već i značajno smanjuje potrošnju energije u poređenju sa proizvodnjom iz primarnih sirovina. Na primer, reciklaža aluminijuma zahteva do 95% manje energije nego proizvodnja aluminijuma iz boksita. Pored toga, reciklaža doprinosi smanjenju ekološkog otiska, jer smanjuje emisije CO₂ koje su povezane sa spaljivanjem otpada i deponovanjem, gde se proizvodi metan kao rezultat anaerobne degradacije organskog materijala.

Postrojenja za reciklažu (slika 7.16) funkcionišu kroz nekoliko faza – sakupljanje i dopremanje otpada, njegovo sortiranje, obrada i konačna priprema materijala za ponovnu upotrebu.

Sortiranje otpada je jedan od ključnih koraka u postrojenju za reciklažu. U ovoj fazi, otpad prolazi kroz različite mehaničke i automatske procese koji izdvajaju materijale prema vrsti, veličini i sastavu. Magnetni separatori se koriste za izdvajanje metala, dok optički senzori i ventilatorski sistemi pomažu u odvajanju plastike i papira. Ručno sortiranje je takođe često deo ovog procesa, kako bi se osigurala preciznost.

Nakon sortiranja, materijali prolaze kroz **obradu i pripremu za reciklažu**, što može uključivati drobljenje, pranje, topljenje ili hemijsku obradu u zavisnosti od vrste materijala. Na primer, plastični otpad se topi i pretvara u granule koje se koriste za proizvodnju novih plastičnih proizvoda, dok se metal topi u livnicama i preoblikuje u nove proizvode. Papir se prerađuje tako što se vlakna obnavljaju i koriste za proizvodnju recikliranog papira.

Tehničke inovacije u postrojenjima za reciklažu stalno unapređuju efikasnost i obim materijala koji mogu biti obrađeni. Napredne tehnologije za sortiranje, kao što su robotizovani sistemi i veštačka inteligencija, omogućavaju brže i preciznije izdvajanje reciklabilnih materijala, čime se povećava ukupna produktivnost. Takođe, istražuju se novi postupci, poput hemijske reciklaže plastike, koji omogućavaju razgradnju kompleksnih polimera do osnovnih monomera, što otvara nove mogućnosti za reciklažu plastičnog otpada koji se do sada smatrao nereciklabilnim.

Slika 7.16. Postrojenje za reciklažu



Iako reciklaža ima značajne ekološke i ekonomske prednosti, njena uspešnost zavisi od efikasnog sistema sakupljanja i separacije otpada, tehničke opremljenosti postrojenja za reciklažu, kao i od nivoa edukacije i svesti populacije o važnosti pravilnog odlaganja otpada. Uspostavljanje integrisanih sistema reciklaže na globalnom nivou je stoga neophodno za postizanje ciljeva održivog razvoja i očuvanje prirodnih resursa za buduće generacije.

7.1.5. Zaštita od buke u životnoj sredini

Buka predstavlja značajan oblik zagađenja životne sredine, sa štetnim uticajem na zdravlje ljudi i ekosistema, zbog čega je zaštita od buke postala važan aspekt u strategijama očuvanja zdravlja i životne sredine, posebno u gusto naseljenim i industrijskim zonama. Antropogena buka, koja je najdominantnija u urbanim sredinama, potiče pre svega od saobraćaja (automobili, kamioni, vozovi, avioni), industrijskih mašina i građevinskih aktivnosti. Ovi izvori generišu širok spektar frekvencija i nivoa zvučnog pritiska, koji mogu negativno uticati na ljude, životinje i okolinu.

Zaštita od buke obuhvata niz naučnih i tehničkih pristupa, sa ciljem smanjenja nivoa buke u životnoj sredini i minimizacije njenog uticaja na zdravlje ljudi. Ovi pristupi uključuju kontrolu izvora buke, **kontrolu prenosa buke** i **zaštitu na mestu prijema**.

Jedan od najefikasnijih načina smanjenja buke je smanjenje njenog generisanja na izvoru. U saobraćaju, to može uključivati tehnološke inovacije u dizajnu vozila, kao što su tiši motor i efikasniji auspuh, dok se u industriji, smanjenje buke može postići upotrebom zvučno izolovanih mašina, primenom prigušivača, upotrebom savremenih materijala ili smanjenjem brzine rada opreme. Korišćenje materijala koji apsorbuju zvuk na mestima gde se proizvodi buka, kao što su specijalne ploče i pregrade, dodatno može smanjiti nivoe buke.

U situacijama gde je buka neizbežna, neophodno je kontrolisati njeno širenje. Zvučna izolacija je jedan od glavnih pristupa u smanjenju prenosa buke. Ova metoda uključuje upotrebu barijera, zidova i pregrada napravljenih od materijala sa visokim akustičnim prigušivanjem, kao što su betonske ili staklene barijere. Ove strukture blokiraju ili apsorbuju zvučne talase, sprečavajući njihovo širenje ka osetljivim područjima. Pored toga, urbani planeri mogu koristiti "zvučne pejzaže" – strategije uređenja prostora koje uključuju biljke, drveće ili zgrade postavljene tako da reflektuju ili apsorbuju zvukove (slika 7.17).

Slika 7.17. Barijere protiv buke



Kada nije moguće u potpunosti kontrolisati izvor buke ili njegov prenos, fokus je na zaštiti pojedinaca koji su izloženi buci. Ovo se često postiže primenom zvučnih izolacija u građevinskim strukturama, kao što su dvostruki prozori, zvučna izolacija zidova i plafona, te korišćenjem tepiha i tapeta sa visokim akustičkim apsorpcionim svojstvima. Pored toga, lična zaštitna oprema, kao što su čepići za uši ili slušalice sa zaštitom od buke, može biti korišćena u industrijskim postrojenjima i drugim radnim okruženjima sa visokim nivoima buke.

Razvoj novih tehnologija igra ključnu ulogu u unapređenju zaštite od buke. Aktivna kontrola buke (ANC) je jedna od naprednih metoda koja koristi zvučne talase suprotne faze kako bi neutralisala neželjene zvuke. Ovaj princip koristi se u slušalicama sa aktivnim poništavanjem buke, ali takođe ima potencijal za širu primenu, uključujući zvučnu kontrolu u vozilima, radnim prostorima i stambenim objektima.

Pored ANC tehnologije, napredak u akustičnim materijalima otvara nove mogućnosti za smanjenje buke. Materijali sa svojstvima visoke apsorpcije zvuka, kao što su nanomaterijali i metaporozni materijali, omogućavaju efikasnije apsorpciju zvučnih talasa na širokom opsegu frekvencija, pružajući bolju zvučnu izolaciju u urbanim sredinama i industrijskim postrojenjima.

7.1.6. Zaštita od elektromagnetnog zračenja

Zaštita od elektromagnetnog (EM) zračenja, bilo da je u pitanju jonizujuće ili nejonizujuće zračenje, postala je ključna tema u naučnim i regulatornim krugovima zbog potencijalno štetnih posledica prekomerne izloženosti. Cilj je minimizacija rizika i osiguranje bezbednog korišćenja tehnologija koje generišu EM zračenje kroz niz strategija i tehničkih rešenja.

Kada je reč o jonizujućem zračenju, kao što su gama-zruci, rendgenski zruci i alfa- i beta-čestice, zaštita je od suštinskog značaja u oblastima poput nuklearne energije, medicine i industrije. Ovi izvori zračenja mogu izazvati oštećenja ćelija i povećati rizik od raka, zbog čega su ključne strategije zaštite — distanca, vreme i zasipanje zaštitnim materijalima. Udaljavanje od izvora smanjuje izloženost jer intenzitet zračenja opada s povećanjem distance, dok smanjenje vremena izloženosti direktno ograničava primljenu dozu. Zaštitni materijali, kao što su papir, plastika, olovo i beton, koriste se za blokiranje različitih vrsta zračenja. Pored toga, radnici koriste ličnu zaštitnu opremu, kao što su olovni pregači i rukavice, dok se nivoi zračenja kontinuirano prate dozimetarima i detektorima zračenja. Međunarodne organizacije, poput IAEA i ICRP, postavljaju regulative kako bi se osiguralo da izloženost ostane u sigurnim granicama, dok se u slučaju kontaminacije primenjuju dekontaminacija i sanacija.

Tehnološki napredak omogućio je razvoj uređaja i sistema koji smanjuju izloženost nejonizujućem zračenju, poput radiofrekventnog (RF) zračenja. Na primer, savremeni mobilni telefoni koriste adaptivne tehnologije za regulisanje snage RF signala u zavisnosti od udaljenosti od bazne stanice, čime se smanjuje nepotrebna izloženost. Zaštitni materijali, poput metalnih mreža, elektroma-

gnetnih štitova i specijalizovanih tkanina, koriste se za izradu ekrana i prekrivača koji apsorbuju ili reflektuju EM zračenje.

Osnovni principi zaštite od EM zračenja uključuju smanjenje vremena izloženosti i povećanje distance od izvora. Na primer, postavljanje mobilnih telefona i *Wi-Fi* rutera dalje od tela smanjuje dozu zračenja, dok ograničavanje vremena provedenog u blizini uređaja s visokim nivoima zračenja, kao što su rendgenski aparati, značajno doprinosi zaštiti. U industrijskim i medicinskim postrojenjima, gde su radnici često izloženi visokim nivoima elektromagnetnog zračenja, koristi se posebna zaštitna oprema, poput olovnih keclja i EM zaštitnih kombinezona, koji apsorbuju ili reflektuju zračenje, smanjujući rizik od oštećenja tkiva.

Povećanje svesti o rizicima EM zračenja je takođe ključna strategija u smanjenju izloženosti. Obrazovni programi za javnost i profesionalce pružaju važne informacije o bezbednom korišćenju uređaja, pravilnom održavanju opreme i merama za smanjenje izloženosti.

Razvoj novih tehnologija za zaštitu od EM zračenja donosi nova rešenja, poput metamaterijala, koji su dizajnirani da manipulišu elektromagnetnim talasima, sve češće korišćenih za zaštitne barijere u bolnicama, elektranama i stambenim objektima. Ovi materijali omogućavaju preciznu kontrolu refleksije i apsorpcije EM talasa. Inovacije poput aktivne neutralizacije EM zračenja, koja funkcioniše po principu sličnom aktivnoj kontroli buke, koriste EM talase suprotne faze kako bi neutralisale neželjene talase i smanjile intenzitet zračenja. Iako je ova tehnologija još u fazi razvoja, ona ima potencijal da postane važna za zaštitu u visokorizičnim okruženjima.

7.2. POLITIKA ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE

Politika zaštite životne sredine predstavlja posvećenost državnih organa propisima i drugim mehanizmima politike koji se odnose na pitanja životne sredine. Globalni pristup podrazumeva postojanje i saglasnost velikog broja zemalja oko zajedničkih konvencija, protokola i sporazuma, dok su na nacionalnim nivoima pitanja politike zaštite životne sredine regulisana na različite načine. Zemlje u razvoju i u ovom segmentu postižu značajne rezultate donošenjem i sprovođenjem odgovarajućih propisa, dok se u nerazvijenim delovima sveta, osim izostanka adekvatnih zakonodavnih okvira, uočava i nedoslednost u njihovoj primeni.

Istorijski posmatrano definisanje pojedinih pravila o zaštiti životne sredine potiče iz vremena drevne Indije, starog Egipta i antičke Grčke. U srednjem veku postojanje pravnih normi iz oblasti zaštite prirode važno je za određene gradove na teritorijama današnje Velike Britanije, Italije i Francuske. Prva dokumenta doneta i usvojena u cilju zaštite životne sredine datiraju iz devetnaestog veka i bave se usko specifičnim oblastima. Takvi su npr. Zakon o zaštiti istorijskih građevina donet u Grčkoj 1834. godine i Zakon o zaštiti voda od zagađenja u Velikoj Britaniji iz 1876. godine. Kasnije, u dvadesetom veku ova oblast doživljava ekspanziju, i nižu se zakoni o zaštiti životne sredine i pojedinih njenih podsistema u velikom broju evropskih zemalja. Zakon o zaštiti prirode donet je u Belgiji 1911, a Zakon o zaštiti vazduha od zagađenja u Velikoj Britaniji 1956. godine. Švedska je prva država koja je sistemski pokušala da obuhvati i reguliše sva dobra životne sredine, i to kroz Zakon o zaštiti životne sredine iz 1969. godine.

7.2.1. Međunarodne konvencije i sporazumi

Posle perioda razvoja prava u oblasti zaštite životne sredine na nacionalnom planu, počinju da se javljaju i prvi nadnacionalni oblici povezivanja. Potreba za uspostavljanjem efikasnih programa zaštite i brige o životnoj sredini na globalnom nivou rezultirala formulisanjem niza dokumenata koji su ratifikovani od strane većine zemalja razvijenog sveta. Početkom dvadesetog veka vodeći ekološki problemi bili su ugroženost biljnog i životinjskog sveta, i prve globalne ekološke konvencije odnose na očuvanje divljih životinja i biljaka, a primeri su Konvencija o zaštiti ptica značajnih za poljoprivredu iz 1902. godine, Vašingtonska konvencija za regulisanje lova na kitove iz 1946. godine, Afrička konvencija o očuvanju prirode i prirodnih bogatstava iz 1968. godine, i druge. Pored pomenutih iz ovog perioda značajna je i konvencija za prevenciju zagađenja mora naftom iz 1954.

godine, koja je uticala na razvoj osnove za regulatorni okvir za prevoz nafte morem. Uprkos inovativnom pristupu na planu očuvanju prirode, pomenute konvencije nisu u potpunosti uspevale da uspostave administrativnu strukturu za implementaciju, tj. nadgledanje i kontrolu sprovođenja.

Rezultati naučnih istraživanja sredinom i krajem 60-ih godina prošlog veka, ukazivali su na povezanost procesa u prirodi i činjenicu da je čovekova životna sredina sve ugroženija. Pod tim uticajem na međunarodnom nivou intenzivno su razmatrana pitanja i mogućnosti zaštite životne sredine. Važnu prekretnicu predstavljala je Konferencija Ujedinjenih nacija o čovekovoј sredini, održana na inicijativu Švedske u Stokholmu, 1972. godine. Na ovoj prvoj konferenciji Ujedinjenih nacija (UN) o životnoj sredini, kao reakcija na sve veće uništavanje prirode, uspostavljena je etika koja je trebala da uskladi društveno-privredni rast društva i zaštitu životne sredine – održivi razvoj. Od tada datira poznata **Stokholmska konvencija**²⁷ koja predstavlja osnovu za mnoge buduće međunarodne sporazume, i ističe značaj ekoloških problema kao što su: emisija zagađujućih materija u atmosferu (gasovi, tečnosti, prašina), zagađenje vode (mora, okeani, reke, jezera), akumulacija toksičnih i netoksičnih otpada, degradacija izvora energije (sirova nafta, ugalj, gas, hidropotencijal), pojava buke, pojava zračenja (jonizujućeg, nuklearnog), oštećenja ozonskog omotača, uništavanje biološke raznovrsnosti živih bića, iscrpljenost mineralnih resursa, izazivanje ekoloških katastrofa usled vojnog ili mirnodopskog korišćenja nuklearne energije itd.

Po značaju, odmah nakon Stokholmske, ističe se i konferencija UN o životnoj sredini i razvoju (UNCED), koja je održana u Rio de Žaneiru u junu 1992. godine, i koja je potvrdila centralno mesto globalne ekološke zabrinutosti za pitanja kao što su globalno zagrevanje i gubitak biološke raznovrsnosti. Na ovoj konferenciji usvojena je i **Konvencija o klimatskim promenama** (*UN Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC)²⁸. U okviru ove konvencije, definisan je niz obaveza za sve zemlje koje se uglavnom odnose na razradu i implementaciju politike za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte. U periodu od 20 godina, između Stokholmske i konferencije u Rio de Žaneiru, došlo je do značajnog jačanja svesti o ugroženosti životne sredine antropogenim aktivnostima, kako na lokalnom, tako i na globalnom nivou. To je rezultiralo nastankom velikog broja međunarodnih pravnih instrumenata koji regulišu pitanja zaštite životne sredine. Poslednjih godina osnovan je **Program UN za životnu sredinu** (*United Nations Environment Programme*, UNEP)²⁹, a da bi se obezbedila sistematičnost

27 United Nations. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment. Stockholm, 5-16 June 1972.

28 United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change. Rio de Janeiro, 3-14 June 1992.

29 United Nations Environment Programme (UNEP). Global Environment Outlook. 2019.

u oblasti konvencija o životnoj sredini razvijenih tokom ovog perioda, one su podeljene u više grupa: konvencije za očuvanje prirode, konvencije za zaštitu morske sredine, konvencije za regulisanje prekograničnih uticaja na životnu sredinu i druge.

Među značajnim sporazumima posebno se izdvajaju **Montrealski protokol** iz 1987. godine kojim je uspostavljena saradnja zemalja potpisnica na istraživanju ozonskog omotača i hemikalija koje izazivaju njegovo razaranje; **Kjoto protokol** iz 1997. godine, od kada je preko 150 zemalja potpisalo Okvirnu konvenciju UN o klimatskim promenama, i **Stokholmska konvencija iz 2001. godine** kojom se zabranjuje upotreba postojanih organskih zagađujućih supstanci (POPs) zbog njihovih dokazanih direktnih štetnih efekata na ljudsko zdravlje i životnu sredinu.

Kjoto protokol predstavlja veoma važan korak prema ograničenju emisije gasova staklene bašte. Prvi put specificirano je zakonski obavezujuće angažovanje, kojim su razvijene zemlje imale obavezu da za vreme prvog perioda angažovanja (2008 – 2012. godina) smanje ukupne emisije gasova sa efektom staklene bašte najmanje 5% u odnosu na nivoe iz 1990. godine. Ovim sporazumom dogovoreni ciljevi su izdiferencirani između razvijenih zemalja (SAD su dobile obavezu da smanje emisiju gasova staklene bašte za 7%, Evropska unija u celini za 8%, Japan i Kanada za 6%). U međuvremenu SAD su opozvale svoje obaveze u okviru Kjoto protokola, pod izgovorom da smanjujući emisiju ugrožavaju svoj ekonomski razvoj.

Dok su jedni Kjoto protokol smatrali odličnom osnovom za smanjenje globalnog zagađenja i zagrevanja, drugi misle da je on samo farsa dok najveći zagađivač SAD ne pristane da ga ratifikuje.

U međuvremenu na Konferenciji Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama (*Conference of the Parties, COP21*) u Parizu 2015. godine, usvojen je **Pariski sporazum**, koji predstavlja istorijski globalni dogovor čiji je cilj borba protiv klimatskih promena. Sporazum postavlja pravno obavezujuće okvire za sve zemlje potpisnice kako bi se ograničilo globalno zagrevanje na ispod 2°C u odnosu na predindustrijski period, uz napore da se porast temperature zadrži na 1,5°C. Ključne obaveze država obuhvataju smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, povećanje upotrebe obnovljivih izvora energije i postizanje klimatske neutralnosti do sredine 21. veka. Pariski sporazum takođe podstiče međunarodnu saradnju u pogledu finansijske pomoći zemljama u razvoju, u cilju adaptacije na klimatske promene i jačanja otpornosti na njihove posledice.

Na nivou Evropske unije, postoje zajedničke obaveze zemalja članica (*Acquis communautaire*), a čak 30% pravnog okvira Evropske unije reguliše ovu široku i složenu oblast politike. Ugovor o Evropskoj uniji propisuje da životna sredina i klimatske promene moraju biti uključeni u sve ostale sektorske politike. Kao deo pristupnih pregovora, Republika Srbija – država kandidat za članstvo u EU, dužna je da ispuní određene obaveze, kroz proces prilagođavanja i usaglašavanja nacionalne politike zaštite životne sredine i održivog razvoja sa standardima Evropske unije.

Od 70-ih godina EU je odobrila preko 200 propisa o zaštiti životne sredine, ali sami propisi nemaju puno efekta ukoliko se ne primenjuju i ne sprovode na adekvatan način.

7.2.2. Nacionalna politika zaštite životne sredine

Pored međunarodnih sporazuma, kojima se definišu ekološki problemi i mere za njihovo suzbijanje i otklanjanje posledica na regionalnom i globalnom nivou, svaka država razvijenog sveta brigu o životnoj sredini uvrstila je u ustavno uređenje, zakon i podzakonska akta. Republika Srbija prihvatila je veliki broj međunarodnih sporazuma iz oblasti zaštite životne sredine. Sukcesijom 2001. godine ratifikovana je Bečka konvenciju i sa njom Montrealski protokol o supstancama koje oštećuju ozonski omotač, a 2008. i 2009. godine Kjoto protokol i Stokholmska konvencija.

Opšti ciljevi politike zaštite životne sredine u Republici Srbiji su:

- donošenje odgovarajućih strateških i planskih dokumenata iz oblasti zaštite životne sredine i održivog korišćenja prirodnih resursa;
- integracija politike zaštite životne sredine i usklađivanje sa ekonomskim ciljevima i politikom drugih sektora;
- jačanje institucionalnih kapaciteta za kreiranje i implementaciju sektorskih politika i politike zaštite životne sredine u celini i uspostavljanje sistema za reagovanje u akcidentnim situacijama;
- unapređenje sistema kontrole kvaliteta životne sredine;
- unapređenje pravnog sistema u oblasti zaštite životne sredine, ne samo donošenjem propisa nego i poboljšanjem nadzora nad njihovim sprovođenjem;

- razvoj efikasnog sistema finansiranja zaštite životne sredine i ekonomskih podsticaja, ne samo potpunom primenom principa „zagađivač plaća” nego i uvođenjem efikasnog sistema ekonomskih instrumenata radi podsticanja smanjenja zagađivanja, odnosno podizanjem nivoa investiranja u životnu sredinu (modernizacijom/proširenjem postojeće infrastrukture u oblasti zaštite životne sredine, uvođenjem tehnologija za smanjenje zagađenja i slično);
- unapređenje formalnog i neformalnog obrazovanja o zaštiti životne sredine i održivom razvoju;
- podizanje nivoa svesti kroz bolje informisanje i komunikaciju sa javnošću i razvijanje mehanizama učešća javnosti u odlučivanju po pitanju životne sredine.

Pravo na zdravu životnu sredinu kao jedno od osnovnih prava i sloboda svakog građanina zagarantovano je prvenstveno Ustavom Republike Srbije³⁰ kao najznačajnijim pravnim aktom. Član 74. Ustava Republike Srbije garantuje pravo na zdravu životnu sredinu. Prema ovom članu, svako ima pravo na život u zdravoj životnoj sredini i dužan je da čuva i unapređuje životnu sredinu u skladu sa zakonom. Takođe, država je odgovorna za obezbeđivanje uslova za ostvarivanje ovog prava kroz sprovođenje politike zaštite životne sredine, kao i za očuvanje prirodnih bogatstava Republike Srbije.

Ustavna načela prate i odgovarajući zakoni, podzakonska akta, nacionalni programi i strategije. U svim zemljama razvijenog sveta nacionalne strategije održivog razvoja predstavljaju krovni dokument kojim se definiše odgovornost i obaveza nekog društva da uskladi svoj razvoj sa potrebama čoveka i brigom o prirodi.

³⁰ Republika Srbija, Ustav Republike Srbije ("Službeni glasnik RS", br. 98/06)

Nacionalna strategija održivog razvoja Republike Srbije

Republika Srbija je 2008. godine usvojila Nacionalnu strategiju održivog razvoja³¹ koja definiše tri osnovna stuba održivog razvoja. U delu koji se bavi ekonomskom dimenzijom održivog razvoja predstavljeni su ciljevi i izbor odgovarajuće ekonomske politike, daljih tranzicionih tokova, održive proizvodnje i potrošnje, obrazovanja i drugih oblasti koje su uključene u koncept održivog razvoja, a koje su zasnovane na znanju kao najbitnijem resursu današnjice. U delu Strategije koji se bavi socijalnom dimenzijom održivog razvoja između ostalih analizirane su društvene vrednosti, kvalitet života i društveno blagostanje, populaciona politika, socijalna sigurnost, siromaštvo, rodna ravnopravnost i javno zdravlje stanovništva. Ekološka dimenzija analizira pitanja zaštite prirodnih resursa: vazduha, vode, zemljišta, biodiverziteta, šuma, mineralnih resursa i obnovljivih izvora energije. Ovaj dokument podrazumeva da osnovne dimenzije održivog razvoja povezuje postojanje adekvatnog institucionalnog okvira, koji je nužan preduslov za sprovođenje ciljeva, mera i politike državnog i regionalnog razvoja. Akcioni plan usvojen je 2010. godine, i njim su definisane nadležne institucije za ostvarivanje ciljeva održivog razvoja i sprovođenje Strategije. Pored odgovarajućih ministarstava i republičkih institucija, Strategija predviđa da u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja treba da bude uključena i lokalna zajednica, civilni sektor i stanovništvo u celini.

Zakoni u oblasti zaštite životne sredine Republike Srbije

Zakon o zaštiti životne sredine³² sa nizom podzakonskih akata uređuje sistem zaštite životne sredine čime se obezbeđuje ostvarivanje prava čoveka na život i razvoj u zdravoj životnoj sredini, kao i uravnotežen odnos privrednog razvoja i životne sredine u Republici Srbiji. U maju 2009. godine usvojen je ovaj sistemski zakon, a u periodu 2009-2010. godine i set ostalih „ekoloških“ zakona, koji će biti navedeni u tabeli 7.2, a detaljnije o njima biće reči u poglavlju Monitoring životne sredine.

31 Republika Srbija, Nacionalna strategija održivog razvoja ("Službeni glasnik RS", br. 57/08, 2008)

32 Republika Srbija. Zakon o zaštiti životne sredine ("Službeni glasnik RS", br. 135/04, 36/09, 36/09, 72/09, 43/11, 14/16, 76/18)

Tabela 7.2. Opšti i posebni zakoni u Republici Srbiji u oblasti životne sredine

Opšti zakoni	Zakon o zaštiti životne sredine, Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu, Zakon o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu, Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađenja životne sredine
Posebni zakoni	Zakon o zaštiti vazduha, Zakon o zaštiti od nejonizujućeg zračenja, Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja i o nuklearnoj sigurnosti, Zakon o zaštiti i održivom korišćenju ribljeg fonda, Zakon o zabrani razvoja, proizvodnje, skladištenja i upotrebe hemijskog oružja, Zakon o ambalaži i ambalažnom otpadu, Zakon o zaštiti prirode, Zakon o upravljanju otpadom, Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini, Zakon o hemikalijama, Zakon o biocidnim proizvodima, Zakon o meteorološkoj i hidrološkoj delatnosti, Zakon o nacionalnim parkovima, Zakon o poljoprivrednom zemljištu, Zakon o geološkim istraživanjima, Zakon o divljači i lovstvu, Zakon o ribarstvu, Zakon o zaštiti životinja od zaraznih bolesti koje ugrožavaju celu zemlju, Zakon o zaštiti bilja od bolesti i štetočina, Zakon o zdravstvenoj ispravnosti životnih namirnica i predmeta opšte upotrebe, Zakon o kontroli kvaliteta poljoprivrednih i prehrambenih proizvoda u spoljnotrgovinskom prometu

Zakon o zaštiti životne sredine propisuje i izradu Nacionalnog programa zaštite životne sredine na svakih deset godina, čijim se sprovođenjem obezbeđuje efikasno planiranje i upravljanje ovom oblašću.

Nacionalni program zaštite životne sredine Republike Srbije

Aktuelni Nacionalni program donet je za period od 2010. do kraja 2019. godine, i pored postojećeg stanja, analizira i uzroke degradacije životne sredine, uticaj pojedinih sektora privrede i štetne efekte na ljudsko zdravlje. Uz unapređenje institucionalnih okvira u kreiranju i implementaciji politike. Program podrazumeva dugačak niz važnih koraka među kojima se poseban akcenat stavlja na: unapređenje sistema kontrole kvaliteta životne sredine akreditacijom ovlašćenih laboratorija, primena normativa i propisa, obavezna kontrola kvaliteta monitoringa činilaca životne sredine i analitičkih metoda, sopstveni monitoring zagađivača, izrada katastra zagađivača, izrada inventara gasova sa efektom staklene bašte, uspostavljanje jedinstvenog informacionog sistema, i unapređenje formalnog i neformalnog obrazovanja o zaštiti životne sredine i energetske efikasnosti. Program je u funkciji pridruživanja Republike Srbije Evropskoj uniji, počiva na nekoliko osnovnih načela (tabela 7.3), koja su ujedno i osnovna načela politike životne sredine Evropske unije.

Tabela 7.3. Načela Nacionalnog programa zaštite životne sredine Republike Srbije

Načelo	Opis
Načelo održivog razvoja	Održivi razvoj zadovoljava potrebe sadašnje generacije bez ugrožavanja kapaciteta životne sredine za buduće generacije.
Načelo očuvanja prirodnih vrednosti	Prirodne vrednosti koriste se uz očuvanje geodiverziteta, biodive*riziteta i zaštićenih prirodnih dobara. Obnovljivi resursi se koriste uz njihovu trajnu obnovu i unapređivanje kvaliteta.
Načelo kompenzacije	Kompenzacijom se ublažavaju štetne posledice na ekološki značajna područja izazvane projektima, radovima ili aktivnostima u prirodi, kroz obnavljanje ili zamenu oštećenih delova staništa i vrsta.
Načelo integralnosti	Organi na svim nivoima obezbeđuju integraciju zaštite životne sredine u sve sektorske politike kroz sprovođenje usklađenih planova i programa.
Načelo zagađivač plaća	Zagađivač plaća naknadu za zagađivanje kada svojim aktivnostima opterećuje životnu sredinu, uključujući upotrebu štetnih materija.
Načelo korisnik plaća	Korisnici prirodnih vrednosti plaćaju realnu cenu za njihovo korišćenje, sanaciju i remedijaciju prostora.
Načelo primene podsticajnih mera	Organi vlasti primenjuju ekonomske i druge mere za smanjenje pritiska na životnu sredinu, koristeći najbolje dostupne tehnike i opremu uz optimalne troškove.
Načelo zajedničke odgovornosti	Problemi zagađenja rešavaju se zajedničkim delovanjem onih koji su ugroženi i onih koji su odgovorni za zagađenje.
Načelo supsidijarnosti	Decentralizacija odlučivanja prenosi nadležnosti sa centralnog na lokalni nivo, u skladu sa zakonom.
Načelo prevencije i predostrožnosti	Prevencija zagađenja je efikasnija od rešavanja posledica, dok predostrožnost podrazumeva izbegavanje aktivnosti koje ugrožavaju životnu sredinu ili zdravlje.
Načelo podizanja nivoa svesti o značaju zaštite	Obrazovanje o zaštiti životne sredine povećava razumevanje problema i interesovanje javnosti za ekološka pitanja.
Načelo informisanja i učešća javnosti	Svako ima pravo na blagovremeno informisanje o stanju životne sredine i učešće u donošenju odluka koje utiču na nju. Podaci o stanju životne sredine su javni.

Načelo	Opis
Načelo odgovornosti zagađivača i pravnog sledbenika	Zagađivač ili njegov pravni sledbenik odgovoran je za uklanjanje uzroka i posledica zagađenja u skladu sa zakonom.
Načelo zaštite prava na zdravu životnu sredinu	Građani i organizacije ostvaruju pravo na zdravu životnu sredinu pred nadležnim organima ili sudom.
Načelo usaglašavanja sa pravnim tekovinama EU (Acquis Communautaire)	Proces integracije sa EU uključuje prenošenje zakonodavstva EU, uspostavljanje institucionalnih kapaciteta i obezbeđivanje finansijskih sredstava za pravilnu primenu zakona u oblasti životne sredine.

Nacionalni program za integraciju Republike Srbije u Evropsku uniju, oblast životne sredine deli na sledeća poglavlja: horizontalno zakonodavstvo, kvalitet vazduha i klimatske promene, upravljanje otpadom, zaštita i upravljanje vodama, zaštita prirode, hemikalije, kontrola industrijskog zagađenja i upravljanje rizikom, genetički modifikovani organizmi, zaštita od buke, šumarstvo i civilna zaštita.

7.3. MONITORING ŽIVOTNE SREDINE

Regulativa i politika igraju ključnu ulogu u zaštiti životne sredine kroz uspostavljanje **zakonskih okvira i standarda** koji definišu dozvoljene nivoe zagađenja, upravljanje prirodnim resursima i odgovorno postupanje s otpadom. Kroz **međunarodne sporazume**, kao i **nacionalne zakone i regulative**, vlade država postavljaju jasna pravila i obaveze za industrijske sektore, poljoprivredu i širu javnost, kako bi se osigurala primena održivih praksi koje smanjuju negativan uticaj na životnu sredinu. Jedan od ključnih mehanizama kojim se osigurava sprovođenje ovih propisa je **monitoring životne sredine** – proces koji omogućava kontinuirano praćenje stanja ključnih parametara, poput kvaliteta vazduha, vode, zemljišta i biodiverziteta, o čemu će detaljnije biti reči u poglavlju koje sledi.

Efikan monitoring životne sredine služi kao osnova za donošenje informisanih političkih odluka i intervencija, jer omogućava pravovremeno otkrivanje problema i praćenje uticaja industrijskih aktivnosti, urbanizacije i klimatskih promena na prirodne resurse. Na osnovu prikupljenih podataka, nadležni organi

moгу precizno proceniti rizike, primeniti odgovarajuće mere i osigurati da pravni subjekti i fizička lica poštuju ekološke standarde. Takođe, kroz monitoring se prati efekat regulativnih politika, omogućavajući povratnu informaciju o tome koje strategije daju najbolje rezultate u zaštiti životne sredine.

Pored zakonskih okvira, mnoge vlade i međunarodne organizacije podstiču ekološki odgovorno ponašanje putem finansijskih stimulansa, kao što su subvencije za inovacije u zelenim tehnologijama, podsticaji za reciklažu i smanjenje emisija, kao i direktna podrška istraživanju u oblasti održivog razvoja. Ovi podsticaji dodatno motivišu privredne sektore i pojedince da usvoje održive prakse, što doprinosi smanjenju ekološkog otiska i očuvanju prirodnih resursa. Monitoring životne sredine igra značajnu ulogu i u oceni uspešnosti ovih politika, pružajući podatke koji su neophodni za dalji razvoj i prilagođavanje regulativa u skladu sa promenama u uslovima u životnoj sredini.

Monitoring u opštem slučaju predstavlja redovno **posmatranje i beleženje** stanja i aktivnosti koje se odvijaju u okviru nekog procesa, projekta ili programa. To je procedura sistematskog i svrsishodnog posmatranja, prikupljanja informacija i izveštavanja o uočenom stanju.

U oblasti životne sredine monitoring predstavlja **sistematsko praćenje stanja životne sredine** putem analize fizičkih, hemijskih, bioloških, estetskih i drugih indikatora. Praćenje (ili monitoring) stanja i kvaliteta životne sredine obuhvata niz radnji koje se sprovode radi dobijanja pouzdanih podataka o stanju i zagađenju životne sredine. Jedan od suštinskih ciljeva monitoringa je identifikacija zagađivača i nivoa zagađenja koji oni uzrokuju u životnoj sredini, čime se stvaraju uslovi za definisanje mera zaštite, donošenje odgovarajućih i pravovremenih odluka i reagovanje u akcidentnim situacijama. Monitoring obuhvata praćenje stanja kvaliteta osnovnih podsistema životne sredine kao što su vazduh, vodeni ekosistemi, litosfera i zemljište, ali i ugroženih biljnih i životinjskih zajednica, inhalatornih alergena, nivoa buke i elektromagnetnog zračenja. Prikupljeni podaci se obrađuju i služe za formiranje informacionog sistema i izveštavanje javnosti, a osim toga koriste ih stručna, naučna zajednica i zakonodavna vlast. Na taj način se vrše stručne procene i naučna istraživanja u različitim oblastima, ali i olakšava donošenje odluka, vrši pravilan izbor mera i aktivnosti u oblasti urbanizma, komunalnog uređenja, planiranja i izgradnje, zdravstvene zaštite ljudi i životinja, poljoprivrede, vodoprivrede, turizma, obrazovanja i drugih oblasti.

Praćenje stanja životne sredine u Republici Srbiji predviđeno je **Zakonom o zaštiti životne sredine**³³, koji uz niz ostalih zakona iz ove oblasti propisuje kontinualnu kontrolu i monitoring kao deo jedinstvenog informacionog sistema životne sredine. Organizovano praćenje stanja i kvaliteta životne sredine započelo je u Srbiji 2002. godine, a prva regulativa usvojena je u decembru 2004. godine, upravo kroz Zakon o zaštiti životne sredine. Članovima zakona propisane su obaveze svih nivoa vlasti – Republike, Autonomne pokrajine i lokalnih samouprava, i načini kako da u okviru svoje nadležnosti, obezbede kontinualnu kontrolu i praćenje stanja životne sredine, kao i na koji način da izvrše finansiranje obavljanja monitoringa. Zakonom je predvideo i kaznene odredbe za nesprovođenje monitoringa i rok od dve godine za donošenje specifičnih programa monitoringa. Zakonom je predviđeno da se monitoring vrši sistematskim merenjem, ispitivanjem i ocenjivanjem indikatora stanja i nivoa zagađenja. Promena stanja i karakteristika životne sredine, se prati osim na osnovu prirodnih faktora, i na osnovu indikatora, pokazatelja stanja kvaliteta vazduha, vode, zemljišta, šuma, biodiverziteta, flore i faune, elemenata klime, ozonskog omotača, jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja, buke, i otpada. Uz to, monitoring podrazumeva i ranu najavu akcidentnih situacija, sa praćenjem i procenom razvoja zagađenja u takvim situacijama.

7.3.1. Opšti principi monitoringa

Prema aktuelnom zakonu, **Vlada Republike Srbije** za potrebe merenja vrednosti indikatora u životnoj sredini, utvrđuje:

- kriterijume za određivanje broja i rasporeda mernih mesta;
- mrežu mernih mesta;
- obim i učestalost merenja;
- klasifikaciju pojava koje se prate;
- metodologiju rada;
- indikatore zagađenja.

Uz sve navedeno, u nadležnosti Vlade su i **rokovi i način dostavljanja podataka** o monitoringu. Sve navedene aktivnosti realizuju se na osnovu **posebnih zakona i uredbi** koji definišu svaku oblast posebno. Zakoni u svakoj oblasti definišu i **granične vrednosti** zagađujućih materija, tj. **indikatora** koji se prate u određenom medijumu.

33 Republika Srbija. Zakon o zaštiti životne sredine, "Službeni glasnik RS", br. 135/2004, 36/2009, 72/2009, 43/2011, 14/2016, 76/2018

Ciljevi i organizacija monitoringa životne sredine

Osnovni ciljevi monitoringa životne sredine su:

- da se utvrdi da li su i koliko priroda i čovek ugroženi usled emisije zagađujućih materija;
- da se utvrdi da li je potencijalni zagađivač ispunio sve zakonom propisane aktivnosti u cilju kontrole emisije;
- da se obezbede relevantni podaci o nivoima zagađenja, koji se potom stavljaju na uvid državnim institucijama i javnosti.

Monitoring životne sredine obavljaju nadležne državne institucije, ali i ovlašćene organizacije koje ispunjavaju uslove u pogledu kadrova, opremljenosti, akreditacije za merenje određenih parametara, i obezbeđenih standarda (SRPS-ISO) u oblasti uzorkovanja, merenja, analize i pouzdanosti dobijenih rezultata u skladu sa zakonom. Svaka privredna delatnost (industrijsko postrojenje, kompleks, objekat, i sl.) koja predstavlja izvor zagađenja, tj. emituje zagađujuće materije (**zagađivač**), preko operatera postrojenja, dužna je da obavlja **sopstveni monitoring** životne sredine. Realizacija se postiže praćenjem indikatora emisije, i uticaja tog postrojenja na životnu sredinu, kao i praćenjem efikasnosti primenjenih mera prevencije nastanka i smanjenja nivoa zagađenja. Uz sve navedeno, za velike industrijske komplekse i objekte od značaja za Republiku Srbiju, neophodno je merenje i meteoroloških parametara. U Republici Srbiji jedinstveni normativi utvrđuju se radi kontrole kvaliteta vazduha, voda, zemljišta, postupanja sa otpadom i hemikalijama, tretmana otpadnih voda, industrijskog zagađenja i upravljanja rizikom, nivoa buke i vibracija.

Režimi monitoringa životne sredine

Sistematski monitoring je u nacionalnim okvirima definisan zakonom i podrazumeva kontinualno praćenje indikatora u cilju integralne zaštite životne sredine i kontrole zagađenja. U slučaju procene postojanja sistema sa izraženim štetnim uticajem na životnu sredinu (vanredne situacije), radi se **dopunski monitoring**. U takvim situacijama moguće je definisati nekoliko karakterističnih situacija:

- stanje povišene pripravnosti u slučajevima kada emisija zagađujućih materija prekoračuje uobičajene vrednosti;
- stanje neophodne i neodložne akcije da se spreči prekoračenje maksimalne dozvoljene koncentracije (MDK) u situacijama kada se emisija zagađenja približila graničnoj vrednosti;
- vanredno (alarmantno) stanje koje se proglašava u cilju smanjenja prekoračenja MDK i vraćanja u dozvoljene okvire.

Različiti nivoi potencijalnog rizika po životnu sredinu definišu i potrebu za različitim **režimima monitoringa**. Pri definisanju režima (intenziteta) monitoringa prati se kolika je **verovatnoća da se prekorači MDK** i kakve su potencijalne **posledice** koje nastaju u životnoj sredini zbog prekoračenja MDK. Neki od elemenata koji se koriste u proceni verovatnoće prekoračenja MDK su: broj izvora zagađenja koji doprinose ukupnoj emisiji, stabilnost procesa, kapacitet izvora i njegova mogućnost da ublaži dodatnu emisiju, sposobnost ispitivane aktivnosti da reaguje kada se pojavi prekoračenje MDK, starost i radni režim opreme koja se koristi, katastar zagađivača iz koga se procenjuje koje zagađujuće materije se oslobađaju ili mogu da se oslobode tokom akcidenta, i maksimalni nivo koncentracije i protoka opasne supstance tokom akcidenta. Posledice se mogu utvrditi na osnovu trajanja akcidenta, akutnih efekata opasne zagađujuće materije – hazardnih karakteristika, položaja postrojenja (udaljenost od naselja i sl.), i meteoroloških uslova.

Sistematski monitoring koji se rutinski obavlja ima unapred određenu dinamiku i režim kako se sprovodi, dok se u slučaju vanrednih okolnosti režim monitoringa uvek mora prilagoditi stepenu i vrsti rizika. U zavisnosti od dinamike kojom se sprovodi, primeri različitih režima monitoringa su:

- režim povremenog monitoringa, koji se radi mesečno, kvartalno ili jednom godišnje;
- režim stalnog-povremenog monitoringa, koji se radi jednom do tri puta nedeljno (dovoljno često da se detektuju stanja povišene emisije);
- režim stalnog-učestalijeg monitoringa, koji se radi jednom dnevno do jednom nedeljno;
- režim intenzivnog monitoringa, koji se radi kontinualno ili nekoliko puta dnevno; kontinualni monitoring detektuje sve nestabilnosti i omogućava da se odmah reaguje ako dođe do vanrednog stanja.

7.3.2. Postupak monitoringa životne sredine

Za svaki tip monitoringa neophodno je unapred definisati uslove, koji podrazumevaju pravilno raspoređene aktivnosti u vezi sa uzorkovanjem i merenjem u vremenu (učestalost uzorkovanja i merenja) i prostoru (mesta i gustina uzorkovanja). Standardizovani uslovi monitoringa omogućavaju da se putem dobijenih rezultata određen proces prati i poredi sa istim ili sličnim procesima u različito vreme i na različitim mestima. Svaki rezultat mora biti ishod niza standardizovanih procedura kako bi se mogao uporediti sa MDK, i na taj način nedvosmisleno utvrditi da li je ispitivano zagađenje i/ili aktivnost (postrojenje) u skladu sa zakonom propisanim normama. Osnovna procedura koja se mora ispoštovati u cilju dobijanja pouzdanih podataka monitoringa sastoji se od uzorkovanja, određivanja vrednosti indikatora, obrade dobijenih podataka, i saopštavanja rezultata monitoringa.

Određivanje vrednosti indikatora životne sredine

Prikupljeni uzorci se analiziraju (na mestu uzorkovanja ili u laboratoriji) klasičnim i instrumentalnim metodama. U klasične metode analize spadaju npr. volumetrija (najčešće razne vrste titracija), gravimetrija i dr., dok instrumentalne metode analize obuhvataju hromatografske, elektrohemijske, spektroskopske i ostale tehnike (videti poglavlje Instrumentalne metode za analizu uzoraka iz životne sredine). Instrumentalne metode analize su osetljivije od klasičnih i omogućavaju merenje sa velikom osetljivošću i niskim pragom detekcije (mogućnost preciznog određivanja niskih koncentracija zagađujućih materija). Merenje na instrumentu samo po sebi nije vremenski zahtevno, ali neretko priprema uzorka, podešavanje i kalibracija instrumenta, usaglašavanje merne procedure, značajno produžavaju vreme do dobijanja podataka.

Osim direktnog merenja koji podrazumevaju kontinualno ili povremeno merenje vrednosti indikatora u životnoj sredini, postoje i drugi načini da se dođe do podataka u procesu monitoringa. Jedan od načina je dobijanje posrednih ili surogat podataka koji su nedovoljno precizni, ali kod pojedinih medijuma i zagađujućih materija mogu biti dovoljno informativni da ukažu na izvore zagađenja u životnoj sredini. Najveća prednost ovih podataka je što zamenjuju skupe i zahtevne procedure merenja, jer se za njihovo dobijanje koriste manje kompleksne tehnike i moguće je dobiti veći broj podataka (primer: određivanje ukupnog organskog ugljenika u uzorcima vazduha (*Total Organic Carbon*, TOC), čemu bi alternativa bila merenje koncentracija velikog broja organskih jedinjenja (VOC, PAH, POPs, i dr.); određivanje biohemijske potrošnje kiseonika (BPK) za sve biohemijske procese u otpadnim vodama, a da se ne zna njegova vrednost za svaki proces posebno).

U procesu monitoringa može se koristiti i postupak preračunavanja radi utvrđivanja emisije. U tom slučaju neophodno je dobro poznavanje procesa, merenje određenih indikatora i određivanje balansa masa (odnos reaktanta i produkta reakcije) da bi se mogla izračunati emisija. Emisioni faktori su podaci koji se dobijaju iz preračunavanja, a na bazi iskustvenih podataka, usrednjenih vrednosti i dobrog poznavanja određenog procesa. Za njihovo korišćenje prethodno je potrebno dobiti saglasnost ovlašćenih institucija jer se u protivnom ne mogu koristiti kao relevantan podatak. U svakom slučaju primena emisionih faktora je metoda za dobijanje brzih ili globalnih procena (primer: na osnovu emisionih faktora pojedinih fosilnih goriva i količine energije koju proizvede jedna termoelektrana, moguće je izračunati kolika je emisija štetnih gasova pri korišćenju određenog goriva).

Metoda ocene ispunjenosti uslova zasnovana je na statističkom upoređivanju merenja, podataka između različitih setova merenja, grešaka koje nastaju pri merenjima, emisionih limita ili drugih sličnih podataka od značaja. Pojedine ocene ne moraju da se baziraju na brojnim podacima, već na logičkim zaključcima da li vrednost indikatora ispunjava uslove ili ne. Najčešće se izmerene vrednosti upoređuju sa propisanim graničnim vrednostima, uzimajući u obzir odgovarajuće nesigurnosti merenja, i svrstavaju se u kategorije:

- usaglašen sa postavljenim uslovima (ispod granice);
- na granici sa postavljenim uslovima;
- neusaglašen sa postavljenim uslovima (preko granice) (primer: kategorije kvaliteta vazduha koje se dobijaju preračunavanjem određenih indeksa kvaliteta, *Air Quality Index*, AQI).

Obrada podataka

Obrada podataka podrazumeva tzv. preprocesing (pripremu podataka za analizu), kada se u skladu sa mernim nesigurnostima, greškom merne metode, osetljivošću i granicama detekcije određuju podaci koji su relevantni za dalju analizu. Analiza podrazumeva osnovnu statističku obradu podataka, prilikom koje se izračunavaju srednje vrednosti, medijana, standardna devijacija i vrednosti određenih precenila niza podataka, koje daju osnovne informacije o indikatorima. O opštim principima obrade podataka, kao i metodama osnovne i napredne statističke analize diskutovano je u poglavlju Analiza podataka iz životne sredine. Dalji postupci podrazumevaju poređenje dobijenih podataka sa propisanim graničnim vrednostima, kako bi se ustanovila usaglašenost sa zakonom i regulativama.

Prilikom monitoringa životne sredine dobijaju se podaci o vrednostima indikatora koji oslikavaju kompleksnost prirode. Ako bi se npr. podaci o vrednostima zagađujućih materija posmatrali u kontekstu svih drugih merljivih karakteristika životne sredine (meteorološki parametri, fizičko hemijske karakteristike vode, zemljišta, i dr.), moglo bi se doći do značajnih informacija o izvorima zagađenja, njihovoj dinamici, ali i o ambijentima koji dovode do povećanih vrednosti zagađenja ili koji utiču na njegovo smanjenje. U pomenutim analizama neophodno je korišćenje naprednih metoda za analizu (o čemu je detaljno pisano u poglavlju Analiza podataka iz životne sredine), koje podrazumevaju poznavanje programiranja, modeliranja, mašinskog učenja i drugih metoda veštačke inteligencije, međutim, pomenuti postupci izlaze iz domena propisanog regularnog monitoringa, i više pripadaju oblasti naučnih istraživanja.

Saopštavanja rezultata monitoringa

Zakon o zaštiti životne sredine Republike Srbije podrazumeva da su podaci o stanju životne sredine javni. Takođe, i jedno od načela Nacionalnog programa zaštite životne sredine³⁴ kaže da u ostvarivanju prava na zdravu životnu sredinu svako ima pravo da bude obavešten o stanju životne sredine i da učestvuje u postupku donošenja odluka čije bi sprovođenje moglo da utiče na životnu sredinu. Otuda i obaveza da se podaci dobijeni monitoringom saopštavaju javnosti, a to se vrši prezentacijom odgovarajućih podataka i informacija o vrednosti indikatora, kao i njihove usaglašenosti sa propisima.

Agencija za zaštitu životne sredine (SEPA)³⁵ vodi tzv. informacioni sistem zaštite životne sredine u Republici Srbiji u koji se prikupljaju svi relevantni podaci. Uloga informacionog sistema je da obezbedi formiranje, klasifikovanje, obradu, održavanje, prezentaciju i distribuciju baza podataka, koje sadrže numeričke, opisne i prostorne podatke. U tim bazama podataka su informacije o: kvalitetu medijuma životne sredine, praćenju stanja i zaštiti životne sredine, zakonodavnim, administrativnim i strateškim merama, kao i naučno-tehničke informacije o planskim merama prevencije.

Informacioni sistem je osnova za Nacionalni ekoregistar³⁶ koji je elektronska baza podataka i portal ka postojećim bazama i dokumentima sa informacijama iz oblasti životne sredine različitih organa i organizacija. Osim navedenih, kao još jedan u nizu dokumenata u službi informisanja javnosti je i Nacionalni registar

34 Republika Srbija. Nacionalni program zaštite životne sredine. Beograd: Ministarstvo zaštite životne sredine, 2010.

35 <https://sepa.gov.rs/>

36 <http://www.ekoregistar.sepa.gov.rs/>

izvora zagađivanja životne sredine³⁷ (inventar emisije), koji se koristi za praćenje kvalitativnih i kvantitativnih promena u životnoj sredini i preduzimanje mera zaštite na nacionalnom i lokalnom nivou.

7.3.3. Monitoring zemljišta

Evropska unija je Akcionim planom od 2010. godine „Životna sredine 2010: naša budućnost, naš izbor“³⁸, podigla nivo značaja zaštite zemljišta na nivo zaštite vode i vazduha, ali trenutno ne postoji zajednički evropski sistem za monitoring zemljišta. Sistematsko praćenje stanja kvaliteta zemljišta u Republici Srbiji definisano je **Zakonom o zaštiti zemljišta**³⁹ i **Uredbom o sistematskom praćenju stanja i kvaliteta zemljišta**⁴⁰. Zakonom se uređuje zaštita zemljišta, sistematsko praćenje stanja i kvaliteta zemljišta, mere sanacije, remedijacije, rekultivacije, inspekcijski nadzor i druga pitanja od značaja za očuvanje zemljišta kao prirodnog resursa od nacionalnog interesa. S druge strane, Uredba propisuje detalje u vezi sa programom monitoringa i metodologijom njegove realizacije.

Institut za standardizaciju Republike Srbije je evropski standard ISO 16133:2018 usvojio kao deo nacionalne standardizacije, i vodi se kao „Kvalitet zemljišta – Smernice za uspostavljanje i održavanje programa monitoringa“⁴¹. Ovlašćenja za monitoring zemljišta imaju pravna lica, agencije ili naučno istraživačke organizacije registrovane za poslove tehničkog ispitivanja i analiza, koje ispunjavaju zakonom propisane uslove.

Državna mreža lokaliteta uspostavlja se za praćenje kvaliteta zemljišta na nivou Republike Srbije na lokalitetima na kojima je došlo ili može doći do zagađenja zemljišta i koji su od posebnog interesa za Republiku Srbiju. Lokalna mreža lokaliteta za praćenje kvaliteta uspostavlja se za praćenje kvaliteta zemljišta na nivou jedinica lokalne samouprave, a čine je dopunski lokaliteti koji se određuju na osnovu merenja ili postupaka procene, i za koje nema podataka o nivou zagađujućih materija. Nadležni organ jedinice lokalne samouprave donosi **Program monitoringa zemljišta na nivou lokalne mreže**, a koji mora biti usklađen s **Programom monitoringa zemljišta na nivou državne mreže**.

37 <https://www.nriz.sepa.gov.rs/>

38 Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja Republike Srbije. Životna sredina 2010: naša budućnost, naš izbor. Beograd: Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja, 2010.

39 Službeni glasnik RS, br. 112/15

40 Službeni glasnik RS, br. 73/19

41 SRPS ISO 16133:2019 – Kvalitet zemljišta – Smernice za uspostavljanje i održavanje programa monitoringa. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije, 2019.

Sadržaj programa monitoringa zemljišta uključuje sve ključne aspekte koji definišu ovaj proces. Prvi element je **broj i raspored lokaliteta**, pri čemu se položaj mernih mesta prikazuje u UTM koordinatnom sistemu, omogućavajući preciznu geografsku identifikaciju svake lokacije. Na svakom lokalitetu, definiše se broj profila koji će biti otvoreni, odnosno broj uzoraka koji će se uzimati radi analize. U okviru uzorkovanja, predviđa se **lista parametara** koji se ispituju na mestima uzorkovanja zemljišta, čime se omogućava sveobuhvatan pregled ključnih indikatora kvaliteta tla. Pored toga, program uključuje i **listu metoda i standarda** koji se koriste za uzorkovanje zemljišta, analizu uzoraka i obradu podataka, čime se osigurava da svi postupci budu usklađeni sa važećim međunarodnim standardima i normama. Za svako merno mesto, posebno u okviru državne mreže monitoringa, biraju se **indikator za ocenu rizika od degradacije zemljišta**, kako bi se moglo precizno proceniti potencijalno narušavanje kvaliteta tla. Na kraju, program definiše **vremensku dinamiku uzorkovanja**, koja uključuje frekvenciju uzimanja uzoraka, analize, obradu i prikaz podataka, osiguravajući redovno praćenje i pravovremeno reagovanje u slučaju identifikacije ekoloških rizika.

Uredba o sistematskom praćenju stanja i kvaliteta zemljišta definiše kriterijume za određivanje broja i rasporeda mernih mesta, lista parametara za određeni tip zemljišta (fizičke, hemijske i mikrobiološke parametre), kao i listu metoda i standarda (spisak referentnih metoda i standarda koji se koriste za uzorkovanje zemljišta, analizu uzoraka i obradu podataka). Kako bi se dobila kompletna slika kvaliteta zemljišta, pored poljoprivrednog zemljišta, kao veoma značajnog u procesima proizvodnje hrane i održanja biljnog i životinjskog sveta, monitoring je neophodno sprovoditi i na osetljivim i opterećenim područjima (industrijska postrojenja, nesanitarne deponije, postrojenja za skladištenje naftnih derivata, javne površine i dr.). Podaci dobijeni monitoringom na nivou državne i lokalne mreže dostavljaju se u formi izveštaja o monitoringu zemljišta, u skladu sa zakonom kojim se uređuje zaštita zemljišta.

Indikatori za ocenu rizika od degradacije zemljišta

Radi praćenja stanja životne sredine i uticaja koji pojedini sektori svojim delovanjima imaju na životnu sredinu, zadnjih decenija se razvijaju modeli koji putem određenih pokazatelja (indikatora) pokušavaju uspostaviti sistem praćenja i ocenjivanja stanja životne sredine, ali i sprovođenja aktivnosti koje vode pozitivnom, održivom načinu upravljanja životnom sredinom. Standardna tipologija indikatora Evropske agencije za životnu sredinu (EEA⁴²) temelji se na *DPSIR*⁴³ modelu, kojim se želi prikazati sistemski odnos između čoveka i njegove okoline. Primenom ove teorijsko metodološke osnove urađena je **Nacionalna lista indikatora zaštite životne sredine**⁴⁴, koja sadrži opšti opis indikatora i indikatore tematskih celina razvrstane na tematska područja. Indikatori koji pripadaju tematskoj celini zemljište dati su na sajtu Agencije za zaštitu životne sredine⁴⁵.

Prvi indikator se odnosi na **stepen ugroženosti zemljišta od erozije**, što podrazumeva procenu rizika od fizičkog oštećenja tla usled vode ili vetra. Sledeći je **stepen ugroženosti zemljišta od gubitka organske materije**, koji ukazuje na opasnost od smanjenja plodnosti tla i pogoršanja njegove strukture zbog nedostatka organskog sadržaja. Takođe, procenjuje se **stepen ugroženosti zemljišta sa rizikom od zbijanja**, koji se odnosi na smanjenje poroznosti tla, što može otežati kretanje vode i vazduha kroz tlo. Još jedan ključni indikator je **stepen ugroženosti zemljišta od zaslanjivanja i/ili alkalizacije**, što se odnosi na akumulaciju soli i povećanje pH vrednosti tla, koje mogu negativno uticati na plodnost i strukturu zemljišta. Procena rizika uključuje i **stepen ugroženosti zemljišta od klizišta**, pri čemu se isključuju klizišta uzrokovana rudarskim aktivnostima za vreme trajanja tih aktivnosti. Konačno, procenjuje se **stepen ugroženosti zemljišta od acidifikacije i stepen ugroženosti zemljišta od hemijskog zagađenja**, koja se odnosi na zakiseljavanje tla usled prekomerne akumulacije kiselih i drugih hemijskih jedinjenja, što može narušiti kvalitet zemljišta i biodiverzitet.

U procesu monitoringa, izbor indikatora za ocenu rizika od degradacije zemljišta vrši na bazi očekivanog stanja ili rezultata prethodnih istraživanja. Indikatori za ocenu rizika od degradacije dobijaju se na osnovu ispitivanja opštih elemenata, kao što su tip zemljišta, struktura, vlažnost, klima, topografija, ali i drugih elemenata (način korišćenja zemljišta, količina ukupnog ugljenika, seizmičke osobine terena), specifičnih za svaki od indikatora.

42 <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/dpsir>

43 D-Driving Forces, P-Pressures, S-State, I-Impact, R-Response

44 Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije. Nacionalna lista indikatora zaštite životne sredine. Beograd: Ministarstvo zaštite životne sredine, godina („Službeni glasnik RS broj 37/11“)

45 https://www.sepa.gov.rs/download/Zemljiste_zakonskiOsnov.pdf

Najznačajnije zagađujuće materije u zemljištu i njihove granične vrednosti

Prema **Uredbi o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu**⁴⁶, kao zagađujuće materije u zemljištu kategorišu se pojedini metali (arsen, kadmijum, hrom, bakar, živa, i dr.), neorganska jedinjenja (cijanidi, bromidi, i dr.), aromatična organska jedinjenja (benzen, toluen, etilbenzen, i dr.), poliaromatični ugljovodonici (PAH), hlorovani ugljovodonici (vinilhlorid, dihlormetan, i dr.), pesticidi (HCH jedinjenja, atrazin, karbarin, i dr.) i ostale zagađujuće materije (ftalati, mineralna ulja, piridini, i dr.). Osobine i hemodinamika zagađujućih materija u zemljištu opisani su u poglavljima Zagađenje zemljišta, Specijacija i mobilnost neorganskih elemenata u zemljištu, i Organske supstance u zemljištu.

Stepen ugroženosti zemljišta od zagađenja određuje se na osnovu graničnih i remedijacionih vrednosti zagađujućih materija datih u prilogu Uredbe. Preko-račenje propisane granične vrednosti narušava ekološku ravnotežu, i nameće dodatna ispitivanja, kao i ograničenja u načinu upravljanja i korišćenja ispitivanog zemljišta. Dodatna istraživanja na kontaminiranim lokacijama rade se u cilju utvrđivanja stepena zagađenosti zemljišta, i ako se dogodi da u 25 m³ zemljišta koncentracija bilo koje zagađujuće materije pređe propisanu remedijacionu vrednost, pristupa se izradi **projekata remedijacije i rekultivacije**, o čemu je detaljnije bilo reči u poglavlju Remedijacija zemljišta.

Metodologija za analizu zemljišta

Ne postoji jedinstvena metoda uzorkovanja zemljišta za monitoring u Evropi i svetu, već svaka država propisuje metodologiju na nacionalnom nivou. Metodologije koje se mogu naći u nacionalnim programima monitoringa su raznorodne (gridovane mreže sa ćelijama različitih dimenzija od 2 do 16 km, profili koji se uzimaju takođe na različitim dubinama od 20 do 150 cm, i ostalo, pri čemu broj lokacija varira u zavisnosti od metodologije i veličine države).

Način uzorkovanja se, takođe, razlikuje u zavisnosti od potrebnih informacija i generalno se može podeliti na:

- **iskustveno:** izbor mesta i broj uzoraka se bira na osnovu znanja i iskustva onog ko radi oprobavanje. Nedostaci ovakvog uzorkovanja su ograničeno zaključivanje koje nije naučno zasnovano, pa se ono uvek kombinuje sa nekom drugom metodom oprobavanja;

46 Republika Srbija. Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu („Službeni glasnik RS, br. 30/2018“)

- **stohastičko** (slučajno): izbor slučajnih uzoraka, broj uzoraka, njihovo mesto i vremenski interval se prepuštaju slučaju i zakonima slučajnih brojeva. Ovaj način uzorkovanja se koristi kada se pretpostavlja da je materijal homogen. Ovim tipom uzorkovanja se dobija statistički pouzdana procena prosečnih vrednosti, proporcija i varijabilnosti; lako se primenjuje i jednostavno je prikazati rezultate.
- **sistematsko**: vremenski raspoređeno; neki trenutak se odabere za početak merenja, a zatim se uzorci uzimaju u jednakim vremenskim razmacima. Sistematskim uzorkovanje se mogu uočiti trendovi i tzv. „hot spots“, mesta sa izuzetno povišenim nivoima zagađenja;
- **stratifikovano**: prikuplja se materijal koji se nalazi u više slojeva koji se ne preklapaju ili na područjima koja su izdvojena u regione. Pogodno je kada se očekuju podaci koji su po vrednostima grupisani i nalaze se u korelaciji sa prostornim ili dubinskim rasporedom ispitivanih slojeva. Svaka grupa podataka se može pojedinačno statistički obraditi, pa omogućava bolju procena srednje vrednosti ili odstupanja nego u slučaju kompozitnog uzorkovanja;
- **po setovima**: u dve faze. Biraju se setovi lokacija koje treba oprobavati (prikupljati probe–uzorke). Uzorci sa tih lokacija se analiziraju jeftinijom analitičkom metodom, pa se na osnovu rezultata vrši klasifikacija. Iz svakog seta se izdvaja jedna za dodatno oprobavanje skupljom metodom;
- **adaptivno**: inicijalna faza je prosto stohastičko oprobavanje, a potom se biraju delovi/lokacije sa anomalijama oko kojih se vrši dodatno uzorkovanje;
- **kompozitno**: prikupljanje uzoraka koji se mogu fizički spojiti i izmešati dok se ne dobije homogeni uzorak za analizu. Čuva se bar polovina primarnih uzoraka, a drugi deo se koristi za pravljenje kompozitnog uzorka. Mana ovakvog uzorkovanja je što daje informaciju samo o srednjoj vrednosti željenog parametra.

U Uredbi o sistematskom praćenju stanja i kvaliteta zemljišta⁴⁷ detaljno su definisani svi koraci koji se preduzimaju u procesu monitoringa zemljišta u okviru državne i lokalnih mreža. U zavisnosti od ciljeva i informacija koje je potrebno pružiti krajnjim korisnicima, prilikom analize mogu se koristiti i neki od međunarodno prihvaćenih standarda i procedura (ISO 10381-1:2002 *Soil quality–Sampling–Part 1: Guidance on the design of sampling programmes*; ISO

47 Republika Srbija. Uredba o sistematskom praćenju stanja i kvaliteta zemljišta („Službeni glasnik RS, br. 73/2019“)

10381-2:2002 *Soil quality–Sampling–Part 2: Guidance on sampling techniques*; ISO 10381-3:2001 *Soil quality–Sampling–Part 3: Guidance on safety*; ISO 10381-4:2003 *Soil quality–Sampling–Part 4: Guidance on the procedure for investigation of natural, near natural and cultivated sites*; ISO 10381-5:2005 *Soil quality–Sampling–Part 5: Guidance on the procedure for the investigation of urban and industrial sites with regard to soil contamination*; ISO 10381-6:2009 *Soil quality–Sampling–Part 6: Guidance on the collection, handling and storage of soil under aerobic conditions for the assessment of microbiological processes, biomass and diversity in the laboratory*; ISO 10381-7:2005 *Soil quality–Sampling–Part 7: Guidance on sampling of soil gas*; ISO 10381-8:2006 *Soil quality–Sampling–Part 8: Guidance on sampling of stockpiles*; ISO 18512:2007: *Soil quality–Guidance on long- and short-term storage of soil samples*).

Kriterijumi za određivanje broja i rasporeda mernih mesta za monitoring zemljišta

Izbor lokaliteta za državnu mrežu monitoringa zemljišta temelji se na sistematskom praćenju stanja i kvaliteta zemljišta u okviru kvadratne mreže sa presečnim tačkama dimenzija 16×16 km. Ovaj pristup omogućava reprezentativnu pokrivenost različitih tipova zemljišta unutar odabranih područja. Pri određivanju tačnih pozicija lokaliteta uzorkovanja, osim prostorne mreže, uzimaju se u obzir dodatni faktori koji omogućavaju precizniju selekciju i obuhvataju:

- **najzastupljeniji tipovi zemljišta** u okviru kvadrata, kako bi se osiguralo da uzorci odražavaju karakteristike dominantnih zemljišnih formacija;
- **način korišćenja zemljišta**, jer različite vrste zemljišnih aktivnosti, poput poljoprivrede ili urbanizacije, mogu imati specifične uticaje na kvalitet tla;
- **reljef** područja, pri čemu se preferiraju lokacije koje omogućavaju precizno praćenje erozije, sedimentacije i drugih geomorfoloških procesa;
- **blizina lokalnih izvora zagađenja** ili prisustvo drugih faktora degradacije, što omogućava procenu uticaja antropogenih i prirodnih zagađivača na zemljište;
- **pristupačnost lokaliteta**, kako bi se olakšao kontinuirani monitoring i redovno uzorkovanje tokom projektovanog ciklusa praćenja;
- **postojeći urbanistički i drugi planovi** koji neće ometati dugoročno praćenje lokaliteta, što osigurava da se monitoring može sprovoditi bez prekida u planiranom vremenskom okviru.

Kvalitet zemljišta u Republici Srbiji

Predviđeni sistem monitoringa podrazumeva sveobuhvatno praćenje stanja zemljišta na nacionalnom nivou, pri čemu se uzimaju u obzir prirodne karakteristike tla, kao i uticaji ljudskih aktivnosti koje mogu narušiti njegov kvalitet. Iako su u Republici Srbiji već uspostavljeni odgovarajući zakonski okviri i metodologija za sistematsko praćenje zemljišta, trenutni podaci o njegovom stanju su ograničeni. Trenutno aktuelni izveštaj⁴⁸ pruža uvid u stanje i naglašava ključne izazove u upravljanju zemljišnim resursima, uključujući očuvanje plodnosti tla, zaštitu od zagađenja i sanaciju degradiranih područja.

Aktuelne informacije o stanju zemljišta dostupne su za period 2018-2019. godine, analizirana je plodnost poljoprivrednog zemljišta, pri čemu je utvrđeno da su zemljišta u centralnoj Srbiji pretežno slabo kisela i siromašna fosforom, dok su zemljišta u Vojvodini uglavnom slabo alkalna, sa srednjim do visokim sadržajem kalijuma. Pored toga, otkriveno je prisustvo hemijskih zagađujućih materija, uključujući teške metale poput bakra, cinka, olova i arsena, naročito u industrijskim zonama i u blizini deponija, gde su prekoračene dozvoljene vrednosti.

Takođe, rizici za degradaciju zemljišta, uključujući eroziju, smanjenje organske materije, zbijanje i zaslanjivanje, identifikovani su na mnogim lokalitetima. Klizišta i gubitak plodnosti tla predstavljaju dodatne izazove. U Izveštaju je navedeno da je identifikovano 309 potencijalno kontaminiranih lokaliteta, gde su pokrenute ili planirane remedijacione aktivnosti. Na 112 divljih deponija u Vojvodini detektovani su teški metali i druge opasne materije, uključujući arsen, kadmijum, nikel i cink, sa prekoračenjem dozvoljenih vrednosti. Ovi rezultati ukazuju na potrebu za kontinuiranim praćenjem i primenom sanacionih mera radi očuvanja kvaliteta zemljišta i zaštite životne sredine, i u nekom narednom periodu realizaciju planiranih aktivnosti na temu sistematskog praćenja stanja u ovoj oblasti životne sredine na način kako je predviđeno zakonom i podzakonskim aktima.

7.3.4. Monitoring vode

Evropske unija je 2000. godine usvojila **Okvirnu direktivu o vodama**⁴⁹, čime je u potpunosti promenjena dotadašnja politika vezana za vodne resurse (obavezujuća za zemlje članice Evropske unije). Ključni ciljevi nove politike definisani su u nekoliko poglavlja:

- sveobuhvatna zaštita svih voda;
- dobar status svih voda;

48 <https://sepa.gov.rs/publikacije/>

49 ODV – Water Framework Directive EU/WFD – 2000/60/EC

- integralno upravljanje rečnim slivom;
- „kombinovani pristup“ (svi ispusti u površinske vode neophodno je da budu kontrolisani bilo kontrolom emisije, ili kontrolom graničnih vrednosti);
- pravilno utvrđivanje cena (cena vode treba da obezbedi podsticaj korisnicima da racionalno koriste vodne resurse);
- uključivanje javnosti.

Osim navedenih oblasti, Direktiva eksplicitno propisuje Monitoring površinskih, podzemnih voda i zaštićenih područja, u cilju uspostavljanja koherentnog i sveobuhvatnog pregleda statusa svih voda. Za površinske vode program monitoringa treba da obuhvati: vodostaje i proticaje do stepena koji je značajan za ekološki i hemijski status, kao i ekološki potencijal. Za podzemne vode programi obuhvataju kontrolu hemijskog i kvantitativnog statusa, a za zaštićena područja takvi programi zavise i dopunjavaju se specifičnim podacima na osnovu kojih su pojedina zaštićena područja uspostavljena.

U cilju usklađivanja vodoprivredne politike sa zahtevima i ciljevima EU, 2010. godine u Republici Srbiji je usvojeno niz zakona i podzakonskih akata, među kojima su najznačajniji: Zakon o vodama⁵⁰, Zakon o meteorološkoj i hidrološkoj delatnosti⁵¹, Pravilnik o utvrđivanju vodnih tela površinskih i podzemnih voda⁵², i Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametara hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda⁵³, Uredba o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje⁵⁴, kao i Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje⁵⁵.

Integralno upravljanje vodama u Srbiji u nadležnosti je Republike, i definisano je navedenim zakonima, kao i programom monitoringa i planom zaštite voda od zagađivanja. Za svaku godinu Vlada Republike Srbije donosi Uredbu o utvrđivanju godišnjeg programa monitoringa statusa voda, kojom se planira nadzorni monitoring (vrši se radi obezbeđenja kompletnog pregleda statusa

50 Republika Srbija, Zakon o vodama ("Sl. glasnik RS", br. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018 - dr. Zakon)

51 Republika Srbija, Zakon o meteorološkoj i hidrološkoj delatnosti, („Službeni glasnik RS 88/2010“)

52 Republika Srbija, Pravilnik o utvrđivanju vodnih tela površinskih i podzemnih voda („Službeni glasnik RS 96/2010“)

53 Republika Srbija, Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametara hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda („Službeni glasnik RS 74/2010“)

54 Republika Srbija, Uredba o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje („Službeni glasnik RS 24/2014“)

55 Republika Srbija, Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje („Službeni glasnik RS, broj 67/2011“)

voda i davanja informacija o dugoročnim trendovima) i operativni monitoring (vrši se radi ustanovljavanja ili potvrđivanja statusa onih vodnih tela koja su identifikovana kao rizična u smislu nemogućnosti ispunjenja zadatih ciljeva životne sredine).

Monitoring voda u Republici Srbiji do 2011. godine vodio je Republički hidrometeorološki zavod⁵⁶, a od 2011. je pod ingerencijom Agencije za zaštitu životne sredine (SEPA). SEPA obavlja poslove razvoja i nadzora nad funkcionisanjem državne mreže stanica za monitoring kvaliteta voda. Takođe, obavljaju se poslovi uzorkovanje površinskih i podzemnih voda, prezervacija uzoraka, terenska i laboratorijska fizičko-hemijska, hemijska i mikrobiološka analiza uzoraka. Određuju se parametri koji su indikativni za sve biološke i hidromorfološke elemente kvaliteta, priprema i uzorkuje sediment za analizu. Za potrebe izrade periodičnih i godišnjih izveštaja, vrši se kontrola i arhiviranje prikupljenih podataka o kvalitetu voda, a izveštaji sadrže ocenu stanja kvaliteta voda u skladu sa domaćim i stranim propisima.

Zakon pod zaštitom vode podrazumeva niz mera i aktivnosti kojima se kvalitet površinskih i podzemnih voda štiti i unapređuje, uključujući i uticaj prekograničnog zagađenja. **Ciljevi zaštite vode** su:

- očuvanja života i zdravlja ljudi;
- smanjenja zagađenja i sprečavanja daljeg pogoršanja stanja voda;
- obezbeđenja neškodljivog i nesmetanog korišćenja voda za različite namene;
- zaštite vodnih i priobalnih ekosistema, uz usklađivanje sa propisima kojima se uređuje zaštita životne sredine.

Plan zaštite voda od zagađivanja obuhvata niz ključnih mera i aktivnosti usmerenih na očuvanje kvaliteta **površinskih i podzemnih voda**, kao i prevenciju njihovog zagađenja. Prvi element ovog plana uključuje listu aglomeracija, odnosno urbanih i industrijskih područja koja zahtevaju specifične mere zaštite voda. Među najvažnijim merama su kontrola, sprečavanje, prekidanje i smanjivanje unošenja hazardnih supstanci u vodene tokove, kako bi se očuvala čistoća i ekološki integritet voda. Plan takođe predviđa mere za sprečavanje odlaganja otpadnih materija na područjima gde to može dovesti do pogoršanja kvaliteta voda, čime se osigurava smanjenje zagađenja iz industrijskih i domaćih izvora.

56 https://www.hidmet.gov.rs/ciril/osmotreni/stanje_voda.php

Prečišćavanje otpadnih voda je ključni segment ovog plana, koji podrazumeva primenu tehnologija i metoda za tretman otpadnih voda pre nego što se ispuste u prirodne vodene sisteme. Uz to, plan uključuje mere za prevenciju i kontrolu rasutih zagađenja, kako bi se smanjio njihov uticaj na vodene ekosisteme. Posebno su važne mere zaštite akvatičnih ekosistema, koji zavise od kvaliteta vode, kao i zaštita od hazardnih i prioriternih supstanci, uključujući i prioritne hazardne supstance.

Plan takođe definiše način sprovođenja interventnih mera u slučajevima zagađivanja, uključujući odgovornost i ulogu organa i pravnih lica zaduženih za sprovođenje pojedinih mera i radova. Uvedeni su i rokovi za smanjenje zagađivanja vode, što je od ključne važnosti za postizanje dugoročnih ciljeva u zaštiti voda. Pored toga, detaljno su opisane odgovornosti i ovlašćenja za sprovođenje zaštitnih mera, uključujući izgradnju objekata i uređaja za prečišćavanje otpadnih voda, što je neophodno za unapređenje kvaliteta voda i očuvanje ekosistema.

Osim planova, postoji i lista zabrana i obaveza za zagađivače, u cilju zaštite kvaliteta vode. Najvažnije zabrane odnose se na ispuštanje zagađujućih materija u vode i vodno zemljište, a obaveze na prečišćavanje otpadnih voda do nivoa koji odgovara graničnim vrednostima emisije ili do nivoa kojim se ne narušavaju standardi kvaliteta životne sredine recipijenta (tekuća ili stajaća voda i vodno zemljište u okruženju 5 m od obale). I zabrane i obaveze neophodno je uskladiti sa propisima kojima se uređuju granične vrednosti zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama, granične vrednosti prioriternih, hazardnih i drugih zagađujućih materija, kao i propisom kojim se uređuju granične vrednosti emisije zagađujućih materija u vode (uvek se uzima strožiji propis za određenu aktivnost).

Radi sprečavanja štetnih uticaja i narušavanja kvaliteta vode i životne sredine, i ocene stanja površinskih i podzemnih voda, utvrđuju se fizičko-hemijski parametri koji se prate i granične vrednosti zagađujućih materija u površinskim vodama, podzemnim vodama i sedimentu, koje su definisane u **Uredbi o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci**. Uredba definiše standarde kvaliteta životne sredine, kao koncentraciju pojedinačne prioritne supstance ili grupe prioriternih supstanci u površinskim vodama, koja ne može da bude prekoračena u cilju zaštite životne sredine i zdravlja ljudi. Standard kvaliteta životne sredine se vezuje za maksimalno dozvoljenu koncentraciju i/ili za vrednosti prosečnih godišnjih koncentracija prioriternih supstanci, koje su u uredbi svrstane u dve grupe – prva i druga grupa prioriternih supstanci. Pri tom se za svaku od supstanci navodi stepen prioriteta, prosečna godišnja koncentracija (PGK) i maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK).

Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, propisuju granične vrednosti emisije zagađujućih materija, kao i načine i uslove ispuštanja zagađujućih materija i primene graničnih vrednosti emisije. Kontrola emisije vrši se merenjem koncentracija zagađujućih materija u:

- tehnološkim otpadnim vodama pre njihovog ispuštanja u javnu kanalizaciju;
- tehnološkim i drugim otpadnim vodama koje se neposredno ispuštaju u recipijent;
- vodama koje se posle prečišćavanja ispuštaju iz sistema javne kanalizacije u recipijent;
- otpadnim vodama koje se ispuštaju u recipijent iz septičke i sabirne jame.

Granične vrednosti emisije nisu uvek strogo definisane (tačne brojne vrednosti), već su prilagođene pojedinim slučajevima, i neretko date uz naznake i pojašnjenja.

Ekološki status i ekološki potencijal voda

Najvažniji pravni akt koji obuhvata parametre za procenu ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda, ekološkog potencijala veštačkih vodnih tela, kao i hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda, jeste **Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametara hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda**. Ovaj pravilnik postavlja osnove za ocenu kvaliteta vodnih tela, omogućavajući klasifikaciju njihovog statusa prema standardima koji su usklađeni sa evropskim direktivama. Ekološki status površinskih voda procenjuje se na osnovu bioloških, hidromorfoloških i fizičko-hemijskih parametara, dok hemijski status obuhvata analizu prisustva prioriternih i opasnih supstanci.

Za veštačka vodna tela, ekološki potencijal se određuje kroz analizu sličnih parametara, ali uzimajući u obzir antropogeni uticaj na te sisteme. Kod podzemnih voda, hemijski status uključuje analizu zagađujućih materija, dok kvantitativni status podrazumeva ocenu rezervi podzemnih voda u odnosu na njihovo korišćenje i prirodno obnavljanje. Na osnovu ovih parametara vrši se **kategorizacija vodnih tela**, što je od ključnog značaja za upravljanje i zaštitu vodnih resursa, omogućavajući identifikaciju problema, određivanje prioriternih mera i usklađivanje sa ciljevima održivog razvoja i očuvanja ekosistema.

Klasifikacija vodnih tela

Na osnovu Pravilnika o utvrđivanju vodnih tela površinskih i podzemnih voda, izvršena je klasifikacija na vodna tela površinskih voda – vodotokove (reke i značajno izmenjena vodna tela-akumulacije i veštačka jezera), jezera, i podzemne vode (izdani i vodonosni kompleksi). Pomenuti Pravilnik sadrži sva registrovana vodna tela i njihove karakteristike, uključujući i kategorije kojima pripadaju. Međutim, u upotrebi je i druga klasifikacija, koja se koristi za određivanje ekološkog statusa i potencijala vodnih tela. Ona je data u tabeli 7.4, a sadržana je u prolozima uz Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda, i parametara hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda.

Tabela 7.4. Klasifikacija vodotokova, jezera, akumulacija i veštačkih vodnih tela

Tip/Kategorija	Opis
Vodotok TIP 1	Velike nizijske reke, dominacija finog nanosa
Vodotok TIP 2	Velike reke, dominacija srednjeg nanosa, izuzev reka područja Panonske nizije
Vodotok TIP 3	Mali i srednji vodotoci, nadmorska visina do 500 m, dominacija krupne podloge
Vodotok TIP 4	Mali i srednji vodotoci, nadmorska visina preko 500 m, dominacija krupne podloge
Vodotok TIP 5	Vodotoci područja Panonske nizije, izuzev vodotoka svrstanih u TIP 1
Vodotok TIP 6	Mali vodotoci izvan područja Panonske nizije koji nisu obuhvaćeni TIPOM 3 i 4, kao i vodotoci koji nisu obuhvaćeni Pravilnikom
Plitka jezera	Jezera do 200 m nadmorske visine, sva plitka jezera (do 10 m dubine), svi barsko-močvarni ekosistemi
Srednje duboka i duboka jezera	Jezera preko 200 m nadmorske visine, srednje duboka (10-30 m) i duboka (preko 30 m)
Akumulacije na TIP 1	Akumulacije formirane na vodnim telima TIPA 1
Akumulacije na TIP 2	Akumulacije formirane na vodnim telima TIPA 2
Akumulacije na TIP 3 i TIP 4	Akumulacije formirane na vodnim telima TIPA 3 i TIPA 4
Akumulacije na TIP 5 i TIP 6	Akumulacije formirane na vodnim telima TIPA 5 i TIPA 6
Veštačka vodna tela	Veštačka vodna tela

Ekološki status za reke i jezera, i ekološki potencijal za veštačka i znatno izmenjena prirodna vodna tela se određuju prema biološkim, hemijskim, fizičko-hemijskim i hidromorfološkim parametrima koji su od značaja za biološke elemente, i to za datu kategoriju površinske vode i dati tip vodnog tela površinskih voda. I ekološki status i ekološki potencijal se mogu kategorisati kao odličan (I kategorija), dobar (II kategorija), umeren (III kategorija), slab (IV kategorija) i loš (V kategorija), prema uputstvima i kriterijumima koji su dati u Pravilniku. Za svaki TIP reke, jezera ili veštačkog vodnog tela razlikuju se parametri koji se prate, i vrednosti tih parametara. Kod svakog TIPA vodnog tela određene su i vrednosti parametara (koncentracije i dr.) koje predstavljaju granicu između pojedinih kategorija.

Primer: u vodi reke X koja pripada TIP X vodotoku, ispituje se koncentracija/prisustvo ukupnog organskog ugljenika, njena PH vrednost, ukupni nitrati, fosfati, razni biološki parametri, ukupna količina fitoplanktona, ukupni koliformi, i mnogi drugi parametri, pri čemu njihove vrednosti (koncentracija u ml/l, broj jedinica u 100ml, i sl.) određuju da li je ekološki status I, II, itd. kategorije. Pa se u izveštaju navodi da je reka X, TIP X vodotoka I kategorije ekološkog statusa. Zadovoljavajući status vodnog tela površinskih voda ostvaren je kada su oba njegova statusa, ekološki i hemijski, ocenjeni najmanje kao dobar (II kategorija).

Metodologija monitoringa voda u Srbiji

Prema aktuelnim pravilnicima na teritoriji Republike Srbije definisano je ukupno 498 vodnih tela površinskih voda. Od toga, 493 vodna tela grupisana su u kategorije reka i izmenjenih vodotokova, a 5 kao jezera. Takođe monitoringom su pokrivene i podzemne vode (izdani), za koje se procenjuje da je ukupni kapaciteti u Srbiji oko 678 miliona m³ godišnje ili 21,5 m³/s.

Aktuelni godišnji program monitoringa voda, gde se osim hidroloških karakteristika, beleženja fizičkih osobina vode na terenu, uzimaju i uzorci vode za dalju fizičko-hemijsku analizu u laboratoriji obavezno sadrži:

- broj i položaj mernih profila na površinskim vodama;
- broj i položaj pijezometara i drugih objekata za merenje količine i nivoa podzemnih voda;
- način i broj merenja količine i nivoa površinskih i podzemnih voda;
- način i postupak ispitivanja kvaliteta voda;
- broj i uslove u kojima se vrši ispitivanje;
- sadržinu izveštaja o utvrđenom kvalitetu voda.

Na osnovu poslednje dostupne Uredbe o utvrđivanju monitoringa statusa voda, hidrološke karakteristike površinskih voda u Srbiji beleže se na 185 mernih mesta, gde se svakodnevno mere vodostaj, protok i na 55 stanica temperatura vode. Ove osnovne informacije mogu se pratiti na sajtu Hidrometeorološkog zavoda Srbije⁵⁷, a postoje i Hidrološki godišnjaci koji se izdaju svake godine⁵⁸. Na stanicama na kojima postoje uređaji (digitalni ili analogni) za praćenje nivoa vode, podaci se očitavaju svakog sata. Jednom mesečno, ili ređe vrši se merenje protoka i izračunavanje količine vode na odabranim mernim mestima, kao i prenos suspendovanog materijala, pad profila, vodenog ogledala i dr.

Ocena kvaliteta površinskih voda u okviru nadzornog monitoringa, prema aktuelnoj uredbi vrši se na 64 merna mesta u Srbiji. Kriterijumi na osnovu kojih je vršen odabir stanica nadzornog monitoringa bili su: mesta sa protokom koji je značajan za vodno područje kao celinu, uključujući mesta na velikim rekama sa površinom sliva većom od 2500 km²; mesta na kojima je količina prisutne vode značajna za vodno područje, uključujući velika jezera i akumulacije; mesta gde velika vodna tela prelaze granicu države članice EU; mesta na prekograničnim vodotocima utvrđena međudržavnim ugovorima između Republike Srbije i susednih država. Osim toga u obzir su uzeta i mesta pogodna za procenu sadržaja zagađujućih materija koje se prenose preko granica države članice. U okviru nadzornog monitoringa potrebno je osmatrati parametre koji su indikativni za određivanje svih bioloških, hidromorfoloških, kao i svih opštih i specifičnih fizičko-hemijskih elemenata kvaliteta voda.

Nadzorni monitoring se sprovodi najmanje godinu dana prema planu i programu monitoringa. Rezultati daju pregled ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i omogućavaju klasifikaciju vodnih tela u pet klasa, dopunjuju i potvrđuju procenu podločnosti vodnih tela na pritiske antropogenog porekla, kao i uticaje na promenu njihovog statusa. Na osnovu rezultata ove vrste monitoringa moguća je efikasna izrada budućih programa monitoringa, kao i procena dugoročnih promena prirodnih uslova, i promena koje su posledica antropogenih aktivnosti. Izbor **parametara za praćenje kvaliteta voda** vrši se na osnovu sledećih kriterijuma:

- parametri koji su indikativni za sve biološke elemente kvaliteta;
- parametri koji su indikativni za sve hidromorfološke elemente kvaliteta;
- parametri koji su indikativni za sve opšte fizičko-hemijske elemente kvaliteta;
- prioritarna grupa zagađujućih materija koje se ispuštaju u rečne slivove ili podslivove;

57 <https://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/index.php>

58 https://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/povrsinske_godisnjaci.php

- ostale zagađujuće materije koje se ispuštaju u značajnim količinama u rečne slivove ili podslivove.

Operativni monitoring se sprovodi na 81 stanici na svim vodnim telima površinskih voda za koja je na osnovu rezultata monitoringa i analize uticaja utvrđeno da postoji rizik nepostizanja ciljeva životne sredine. Takođe ova vrsta monitoringa sprovodi se i na onim vodnim telima u koje se ispuštaju supstance sa prioritetne liste. Za određivanje veličine pritiska kojima su vodna tela površinske vode izložena, ispituju se:

- parametri koji su pokazatelji onog biološkog elementa kvaliteta, ili više njih, koji su najosetljiviji na pritiske kojima su vodna tela izložena;
- prioritetne supstance i druge zagađujuće materije ispuštene u značajnim količinama;
- parametri koji su pokazatelji onog hidromorfološkog elementa kvaliteta koji je najosetljiviji na razmatrani pritisak.

Godišnja učestalost ispitivanja pojedinačnih elemenata kvaliteta voda je različita i kreće se od hidrološkog režima (vodostaj i proticaj) koji se prate svakodnevno, preko opštih fizičko-hemijskih elemenata i specifičnih neprioritetnih zagađujućih materija (jednom mesečno), fitoplanktona (na dva meseca), ili makroinvertebrata i fitobentosa (dva puta godišnje). Praćenje pojedinih parametara ograničeno je samo na velike ravničarske vodotokove (TIP 1).

Nivo vodostaja podzemnih voda meri se u okviru mreže pijeziometara koji su postavljeni na preko 300 mesta u Srbiji. Na polovini mernih mesta meri se samo nivo, dok se na oko 170 mesta meri i temperatura podzemne vode. Takođe, na oko 60 pijeziometara podaci se beleže svaki dan, dok je dinamika kod ostalih od dva do šest puta mesečno. I ovi podaci na godišnjem nivou sadržani su u Hidrološkom godišnjaku za određenu godinu.

Na pet mernih mesta na Dunavu, Savi, Velikoj Moravi i Ibru od 2023. godine dostupni su podaci o kvalitetu voda na dnevnom i nedeljnom nivou, koji se mogu ispratiti na sajtu SEPA⁵⁹. To predstavlja značajan pomak u sistematskom praćenju kvaliteta voda, gde se korišćenjem automatizovanih sistema javnost blagovremeno obaveštava stanju životne sredine.

59 <http://77.46.150.213:8080/apex/f?p=406:4>

Kvalitet voda u Republici Srbiji

Aktuelni izveštaj o kvalitetu površinskih i podzemnih voda dostupan je za 2022. godinu, i daje ključne podatke o stanju ekoloških sistema kroz analizu bioloških, fizičko-hemijskih i hemijskih parametara. Ispitivanje je sprovedeno na 79 profila vodotoka, 6 profila kanalizacione mreže, 2 akumulacije, kao i na 56 lokacija podzemnih voda. Biološki indikatori, kao što su fitoplankton i makro-invertebrati, korišćeni su za procenu ekološkog statusa voda, dok su hemijski parametri uključivali analizu prisustva teških metala, organskih zagađivača i prioriternih supstanci. Rezultati ukazuju na značajne razlike u kvalitetu vode, pri čemu je na mnogim mestima, naročito u blizini industrijskih i urbanih područja, zabeleženo prekoračenje graničnih vrednosti za određene zagađujuće materije, poput teških metala i polutanata iz poljoprivrednih izvora.

Ekološki status mnogih vodnih tela ocenjen je kao nepovoljan zbog prisustva zagađujućih materija koje negativno utiču na biodiverzitet i ekosisteme. Takođe, podaci o podzemnim vodama pokazuju prisustvo teških metala u nekoliko lokacija, što sugerise potrebu za dodatnim merama zaštite. Ovi rezultati naglašavaju potrebu za kontinuitetom u monitoringu i primeni preventivnih i sanacionih mera, kako bi se smanjio uticaj zagađenja i očuvao kvalitet površinskih i podzemnih voda u Republici Srbiji.

7.3.5. Monitoring vazduha

Kvalitet vazduha je jedno od pitanja koje izaziva najviše pažnje i ono predstavlja jednu od oblasti gde je u većini zemalja i Evrope i ostatka sveta državna politika zaštite životne sredine „najaktivnija“. Smatra se da su problemi atmosferskog zagađenja našli utemeljenje u zakonodavnim okvirima evropske unije 80-tih godina prošlog veka. Savet Evropske ekonomske zajednice 1979. godine doneo je, a Zajednica ratifikovala Konvenciju o prekograničnom zagađivanju vazduha na velikim udaljenostima, i nakon toga 1980. godine prvu Direktivu koja se odnosila na standarde kvaliteta vazduha i sadržala granične vrednosti za sumpor-dioksid i suspendovane čestice⁶⁰. Kasnije su se otvarala i druga pitanja u vezi sa kiselim kišama, određivanjem graničnih vrednosti za ostale zagađujuće materije, kao i ograničavanje emisija zagađujućih materija iz velikih industrijskih postrojenja. Devedesetih godina u prvi plan došao je razvoj legislative u domenu zaštite ozonskog omotača, ograničavanja emisija ugljendioksida i oštećenja šuma atmosferskim zagađenjem.

60 European Economic Community. Directive 80/779/EEC on Air Quality Limit Values and Guide Values for Sulphur Dioxide and Suspended Particulates. Official Journal of the European Communities, L229, 30 August 1980, pp. 30-48.

Od 2005. godine politika Evropske unije u oblasti kvaliteta vazduha definisana je i oslonjena u potpunosti na Šesti akcioni program u oblasti životne sredine⁶¹. Ključni strateški dokumenti EU u ovoj oblasti je Tematska strategija o zagađivanju vazduha (*Thematic Strategy on air pollution*)⁶², koja definiše ciljeve za smanjenje koncentracija zagađujućih materija. Osim toga naglašava da se rezultati u oblasti poboljšanja kvaliteta vazduha mogu postići unapređivanjem zakonodavstva u oblasti životne sredine i kroz integraciju pitanja kvaliteta vazduha u relevantne politike. Ova strategija je jedna od sedam strategija čija izrada je predviđena Šestim akcionim programom i prva koja je formalno usvojena od strane Komisije. Strategija je zasnovana pretežno na istraživanjima koja su sprovedena u okviru *Clean Air for Europe - CAFE Program*⁶³.

Najznačajniji propis za implementaciju pomenutih programa u sektoru kvaliteta vazduha je Direktiva o kvalitetu ambijentalnog vazduha i čistijem vazduhu za Evropu⁶⁴, koja postavlja standarde kvaliteta sa ciljem zaštite zdravlja ljudi. Svi ostali propisi u sektoru kvaliteta vazduha, uključujući i kontrolu emisija iz mobilnih izvora, poboljšanje kvaliteta goriva, i dr. podržavaju postizanje standarda kvaliteta definisanih u ovoj direktivi. Ona sadrži scenarija kvaliteta vazduha do 2020. godine u pogledu: finih čestica (*Particular Matter-PM*), troposferskog ozona (*ground level ozone*), acidifikacije (*acidification*) (posledica acidifikacije su kisele kiše), eutrofikacije - cvetanja vode (*eutrophication*) i dr. Osim pomenute, značajna je i Direktiva o trgovini emisijama⁶⁵, a novine u ova dva dokumenta su zahtevi poput npr. informisanja javnosti o stanju kvaliteta vazduha na dnevnom nivou, i praćenje i izveštavanje o trgovini emisijama u evropskom registru. Važna veza kvaliteta vazduha sa sektorom industrijskog zagađenja su Direktiva o industrijskim emisijama⁶⁶ i Direktiva o nacionalnim kvotama emisije⁶⁷. Ova povezanost je važna jer u okviru Direktive o industrijskim emisijama za najveće tačkaste izvore emisija u vazduhu moraju biti postavljena stroga ograničenja emisija.

61 <https://ec.europa.eu/environment/archives/action-programme/intro.htm>

62 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52005DC0446&from=EN>

63 <https://ec.europa.eu/environment/archives/cafe/general/keydocs.htm>

64 European Parliament and Council. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. Official Journal of the European Union, L152, 11 June 2008, pp. 1-44.

65 European Parliament and Council. Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community. Official Journal of the European Union, L140, 5 June 2009, pp. 63-87.

66 European Parliament and Council. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Official Journal of the European Union, L334, 17 December 2010, pp. 17-119.

67 European Parliament and Council. Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Official Journal of the European Communities, L309, 27 November 2001, pp. 22-30.

Postoji niz drugih obaveza i pravnih dokumenata koja regulišu i aktivnosti u poljoprivrednom sektoru - Direktiva o nitratima⁶⁸, i mnoge druge.

Zakonska osnova u oblasti kvaliteta vazduha u Republici Srbiji uređena je postojećom domaćom regulativom, koja je u najvećoj meri preuzeta iz Direktive 2008. Krovni zakon je **Zakon o zaštiti vazduha**⁶⁹, a odredbe u oblasti monitoringa i ocene kvaliteta vazduha, formulisane su kroz podzakonska akta: **Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha**⁷⁰, **Uredba o utvrđivanju programa kontrole kvaliteta vazduha u državnoj mreži**⁷¹ i **Uredba o utvrđivanju zona i aglomeracija**⁷². Kvalitet vazduha obuhvaćen je u Nacionalnoj strategiji održivog razvoja koja kao osnovni zadatak u ovoj oblasti definiše očuvanje kvaliteta, a gde je primenljivo, i poboljšanje kvaliteta vazduha (naročito u urbanim sredinama i u blizini velikih industrijskih postrojenja).

Zaštita vazduha u Republici Srbiji ostvaruje se kroz nekoliko ključnih aktivnosti. Prvo, **uspostavljanjem jedinstvenog sistema upravljanja kvalitetom vazduha** na teritoriji cele zemlje, koji se kontinuirano održava i unapređuje. Drugo, **očuvanjem i poboljšanjem kvaliteta vazduha kroz primenu specifičnih mera zaštite**, čiji je cilj sprečavanje i smanjenje štetnih posledica po zdravlje ljudi i životnu sredinu. Takođe, važan segment zaštite obuhvata **izbegavanje, sprečavanje i smanjenje zagađenja** koja doprinose oštećenju ozonskog omotača i klimatskim promenama. **Podaci o kvalitetu vazduha** pribavljaju se na osnovu merenja i standardizovanih analitičkih metoda, a njihova dostupnost javnosti je osigurana. Pored toga, Republika Srbija izvršava svoje obaveze u skladu sa **međunarodnim ugovorima i aktivno učestvuje u međunarodnoj saradnji** na zaštiti i poboljšanju kvaliteta vazduha.

Na državnom nivou uspostavljena je mreža za monitoring kvaliteta vazduha, koja je u nadležnosti Agencije za zaštitu životne sredine⁷³. Operativni monitoring kvaliteta vazduha realizuje se u skladu sa Uredbama koje ga precizno definišu. Osim pribavljanja podataka o najznačajnijim zagađujućim materijama u vazduhu, Agencija ima obavezu blagovremenog obaveštavanja javnosti o kvalitetu vazduha. Preliminarni rezultati se saopštavaju u realnom vremenu, i mogu se

68 European Council. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. Official Journal of the European Communities, L375, 31 December 1991, pp. 1-8.

69 Republika Srbija, Zakon o zaštiti vazduha, („Službeni glasnik RS“ broj 36/09 i 10/13)

70 Republika Srbija, Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha („Službeni glasnik RS“, br. 11/10, 75/10)

71 Republika Srbija, Uredba o utvrđivanju programa kontrole kvaliteta vazduha u državnoj mreži („Službeni glasnik RS“, broj 58/11)

72 Republika Srbija, Uredba o utvrđivanju zona i aglomeracija („Službeni glasnik RS“ broj 58/11 i 98/12)

73 <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=300&id=20028&akcija=showAll>

pratiti na sajtu **Objedinjeni prikaz automatskog monitoringa kvaliteta vazduha u republici Srbiji**. Verifikovane vrednosti i ocena kvaliteta vazduha u aglomeracijama i zonama prezentuju se u Godišnjem izveštaju o stanju kvaliteta vazduha u Republici Srbiji. Državna agencija pored navedenih obaveza, vrši i razmenu podataka o kvalitetu vazduha sa Evropskom agencijom za životnu sredinu (EEA), Evropskom mrežom za informacije i posmatranje (EIONET) i za potrebe izveštavanja u skladu sa preuzetim međunarodnim obavezama (EMEP Protokol).

Osim državnih institucija, o zaštiti i poboljšanju kvaliteta vazduha u obavezi su da brinu i jedinice lokalne samouprave, privredna društva, preduzetnici, kao i druga pravna i fizička lica, u okviru svojih ovlašćenja. Svi koji u obavljanju delatnosti utiču ili mogu uticati na kvalitet vazduha dužni su da: obezbede tehničke mere za sprečavanje ili smanjivanje emisija u vazduh; planiraju troškove zaštite vazduha od zagađivanja u okviru investicionih i proizvodnih troškova; prate uticaj svoje delatnosti na kvalitet vazduha; obezbede druge mere zaštite, u skladu zakonima kojima se uređuje zaštita životne sredine.

Kvalitet vazduha se ocenjuje u zonama ili aglomeracijama (delovima teritorije Republike Srbije, koje su određene na osnovu ocene kvaliteta vazduha; aglomeracije je najčešće oblast iznad 250 hiljada stanovnika ili iznad neke unapred utvrđene gustine stanovništva), koje se periodično određuju i preispituju. U svim zonama i aglomeracijama za ocenjivanje kvaliteta vazduha koriste se podaci dobijeni fiksним merenjima koncentracija propisanih zagađujućih materija, koji se mogu dopunjavati podacima dobijenim tehnikama modelovanja i/ili indikativnim merenjima.

Zagađujuće materije u vazduhu (merenje imisije/kvaliteta vazduha)

Prilikom ocenjivanja kvaliteta vazduha, zakon propisuje obavezno merenje koncentracija neorganskih gasova sumpor dioksida (SO_2), azot dioksida i oksida azota (NO , NO_2 , NO_x), ugljenmonoksida (CO) i prizemnog ozona (O_3); suspendovanih čestica (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), i njihovog sastava u pogledu određivanja koncentracija olova (Pb), benzena (C_6H_6), arsena (As), kadmijuma (Cd), nikla (Ni) i benzo(a)pirena (B(a)P). Osim pomenutih, mogu se meriti i koncentracije drugih zagađujućih materija koje su propisane relevantnim međunarodnim propisima.

Zahtevi u pogledu kvaliteta vazduha predstavljeni su kao: granične vrednosti nivoa zagađujućih materija u vazduhu, donje i gornje granice ocenjivanja kvaliteta vazduha, kritični nivoi, granice tolerancije i tolerantne vrednosti, ciljne vrednosti i (nacionalni) dugoročni ciljevi zagađujućih materija u vazduhu, koncentracije opasne po zdravlje ljudi, i koncentracije o kojima se izveštava

javnost. Sve navedene vrednosti, uključujući zagađujuće materije i referentne merne metode kojima se određuju njihove koncentracije u vazduhu sadržane su u **Uredbi o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha**.

Prema nivou zagađenosti, polazeći od propisanih graničnih i tolerantnih vrednosti, a na osnovu rezultata merenja, prema Zakonu utvrđuju se sledeće kategorije kvaliteta vazduha: 1) prva kategorija - čist ili neznatno zagađen vazduh gde nisu prekoračene granične vrednosti nivoa ni za jednu zagađujuću materiju; 2) druga kategorija - umereno zagađen vazduh gde su prekoračene granične vrednosti nivoa za jednu ili više zagađujućih materija, ali nisu prekoračene tolerantne vrednosti ni jedne zagađujuće materije; 3) treća kategorija - prekomerno zagađen vazduh gde su prekoračene tolerantne vrednosti za jednu ili više zagađujućih materija.

Kategorizacija kvaliteta vazduha može se vršiti na različite načine, a jedan od njih je i izračunavanje indeksa kvaliteta vazduha. Formula za izračunavanje ovog indeksa sadrži aktuelne vrednosti koncentracije zagađujuće materije i njene granične, maksimalne i minimalne vrednosti. Računa se za svaku supstancu koja se meri, a prikazuje se najviša izračunata vrednost u tom trenutku ili za određeni period (npr. prethodna 24h). Način izračunavanja i vrednosti koje karakterišu određenu kategoriju vazduha se razlikuju od države do države, jer su i standardi kvaliteta vazduha u pojedinim državama različiti, ali suština ovakvog prikaza zagađenja je da se pošalje javnosti jedna informacija o kvalitetu vazduha i koliko je rizik za stanovništvo u tim uslovima. Pored vrednosti AQI, na popularnim sajtovima (<https://www.airvisual.com/>, <https://waqi.info/>) se nalaze i informacije i preporuke za ponašanje i vreme boravka na otvorenom.

U zonama i aglomeracijama u kojima je vazduh treće kategorije, tj. postoji stalno zagađenje vazduha na određenom prostoru koje prevazilazi efekte mera koje se preduzimaju, i kada je ugrožen kapacitet životne sredine, nadležni organi donose Plan kvaliteta vazduha sa ciljem da se postignu odgovarajuće granične vrednosti ili ciljne vrednosti koncentracija. Ovakva dokumenta sadrže analizu stanja, procenu izvora zagađenja i njihovih karakteristika, ugroženost stanovništva, kao i kratkoročne i dugoročne akcione planove kojima bi se poboljšao kvalitet vazduha.

Mreže za monitoring kvaliteta vazduha

Državna mreža uspostavlja se u skladu sa **Programom kontrole kvaliteta vazduha** kojim se određuje broj i raspored mernih stanica (merna mesta) u određenim zonama i aglomeracijama, kao i obim, vrsta i učestalost merenja.

Državna mreža mernih stanica u Republici Srbiji obuhvata različite tipove stanica koje su strateški postavljene kako bi omogućile sveobuhvatno praćenje kvaliteta vazduha. Ova mreža uključuje **stanice za merenje regionalnog i prekograničnog atmosferskog prenosa zagađujućih materija** u vazduhu i aerosedimentu, u skladu sa međunarodnim obavezama koje Srbija preuzima. U urbanim i industrijskim područjima, stanice su postavljene radi **procene kvaliteta vazduha u naseljenim i nenaseljenim zonama**. Takođe, posebne stanice su posvećene **merenju kvaliteta vazduha u zaštićenim prirodnim dobrima i zaštićenoj okolini nepokretnih kulturnih dobara**, što doprinosi očuvanju biodiverziteta i kulturnog nasleđa. Merenje kvaliteta vazduha u **područjima pod uticajem specifičnih izvora zagađivanja**, uključujući pokretne izvore kao što su saobraćaj, takođe je obuhvaćeno mrežom. Osim toga, mreža uključuje i **stanice specijalizovane za praćenje alergenog polena**, čime se omogućava bolja kontrola uticaja na javno zdravlje.

Lokalnu mrežu čine **dopunske merne stanice** (merna mesta) koje nadležni organ jedinice lokalne samouprave, u skladu sa svojim potrebama i mogućnostima, određuje na osnovu merenja ili postupaka procene za zone i aglomeracije za koje nema podataka o nivou zagađujućih materija. Monitoring kvaliteta vazduha u lokalnoj mreži obavlja se prema programu koji za svoju teritoriju donosi nadležni organ, i on mora biti usklađen sa programom monitoringa u državnoj mreži. Postoje i namenska merenja koncentracija zagađujućih materija, u slučajevima kada postoji osnovana sumnja da je došlo do zagađenja vazduha koje može narušiti zdravlje ljudi i/ili životnu sredinu.

Merenje emisije zagađujućih materija

I državna, a i lokalne mreže monitoringa koriste se za merenje **imisije**, koja podrazumeva postavljanje stacionarnih mernih mesta na određenim lokacijama i određivanje koncentracija zagađujućih materija u ambijentalnom vazduhu sa određenom vremenskom dinamikom. Određivanje koncentracija zagađujućih materija direktna iz izvora zagađenja, predstavlja merenje **emisije**, za koju takođe postoje zakonom utvrđene metode merenja i propisane granične vrednosti. Stacionarni izvori iz kojih se meri emisija zagađenja su postrojenja za sagorevanje, postrojenja za skladištenje naftnih derivata, postrojenja u kojima

se koriste organski rastvarači i dr. Pokretnim izvorima emisije smatraju se motori sa unutrašnjim sagorevanjem koji se koriste u prevoznim sredstvima, i emisije zagađujućih materija iz ovih izvora se kontrolišu prilikom tehničkog pregleda, u skladu sa odgovarajućim tehničkim propisom i zakonom kojim se uređuje bezbednost saobraćaja. **Inventari emisije**, pored direktnih merenja predstavljaju izvor informacija o količini emitovanog zagađenja u atmosferu. U opštem slučaju emisija se izračunava, i to na osnovu faktora emisije i stope aktivnosti posmatranog zagađivača. Ovako dobijene vrednosti emisije imaju nesigurnost (grešku) do 30%, jer se koeficijent dobijaju statistički iz baza podataka vezanih za proizvodnju, ekonomiju i energetiku, najčešće.

Vlada Republike Srbije propisuje:

- granične vrednosti emisije zagađujućih materija u vazduh;
- način i postupak merenja emisije zagađujućih materija;
- kriterijume za uspostavljanje mernih mesta za merenje emisije;
- postupak vrednovanja rezultata merenja emisije i usklađenost sa propisanim normativima;
- sadržaj izveštaja o izvršenim merenjima emisije i bilansu emisije;
- način dostavljanja podataka o emisijama za potrebe informacionog sistema i rokove dostavljanja podataka.

Granične vrednosti emisije zagađujućih materija definisane su u Uredbama i zavise od niza karakteristika izvora zagađenja. Primer je Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh iz postrojenja za sagorevanje⁷⁴, koja sadrži detalje vezane za kapacitet kotlova, starost, vrstu goriva koje se koristi i sl.

Kvalitet vazduha u Republici Srbiji

Prema poslednjem dostupnom izveštaju Agencije za zaštitu životne sredine, stanje kvaliteta vazduha u Republici Srbiji u 2022. godini pokazuje jasne regionalne razlike u stepenu zagađenja, pri čemu su urbane i industrijske zone u znatno lošijem položaju u poređenju sa ruralnim područjima. Teritorija Republike je podeljena na zone i aglomeracije, u zavisnosti od broja i gustine stanovništva na nekom području.

74 Republika Srbija, Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh iz postrojenja za sagorevanje („Službeni glasnik RS”, broj 6/2016)

Aglomeracije u Srbiji su prostorne celine definisane kao urbane ili industrijske oblasti sa većom gustinom stanovništva i značajnim prisustvom industrijskih aktivnosti ili saobraćaja, koje imaju uticaj na kvalitet životne sredine, posebno vazduha. U kontekstu zaštite kvaliteta vazduha, aglomeracije su posebne oblasti u kojima se sprovodi sistematsko merenje i praćenje zagađenja kako bi se procenio nivo zagađujućih materija i preduzele odgovarajuće mere. Prema važećim propisima i Uredbi o određivanju zona i aglomeracija u Republici Srbiji⁷⁵, identifikovano je osam aglomeracija:

- Beograd – obuhvata teritoriju grada Beograda;
- Novi Sad – obuhvata teritoriju grada Novog Sada;
- Niš – obuhvata teritoriju grada Niša;
- Bor – obuhvata teritoriju opštine Bor, koja je poznata po značajnom zagađenju usled industrijskih emisija;
- Užice – obuhvata teritoriju grada Užica;
- Kosjerić – obuhvata teritoriju opštine Kosjerić;
- Smederevo – obuhvata teritoriju grada Smedereva, koji ima visok nivo industrijskih emisija;
- Pančevo – obuhvata teritoriju grada Pančeva, poznatog po zagađenju iz petrohemijske industrije.

Ove aglomeracije su prepoznate kao oblasti sa značajnim problemima u vezi sa kvalitetom vazduha, gde su koncentracije zagađujućih materija često iznad dozvoljenih granica, što zahteva redovno praćenje i preduzimanje mera za smanjenje zagađenja, od kojih je jedna i izrada strateških dokumenata kao što su **Planovi kvaliteta vazduha**. Ovi planovi sadrže kratkoročne i dugoročne mere, akcione programe i očekivane ishode, koji treba da doprinesu poboljšanju aktuelnog stanja. Izrađuju se na period od pet ili deset godina, pri čemu se u međuvremenu preko merljivih pokazatelja prati uspešnost propisanih mera.

U zoni "Srbija" i "Vojvodina" vazduh je uglavnom prve kategorije, što znači da je čist ili blago zagađen, dok su aglomeracije poput Beograda, Novog Sada, Niša, Bora, Užica i Smedereva, prema dostupnim podacima, označene kao područja treće kategorije zbog prekomernih koncentracija suspendovanih čestica PM_{10} i $PM_{2,5}$, azot-dioksida (NO_2), sumpor-dioksida (SO_2), arsena i olova.

⁷⁵ Republika Srbija, Uredba o određivanju zona i aglomeracija u Republici Srbiji („Službeni glasnik RS“, br. 58/11 i 98/12)

Kada je kvalitet vazduha u pitanju, najveći problem predstavljaju suspendovane čestice PM_{10} i $PM_{2,5}$, koje su tokom 2022. godine bile najdominantniji zagađujuće materije. Granične vrednosti za PM_{10} su premašene u mnogim gradovima, uključujući Valjevo, Zaječar, Novi Pazar, Užice i Loznicu, gde su zabeležene godišnje koncentracije koje su značajno iznad propisanih vrednosti. Primera radi najviše dnevne vrednosti PM_{10} su zabeležene u Beogradu (merno mesto Ovča, $516 \mu g m^{-3}$) i Zaječaru ($326 \mu g m^{-3}$), što daleko premašuje graničnu vrednost ($50 \mu g m^{-3}$). Za frakciju $PM_{2,5}$, kod koje se prati preporuka WHO o maksimalnoj dozvoljenoj koncentraciji tokom kalendarske godine, vrednosti su premašene u Novom Pazaru, Užicu, Valjevu i Beogradu, što je povezano sa lošim sistemom grejanja na čvrsta goriva i emisijama iz saobraćaja i industrije.

Osim suspendovanih čestica, problem predstavljaju i visoke koncentracije azot-dioksida, čije maksimalne vrednosti su zabeležene u Beogradu, na mernim mestima u blizini prometnih saobraćajnica. Ove koncentracije su često iznad dnevnih i godišnjih graničnih vrednosti, što ukazuje na visok nivo saobraćajnog zagađenja u glavnom gradu. Industrijske emisije, posebno u Boru, imaju veliki uticaj na zagađenje sumpor-dioksidom (SO_2), a koncentracije olova su takođe premašene na nekoliko mernih mesta.

Ovi podaci ukazuju na potrebu za hitnim merama zaštite životne sredine, posebno u urbanim i industrijskim zonama. Uvođenje efikasnijih sistema grejanja, unapređenje industrijskih standarda i smanjenje emisija iz saobraćaja su ključni koraci ka poboljšanju kvaliteta vazduha i smanjenju negativnih uticaja na zdravlje stanovništva u Srbiji.

7.3.6. Monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini

Prema **Zakonu o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti**⁷⁶, sistematsko ispitivanje radioaktivnosti u životnoj sredini vrši se radi utvrđivanja prisustva radionuklida i procene nivoa izlaganja stanovništva jonizujućim zračenjima i to: u redovnim uslovima, u slučaju sumnje na akcident i u toku akcidenta. Pravilnikom o utvrđivanju **Programa sistematskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini**⁷⁷ utvrđena su mesta, vremenski intervali, vrste i način sistematskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini, koji daju osnovne podatke za procenu radijacionog opterećenja stanovništva i osnovne podatke o prosečnom nivou radioaktivnosti. Kontinuirano praćenje ovih podataka može da ukaže na eventualne promene i neželjena dešavanja u životnoj sredini.

76 Republika Srbija, Zakonu o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti („Službeni glasnik RS“, broj 95/18 i 10/19)

77 Republika Srbija, Program sistematskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini („Službeni glasnik RS“, broj 100/10)

Sakupljanje i analizu uzoraka obavljaju pravna lica, koja obavljaju poslove zaštite od zračenja, a ovlašćena su od strane **Direktorata za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije**⁷⁸. Na osnovu rezultata monitoringa radioaktivnosti Direktorat prati ugroženost životne sredine od jonizujućeg zračenja i izlaganje stanovništva jonizujućem zračenju, nalaže preduzimanje hitnih mera u slučaju povećanja radioaktivnosti i vrši procenu doza koje stanovništvo primi od jonizujućeg zračenja iz životne sredine. Merenjem zračenja, između ostalog, može se:

- utvrditi nivo spoljašnjeg zračenja;
- vršiti ispitivanje sadržaja radionuklida na lokacijama na kojima je dejstvovalo osiromašenim uranijumom;
- odrediti sadržaj radionuklida u vazduhu, čvrstim i tečnim padavinama, površinskim vodama, vodi za piće, životnim namirnicama;
- odrediti sadržaj radona u zatvorenom prostoru, itd.

U cilju blagovremenog delovanja u slučaju nuklearne ili radiološke vanredne situacije, radi izbegavanja i umanjenja štetnih posledica dejstva zračenja po zdravlje i živote ljudi i životnu sredinu, u Srbiji je uspostavljen automatski sistem pravovremene najave akcidenta. Jačina ambijentalnog ekvivalenta doze gama zračenja u vazduhu se meri svakodnevno u toku 24 časa na devet lokacija na teritoriji Republike Srbije (Palić, Niš, Zlatibor, Vranje, Novi Sad, Kosovska Mitrovica, Beograd, Vinča i Kladovo⁷⁹). Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije objavljuje godišnji izveštaj o nivou izlaganja stanovništva jonizujućim zračenjima iz životne sredine u Republici Srbiji.

U skladu sa sporazumom sa Evropskom unijom, podaci iz sistema pravovremene najave akcidenta se od 2011. godine šalju u evropsku mrežu za razmenu podataka EURDEP (*European Radiological Data Exchange Platform*). Sporazumom se Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost obavezuje da podatke o jačini ambijentalnog ekvivalenta doze šalje EURDEP mreži u redovnim uslovima i u vanrednim situacijama. Takođe, Direktoratu je sporazumom omogućen pristup podacima o monitoringu radioaktivnosti svih drugih država članica EURDEP tako da Direktorat, u svakom trenutku, ima podatke o vrednostima jačine ambijentalnog ekvivalenta doze izmerenim u državama Evropske unije.

78 <http://www.srbatom.gov.rs/srbatommm/monitoring-radioaktivnosti/>

79 <http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/zracenje/index.htm>

Osim sistematskog monitoringa prate se i koncentracije radionuklida u različitim medijumima od značaja za zdravlje ljudi. Granične vrednosti i metode merenja propisane su **Pravilnikom o sadržaju radionuklida i granicama u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet**⁸⁰.

7.3.7. Monitoring nejonizujućeg zračenja

Izvor nejonizujućeg zračenja je svaki uređaj, instalacija ili objekat koji emituje ili može da emituje nejonizujuće zračenje. **Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja**⁸¹ radi otkrivanja prisustva, utvrđivanja opasnosti, obaveštavanja i preduzimanja mera zaštite od nejonizujućih zračenja propisuje neophodnost sistematskog ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja u životnoj sredini. Vlada Republike Srbije donosi **Program sistematskog ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja u životnoj sredini** za period od dve godine. Program sadrži propisane načine ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja u niskofrekventnom i visokofrekventnom području, i to: mesta merenja, period i lokacije merenja, metode merenja i proračuna i izveštavanje.

Prema poslednjem dostupnom Programu, propisano je merenje nivoa nejonizujućih zračenja u životnoj sredini u niskofrekventnom području, i to u zonama povećane osetljivosti u blizini transformatorskih stanica i nadzemnih elektroenergetskih vodova za prenos ili distribuciju električne energije. U visokofrekventnom području preporučena su merenja u blizini radio baznih stanica mobilne telefonije i telekomunikacionih predajnika radiorelejnih sistema. U oba slučaja, sa dinamikom jednom godišnje, u Programu je i spisak naseljenih mesta u kojima se vrši monitoring nejonizujućeg zračenja, kao i metode merenja i proračuna. Pravno lice koje vrši poslove sistematskog ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja u životnoj sredini dužno je da ministarstvu dostavi godišnji izveštaj o rezultatima ispitivanja, najkasnije do 31. marta tekuće godine za prethodnu godinu, a u slučaju vanrednog događaja odmah, u skladu sa Zakonom.

Radi usklađivanja standarda kvaliteta životne sredine, **Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima**⁸² propisuje granice izlaganja nejonizujućim zračenjima, odnosno bazična ograničenja i referentni granični nivoi izlaganja

80 Republika Srbija, Pravilnik o sadržaju radionuklida i granicama u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet („Službeni glasnik RS“, broj 36/2018)

81 Republika Srbija, Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja („Službeni glasnik RS“, broj 36/2009)

82 Republika Srbija, Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima („Sl. glasnik RS“, br. 104/2009)

stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima različitih frekvencija. Za određene opsege frekvencije nejonizujućeg zračenja granične vrednosti se odnose na jačinu električnog polja E (V/m), jačinu magnetnog polja H (A/m), gustinu magnetnog fluksa B (μ T) i gustina snage ekvivalentnog ravnog talasa S_{ekv} (W/m^2).

Nivoi jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja u Republici Srbiji

Prema aktuelnom Izveštaju o izlaganju stanovništva jonizujućem zračenju u 2023. godini, nivoi su bili u skladu sa međunarodnim standardima, bez značajnih odstupanja koja bi mogla ugroziti zdravlje stanovništva. Merenja ambijentalnog ekvivalentnog nivoa doze gama zračenja sprovedena su na više lokacija širom zemlje, pri čemu su vrednosti zračenja bile u granicama dozvoljenih nivoa. Najviše zabeležene vrednosti gama zračenja bile su u Lazarevcu, dok su najniže vrednosti izmerene u Užicu, ukazujući na regionalne varijacije koje su u granicama prirodnih oscilacija.

Pored toga, analize radioaktivnosti u atmosferi, vodi, sedimentima i hrani pokazale su prisustvo radionuklida prirodnog porekla, poput kosmogenog ^7Be i ^{210}Pb , dok su nivoi veštačkih radionuklida poput ^{137}Cs i ^{90}Sr bili zanemarljivi. Rezultati merenja u vodi za piće i sedimentima ukazuju na odsustvo opasnih koncentracija veštačkih radionuklida, što dodatno potvrđuje stabilnost ekoloških sistema u Srbiji kada se radi o jonizujućem zračenju odnosno radioaktivnosti u životnoj sredini. Istraživanja o prisustvu radona u zatvorenim prostorijama pokazala su da su koncentracije uglavnom ispod interventnih nivoa, sa sporadičnim preporukama za preduzimanje mera smanjenja. Sveobuhvatno, trenutno stanje jonizujućeg zračenja u Srbiji karakteriše stabilnost i niska izloženost stanovništva, uz kontinuirano praćenje stanja i sprovođenje adekvatnih preventivnih mera.

Nivoi nejonizujućeg zračenja u Republici Srbiji, prema aktuelnim izveštajima su u skladu sa međunarodnim standardima, pri čemu monitoring obuhvata različite izvore zračenja, poput telekomunikacionih tornjeva i visokonaponskih mreža. U većini slučajeva, koncentracije nejonizujućeg zračenja su ispod propisanih graničnih vrednosti. Ipak, na pojedinim mestima, posebno u blizini dalekovoda i trafostanica, vrednosti su bile blizu gornjih dozvoljenih pragova, pa otuda postoji potreba za kontinuiranim monitoringom kao jednom od mera zaštite radi smanjenja potencijalnih zdravstvenih rizika usled dugotrajne izloženosti.

7.3.8. Monitoring buke

Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini⁸³ uređuje: mere i uslove zaštite od buke u životnoj sredini; merenje buke u životnoj sredini; pristup informacijama o buci; nadzor i druga pitanja od značaja za zaštitu životne sredine i zdravlje ljudi. Osim Zakona, postoji i **Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini**⁸⁴, kojom se detaljnije definišu načini monitoringa buke u otvorenom i zatvorenom prostoru.

Mere i uslovi zaštite od buke u životnoj sredini u nadležnosti Republike Srbije i lokalnih samouprava podrazumevaju:

- preventivne mere (prostorno, urbanističko i akustičko planiranje, zvučna zaštita i utvrđivanje ispunjenosti uslova zaštite od buke);
- indikatore buke i granične vrednosti;
- tretman pojedinačnih izvora buke (proizvodnja, promet i upotreba izvora buke, zoniranje, održavanje javnih skupova i aktivnosti);
- izradu strateških mapa
- akcionih planova.

Monitoring buke je u nadležnosti Republike Srbije i lokalnih samouprava, i vrši se sistematskim merenjem, ocenjivanjem i proračunom određenog indikatora buke. Takođe, pravno lice ili preduzetnik koji je vlasnik, odnosno korisnik izvora buke, dužan je da na propisan način obezbedi merenje buke i izradu izveštaja o merenju buke. Sistematsko praćenje indikatora buke podrazumeva izradu se strateške karte buke, kao sastavnog dela jedinstvenog informacionog sistema životne sredine.

83 Republika Srbija, Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini („Službeni glasnik RS“, broj 36/2009 i 88/2010)

84 Republika Srbija, Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini („Službeni glasnik RS“, broj 75/2010)

Indikatori buke u životnoj sredini i granične vrednosti

Postoje **osnovni** i **dodatni** indikatori buke, i oni se u opštem slučaju izračunavaju na osnovu poznatih zakonitosti, korišćenjem podataka o jačini zvuka u različitim uslovima, i koeficijenta specifičnih za merno mesto, doba dana i dr. Ocenjivanje osnovnih indikatora na osnovu proračuna sadržano je u evropskoj Direktivi 2002/49/EZ⁸⁵, koja preporučuje metode i standarde za industrijsku buku, buku vazdušnog saobraćaja, drumskog, železničkog i dr. Dodatni indikatori sadrže korekcije zbog karakteristika buke i nivoa izloženosti.

Pomenuta uredba sadrži granične vrednosti indikatora koje se definišu u zavisnosti od tipa prostora i vremenskih intervala. Granične vrednosti buke razlikuju se za otvorene i zatvorene prostore, pri čemu su propisi strožiji za stambene i osetljive objekte, kao što su škole, bolnice i vrtići. Na otvorenom prostoru, kao što su javni parkovi, rekreativne površine ili naselja, granične vrednosti se određuju s ciljem očuvanja kvaliteta života i zaštite od dugotrajne izloženosti štetnim nivoima buke. U zatvorenom prostoru, poput stanova, kancelarija ili obrazovnih ustanova, granice su još preciznije definisane, kako bi se obezbedila adekvatna zaštita zdravlja i komfora korisnika prostora.

Pored toga, granične vrednosti buke često se razlikuju u zavisnosti od vremenskih perioda, pa su noćne norme strože kako bi se omogućilo nesmetano spavanje i odmor, dok su dnevne vrednosti više tolerisane zbog veće aktivnosti. Ovi standardi su ključni za regulisanje nivoa buke u urbanim sredinama i za planiranje odgovarajućih zaštitnih mera, poput postavljanja zvučnih barijera, zvučno izolovanih prozora i uvođenja zona sa smanjenim saobraćajem u gradovima.

Strateške karte buke u Republici Srbiji predstavljaju ključni alat za procenu i upravljanje bukom u urbanim sredinama i područjima sa velikim saobraćajem. Ove karte se izrađuju kako bi se identifikovali izvori buke, analizirali nivoi izloženosti stanovništva i omogućilo planiranje odgovarajućih mera za smanjenje štetnih efekata buke. Na osnovu Uredbe o indikatorima buke i graničnim vrednostima, strateške karte buke obuhvataju ključne saobraćajnice, industrijske zone i železničke koridore, gde su najviše koncentracije buke. Karte omogućavaju lokalnim i državnim vlastima da prate trendove buke, planiraju mere zaštite, kao što su postavljanje zvučnih barijera i zoniranje, i usklađuju svoje aktivnosti sa evropskim standardima u cilju poboljšanja kvaliteta života građana i smanjenja negativnih zdravstvenih posledica izazvanih bukom.

85 European Parliament and Council. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities, L189, 18 July 2002, pp. 12-25.

Nivoi buke u Republici Srbiji

Stanje sa bukom u Republici Srbiji pokazuje da se u mnogim urbanim i industrijskim sredinama beleže povećani nivoi buke, posebno u područjima sa gustim saobraćajem, blizinom industrijskih postrojenja i na mestima s intenzivnim aktivnostima. Najveći doprinos povećanom nivou buke dolazi iz saobraćaja, uključujući drumsku, železničku i vazдушnu komunikaciju, kao i iz industrijskih zona.

Prema merenjima publikovanim u poslednjim aktuelnim izveštajima lokalnih samouprava, u većim gradovima poput Beograda, Novog Sada i Niša, zabeležena su prekoračenja dozvoljenih granica buke, naročito u noćnim periodima, što ima negativan uticaj na kvalitet života građana. Uprkos postojanju zakonskih propisa i strateških karata buke, kontrola i smanjenje nivoa buke predstavljaju izazov, naročito u gusto naseljenim područjima. Mere zaštite, poput postavljanja zvučnih barijera i smanjenja saobraćajne gužve, i dalje su neophodne kako bi se nivo buke održavao u prihvatljivim granicama i obezbedila adekvatna zaštita zdravlja stanovništva.

7.3.9. Monitoring otpada

Upravljanje otpadom podrazumeva sprovođenje propisanih mera za postupanje sa otpadom u procesima sakupljanja, transporta, skladištenja, tretmana, i odlaganja otpada, uključujući i nadzor nad tim aktivnostima i brigu o postrojenjima za upravljanje otpadom posle zatvaranja. Visoki troškovi ovih delatnosti, neracionalna organizacija, nizak kvalitet usluga i nedovoljna briga za okolinu, rezultat su jako lošeg stanja u organizaciji upravljanja otpadom. U Republici Srbiji je praktično jedini način upravljanja otpadom odlaganje na lokalne deponije, koje, uz malo izuzetaka, ne zadovoljavaju ni osnovne higijenske i tehničko-tehnološke uslove, i većina ovih odlagališta je praktično popunjena.

Vlada Republike Srbije 2003. godine usvojila je **Nacionalnu strategiju upravljanja otpadom – sa programom približavanja Evropskoj uniji**. Ona predstavlja bazni dokument kojim se obezbeđuju uslovi za racionalno i održivo upravljanje otpadom na nivou Republike. Strategija određuje pravce i aktivnosti u skladu sa ekonomskim razvojem i zahtevima i planovima Evropske unije, odgovornost, ciljeve i zadatke. Proces pridruživanja Evropskoj uniji i harmonizacija domaćeg i evropskog zakonodavstva u oblasti otpada obuhvatili su i osnovne principe koji se primenjuju u cilju poboljšanja sistema upravljanja otpadom na prostoru Republike Srbije, i to:

- smanjenje količina nastalog otpada;
- prevenciju nastajanja otpada;
- rešavanje problema otpada na mestu nastanka;
- princip separacije otpada;
- princip reciklaže što veće količine otpada;
- princip racionalnog korišćenja postojećih kapaciteta za prerađu otpada;
- princip racionalne izgradnje postrojenja za tretman;
- princip monitoringa zagađenja u cilju očuvanja kvaliteta životne sredine.

Primena osnovnih principa upravljanja otpadom prikazanih u ovom strateškom okviru, tj. rešavanja problema otpada na mestu nastajanja, princip prevencije, odvojeno sakupljanje otpadnih materijala, princip neutralizacije opasnog otpada, regionalnog rešavanja odlaganja otpada i sanacije smetlišta, omogućava ispunjavanje i osnovnih principa EU u oblasti otpada, i sprečava dalje opasnosti po životnu sredinu i generacije koje dolaze.

Najvažniji cilj **Zakona o upravljanju otpadom**⁸⁶ je upravo upravljanje otpadom na način kojim se ne ugrožava zdravlje ljudi i životna sredina. Zakon je definisao način upravljanja otpadom, načela na kojima se temelji upravljanje otpadom, klasifikaciju otpada i ostala planska dokumenta, strategiju, nacionalni, regionalni i lokalne planove upravljanja, subjekte koji upravljaju otpadom, odgovornosti, obaveze i dr.

Stanje sa otpadom u Republici Srbiji

Stanje sa otpadom u Republici Srbiji predstavlja jedan od ključnih ekoloških izazova, s obzirom na rastuću količinu generisanog otpada usled urbanizacije, industrijskog razvoja i promena u životnim navikama stanovništva. Najveći deo otpada i dalje završava na nesanitarnim deponijama, a postojeći kapaciteti za reciklažu i tretman otpada nisu dovoljni da odgovore na ove izazove. Problem dodatno komplikuju niske stope primarne selekcije i reciklaže, što dovodi do prekomernog korišćenja deponijskog prostora i povećanih emisija štetnih gasova poput metana i ugljen-dioksida, koji doprinose klimatskim promenama. Nedostatak adekvatne infrastrukture, kao što su reciklažni centri, postrojenja za kompostiranje i spalionice otpada, usporava napredak ka održivom sistemu upravljanja otpadom.

⁸⁶ Republika Srbija, Zakona o upravljanju otpadom („Službeni glasnik RS“, broj 36/2009, 88/2010, 14/2016 i 95/2018)

Razvijene zemlje Evrope i sveta često rešavaju problem otpada izvozom "prljavih" tehnologija u zemlje u razvoju i trgovinom otpadom na globalnom tržištu. Postrojenja za preradu otpada, koja se fokusiraju na reciklažu i odvajanje sirovina za ponovnu upotrebu, sve se više premeštaju u zemlje trećeg sveta, gde se najveći deo otpada iz uvoza obrađuje. U razvijenim sistemima ključne komponente održivog upravljanja otpadom i zaštite životne sredine uključuju tri nivoa kontrole: prvo, popis svih zagađivača kroz katastar, gde se obezbeđuju dozvole na osnovu procene potencijalnih štetnih efekata; drugo, monitoring, odnosno nadgledanje i kontrola zagađivanja kako bi se osiguralo da ono ostaje unutar zakonskih granica; i treće, delotvorna kaznena politika koja osigurava poštovanje propisa. Na primer, u Sjedinjenim Američkim Državama dnevne ekološke kazne mogu iznositi i do 25000 dolara, što predstavlja snažan podsticaj za poštovanje zakonskih normi.

U Republici Srbiji, naponi za unapređenje upravljanja otpadom uključuju usklađivanje sa evropskim standardima, ali je neophodno dodatno ojačati infrastrukturu i podići svest stanovništva o važnosti reciklaže. Razvoj održivih rešenja, jačanje cirkularne ekonomije i implementacija efikasnijih kaznenih politika ostaju prioriteta kako bi se smanjio negativan uticaj otpada na životnu sredinu i unapredilo zdravlje stanovništva.

Rezime



U savremenom društvu, svest o značaju životne sredine i održivog razvoja postaje sve važnija tema u globalnim diskusijama. Iako je naučno razumevanje ekoloških problema napredovalo tokom poslednjih decenija, i dalje postoji zabrinjavajući raskorak između teorijskog razumevanja i praktičnog delovanja. Savremeni čovek suočava se sa ozbiljnim izazovima poput klimatskih promena, gubitka biodiverziteta, zagađenja vode i vazduha, kao i iscrpljivanja prirodnih resursa. Ova pitanja više nisu samo predmet interesovanja ekoloških stručnjaka, već zahtevaju šire angažovanje celokupnog društva.

Svest o životnoj sredini podrazumeva razumevanje uticaja aktivnosti ljudi na životnu sredinu, pri čemu je ključno sagledati ekološke, socijalne i ekonomske aspekte globalnih problema. Svako pojedinačno delovanje može imati kumulativni efekat na zdravlje planete. Međutim, sama svest nije dovoljna; potrebno je razviti savest – dublju moralnu odgovornost i spremnost na delovanje u pravcu očuvanja životne sredine i osiguravanja resursa za buduće generacije.

Održivi razvoj, koji predstavlja balans između zadovoljavanja trenutnih potreba i očuvanja resursa, postao je ključni okvir za globalne politike i inicijative. Uvođenje ciljeva održivog razvoja od strane Ujedinjenih nacija 2015. godine obezbedilo je platformu za integrisanje ekoloških, ekonomskih i socijalnih prioriteta u svakodnevni život. Ipak, javna svest o ovim ciljevima značajno varira u zavisnosti od regiona, obrazovnog sistema i socioekonomskih faktora, što ukazuje na potrebu za širim obrazovanjem i distribucijom znanja o održivom razvoju.

Savest savremenog čoveka ogleda se u prepoznavanju njegove uloge u globalnim procesima očuvanja životne sredine. Ona podrazumeva spremnost na promene u svakodnevnom životu – od smanjenja potrošnje energije i odgovornog upravljanja otpadom, do izbora održivih načina ishrane i transporta. Pored individualne odgovornosti, neophodno je kritičko promišljanje o sistemskim barijerama koje otežavaju bržu tranziciju ka održivim modelima. Održivi razvoj zahteva promene na institucionalnom i političkom nivou, gde odgovorni donosioci odluka prepoznaju dugoročne posledice svojih akcija.

U ovom kontekstu, obrazovanje igra ključnu ulogu. Ono ne obuhvata samo prenošenje znanja o problemima u životnoj sredini, već i osposobljavanje mladih ljudi, učenika i studenata, da postanu odgovorni građani. Održivi razvoj se ne svodi samo na poštovanje određenih pravila, već predstavlja

filozofiju života koja promoviše balansiranje trenutnih potreba sa očuvanjem resursa za buduće generacije. Obrazovne institucije mogu pomoći u razumevanju globalnih izazova, kao što su klimatske promene i siromaštvo, i razvijati svest ljudi o njihovoj ulozi u očuvanju planete.

Integrisanjem ovih koncepata u obrazovni sistem, škole i univerziteti postaju ključni akteri u osposobljavanju mladih da postanu lideri zaštite životne sredine i održivog razvoja. Angažovanjem stručnjaka i korišćenjem novih tehnologija, obrazovni sistem može postati centralna platforma za stvaranje generacije

Literatura



1. Aničić M., Mijić, Z., Kuzmanoski, M., Stojić, A., Tomašević, M., Rajšić, S., Tasić, M., 2012. A study of airborne trace elements in Belgrade urban area: instrumental and active biomonitoring approach. In: Trace Elements: Environmental Sources, Geochemistry and Human Health, Editors: Diego Alejandro De Leon and Paloma Raquel Aragon, Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-62081-401-7, pp.1-30. <https://nova-publishers.com/shop/trace-elements-environmental-sources-geochemistry-and-human-health/>
2. Aničić Urošević, M., Jovanović, G., Stević, N., Deljanin, I., Nikolić, M., Tomašević, M. and Samson, R., 2019. Leaves of common urban tree species (*Aesculus hippocastanum*, *Acer platanoides*, *Betula pendula* and *Tilia cordata*) as a measure of particle and particle-bound pollution: a 4-year study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, pp.1081-1090.
3. Aničić Urošević, M., Krmar, M., Radnović, D., Jovanović, G., Jakšić, T., Vasić, P. and Popović, A., 2020. The use of moss as an indicator of rare earth element deposition over large area. *Ecological Indicators*, 109, p.105828.
4. Aničić Urošević, M., Vuković, G., Jovanović, P., Vujičić, M., Sabovljević, A., Sabovljević, M. and Tomašević, M., 2017. Urban background of air pollution: Evaluation through moss bag biomonitoring of trace elements in Botanical garden. *Urban Forestry & Urban Greening*, 25, pp.1-10.
5. Aničić Urošević, M., Vuković, G., Tomašević, M., 2017. Biomonitoring of Air Pollution Using Mosses and Lichens, A Passive and Active Approach, State of the Art Research and Perspectives. Nova Science Publishers, New York, NY, ISBN: 978-1-63485-375-0.
6. Aničić Urošević, M., Vuković, G., Vasić, P., Jakšić, T., Nikolić, D., Škrivanj, S. and Popović, A., 2018. Environmental implication indices from elemental characterisations of collocated topsoil and moss samples. *Ecological Indicators*, 90, pp.529-539.
7. Bacanin, N., Perišić, M., Jovanović, G., Damaševičius, R., Stanišić, S., Simić, V., Živković, M., & Stojić, A., 2024. The explainable potential of coupling hybridized metaheuristics, XGBoost, and SHAP in revealing toluene behavior in the atmosphere. *Science of The Total Environment*, 929, 172195.
8. Bezdan, T., 2024. Klasterovanje tekstualnih dokumenata poboljšanom hibridnom metodom metaheuristike i algoritmom nenadgledanog mašinskog učenja (Doktorska disertacija). Univerzitet Singidunum.
9. Carslaw, D. C., & Beevers, S. D., 2013. Characterising and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering. *Environmental Modelling & Software*, 40, 325-329.

10. Covert, I., 2020. Explaining machine learning models with SHAP and SAGE. <https://iancovert.com/blog/understanding-shap-sage/>. Pristupljeno u septembru 2024. godine.
11. Crnogorac, Č., & Spahić, M., 2012. Osnovi geoekologije. Art Print.
12. Đarmati, Š., Veselinović, D., Gržetić, I., & Marković, D., 2008. Životna sredina i njena zaštita, Životna sredina – knjiga I. Futura, Beograd. ISBN 978-86-86859-01-3.
13. Đarmati, Š., Veselinović, D., Gržetić, I., & Marković, D., 2008. Životna sredina i njena zaštita, Životna sredina – knjiga II. Futura, Beograd. ISBN 978-86-86859-07-5.
14. Deljanin, I., Antanasijević, D., Vuković, G., Aničić Urošević, M., Tomašević, M., Perić-Grujić, A. and Ristić, M., 2015. Lead spatio-temporal pattern identification in urban microenvironments using moss bags and the Kohonen self-organizing maps. *Atmospheric Environment*, 117, pp.180-186.
15. Dmitrović, S., Dragičević, M., Savić, J., Milutinović, M., Živković, S., Maksimović, V., Matekalo, D., Perišić, M. and Mišić, D., 2021. Antagonistic interaction between phosphinothricin and nepeta rtanjensis essential oil affected ammonium metabolism and antioxidant defense of arabidopsis grown in vitro. *Plants*, 10(1), p.142.
16. Dmitrović, S., Perišić, M., Stojić, A., Živković, S., Boljević, J., Živković, J. N., Mišić, D., 2015. Essential oils of two Nepeta species inhibit growth and induce oxidative stress in ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) shoots in vitro. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(3), 1-15.
17. Dučić, I., Herceg Romanić, S., Mustać, B., Mendaš, G., Đinović-Stojanović, J., Popović, A., Jovanović, G., 2024. Efficiency of clustering methods and self-organizing maps of Adriatic sardines and anchovies regarding organochlorine and fatty acid burden. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 31, 30509–30518 <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33235-8> (M21)
18. Energetski portal, Stojić, A.. 2024. Mogućnosti veštačke inteligencije u zaštiti životne sredine. Energetski portal. <https://energetskiportal.rs/mogucnosti-vestacke-inteligencije-u-zastiti-zivotne-sredine/>. Pristupljeno u septembru 2024. godine.
19. Goryainova, Z., Vuković, G., Urošević, M.A., Vergel, K., Ostrovnaya, T., Frontasyeva, M. and Zechmeister, H., 2016. Assessment of vertical element distribution in street canyons using the moss *Sphagnum girgensohnii*: A case study in Belgrade and Moscow cities. *Atmospheric Pollution Research*, 7(4), pp.690-697.
20. Gračanin, M., 1947. Pedologija, II. deo. Fiziografija tala. Zagreb.
21. Harvey, D., 2000. Modern Analytical Chemistry. DePauw University. ISBN 0-07-116953-9.
22. Herceg Romanić, S, Jovanović, G., Mustać, B., Stojanović-Đinović, J., Stojić, A., Čadež, T., Popović, A., 2021. Fatty acids, persistent organic pollutants, and trace elements in small pelagic fish from the eastern Mediterranean Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 170, p. 112654.

23. Herceg Romanić, S., Jaćimović, N., Mendaš, G., Fingler, S., Stipičević, S., Jakšić, G., Popović, A. and Jovanović, G., 2023. Bedload sediment transport model for revealing the multi-year trend of polychlorinated biphenyl contamination in the river sediment (Kupa, Croatia). *Environmental geochemistry and health*, 45(11), pp.8473-8487.
24. Herceg Romanić, S., Jovanović, G., Mustać, B., Stojanović-Đinović, J., Stojić, A., Čadež, T. and Popović, A., 2021. Fatty acids, persistent organic pollutants, and trace elements in small pelagic fish from the eastern Mediterranean Sea. *Marine pollution bulletin*, 170, p.112654.
25. Herceg Romanić, S., Mendaš, G., Fingler, S., Drevenkar, V., Mustać, B. and Jovanović, G., 2024. Polychlorinated biphenyls in mussels, small pelagic fish, tuna, turtles, and dolphins from the Croatian Adriatic Sea waters: an overview of the last two decades of monitoring. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 75(1), pp.15-22.
26. Herceg Romanić, S., Miličević, T., Jovanović, G., Sarić, M.M., Mendaš, G., Fingler, S., Jakšić, G., Popović, A. and Relić, D., 2023. Persistent organic pollutants in Croatian breast milk: An overview of pollutant levels and infant health risk assessment from 1976 to the present. *Food and chemical toxicology*, p.113990.
27. Herceg Romanić, S., Vuković, G., Klinčić, D. and Antanasijević, D., 2018. Self-organizing maps for indications of airborne polychlorinated biphenyl (PCBs) and organochlorine pesticide (OCPs) dependence on spatial and meteorological parameters. *Science of the total environment*, 628, pp.198-205.
28. Herceg Romanić, S., Vuković, G., Klinčić, D., Sarić, M.M., Župan, I., Antanasijević, D. and Popović, A., 2018. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Cyprinidae fish: Towards hints of their arrangements using advanced classification methods. *Environmental research*, 165, pp.349-357.
29. Jovanović, G., Aničić Urošević, M., Herceg Romanić, S., Mendaš, G., Janković, M., Popović, A. 2022. Moss Biomonitoring of Organic Pollutants: Up-to-Date Achievements, Needs and Potentials, In: *Advances in Environmental Research*, Editor: Justin A. Daniels, Nova Science Publisher, NY, USA, ISBN: 978-1-68507-931-4.
30. Jovanović, G., Herceg Romanić, S., Stojić, A., 2020, Advanced modeling of persistent organic pollutants (POPs) patterns in biomatrices. In: Leal Filho W., Azul A., Brandli L., Özuyar P., Wall T. (eds) *Sustainable Cities and Communities. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-53618-708-3, pp. 105-145. <https://novapublishers.com/shop/advances-in-environmental-research-volume-77/>
31. Jovanović, G., Herceg Romanić, S., Stojić, A., Klinčić, D., Matek Sarić, M., Grzunov Letinić, J., Popović, A., 2019. Introducing of modeling techniques in the research of POPs in breast milk – A pilot study, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172, 341-347.

32. Jovanović, G., Matek Sarić, M., Herceg Romanić, S., Stanišić, S., Mitrović Dankulov, M., Popović, A., Perišić, M. 2021. Patterns of PCB-138 Occurrence in the Breast Milk of Primiparae and Multiparae Using SHapley Additive exPlanations Analysis, In: Artificial Intelligence: Theory and Applications, Editor: Endre Pap, Studies in Computational Intelligence, Springer, Cham, ISBN: 978-3-030-72711-6, pp. 191-206. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72711-6_12
33. Jovanović, G., Perišić, M., Bačanin, N., Živković, M., Stanišić, S., Štrumberger, I., Alimpić, F., Stojić, A., 2023. Potential of Coupling Metaheuristics-Optimized-XGBoost and SHAP in Revealing PAHs Environmental Fate. *Toxics*. 11(4):394, 1–25.
34. Jovanović, G., Perišić, M., Stanišić, S., and Stojić, A., 2022. Explaining xylene wet deposition using artificial intelligence. In Horizons in World Physics, Volume 307. Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-68507-549-1, pp. 1-30. <https://nova-publishers.com/shop/horizons-in-world-physics-volume-307/>
35. Jovanović, L., Jovanović, G., Perišić, M., Alimpić, F., Stanišić, S., Bačanin, N., Živković, M., Stojić, A., 2023. The explainable potential of coupling metaheuristics-optimized-XGBoost and SHAP in revealing VOC's environmental fate, *Atmosphere*, 14(1), p.109, 1–27.
36. Klima 101, Stojić, A., 2024. Naši istraživači pomoću veštačke inteligencije postavljaju dijagnozu za probleme u životnoj sredini. Klima 101. <https://klima101.rs/projekat-atlas-vestacka-inteligencija-zivotna-sredina/>. Pristupljeno u septembru 2024. godine.
37. Lazić, L., Aničić Urošević, M., Mijić, Z., Vuković, G. and Ilić, L., 2016. Traffic contribution to air pollution in urban street canyons: Integrated application of the OSPM, moss biomonitoring and spectral analysis. *Atmospheric Environment*, 141, pp.347-360..
38. Manahan, S., 2017. Environmental Chemistry (10th Edition). CRC Press. ISBN 9781-315160474.
39. Manojlović, D., Mutić, J., & Šegan, D., 2010. Osnove elektroanalitičke hemije. Univerzitet u Beogradu. ISBN 978-86-7220-039-3.
40. Mendaš, G., Herceg Romanić, S., Jovanović, G., Aničić Urošević, M., Ilić, M., Milićević, T. and Popović, A., 2021. Organochlorines burden in moss *H. cupressiforme* and topsoil across Serbia. *Environmental geochemistry and health*, 43, pp.273-283.
41. Mendaš, G., Jakovljević, I., Herceg Romanić, S., Fingler, S., Jovanović, G., Sarić, M.M., Pehnek, G., Popović, A. and Stanković, D., 2024. Presence of polycyclic aromatic hydrocarbons and persistent organochlorine pollutants in human Milk: Evaluating their levels, association with Total antioxidant capacity, and risk assessment. *Science of the total environment*, 931, p.172911.
42. Mijić, Z., Rajšić, S., Žekić, A., Perišić, M., Stojić, A., & Tasić, M., 2010. Characteristics and application of receptor models to the atmospheric aerosols research. In Air Quality (pp. 143-167). Springer.

43. Mijić, Z., Stojić, A., Perišić, M., Rajšić, S., Tasić M., 2012. Statistical character and transport pathways of atmospheric aerosols in Belgrade. In: *Air Quality – New Perspective*, Edited by Gustavo Lopez Badilla, Benjamin Valdez and Michael Schorr, Published by InTech, ISBN: 978-953-51-0674-6, pp. 199-226.
- <https://www.intechopen.com/books/air-quality-new-perspective/statistical-character-and-transport-pathways-of-atmospheric-aerosols-in-belgrade>
44. Mijić, Z., Stojić, A., Perišić, M., Rajšić, S., Tasić, M., 2012. Receptor modeling studies for the characterization of PM₁₀ pollution sources in Belgrade. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 18(4-2), 623-634. doi: 10.2298/CICEQ120104108M
45. Mijić, Z., Stojić, A., Perišić, M., Rajšić, S., Tasić, M., Radenković, M., Joksić, J., 2010. Seasonal variability and source apportionment of metals in the atmospheric deposition in Belgrade. *Atmospheric Environment*, 44(30), 3630-3637.
46. Milićević, T., Aničić Urošević, M., Relić, D., Jovanović, G., Nikolić, D., Vergel, K. and Popović, A., 2021. Environmental pollution influence to soil–plant–air system in organic vineyard: bioavailability, environmental, and health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp.3361-3374.
47. Milićević, T., Aničić Urošević, M., Relić, D., Vuković, G., Škrivanj, S. and Popović, A., 2018. Bioavailability of potentially toxic elements in soil–grapevine (leaf, skin, pulp and seed) system and environmental and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 626, pp.528-545.
48. Milićević, T., Aničić Urošević, M., Vuković, G., Škrivanj, S., Relić, D., Frontasyeva, M.V. and Popović, A., 2017. Assessment of species-specific and temporal variations of major, trace and rare earth elements in vineyard ambient using moss bags. *Ecotoxicology and environmental safety*, 144, pp.208-215.
49. Milićević, T., Aničić Urošević, M., Vuković, G., Vasić, P., Jakšić, T., Nikolić, D., Popović, A. 2021. Procena rizika po životnu sredinu na osnovu koncentracija elemenata (sa posebnim osvrtom na koncentraciju uranijuma) u uzorcima mahovina i zemljišta sa teritorije pokrajine Kosovo i Metohija. U „Odložena istina o posledicama nato bombardovanja Srbije 1999. godine (dopunjena verzija pripremljene monografije: „Posledice NATO bombardovanja Srbije“ u saradnji Društva fizikohemičara Srbije i Akademijskog odbora SANU „Čovek i životna sredina“); Editori: Vukmirović Z., Jovović A., Antić S., Beograd, Srpska akademija nauka i umetnosti (SANU)
50. Milićević, T., Herceg Romanić, S., Popović, A., Mustać, B., Đinović-Stojanović, J., Jovanović, G. and Relić, D., 2022. Human health risks and benefits assessment based on OCPs, PCBs, toxic elements and fatty acids in the pelagic fish species from the Adriatic Sea. *Chemosphere*, 287, p.132068.
51. Milićević, T., Relić, D., Aničić Urošević, M., Vuković, G., Škrivanj, S., Samson, R. and Popović, A., 2018. Integrated approach to environmental pollution investigation–spatial and temporal patterns of potentially toxic elements and magnetic particles

- in vineyard through the entire grapevine season. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, pp.245-254.
52. Molnar, C., 2020. Interpretable machine learning. Lulu.com. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/what-is-machine-learning.html>. Pristupljeno u septembru 2024. godine.
53. Nikolić, M., & Zečević, A., 2019. Mašinsko učenje. <https://ml.matf.bg.ac.rs/readings/ml.pdf>. Pristupljeno u septembru 2024. godine.
54. Palin, R. M., Santosh, M., Cao, W., Li, S. S., Hernández-Urbe, D., and Parsons, A., 2020. Secular change and the onset of plate tectonics on Earth. *Earth-Science Reviews*, 207, 103172.
55. Perišić M., Maletić D., Stanišić Stojić S., Rajšić S., Stojić A., 2017. Forecasting hourly particulate matter concentrations based on the advanced multivariate methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(5), 1047-1054.
56. Perišić, M. D., 2016. Primena hibridnih receptorskih modela u analizi kvaliteta vazduha i transporta zagađujućih materija u Beogradu (Doktorska disertacija). Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet.
57. Perišić, M., Rajšić, S., Šoštarić, A., Mijić, Z., and Stojić, A., 2017. Levels of PM₁₀-bound species in Belgrade, Serbia: spatio-temporal distributions and related human health risk estimation. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 93-103.
58. Perišić, M., Stojić, A., Stanišić Stojić, S., Šoštarić, A., Mijić, Z., and Rajšić, S., 2015. Estimation of required PM₁₀ emission source reduction on the basis of a 10-year period data. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8, 379-389.
59. Pešević, D., 2022. Upravljanje otpadom (Master rad). Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet.
60. Plan kvaliteta vazduha u aglomeraciji Novi Sad, Naučna studija, Perišić, M., Jovanović, G., Stojić, A., 2021.
61. Plan kvaliteta vazduha u aglomeraciji Pančevo, Naučna studija, Perišić, M., Jovanović, G., Stojić, A., 2022.
62. Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, Naučna studija, Perišić, M., Jovanović, G., Stanišić, S., Stojić, A., 2020.
63. Rikalović, M., Jovanović, G., Jelić, I. 2023. Hemija životne sredine, Univerzitet Singidunum, ISBN: 978-86-7912-797-6
64. Šebek, R., 2017. Sezonske varijacije koncentracija PM₁₀ za Beograd računate disperzionim modelom (Master rad). Fizički fakultet, Institut za meteorologiju, Univerzitet u Beogradu.
65. Šimić, I., Jovanović, G., Herceg Romanić, S., Klinčić, D., Matek Sarić, M. and Popović, A.R., 2020. Optimization of Gas Chromatography-electron Ionization-tandem mass spectrometry for determining Toxic Non-ortho polychlorinated biphenyls in breast milk. *Biomedical and environmental sciences*, 33(1), pp.58-61.

66. Šoštarić, A., Stojić, A., Stojić, S. S., Gržetić, I., 2016. Quantification and mechanisms of BTEX distribution between aqueous and gaseous phase in a dynamic system. *Chemosphere*, 144, 721-727.
67. Šoštarić, A., Stojić, S. S., Vuković, G., Mijić, Z., Stojić, A., Gržetić, I., 2017. Rainwater capacities for BTEX scavenging from ambient air. *Atmospheric Environment*, 168, 46-54.
68. Stanišić Stojić, S., Ignjatović, L., Popov, S., Škrivanj, S., Đorđević, A., Stojić, A., 2016. Heavy metal accumulation in wheat and barley: The effects of soil presence and liquid manure amendment. *Plant Biosystems*, 150(1), 104-110.
69. Stanišić Stojić, S., Stanišić, N. and Stojić, A., 2016. Temperature-related mortality estimates after accounting for the cumulative effects of air pollution in an urban area. *Environmental Health*, 15, pp.1-10.
70. Stanišić Stojić, S., Stanišić, N., Stojić, A., 2016. Short- and long-term effects of urban air pollution on cardiopulmonary and malignant death rates. In: *Air Pollution: Management Strategies, Environmental Impact and Health Risks*, Editor: Gerald L. Burns, Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-63485-375-0. pp. 41-68. http://www.novapublishers.org/catalog/product_info.php?products_id=58708
71. Stanišić Stojić, S., Stanišić, N., Stojić, A., Džamić, V., 2016. Seasonal mortality variations of cardiovascular, respiratory and malignant diseases in the City of Belgrade. *Stanovništvo*, 54(1), 83-104.
72. Stanišić Stojić, S., Stanišić, N., Stojić, A., Šoštarić, A., 2016. Single and combined effects of air pollutants on circulatory and respiratory system-related mortality in Belgrade, Serbia. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 79(1), 17-27.
73. Stanišić, S., Jovanović, G., Perišić, M., Herceg Romanić, S., Milićević, T. and Stojić, A., 2022. Explaining the environmental fate of PAHs in indoor and outdoor environments by the use of artificial intelligence. In *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Exposure and Health Effects*. Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-68507-685-6, pp. 1-36. <https://novapublishers.com/shop/polycyclic-aromatic-hydrocarbons-sources-exposure-and-health-effects/>
74. Stanišić, S., Perišić, M., Jovanović, G., Maletić, D., Vudragović, D., Vranić, A., Stojić, A., 2021. What information on volatile organic compounds can be obtained from the data of a single measurement site through the use of artificial intelligence? In *Artificial Intelligence: Theory and Applications*, pp. 207-225. Springer, Cham. ISBN: 978-3-030-72711-6. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72711-6_12
75. Stanišić, S., Perišić, M., Jovanović, G., Milićević, T., Romanić, S.H., Jovanović, A., Šoštarić, A., Udovičić, V., Stojić, A., 2021. The PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbon behavior in indoor and outdoor environments, part I: Emission sources. *Environmental Research*, 193, p.110520.

76. Stanišić, S., Stojić, A., 2020, Urban Air Pollution and Environmental Health. In: Leal Filho W., Azul A., Brandli L., Özuyar P., Wall T. (eds) Sustainable Cities and Communities. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer, Cham, ISBN: 978-3-319-71061-7. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-71061-7_120-1
77. Stanišić, S., Stojić, A., Prodanović, M., 2018. Environmental concerns in Serbia – with specific regard to air-pollution and its effects on human health, Editor: Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-63485-375-0, pp. 215-229. <https://novapublishers.com/shop/serbia-current-issues-and-challenges-in-the-areas-of-natural-resources-agriculture-and-environment/>
78. Stanišić, S., Stojić, A., Prodanović, M., 2018. Health aspects of urban life. In: A Closer Look at Urban Areas, Editor: Sahar Romero, Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-63485-375-0, pp. 49-64. http://www.novapublishers.org/catalog/product_info.php?products_id=65599
79. Stojić, A. M., 2015. Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi. (Doktorska disertacija). Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet.
80. Stojić, A., & Stojić, S. S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, 216-223.
81. Stojić, A., Jovanović, G., Stanišić, S., Romanić, S.H., Šoštarić, A., Udovičić, V., Perišić, M. and Milićević, T., 2022. The PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbon behavior in indoor and outdoor environments, part II: Explainable prediction of benzo [a] pyrene levels. *Chemosphere*, 289, p.133154.
82. Stojić, A., Maletić, D., Stojić, S. S., Mijić, Z., Šoštarić, A., 2015. Forecasting of VOC emissions from traffic and industry using classification and regression multivariate methods. *Science of the Total Environment*, 521, 19-26.
83. Stojić, A., Mustać, B., Jovanović, G., Đinović Stojanović, J., Stanišić, S., Herceg Romanić, S., 2021. Patterns of PCB-138 bioaccumulation in small pelagic fish from the Eastern Mediterranean Sea using explainable machine learning prediction. In Artificial Intelligence: Theory and Applications, pp. 175-189. Springer, Cham. ISBN: 978-3-030-72711-6. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72711-6_10
84. Stojić, A., Stanić, N., Vuković, G., Stanišić, S., Perišić, M., Šoštarić, A., Lazić, L., 2019. Explainable extreme gradient boosting tree-based prediction of toluene, ethylbenzene and xylene wet deposition. *Science of The Total Environment*, 653, 140–147.
85. Stojić, A., Stanišić Stojić, S., Mijić, Z., Ilić, L., Tomašević, M., Todorović, M., Perišić, M., 2015. Comprehensive analysis of VOC emission sources in Belgrade urban area. In: Urban and Built Environments: Sustainable Development, Health Implications and Challenges, Editor: Alexis Cohen, Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-62417-735-4, pp. 55-88. <https://novapublishers.com/shop/urban-and-built-environments-sustainable-development-health-implications-and-challenges/>

86. Stojić, A., Stanišić Stojić, S., Reljin, I., Čabarkapa, M., Šoštarić, A., Perišić, M., Mijić, Z., 2016. Comprehensive analysis of PM₁₀ in Belgrade urban area on the basis of long-term measurements. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 10722-10732.
87. Stojić, A., Stanišić Stojić, S., Šoštarić, A., Ilić, L., Mijić Z., Rajšić S., 2015. Characterization of VOC sources in an urban area based on PTR-MS measurements and receptor modelling. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(17), 13137-13152.
88. Stojić, A., Stojić, S. S., Mijić, Z., Šoštarić, A., & Rajšić, S., 2015. Spatio-temporal distribution of VOC emissions in urban area based on receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 106, 71-79.
89. Stojić, A., Stojić, S. S., Reljin, I., Čabarkapa, M., Šoštarić, A., Perišić, M., & Mijić, Z., 2016. Comprehensive analysis of PM₁₀ in Belgrade urban area on the basis of long-term measurements. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 10722-10732.
90. Stojić, A., Vuković, G., Perišić, M., Stanišić, S., Šoštarić, A., 2018. Urban air pollution: an insight into its complex aspects. In: A Closer Look at Urban Areas, Editor: Sahar Romero, Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-63485-375-0, pp. 69-123. http://www.novapublishers.org/catalog/product_info.php?products_id=65599
91. Stull, R. B., 2012. An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
92. Todorović, M., Perišić, M., Kuzmanoski, M., Stojić, A., Šoštarić, A., Mijić, Z., Rajšić, S., 2015. Assessment of PM10 pollution level and required source emission reduction in Belgrade area. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 50(13), 1351-1359.
93. Tomašević, M., Mijić, Z., Aničić, M., Stojić, A., Perišić, M., Kuzmanoski, M., Todorović, M., Rajšić, S., 2013. Air quality study in Belgrade: particulate matter and volatile organic compounds as threats to human health. In: Air Pollution: Sources, Prevention and Health Effects, Editor: Rajat Sethi, Nova Science Publishers, NY, USA, ISBN: 978-1-62417-735-4, pp. 315-346. <https://novapublishers.com/shop/environmental-and-agricultural-research-summaries-volume-1/>
94. Turgut, E.T., Gaga, E.O., Jovanović, G., Odabasi, M., Artun, G., Ari, A. and Aničić Urošević, M., 2019. Elemental characterization of general aviation aircraft emissions using moss bags. *Environmental science and pollution research*, 26, pp.26925-26938.
95. Vuković (Jovanović) G. P., 2015. Biomonitoring of urban air pollution (particulate matter, trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons) using mosses *Sphognum girgensohnii* Russow and *Hypnum cupressiforme* Hedw. (Doktorska disertacija). Univerzitet u Beogradu, Hemijski fakultet.
96. Vuković G., Aničić Urošević M., 2017. Is moss bag biomonitoring suitable method for assessment of intricate urban air pollution?, In: Aničić Urošević, M., Vuković G., Tomašević, M. (Eds.), Biomonitoring of Air Pollution Using Mosses and Lichens, A Pa-

- ssive and Active Approach, State of the Art Research and Perspectives. Nova Science Publishers, New York, NY, ISBN: 978-1-63485-375-0, pp. 27-74. <https://novapublishers.com/shop/biomonitoring-of-air-pollution-using-mosses-and-lichens-a-passive-and-active-approach-%E2%80%92-state-of-the-art-research-and-perspectives/>
97. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Goryainova, Z., Pergal, M., Škrivanj, S., Samson, R. and Popović, A., 2015. Active moss biomonitoring for extensive screening of urban air pollution: Magnetic and chemical analyses. *Science of the total environment*, 521, pp.200-210.
 98. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Pergal, M., Janković, M., Goryainova, Z., Tomašević, M. and Popović, A., 2015. Residential heating contribution to level of air pollutants (PAHs, major, trace, and rare earth elements): a moss bag case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, pp.18956-18966.
 99. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Razumenić, I., Goryainova, Z., Frontasyeva, M., Tomašević, M. and Popović, A., 2013. Active moss biomonitoring of small-scale spatial distribution of airborne major and trace elements in the Belgrade urban area. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, pp.5461-5470.
 100. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Razumenić, I., Kuzmanoski, M., Pergal, M., Škrivanj, S. and Popović, A., 2014. Air quality in urban parking garages (PM₁₀, major and trace elements, PAHs): Instrumental measurements vs. active moss biomonitoring. *Atmospheric environment*, 85, pp.31-40.
 101. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Škrivanj, S., Milićević, T., Dimitrijević, D., Tomašević, M. and Popović, A., 2016. Moss bag biomonitoring of airborne toxic element decrease on a small scale: a street study in Belgrade, Serbia. *Science of the Total Environment*, 542, pp.394-403.
 102. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Škrivanj, S., Vergel, K., Tomašević, M. and Popović, A., 2017. The first survey of airborne trace elements at airport using moss bag technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.15107-15115.
 103. Vuković, G., Aničić Urošević, M., Tomašević, M., Samson, R. and Popović, A., 2015. Biomagnetic monitoring of urban air pollution using moss bags (*Sphagnum girgensohnii*). *Ecological Indicators*, 52, pp.40-47.
 104. Vuković, G., Herceg Romanić, S., Babić, Ž., Mustać, B., Štrbac, M., Deljanin, I. and Antanasijević, D., 2018. Persistent organic pollutants (POPs) in edible fish species from different fishing zones of Croatian Adriatic. *Marine pollution bulletin*, 137, pp.71-80.
 105. Živković, S., Skorić, M., Ristić, M., Filipović, B., Milutinović, M., Perišić, M. and Puač, N., 2021. Rehydration process in rustyback fern (*Asplenium ceterach* L.): profiling of volatile organic compounds. *Biology*, 10(7), p.574.

Izvor slike

Preuzete slike i njihovi izvori (slike koje nisu navedene, kreirane su od strane autora za potrebe pisanja knjige)

Slika na strani 9: "Mi nismo zemlju nasledili od svojih predaka, mi smo je pozajmili od svojih potomaka!" (Seattle – indijanski poglavica plemena Duwamish, 1854. godine)

Izvor slike: Petmal/iStock

Slika na strani 15: Životna sredina je skup prirodnih i stvorenih vrednosti čiji kompleksni međusobni odnosi čine okruženje, odnosno prostor i uslove života

Izvor slike: Shutterstock

Slika na strani 35: Mobilnost elemenata zavisi od fizičko-hemijskih osobina elemenata i zemljišta (pH vrednost, Eh vrednost, sastav zemljišta).

Izvor slike: Shutterstock

Slika na strani 40: U ovom trenutku zemljište obezbeđuje 90% hrane za čovečanstvo i predstavlja jedan od najznačajnijih uslova opstanka živog sveta na Zemlji.

Izvor slike: Shutterstock / amenic181 Os ciclos da vida

Slika na strani 41. Hidrološki ciklus

Izvor slike: <https://icograms.com/usage-scientific-illustration.php> (adaptirano)

Slika na strani 43. Današnji svet se ne može zamisliti bez vode - potrošnja je dostigla 200 litara dnevno po stanovniku.

Izvor slike: CC0, pixabay.com

Slika na strani 75. Biosfera je živi omotač planete, gde milijarde organizama zajedno stvaraju dinamičnu mrežu života koja održava Zemlju u ravnoteži.

Izvor slike: Romolo Tavani – Fotolia

Slika na strani 93. „Značajni problemi sa kojima se suočavamo ne mogu se rešavati na istom nivou razmišljanja na kojem smo bili kada smo ih napravili.“ Albert Ajnštajn

Izvor slike: <https://slideplayer.com/slide/6048882/>

Slika na strani 124. Zagađenje litosfere ne ostaje ograničeno na samo jednu oblast – ono se širi kroz podzemne vode, ulazi u reke i okeane, a čak i vazduhom udišemo čestice koje potiču sa zagađenog tla.

Izvor slike: Michael Clevenger/The Courier-Journal

Slika na strani 125. Krčenje šuma je tihi razarač naše planete, koji ne samo da uništava staništa miliona vrsta, već ubrzava klimatske promene, lišava nas prirodnih filtera vazduha i vode, i ozbiljno ugrožava ekosisteme od kojih zavisi život na Zemlji.

Izvor slike: EPA-EFE/Mauricio Duenas Castaneda

Slika na strani 127. Prekomerna upotreba pesticida, herbicida i veštačkih đubriva osiromašuje plodnost tla, zagađuje podzemne vode, uništava biodiverzitet i narušava prirodnu ravnotežu.

Izvor slike: Pixabay

Slika na strani 129. Naftne mrlje stvaraju toksične slojeve na površini vode, ometajući razmenu gasova i ugrožavajući živote morskih organizama, dok u priobalnim ekosistemima narušavaju staništa i dugoročno ugrožavaju biodiverzitet.

Izvor slike: Carlos Barria, Reuters

Slika na strani 131. Zagađujuće materije u vazduhu nisu uvek vidljive i dolaze iz mnogo različitih izvora, prodiru u svaki aspekt našeg života, od vazduha koji udišemo do hrane koju jedemo, ostavljajući trajne posledice na ljudsko zdravlje i životnu sredinu.

Izvor slike: Kevin Frayer, Getty Images

Slika na strani 133. Ljudske aktivnosti ozbiljno narušavaju prirodnu ravnotežu u biosferi, dok organizmi pokušavaju da se prilagode ovim brzim promenama koje često prevazilaze njihove evolutivne kapacitete.

Izvor slike: DreamStime

Slika na strani 156. „Čini mi se da pokušaj prirode da na ovoj planeti stvori misaono biće nije uspeo“ Maks Born

Izvor slike: 24.media.tumblr.com

Slika na strani 235. Uticaj zagađenja vazduha na formiranje kancera

Izvor slike: <https://www.who.int/thailand/health-topics/air-pollution>

Slika na strani 237. Faze razvoja naučne paradigme

Izvor slike: <https://www.linkedin.com/pulse/data-science-paradigm-shuaib-suleman/>

Slika na strani 239. Odnos istine i delova istine

Izvor slike: <https://www.bigstockphoto.com/image-63384445/stock-photo-half-truth-and-half-truth-does-not-equal-truth>

Slika 2.1 Neporemećene horizontalne strukture sedimentnih stena

Izvor slike: Fundamentals of physical geology, Springer India

Slika 2.2. Faze nastanka zemljišta

Izvor slike: <https://collembolles.fr/images/Biotope/formation-sols-a.jpg>

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSv9-PoVzMnLi54uEFYeK9HGco-bo8OwGPb8p4dX0tocOaZjTxU>

Slika 2.3. Osnovni horizonti (levo) i primer vertikalnog profila zemljišta (desno)

Izvor slike: <https://www.dreamstime.com/vector-soil-layers-isometric-diagram-underground-soil-layers-diagram-soil-layers-isometric-diagram-underground-soil-layers-diagram-image115260664>

Slika 2.4. Zemljište kao multifazni sistem

Izvor slike: <https://www.istockphoto.com/vector/composition-of-the-soil-components-of-the-earth-agroindustrial-industry-infographics-gm833270104-135552753>

Slika 2.5. Triangularni dijagram za određivanje teksture zemljišta u zavisnosti od procentnog udela pojedinih frakcija sitne zemlje

Izvor slike: <https://www.zelenavizija.com/Zemljiste.html>

Slika 2.6. Prikaz Si tetraedarske strukture (levo) i primeri silikatnih minerala u zemljištu (desno)

Izvori slike: <https://www.iqsdirectory.com/articles/rubber-molding/silicone-molding.html> ;
https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-39312-4_51

Slika 2.7. Primeri organskih jedinjenja u zemljištu

Izvor slike: <https://slideplayer.com/slide/4372369/>

Slika 2.8. Ekološki oblik elemenata u zemljištu

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/7377398_The_Speciation_of_Metals_in_Mammals_Influences_Their_Toxicokinetics_and_Toxicodynamics_and_Therefore_Human_Health_Risk_Assessment_1/figures?lo=1

Slika 2.11. Prikaz moguće raspodele organskih zagađujućih supstanci u zemljištu; POPs – dugotrajna organska jedinjenja (Persistent Organic Pollutants)

Izvor slike: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.089>

Slika 2.13. Prikaz molekula vode: a) kovalenta veza; b) dipolni momenat; c) vodonična veza; i d) struktura leda i vode u tečnom stanju

Izvori slike: <https://www.youtube.com/watch?v=5Mczq5ee0q4> ;
<https://www.usgs.gov/media/images/strong-polar-bond-between-water-molecules-creates-water-cohesion-0>

Slika 2.14. Raspodela vrsta u sistemu $\text{CO}_2(\text{aq}) - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ u vodi u zavisnosti od pH vrednosti

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/303849202_Relationships_between_geological_formations_and_groundwater_chemistry_and_their_effects_on_the_concrete_lining_of_tunnels_case_study_Tabriz_metro_line_2/figures?lo=1

Slika 2.16. Stratifikacija atmosfere

Izvor slike: http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7b.html#google_vignette (adaptirano)

Slika 2.16. Komponente vetra: srednji vetar (gore), talas (sredina) i turbulencija (dole)

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 2.17. Evolucija planetarnog graničnog sloja u toku dana iznad kopna u polju visokog pritiska

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 2.18. Disperzija zagađujućih materija (levo) i profili potencijalne temperature i koncentracije (desno)

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 2.19. Disperzija zagađujućih materija u rezidualnom sloju (isprekidane linije – ekvipotencijalne površi virtuelne potencijalne temperature)

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 2.20. Ciklus hidroksil radikala ($\text{HO}\cdot$) u atmosferi

Izvor slike: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/cs/c2cs35140d>

Slika 2.21. Razgradnja ozonskog omotača pod uticajem CFC

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/228279972_Impact_of_Global_Warming_on_Rural-Urban_Migration_and_Net_Emigration_in_Forefront_Sub-Saharan_Countries

Slika 2.22. Ilustrativni prikaz nastanka kiselih kiša rastvaranjem SO_2 i NO_2 u atmosferskoj vodi

Izvor slike: <https://depositphotos.com/vector/acid-rain-chemical-cause-effects-damage-nature-outline-diagram-labeled-659077736.html>

Slika 2.23. Ilustrativni prikaz nastanka fotohemijskog smoga

Izvor slike: <https://www.geeksforgeeks.org/photochemical-smog/> (adaptirano)

Slika 2.24. Potencijalne reakcije oksidacije VOC u atmosferi (levo) i formiranje sekundarnog organskog aerosola (desno)

Izvor slike: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.003>

Slika 2.26. Elektromagnetni spektar i karakteristike talasa

Izvor slike: <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT0ymfiQtJ4w8RPJDGuyPAEGJI8kQYD9gHINvm0GKMoNhYiev1d>

Slika 2.26. Kruženje azota

Izvor slike: <https://biologynotesonline.com/wp-content/uploads/2023/07/The-Nitrogen-Cycle.webp?ezimgfmt=ngcb1/notWebP> (adaptirano)

Slika 2.27. Kruženje ugljenika

Izvor slike: <https://quizlet.com/gb/379303633/the-carbon-cycle-gcse-diagram/>

Slika 3.3. Raspodela čestica prema veličini i mehanizmu nastanka

Izvor slike: <https://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/id/29451/Disertacija602.pdf>

Slika 3.4. Periodni sistem elemenata i njihove glavne karakteristike

Izvor slike: <https://sciencenotes.org/category/chemistry/periodic-table-chemistry/page/17/>

Slika 3.6. 16 US EPA(United States Environmental Protection Agency) PAH klasifikovanih prema molekulskoj masi i IARC (International Agency for Research on Cancer) grupama (1, 2A i 2B)

Izvor slike: <https://i0.wp.com/chemistry-matters.com/wp-content/uploads/2020/09/pah-figure2.jpg?w=956&ssl=1>

Slika 3.6. Predstavnicu isparljivih organskih jedinjenja

Izvor slike: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137489>

Slika 3.8. Primeri otpada

Izvor slike: <https://www.bigstockphoto.com/image-355079333/stock-photo-domestic-waste-for-compost-from-fruits-and-vegetables-in-garbage-bin>

Slika 4.1. Pristup složenim fenomenima/pojavama u životnoj sredini

Izvori slike: <https://www.dealingwithdata.blog/post/big-data>
<https://www.quantyc.ai/>

Slika 5.1. Prikaz tačnosti i preciznosti i uticaj parametara na prisustvo slučajnih i sistematskih grešaka

Izvor slike: https://www.researchgate.net/post/What_are_the_2D_and_3D_position_accuracy_measures_of_GNSS_receivers

Slika 5.3. Primer kontrolne sa naznačenim granicama upozorenja i akcije

Izvor slike: [Izvor slike: https://www.youtube.com/watch?v=q0gX3oKEHKM](https://www.youtube.com/watch?v=q0gX3oKEHKM)

Slika 5.4. Apsorpcija i emisija fotona između energetske nivoa

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/319092605_calculation_of_non-gray_radiation_transmissivity_absorptivity_and_absorption_coefficient_of_water_vapour_from_hitemp-2010_database_at_high_temperature

Slika 5.5. Osnovni delovi spektroskopskih instrumenata

Izvor slike: <https://blog.stuidapp.com/raman-effect/>

Slika 5.6. Monohromator sa difrakcionom rešetkom

Izvor slike: https://www.df.uns.ac.rs/wp-content/uploads/publikacije/kristina_vuckovic_-_diplomski_rad_%28d-%29.pdf

Slika 5.9. Atomizacija uzorka u atomskoj apsorpcionoj spektroskopiji plamenom (levo) i elektrotermalno (u sredini), i procesi nastajanja gasovitih atoma (desno)

Izvor slike: Harvey, D. (2000). Modern Analytical Chemistry. DePauw University, ISBN 0-07-116953-9.

Slika 5.10. Plazma kao izvor za atomizaciju i eksitaciju u emisionoj spektroskopiji

Izvor slike: Sandra Škrivanj, 2011. Uticaj matriksa na određivanje makro i mikroelemenata u zemljišnim ekstraktima ICP-OES metodom. Hemijski fakultet Univerziteta u Beogradu

Slika 5.12. Osnovni delovi dvoznačnog spektrometra

Izvor slike: <http://www.chemhume.co.uk/ASCHEM/Unit%202/Ch10%20Alkenes/Alkenes.htm>

Slika 5.13. Primeri IC spektara

Izvori slike: <https://www.slideshare.net/slideshow/infrared-spectrum-infrared-frequency-and-hydrocarbons/238333492> ;

<https://orgchemboulder.com/Spectroscopy/irtutor/aromaticsir.shtml>

Slika 5.14. Osnovni principi XRF analize i delovi uređaja

Izvori slike: <https://yns.nebraska.edu/stem-tools-for-classrooms/mobile-labs/xrf> ;
<https://ywcmatsci.yale.edu/xrf> ;
<https://www.slideshare.net/slideshow/construction-of-xray-tube/244044511>

Slika 5.15. Primeri principa izvođenja ekstrakcionih tehnika

Izvori slike: https://www.researchgate.net/publication/333431629_Recent_advances_in_sorbents_applications_and_techniques_used_for_solid-phase_extraction_of_atrazine_and_its_metabolites_deisopropylatrazine_and_deethylatrazine_a_review/figures?lo=1 ;
<https://www.slideshare.net/slideshow/lect-9-solvent-extraction/242825084>

Slika 5.16. Razdvajanje komponentni smeše u hromatografskoj koloni

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/383212483_Antimicrobial_Potential_Activity_of_Onion_Allium_Cepa_Waste_Extracts_Prepared_in_Different_Solvent_Systems

Slika 5.18. Podela hromatografije prema interakciji sa stacionarnom fazom

Izvor slike: <https://www.slideshare.net/slideshow/chapter3-66681563/66681563>

Slika 5.19. Podela hromatografije prema tipu nosača

Izvori slike: <https://www.youtube.com/watch?v=-LEpm6RmXz4> ;
<https://byjus.com/question-answer/explain-the-process-of-chromatography/>

Slika 5.20. Šematski prikaz uređaja za tečnu i gasnu hromatografiju

Izvori slike: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19157-2.00001-7> ;
<https://doi.org/10.18231/J.IJPCA.2019.006>

Slika 5.21. Osnovni koraci u analizi primenom masene spektrometrije

Izvor slike: <https://slideplayer.com/slide/14267584/>

Slika 5.22. Principi rada izvora jonizacije

Izvori slike: <https://massspec.chem.ox.ac.uk/files/maldiuserinformationpdf> ;
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:992242> ;
<https://www.slideshare.net/slideshow/mass-spectrometry-229605687/229605687>

Slika 5.23. Joni u masenom spektru

Izvor slike: <https://www.slideshare.net/slideshow/mass-spectrometry-79640584/79640584>

Slika 5.24. Primeri referentnih elektroda

Izvor slike: <https://slideplayer.cz/slide/2409999/> ;
https://chem.libretexts.org/Courses/Northeastern_University/11%3A_Electrochemical_Methods/11.2%3A_Potentiometric_Methods

Slika 6.1. Primer struktuiranih podataka iz oblasti životne sredine

Izvor slike: prezentacija sa predavanja iz predmeta Zagađenje i zaštita vazduha

Slika 6.2. Primer kvaliteta prognoze koncentracija PM10 bazirane na meteorološkim parametrima u različitim konfiguracijama životne sredine

Izvor slike: Perišić, M., Stojić, A., Stanišić Stojić, S., Šoštarić, A., Mijić, Z. and Rajšić, S., 2016. Estimation of required PM 10 emission source reduction on the basis of a 10-year period data. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8, pp.379-389.

Slika 6.3. Primer evaluacije rezultata popunjavanja nedostajućih vrednosti

Izvor slike: prezentacija sa predavanja iz predmeta Zagađenje i zaštita vazduha

Slika 6.6. Poređenje performansi nelinearnih metoda. Kao što se može videti, algoritmi TriMAP i posebno PaCMAP u značajnoj meri odražavaju i globalnu i lokalnu strukturu originalnih podataka

Izvor slike: <https://towardsdatascience.com/why-you-should-not-rely-on-t-sne-umap-or-trimap-f8f5dc333e59>

Slika 6.7. Raspodela koncentracija polihlorovanog bifenila PCB-180 u majčinom mleku za majke koje su rodile jedno, dvoje ili troje dece

Izvor slike: Jovanović, G., Romanić, S.H., Stojić, A., Klinčić, D., Sarić, M.M., Letinić, J.G. and Popović, A., 2019. Introducing of modeling techniques in the research of POPs in breast milk—A pilot study. *Ecotoxicology and environmental safety*, 172, pp.341-347.

Slika 6.9. Primena funkcija gustine raspodela u identifikaciji porekla čestičnog zagađenja vazduha u Beogradu

Izvor slike: Perišić, M., Stojić, A., Stanišić Stojić, S., Šoštarić, A., Mijić, Z. and Rajšić, S., 2016. Estimation of required PM 10 emission source reduction on the basis of a 10-year period data. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8, pp.379-389.

Slika 6.13. Deskriptivna statistika satnih koncentracija zagađujućih materija po mernim mestima u Beogradu za period od 2017. do 2019. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.16. Korelacije parametara kvaliteta vazduha i meteoroloških parametara – primer mernog mesta Gradski zavod za javno zdravlje Beograd za period od 2017. do 2019. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.18. Dinamika dnevnih, nedeljnih i mesečnih koncentracija zagađujućih materija u Novom Sadu u periodu od 2018. do 2020. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha u aglomeraciji Novi Sad, 2021. godina

Slika 6.19. Lomb-Scargle periodogram satnih koncentracija osnovnih zagađujućih materija godine u Beogradu u periodu od 2011. do 2014. godine

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 6.20. Strukturne karakteristike vremenske serije koncentracija PM10 na mernim mestima Gradskog zavoda za javno zdravlje Beograd i Obrenovac za period od 2017. do 2019. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.22. Trend masenih koncentracija PM₁₀ sa procenom stope promene za period od 2003. do 2014. godine primenom metode Theil-Sen

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 6.24. Opsezi učešća dominantnih izvora zagađenja vazduha u Beogradu u periodu od 2017. do 2019. godine na mernim mestima na kojima su evidentirani

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.26. Profili izvora zagađenja vazduha u Beogradu dobijeni primenom metoda Unmix i PMF

Izvor slike: Stojić, A., Stojić, S.S., Mijić, Z., Šoštarić, A. and Rajšić, S., 2016. Spatio-temporal distribution of VOC emissions in urban area based on receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 106, pp.71-79.

Slika 6.27. Odnos između masenih koncentracija PM₁₀ i karakteristika vetra: polarni klaster plot (učestalost (%) i prosečan doprinos ($\mu\text{g m}^{-3}$)) (a), sezonske varijacije ($\mu\text{g m}^{-3}$) (b) i funkcija uslovne verovatnoće u četiri opsega kvantila (c) PMF

Izvor slike: Stojić, A., Stojić, S.S., Reljin, I., Čabarkapa, M., Šoštarić, A., Perišić, M. and Mijić, Z., 2016. Comprehensive analysis of PM₁₀ in Belgrade urban area on the basis of long-term measurements. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, pp.10722-10732.

Slika 6.28. Zavisnost korelacije između SO₂ i PM₁₀ u odnosu na pravac i brzinu vetra u Pančevu za period od 2016. do 2020. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha u aglomeraciji Pančevo, 2022. godina

Slika 6.29. Primer zavisnosti koncentracija PM₁₀ od pravca vetra i godišnjih, dnevnih, nedeljnih i sezonskih varijacija

Izvor slike: https://bookdown.org/david_carslaw/openair/sections/directional-analysis/polar-annulus.html

Slika 6.30. Trajektorije cirkulacije vazduha tokom leta (a) i jeseni (b), kao i odgovarajuće visine trajektorija (c, d)

Izvor slike: Šoštarić, A., Stojić, S.S., Vuković, G., Mijić, Z., Stojić, A. and Gržetić, I., 2017. Rainwater capacities for BTEX scavenging from ambient air. *Atmospheric Environment*, 168, pp.46-54.

Slika 6.31. Srednja vrednost udela u izmerenim masenim koncentracijama PM₁₀ i učestanost pristizanja vazdušnih masa pridružene odgovarajućim klasterima trajektorija

Izvor slike: Stojić, Andreja M. (2015). Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija (Doktorska disertacija) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu. Beograd.

Slika 6.34. Promena koncentracije zagađujuće materije sa visinom

Izvor slike: Stojić, A. and Stojić, S.S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, pp.216-223.

Slika 6.35. Reprezentativne (plavo) i nereprezentativne (crveno) krajnje tačke trajektorija cirkulacije vazduha

Izvor slike: Stojić, A. and Stojić, S.S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, pp.216-223.

Slika 6.36. Primer identifikacije potencijalnih izvora emisije

Izvor slike: Mijić, Z., Rajšić, S., Žekić, A., Perišić, M., Stojić, A. and Tasić, M., 2010. Characteristics and application of receptor models to the atmospheric aerosols research. *Air quality*, pp.143-167.

Slika 6.37. Koncept trodimenzionalne PSCF i CWT analize (a) i CWBL analize (b) i grafička interpretacija 3D CWTK (c) i CWBL (d)

Izvor slike: Stojić, A. and Stojić, S.S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, pp.216-223.

Slika 6.38. 3D PSCF mapa potencijalnih izvora $PM_{2,5}$ u Evropi (gore), oblast najveće verovatnoće potencijalnih izvora $PM_{2,5}$ (dole)

Izvor slike: Stojić, A. and Stojić, S.S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, pp.216-223.

Slika 6.39. Raspodela regionalnih izvora emisije PM_{10} na teritoriji Beograda i susednih opština u periodu od 2017. do 2019. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.40. Mapa izvedena iz 2D CWT za $PM_{2,5}$ [$\mu g\ m^{-3}$] (b) i emisije isparljivih organskih jedinjenja iz industrije (e), kao i 3D CWT raspodela zagađujućih materija tokom transporta unutar graničnog sloja mešanja (a, c, d, e)

Izvor slike: Stojić, A. and Stojić, S.S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, pp.216-223.

Slika 6.41. Mapa raspodele emisije isparljivih organskih jedinjenja poreklom iz industrije

Izvor slike: Stojić, A. and Stojić, S.S., 2017. The innovative concept of three-dimensional hybrid receptor modeling. *Atmospheric Environment*, 164, pp.216-223.

Slika 6.42. Potencijalni izvori PM_{10} identifikovani korišćenjem PSCF (verovatnoća), CWT, TRCW i sQTBA modela ($\mu g\ m^{-3}$)

Izvor slike: Perišić, M., Rajšić, S., Šoštarić, A., Mijić, Z. and Stojić, A., 2017. Levels of PM_{10} -bound species in Belgrade, Serbia: spatio-temporal distributions and related human health risk estimation. *Air Qual Atmos Health* 10: 93–103.

Slika 6.43. Karakteristični oblici disperzije u različitim uslovima stabilnosti atmosfere

Izvor slike: https://www.researchgate.net/figure/Vertical-dispersion-under-various-conditions-for-low-and-high-elevations-of-the-source_fig2_263970547

Slika 6.44. Horizontalna i vertikalna raspodela disperzije PM_{10} u sloju od 0 do 100 m za 8. avgust (levo) i 8. februar (desno) 2012. godine

Izvor slike: Ružica Šebek, 2017. Sezonske varijacije koncentracija PM_{10} za Beograd računate disperzionim modelom, master rad. Fizički fakultet, Institut za meteorologiju, Univerzitet u Beogradu.

Slika 6.45. Horizontalni presek disperzije PM_{10} po sezonama

Izvor slike: Ružica Šebek, 2017. Sezonske varijacije koncentracija PM_{10} za Beograd računate disperzionim modelom, master rad. Fizički fakultet, Institut za meteorologiju, Univerzitet u Beogradu.

Slika 6.47. Kumulativna kriva izloženost-odgovor nakon uračunavanja efekata zagađenja vazduha i raspodele temperature

Izvor slike: Stanišić Stojić, S., Stanišić, N. and Stojić, A., 2016. Temperature-related mortality estimates after accounting for the cumulative effects of air pollution in an urban area. *Environmental Health*, 15, pp.1-10.

Slika 6.49. Primer procene nivoa organohlornog jedinjenja p,p'-DDT u majčinom mleku za jedno (ljubičasta), dva (zelena) i tri (žuta) rođena deteta

Izvor slike: Jovanović, G., Romanić, S.H., Stojić, A., Klinčić, D., Sarić, M.M., Letinić, J.G. and Popović, A., 2019. Introducing of modeling techniques in the research of POPs in breast milk—A pilot study. *Ecotoxicology and environmental safety*, 172, pp.341-347.

Slika 6.50. Primer ansambala stabala odlučivanja

Izvor slike: prezentacija sa predavanja iz predmeta Zagađenje i zaštita vazduha

Slika 6.51. Evaluacija regresionih modela za čestično zagađenje za merna mesta u Beogradu

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.52. Unapređenje performansi XGBoost modela toluena u atmosferi primenom metaheuristika

Izvor slike: Bacanin, N., Perisic, M., Jovanovic, G., Damaševičius, R., Stanisic, S., Simic, V., Zivkovic, M. and Stojic, A., 2024. The explainable potential of coupling hybridized metaheuristics, XGBoost, and SHAP in revealing toluene behavior in the atmosphere. *Science of The Total Environment*, 929, p.172196.

Slika 6.53 Parcijalna zavisnost koncentracija PM_{10} od brzine vetra u Beogradu dobijena za model Gradient boosting

Izvor slike: prezentacija sa predavanja iz predmeta Zagađenje i zaštita vazduha

Slika 6.54. Primer značajnosti varijabli za predikciju PM_{10} u Beogradu

Izvor slike: prezentacija sa predavanja iz predmeta Zagađenje i zaštita vazduha

Slika 6.55. Primer primene ICE plot

Izvor slike: <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/ice.html>

Slika 6.56. Primer kooperativne igre

Izvor slike: prezentacija sa predavanja iz predmeta Zagađenje i zaštita vazduha

Slika 6.57. Raspodela uticaja parametara životne sredine na koncentracije PM_{10} na mernom mestu Gradski zavod za javno zdravlje Beograd za period od 2017. do 2019. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 6.58. Uticaj intenziteta fluksa momenta količine kretanja i NO_x (gore), kao i temperature i SO₂ (dole) na PM₁₀ i na mernom mestu Gradski zavod za javno zdravlje Beograd za period od 2017. do 2019. godine

Izvor slike: Plan kvaliteta vazduha za aglomeraciju Beograd, 2020. godina

Slika 7.1. Dva nivoa mehaničkog filtriranja vazduha (pre-filter i HEPA filter)

<https://rs.trotec.com/proizvodi-i-usluge/masine-homecomfort/luftreinigung/airgo-clean-10-e/>

Slika 7.2. Principa rada elektrostatičkog filtera

Izvor slike: Milica D. Radić i Dejan M. Petković - Elektrostatički filteri, Fakultet zaštite na radu Niš, 2013

Slika 7.3. Elektrostatički filteri na termoelektrani Kostolac

Izvor slike: <https://www.sindikar-tekostolac.rs/kratki-istorijat-te-kostolac/>

Slika 7.4. Princip adsorpcije na porama aktivnog ugljenika

Izvor slike: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85204-3.00021-X> (adaptirano)

Slika 7.6. Primer industrijskog skrubera (levo) i šematski prikaz načina rada (desno) Izvor slike: <https://www.indiamart.com/proddetail/packaged-tower-gas-scrubbers-23346906262.html>

Slika 7.6. Primer industrijskog postrojenja za biološki tretman zagađenog vazduha

Izvor slike: <https://www.bmbpurification.com/en/air-biofilters/>

Slika 7.7. Šematski prikaz višestepenog tretmana zagađenog vazduha

Izvor slike: <https://www.plasmafilter.no/sv/plasmafilter/teknologi/> (adaptirano)

Slika 7.8. Primer ciklusa za prečišćavanje zagađene vode

Izvor slike: https://www.wahanaadya.co.id/070323_CP_Wahana_Adya.pdf

Slika 7.9. Primeri procesa prethodne obrade vode

Izvori slike: <https://www.intechopen.com/chapters/81176>

<https://www.rjwaterpurification.com/products/172.html>

Slika 7.10. Vezivanje čestica koloida sa koagulantima i flokulantima u vodi

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/275634703_Functionalized_Nanocelluloses_in_Wastewater_Treatment_Applications/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic

Slika 7.11. Kosi pločasti separator i ciklon za sedimentaciju

Izvor slike: <https://skill-lync.com/student-projects/week-8-simulating-cyclone-separator-with-discrete-phase-modelling-276>

Slika 7.12. Jonska izmena

Izvor slike: <https://vodasolution.com/demineralized-water/>

Slika 7.13. Primeri nivoa u membranskoj filtraciji

Izvor slike: https://www.researchgate.net/publication/352916535_Polymeric_Membrane_with_Nanomaterials_for_Water_Purification_A_Review

Slika 7.14. Različiti koraci u procesu remedijacije zemljišta

Izvor slike: <https://www.veolia.rs/sr/projektovanje-i-izvršenje-radova-remedijacije-zemljišta-na-glavnoj-lokaciji-fiat-automobili-srbija>

Slika 7.16. Postrojenje za reciklažu

Izvor slike: <https://www.renovablesverdes.com/bs/postrojenje-za-recikla%C5%BEu/>

Slika 7.17. Barijere protiv buke

Izvori slike: <https://kosanovic.rs/portfolio/brankow-terrace-2013/>

<https://www.multivario.rs/transparentni-paneli-protiv-buke>

Biografije autora



Prof. dr Mirjana Perišić

Mirjana Perišić doktorirala je na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu u oblasti Fizike životne sredine. Njene istraživačke aktivnosti usmerene su na interdisciplinarna istraživanja životne sredine, sa posebnim fokusom na analizu kvaliteta vazduha, identifikaciju izvora zagađenja i primenu veštačke inteligencije u cilju razumevanje dinamike zagađenja i razvoja strategija za unapređenje kvaliteta životne sredine. Učestvovala je u brojnim međunarodnim projektima, uključujući COST i Horizon 2020, kao i nacionalnim projektima vezanim za zagađenje vazduha i klimatske promene. Autor je brojnih naučnih radova i poglavlja u međunarodnim monografijama. Zaposlena je u Laboratoriji za fiziku životne sredine u Institutu za fiziku u Beogradu i na Univerzitetu Singidunum u okviru programa Životna sredina i održivi razvoj.



Prof. dr Gordana Jovanović

Gordana Jovanović doktorirala je na Hemijskom fakultetu Univerziteta u Beogradu u oblasti primenjene hemije. Njeno istraživanje obuhvata interdisciplinarna istraživanja hemije životne sredine, fizičke hemije i analitičke hemije, sa posebnim fokusom na dinamiku i raspodelu zagađujućih supstanci u vazduhu, vodi i zemljištu. Kroz primenu naprednih analitičkih i statističkih metoda, uključujući veštačku inteligenciju, dr Jovanović proučava poreklo zagađenja i međusobne interakcije faktora životne sredine. Objavila je preko 40 naučnih radova i 9 poglavlja u međunarodnim monografijama. Učestvovala je u brojnim međunarodnim i nacionalnim projektima. Trenutno je angažovana u Laboratoriji za fiziku životne sredine u Institutu za fiziku u Beogradu, kao i u nastavi na studijskom programu Životna sredina i održivi razvoj i Farmaceutskom fakultetu Univerziteta Singidunum..



Prof. dr Andreja Stojić

Andreja Stojić doktorirao je na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu u oblasti atomske i molekularne fizike i njene primene u nauci o životnoj sredini. Zaposlen je u Laboratoriji za fiziku životne sredine Instituta za fiziku u Beogradu i na studijskom programu Životna sredina i održivi razvoj Univerziteta Singidunum. Osnovne oblasti istraživanja obuhvataju nauku o podacima i nauku o životnoj sredini, uz fokus na primeni veštačke inteligencije u domenu atmosferske hemije i fizike. Učestvovao je u više nacionalnih i međunarodnih naučnih i primenjenih projekata, uključujući H2020 i projekte Fonda za nauku Republike Srbije u oblastima životne sredine i nauke o podacima. Koautor je više publikacija indeksiranih u relevantnim naučnim bazama podataka. Član grupe Neverne bebe.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

502.131.1

ПЕРИШИЋ, Мирјана, 1979-

Kompleksnost životne sredine : integralni pristup razumevanju fenomena /
Mirjana D. Perišić, Gordana P. Jovanović, Andreja M. Stojić. - 1. izd. - Beograd
: Univerzitet Singidunum, 2024 (Beograd : Caligraph). - VIII, 473 str. : ilustr. ; 24 cm

Slike autora. - Tiraž 300. - Biografije autora: str. 470-472. - Bibliografija: str. 448-457.

ISBN 978-86-7912-826-3

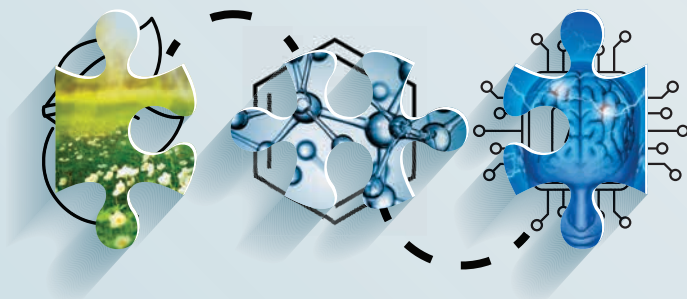
1. Јовановић, Гордана, 1988- [autor] 2. Стојић, Андреја, 1976- [autor]

а) Животна средина -- Одрживи развој

COBISS.SR-ID 160199945

© 2024.

Sva prava zadržana. Nijedan deo ove publikacije ne može biti reprodukovan u bilo kom vidu i putem bilo kog medija, u delovima ili celini bez prethodne pismene saglasnosti izdavača.



MIRJANA PERIŠIĆ | GORDANA JOVANOVIĆ | ANDREJA STOJIĆ

KOMPLEKSNOST ŽIVOTNE SREDINE

INTEGRALNI PRISTUP RAZUMEVANJU FENOMENA

Rezultat modernog načina života i odluka koje donosimo na ličnom i civilizacijskom planu nepovratno narušava stanje životne sredine, uzrokujući prevremenu smrt više od 9 miliona ljudi godišnje. To je kao da svake godine sa lica Zemlje nestane država veća od Srbije. Svakog sata više od hiljadu ljudi, svake četiri sekunde jedan čovek. Prema poslednjem izveštaju Svetske zdravstvene organizacije, 99% stanovništva udiše vazduh lošeg kvaliteta. Degradirano je blizu 30% zemljišta što utiče na kvalitet života svakog trećeg čoveka na planeti. Problem sa pijaćom vodom ima svaki četvrti čovek.

Očigledno je da savremeno društvo većinski ne razume ozbiljnost i kompleksnost problema, ne doživljava da ga se tiče, niti shvata šta je neophodno učiniti kako bi se trenutno stanje unapredilo. Zamislimo situaciju u kojoj lečenje nije u rukama lekara? Suprotno potrebi, ispostavlja se da na celokupno stanje životne sredine dominantno utiču kapital i donosioci odluka. Novac. Stručnost, sposobnost i angažovanje. Zakoni, regulative, primene i kontrola. Organizacija, interakcija, komunikacija i saradnja. Ponašanje, etika, odgovornost i svest. Savest.

Ova knjiga skicira jedan od koncepata dolaska do znanja utemeljenog u podacima u oblasti životne sredine: kako podatke pretvoriti u činjenice, činjenice u znanje, znanje u uvid i na kraju uvid u mudrost koja će pomoći u razumevanju sveta u kome živimo, ali i donošenju boljih odluka, odluka u skladu sa civilizacijskim trenutkom u kom se nalazimo.