Procena uticaja izmenjenih aktivnosti ljudi tokom pandemije COVID-19 na raspodele isparljivih organskih jedinjenja u Beogradu

By Nataša Radić

WORD COUNT	45590	TIME SUBMITTED	09-OCT-2025 01:45PM
		PAPER ID	118526004

UNIVERZITET SINGIDUNUM

BEOGRAD

DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Procena uticaja izmenjenih aktivnosti ljudi tokom pandemije COVID-19 na raspodele isparljivih organskih jedinjenja u Beogradu

MENTOR:

Prof. dr Andreja Stojić

STUDENT: Nataša Radić

BROJ INDEKSA: 485095/2019

Beograd, 2025.god.

SINGIDUNUM UNIVERSITY

BELGRADE

DEPARTMENT OF POSTGRADUATE STUDIES

PhD Thesis

Assessment of the impact of altered human activities during the COVID-19 pandemic on the distribution of volatile organic compounds in Belgrade

MENTOR:

Prof. dr Andreja Stojić

STUDENT: Nataša Radić

Student ID number: 485095/2019

Belgrade, 2025.

Mentor:

Prof. dr Andreja Stojić, vanredni profesor

Univerzitet Singidunum, Beograd

Komentor:

Prof. dr Mirjana Perišić, vanredni profesor

Univerzitet Singidunum, Beograd

Članovi komisije:

Doc. dr Timea Bezdan

Univerzitet Singidunum, Beograd

dr Dimitrije Maletić, naučni savetnik

Univerzitet u Beogradu, Institut za fiziku u Beogradu

Procena uticaja izmenjenih aktivnosti ljudi tokom pandemije COVID-19 na raspodele isparljivih organskih jedinjenja u Beogradu

Rezime

Pandemija COVID-19, kao specifična krizna situacija, pružila je jedinstvenu priliku za razumevanje uticaja izmenjenih društvenih okolnosti na kvalitet vazduha. U ovoj disertaciji prikazani su rezultati istraživanja složenih interakcija između prirodnih, ekoloških i socio-ekonomskih promena tokom pandemije, kao i njihovog uticaja na kvalitet vazduha u Beogradu. Cilj istraživanja bio je da se analizom dinamike koncentracija benzena, kao karakterističnog antropogenog predstavnika isparljivih organskih jedinjenja, izvrši karakterizacija uticaja faktora životne sredine, aktivnosti ljudi i društvenih odgovora na novonastale okolnosti na stanje kvaliteta vazduha. Poseban fokus stavljen je na period vanrednog stanja (15. mart-6. maj 2020. godina), kada su, uz mere ograničenja kretanja, u velikoj meri redukovane i privredne aktivnosti.

U analizu je uključen veliki broj varijabli koje omogućavaju kontekstualno razumevanje ovih promena. Merenje koncentracija isparljivih organskih jedinjenja izvršeno je korišćenjem masenog spektrometra sa transferom protona na urbanoj lokaciji u Beogradu. Baza podataka upotpunjena je izmerenim i modeliranim meteorološkim parametrima, kao i koncentracijama osnovnih zagađujućih materija, dobijenim iz nacionalne mreže za regulatorni monitoring kvaliteta vazduha. U analizu su uključene i varijable koje opisuju mobilnost stanovništva (boravak kod kuće, vožnja, poseta parkovima, prodavnicama i dr.), zdravstveni pokazatelji (broj obolelih, vakcinisanih, preminulih i dr.), kao i mere koje su se odnosile na zabrane i ograničenja kretanja (zatvaranje aerodroma, škola, tržnih i sportskih centara, obaveza rada od kuće i dr.). Kako bi analizom bili obuhvaćeni odloženi efekti mobilnosti i mera politike na kvalitet vazduha, uključene su i odgovarajuće varijable sa vremenskim kašnjenjem do tri dana.

U analizi podataka kombinovane su statističke metode i veštačka inteligencija. Statistička analiza, koja je podrazumevala poređenje perioda pre i za vreme vanrednog stanja, obuhvatila je korelacionu analizu i analizu koncentracija u zavisnosti od pravca i brzine vetra. U cilju otkrivanja dubljih, nelinearnih povezanosti benzena (ciljna varijabla) sa ostalim varijablama

(prediktori) korišćena je regresiona analiza bazirana na ansamblima stabala odlučivanja mašinskog učenja. Optimizacija hiperparametara modela izvršena je primenom metaheuristika, dok su metode interpretacije modela mašinskog učenja omogućile kvantifikaciju lokalnih i globalnih uticaja prediktora na predikciju benzena. Osim navedenog, izvršena je i klasterizacija lokalnih uticaja, koja je omogućila identifikaciju različitih režima životne sredine koji su na različite načine uticali na ponašanje benzena tokom pandemije.

Analiza je pokazala da su promene izazvane pandemijom imale značajan uticaj na koncentracije benzena, ostvaren na kompleksan način u zavisnosti od specifičnog ekološkog konteksta. Identifikovana su i opisana tri režima životne sredine karakteristična za početak vanrednog stanja koji su oblikovali dinamiku koncentracija u atmosferi tokom njegovog trajanja. Prvi režim, koji povezuje lokalne aktivnosti postrojenja naftne industrije, sagorevanje biomase, hemijsku proizvodnju i saobraćaj, doveo je do smanjenja koncentracija benzena za 15,7%, što sugeriše da su privremeno smanjenje industrijske aktivnosti i redukcija emisija iz saobraćaja doprineli smanjenju prisustva benzena u vazduhu. Drugi režim, koji karakteriše noćna hemija i specifični meteorološki uslovi, rezultirao je povećanjem koncentracija benzena za 51,9%. Treći režim, koji karakterišu emisije iz lokalnih industrijskih aktivnosti i uslovi sa intenzivnijim strujanjem vazduha, doveo je do blagog smanjenja koncentracija benzena od 2,33%, što ukazuje na redukciju industrijskih aktivnosti tokom vanrednog stanja, ali i uticaj meteoroloških faktora.

Rezultati su pokazali da je direktan uticaj mobilnosti na nivoe benzena manji u odnosu na uticaj ostalih zagađujućih materija i meteoroloških parametara. Smanjenje boravka na radnim mestima od 40% do 80% uobičajeno dovodi do smanjenja koncentracija benzena do oko 3% nakon tri dana (odloženi efekti), dok produženi boravci kod kuće (više od 20% u odnosu na period pre uvođenja vanrednog stanja) dovode od povećanja koncentracija za oko 3%. Ovo potvrđuje da su loženje fosilnih goriva za potrebe grejanja domaćinstava i druge aktivnosti povezane sa boravkom u kući (kuvanje, čišćenje i sl.) imale važnu ulogu u emisijama benzena tokom trajanja vanrednog stanja.

Rezultati prikazani u okviru ove disertacije ukazuju na potrebu sveobuhvatnog pristupa u analizi kvaliteta vazduha, koji prevazilazi tradicionalno oslanjanje na koncentracije osnovnih zagađujućih materija i meteorološke parametre. Specifične krizne situacije, kakva je bila pandemija COVID-19, dovode do promene u ponašanju ljudi, društvenim navikama i javnim politikama, uključujući mere u oblasti javnog zdravlja i promene socio-ekonomskih uslova.

Sve to može imati očekivane i neočekivane uticaje na koncentracije zagađujućih materija u atmosferi. Integracija različitih faktora u analizi kvaliteta vazduha neophodna je za razumevanje kompleksnih i dominantno nelinearnih odnosa koji oblikuju dinamiku zagađenja.

Primena veštačke inteligencije omogućila je detaljnu analizu podataka i prepoznavanje obrazaca koje nije moguće utvrditi primenom konvencionalnih pristupa. Regresioni modeli pokazali su se kao efikasan alat za kontekstualizaciju, a metode interpretacije modela mašinskog učenja za kvantifikaciju uticaja različitih varijabli na koncentracije benzena. Integracijom mašinskog učenja, metaheuristika za optimizaciju hiperparametara i dobijanje maksimalnih performansi modela, metoda interpretacije modela mašinskog učenja i naprednih tehnika za klasterizaciju lokalnih uticaja, dobijen je koristan alat koji doprinosi boljem razumevanju uzroka i evolucije zagađenja, ali pruža i temelje za izradu efikasnijih, adaptivnih strategija zaštite životne sredine.

Rezultati dobijeni u ovoj disertaciji imaju potencijal za široku primenu, posebno u urbanim sredinama koje se suočavaju sa ozbiljnim problemima zagađenja vazduha. Istraživanje potvrđuje značaj multidisciplinarnog pristupa u analizi atmosferskog zagađenja i naglašava potrebu za uključivanjem različitih izvora podataka u cilju obezbeđivanja sveobuhvatnih modela za upravljanje kvalitetom vazduha. Ovi rezultati mogu služiti kao osnova za unapređenje postojećih strategija zaštite životne sredine i oblikovanje politika koje uzimaju u obzir kako prirodne, tako i društvene determinante koji utiču na zagađenje.

Ključne reči: kvalitet vazduha; isprarljiva organska jedinjenja; benzen; masena spektrometrija sa transferom protona; COVID-19; mašinsko učenje; metaheuristike; metode interpretacije modela mašinskog učenja; klasterizacija.

Assessment of the impact of altered human activities during the COVID-19 pandemic on the distribution of volatile organic compounds in Belgrade

Abstract

The COVID-19 pandemic, as a specific crisis situation, provided a unique opportunity to understand the impact of altered societal conditions on air quality. This dissertation presents the results of research into the complex interactions between natural, ecological, and socio-economic changes during the pandemic, as well as their influence on air quality in Belgrade. The aim of the study was to analyze the dynamics of benzene concentrations—a representative anthropogenic volatile organic compound (VOC)—to characterize the influence of environmental factors, human activities, and societal responses to the new circumstances on air quality. Particular focus was placed on the state of emergency period (March 15–May 6, 2020), during which movement restrictions were in place and economic activity was significantly reduced.

A wide range of variables was included in the analysis to enable contextual understanding of these changes. Measurements of VOC concentrations were conducted using a proton transfer reaction mass spectrometer (PTR-MS) at an urban site in Belgrade. The database was supplemented with measured and modeled meteorological parameters, as well as concentrations of key air pollutants obtained from the national regulatory air quality monitoring network. Additional variables included indicators of population mobility (time spent at home, driving, visits to parks, stores, etc.), health metrics (number of cases, vaccinations, deaths), and public policies related to movement restrictions (closures of airports, schools, shopping and sports centers, mandatory remote work, etc.). To account for the delayed effects of mobility and policy measures on air quality, lagged variables up to three days were also incorporated.

A combination of statistical methods and artificial intelligence was used for data analysis. The statistical analysis included a comparison of the periods before and during the state of emergency, covering correlation analyses and pollution concentration assessments based on wind direction and speed. To uncover deeper, nonlinear relationships between benzene (as the target variable) and other predictors, regression models based on machine learning decision tree ensembles were applied. Model hyperparameters were optimized using metaheuristic algorithms, while model interpretation techniques enabled quantification of local and global

predictor influences on benzene levels. Additionally, clustering of local effects was performed, allowing for the identification of distinct environmental regimes that influenced benzene behavior during the pandemic in various ways.

The analysis revealed that pandemic-induced changes had a significant impact on benzene concentrations, realized in complex ways depending on the specific ecological context. Three environmental regimes characteristic of the early state of emergency were identified and described, each shaping atmospheric concentration dynamics during the period. The first regime, associated with local oil industry activities, biomass burning, chemical manufacturing, and traffic, resulted in a 15.7% reduction in benzene concentrations, suggesting that temporarily reduced industrial activity and lower traffic emissions contributed to improved air quality. The second regime, characterized by nocturnal chemistry and specific meteorological conditions, led to a 51.9% increase in benzene concentrations. The third regime, marked by emissions from local industrial activities and intensified air flow conditions, produced a modest 2.33% decrease in benzene concentrations, indicating both reduced industrial activity and the influence of meteorological factors during the state of emergency.

The results showed that the direct impact of human mobility on benzene levels was smaller than the influence of other pollutants and meteorological variables. A reduction in workplace attendance of 40% to 80% typically resulted in about a 3% decrease in benzene concentrations after a three-day lag, while extended stays at home (over 20% above the pre-emergency baseline) were associated with a 3% increase in benzene concentrations. This suggests that fossil fuel combustion for household heating and other home-based activities (cooking, cleaning, etc.) played a significant role in benzene emissions during the state of emergency.

The findings presented in this dissertation highlight the need for a comprehensive approach to air quality analysis that goes beyond traditional reliance on basic pollutant concentrations and meteorological parameters. Specific crisis events, such as the COVID-19 pandemic, can alter human behavior, social habits, and public policies—including public health interventions and shifts in socio-economic conditions—all of which may have both expected and unexpected effects on air pollutant concentrations. Integrating diverse factors into air quality analyses is essential for understanding the complex, predominantly nonlinear relationships that shape pollution dynamics.

The application of artificial intelligence enabled detailed data analysis and pattern recognition that would not be possible using conventional approaches. Regression models proved to be an

effective tool for contextualization, while machine learning model interpretation techniques allowed for the quantification of various variables' influences on benzene concentrations. By integrating machine learning, metaheuristic hyperparameter optimization for maximizing model performance, model interpretation techniques, and advanced clustering of local effects, a valuable analytical tool was developed that enhances understanding of pollution causes and dynamics, while also laying a foundation for more efficient and adaptive environmental protection strategies.

The results obtained in this dissertation have significant potential for broader application, particularly in urban environments facing serious air pollution challenges. This research confirms the importance of a multidisciplinary approach to atmospheric pollution analysis and emphasizes the need to incorporate diverse data sources to develop comprehensive air quality management models. These results may serve as a foundation for improving existing environmental protection strategies and shaping policies that account for both natural and societal determinants influencing pollution levels.

Keywords: air quality; volatile organic compounds; benzene; proton transfer reaction mass spectrometry; COVID-19; machine learning; metaheuristics; model interpretation methods; clustering.

Spisak slika

Slika 1. Uklanjanje IOJ iz atmosfere 22
Slika 2. Šematski prikaz formiranja ozona u prisustvu IOJ i NOx 24
Slika 3. Reakcija benzena sa ˙OH 29
Slika 4: Uređaj PTR-MS (model Standard PTR-quad-MS) 30
Slika 5. Prikaz lokacije mernog mesta 31
Slika 6. Prikaz osnovnih delova uređaja PTR-MS 33
Slika 7. Drift cev PTR-MS uređaja 34
Slika 8. Kvadrupolni maseni analizator 42
Slika 9. Sekundarni elektronski multiplikator 43
Slika 10. Primer emisija iz visoko (levo) i nisko (desno) pozicioniranih izvora 51
Slika 11. Koraci u postupku klaster analize 52
Slika 12: Vrste mašinskog učenja 54
Slika 13. Glavni koraci rada koncepta *Bagging* 56
Slika 14. Glavni koraci rada u Boosting-a 57
Slika 15: 5-fold cross-validacija 62
Slika 16. Interpretacija R^2 vrednosti – $R^2 = 1$ (levo), $R^2 = 0,8$ (u sredini) i $R^2 = 0$ (desno) 63
Slika 17. Primer lokalne (SHAP, levo) i globalne (SAGE, desno) interpretacije uticaja varijabli 66
Slika 18. Indikacija prostorne raspodele i razlika u nivoima benzena pre i tokom pandemije 82
Slika 19. Indikacija mesečne prostorne raspodele nivoa benzena tokom pandemije 83
Slika 20. Globalna važnost grupa varijabli na koncentracije benzena tokom vanrednog stanja izazvanog pandemijom COVID-19 84
Slika 21. Normalizovani nivoi i normalizovani lokalni uticaji varijabli u različitim režimima životne sredine 92
Slika 22. Vremenske serije nivoa benzena i režima životne sredine 97
Slika 23. Distribucija najvažnijih nivoa (plavo) i uticaja (crveno) za režime E3, E4 i E7 98
Slika 24. Normalizovani uticaj potvrđenih slučajeva na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana) 108
Slika 25. Normalizovani uticaj potvrđenih smrtnih slučajeva na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana) 110
Slika 26. Normalizovani uticaj smanjene vožnje na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana) 111
Slika 27. Normalizovani uticaj promene prisustva zaposlenih na radnim mestima na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana) 112
Slika 28. Normalizovani uticaj promene vremena provedenog kod kuće na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana) 113

Spsak tabela

Tabela 1. Kratkoročni i dugoročni efekti IOJ na zdravlje ljudi 26
Tabela 2. Spisak kancerogenih i potencijalno kancerogenih IOJ..... 27
Tabela 3. Osnovne fizičko- hemijskih osobina benzena..... 28
Tabela 4. IOJ koja se mogu detektovati uređajem PTR-MS..... 35
Tabela 5. Meteorološki podaci sadržani u GDAS arhivi 47
Tabela 6. Spisak korišćenih varijabli iz baze podataka Oxford..... 48
Tabela 7. Deskriptivna statistika za merene parametre pre i posle uvođenja vanrednog stanja. 70
Tabela 8. SAGE statistika..... 85
Tabela 9. Statistika uticaja u pojedinim režimima životne sredine..... 90
Tabela 10. Identifikacija protonizovanih molekula IOJ dobijenih merenjem uzoraka ambijentalnog vazduha uređajem PTR-MS..... 93
Tabela 11. Osnovne karakteristike režima životne sredine E3 99
Tabela 12. Osnovne karakteristike režima životne sredine E4 102
Tabela 13. Osnovne karakteristike režima životne sredine E7 104

Sadržaj

Spisak slika

Spsak tabela

1. Uvod 1

2. Ciljevi i hipoteze naučnog istraživanja 5

2. 1 Ciljevi naučnog istraživanja 5

2.2 Hipoteze 5

2.3 Sadržaj doktorske disertacije 6

3. Pandemija virusa SARS-CoV-2 (COVID 19) i njen uticaj na kvalitet vazduha u svetu 9

4. Pandemija COVID 19 u Republici Srbiji – hronologija uvođenja i relaksacije restriktivnih mera . 13

4.1 Restriktivne mere u okviru privrednih aktivnosti 17

5. Osnovne karakteristike isparljivih organskih jedinjenja 19

5.1 Izvori emisije isparljivih organskih jedinjenja 20

5.2 Dinamika isparljivih organskih jedinjenja u atmosferi 21

5.3 Uticaj IOJ na zdravlje ljudi i životnu sredinu 25

5.4 Benzen 27

6. Metode uzorkovanja, merenja i preuzimanja podataka iz drugih baza za potrebe analize 30

6.1 Mesto uzorkovanja 30

6.2 Eksperimentalna postavka 31

6.3 Merenje koncentracija isparljivih organskih jedinjenja primenom masene spektrometrije sa transferom protona 32

6.3.1 Maseni spektrometar sa transferom protona 33

6.4 Merenje meteoroloških parametara 44

6.5 Podaci korišćeni za kontekstualizaciju 44

6.5.1 Podaci o koncentracijama osnovnih zagađujućih materija 45

6.5.2 Modelirani meteorološki podaci 45

6.5.3 Podaci o pandemiji COVID-19 i merama odgovora 47

6.5.4 Epidemiološki podaci sa platforme *Worldometer* 49

6.5.5 Podaci o mobilnosti iz baza *Apple* i *Google* 49

7. Metode korišćene za analizu podataka 50

7.1 Identifikacija prostorne raspodele izvora emisije 50

7.2 Klaster analiza 51

7.2.1 Klaster analiza u identifikaciji izvora emisije – polarna klaster analiza 53

7.3 Mašinsko učenje 53

7.3.1 Nadgledano mašinsko učenje 55

7.3.1.1 Stabla odlučivanja 55

7.3.1.2 Ansambli stabala odlučivanja 56

7.3.1.2.1 AdaBoost 57
7.3.1.2.2 Gradient Boosting 57
7.3.1.2.3 XGBoost (Extreme Gradient Boosting) 58
7.3.1.2.4 CatBoost (Categorical Boosting) 58
7.3.1.2.5 LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) 58
7.3.1.2.6 HGBT (Histogram-based Gradient Boosting) 58
7.3.2 Metode optimizacije parametara modela 58
7.3.2.1 Podešavanje hiperparametara 59
7.3.2.1.1 Metaheuristička optimizacija 60
7.3.3 Proces evaluacije i izbor optimalnog modela 61
7.3.3.1 Unakrsna validacija 61
7.3.3.2 Evaluacija modela pomoću R^2 metrike 62
7.3.3.3 Srednja apsolutna greška (MAE) 63
7.3.3.4 Srednja kvadratna greška (MSE) 64
7.3.3.5 Srednja kvadratna greška (RMSE) 64
7.3.3.6 Srednja apsolutna procentualna greška (MAPE) 64
7.3.3.7 Maksimalna greška (Max Error) 65
7.4 Metode interpretacije modela mašinskog učenja 65
7.4.1 Shapley Additive Global Importance 66
7.4.2 Shapley Additive Explanations 66
7.5 Klaster analiza uticaja 67
7.5.1 Redukcija dimenzionalnosti 67
7.5.1.1 *Uniform Manifold Approximation and Projection* 68
7.5.1.2 Klasterizacija zasnovana na hijerarhijskoj gustini 68
8. Rezultati i diskusija 69
8.1 Stanje kvaliteta vazduha u Beogradu pre i tokom trajanja pandemije 69
8.2 Indentifikacija izvora benzena tokom vanrednog stanja 81
8.3 Uticaj faktora životne sredine na koncentracije benzena u vanrednim okolnostima 83
8.3.1 Dinamika režima životne sredine tokom trajanja vanrednog stanja 96
8.3.1.1 Režim životne sredine E3 – hemijska proizvodnja, sagorevanje i emisije povezane sa naftom 99
8.3.1.2 Režim životne sredine E4 – lokalni industrijski procesi 101
8.3.1.3 Režim životne sredine E7 – emisije iz izvora koje nisu posledice sagorevanja, noćna hemija i meteorološki kontekst 103
8.4 Uticaj mobilnosti i pandemijskih varijabli na koncentraciju benzena tokom pandemije 107
8.4.1 Uticaj potvrđenih slučajeva COVID-19 na dinamiku benzena 107
8.4.2 Uticaj potvrđenih smrtnih slučajeva COVID-19 na dinamiku benzena 109

8.4.3 Uticaj izmenjene mobilnosti na nivo benzena – varijabla vožnja 111
8.4.4 Uticaj promene prisustva zaposlenih na radnim mestima na dinamiku benzena 112
8.4.5 Uticaj promene vremena provedenog kod kuće na dinamiku benzena 113
9. ZAKLJUČAK 115
Literatura: 118

Lista skraćenica i pojmova

ABC – *Artificial Bee Colony Algorithms*

AdaBoost – *Adaptive Boosting*

AP – afinitet prema protonu (*Proton Affinity*)

CatBoost – *Categorical Boosting*

crAIRsis – projekat *Characterizing crises-caused air pollution alterations using an artificial intelligence-based framework*

cps – odbroj u sekundi (*counts per second*)

DBSCAN – *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*

MAE – srednja apsolutna greška (*Mean Absolute Error*)

FFA – *Firefly Algorithm*

GDAS – Globalni sistem za asimilaciju podataka (*Global Data Assimilation System*)

HDBSCAN – *Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*

HHO – *Harris Hawks Optimization*

IOJ – isparljiva organska jedinjenja (*Volatile Organic Compounds – VOC*)

JP – jonizacioni potencijal (*Ionization Potential*)

LightGBM – *Light Gradient Boosting Machine*

lag1, lag2, lag3 – lagovane vrednosti varijable sa vremenskim zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana

MAPE – srednja apsolutna procentualna greška (*Mean Absolute Percentage Error*)

Max Error – maksimalna greška (*Maximum Error*)

MDS – višedimenziono skaliranje (*Multidimensional Scaling*)

MinPts – minimalni broj tačaka (*Minimal Number of Points*)

MSE – srednja kvadratna greška (*Mean Squared Error*)

ML – mašinsko učenje (*Machine Learning*)

npc $ppbv^{-1}$ – normalizovan broj produkata po ppbv (*Normalized Product Count per ppbv*)

PM_{10} – suspendovane čestice aerodinamičnog dijametra manjeg od 10 μm

$PM_{2,5}$ – suspendovane čestice aerodinamičnog dijametra manjeg od 2,5 μm

ppm, ppb, ppbv – 10^{-6}, 10^{-9}, 10^{-9} zapreminski udeo u smeši (*parts per million, parts per billion, parts per billion by volume*)

PTR-MS – masena spektrometrija sa transferom protona (*Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry*)

PHEIC – javna zdravstvena opasnost međunarodnog značaja (*Public health emergency of international concern*)

QSA – *Quantum-behaved Swarm Algorithm*

RMSE – koren srednje kvadratne greške (*Root Mean Squared Error*)

RSS – suma kvadrata reziduala (*Residual Sum of Squares*)

SAGE – *Shapley Additive Global Explanations*

SARS CoV 2 – Teški akutni respiratorni sindrom koronavirus 2 (*Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*)

SCA – *Sine Cosine Algorithm*

SEPA – Agencija za zaštitu životne sredine (*Serbian Environmental Protection Agency*)

SHAP – *Shapley Additive Explanations*

SMA – algoritam sluznih buđi (*Slime Mould Algorithm*)

SMO – Svetska meteorološka organizacija (*World Meteorological Organization – WMO*)

SOA – sekundarni organski aerosoli (*Secondary Organic Aerosols*)

SZO – Svetska zdravstvena organizacija (*World Health Organization – WHO*)

TgC – teragram ugljenika (*Teragram of carbon*)

UMAP – *Uniform Manifold Approximation and Projection*

USEPA – Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (*United States Environmental Protection Agency*)

wd – pravac vetra (*Wind Direction*)

ws – brzina vetra (*Wind Speed*)

XAI – metode interpretacije modela mašinskog učenja (*Explainable Artificial Intelligence*)

XGBoost – *Extreme Gradient Boosting*

1. Uvod

Kvalitet vazduha je od suštinskog značaja za zdravlje ljudi. Izloženost povišenim koncentracijama zagađujućih materija u vazduhu predstavlja važan faktor u upravljanju životnom sredinom i kreiranju politika, jer ima ozbiljne posledice po javno zdravlje (WHO, 2024). Zbog toga se već godinama ulaže pažnja u osmišljavanje i razvoj integrisanog pristupa za analizu i predviđanje koncentracija zagađujućih materija, kao i u procenu doprinosa pojedinačnih izvora zagađenja, u cilju formulisanja efikasnih mera za prevenciju i zaštitu vazduha od zagađenja.

Štetan uticaj zagađenog vazduha na životnu sredinu i zdravlje ljudi najizraženiji je u urbanim, prenaseljenim područjima i industrijski razvijenim sredinama, i nesumnjivo se dovodi u vezu sa delatnostima ljudi. Povećanje urbanizacije širom sveta, uz konstantan rast populacije u gradovima, dovodi do toga da sve veći broj ljudi doživljava negativne posledice usled zagađenja vazduha (J. Fenger, 1999; Suroshe, 2023).

Kompleksnost dinamike zagađenja vazduha oblikovana je nizom različitih faktora. Osim izvora emisije zagađujućih materija u vazduh, koji predstavljaju glavni faktor, značajan udeo imaju meteorološki parametri, topografski faktori, a sve češće se pominju i soci-ekonomski uslovi života i rada. Situaciju dodatno usložnjavaju nesvakidašnje okolnosti koje su proizašle iz kriznih situacija, kakve su ratovi, ekonomske, ali i velike zdravstvene krize. U takvim prilikama menjaju se navike i uobičajeni obrasci ponašanja, što posredno ili neposredno utiče na ostale segmente životne sredine, a sve zajedno na kvalitet vazduha. Pandemija COVID-19, izazvana virusom SARS-CoV-2, donela je dramatične promene na globalnom nivou, zahvatajući različite aspekte života, od mobilnosti do privrednih aktivnosti i politika, i nesumnjivo je predstavljala izazov i povod za brojna naučna istraživanja (Khojasteh i koautori, 2022). Usled brzog širenje virusa, Svetska zdravstvena organizacija (SZO, eng. *World Health Organization – WHO*) je 30. januara 2020. godine događaj klasifikovala kao vanrednu situaciju od međunarodnog značaja za javno zdravlje (*Public health emergency of international concern – PHEIC*), nakon čega je usledilo i proglašenje pandemije, 11. marta iste godine (Baldwin i McKee, 2023). Iako je Komitet SZO za hitne slučajeve 5. maja 2023. godine izjavio da pandemija više ne ispunjava kriterijume za PHEIC, njen uticaj je i dalje prisutan.

Tokom perioda trajanja pandemije, kako bi sprečili prenošenje virusa i ublažili pritisak na zdravstvene sisteme, vlade širom sveta reagovale su merama kao što su blokade, zabrane putovanja i protokoli socijalnog distanciranja. Sve sprovedene intervencije, efikasne u cilju

ublažavanja širenja virusa, izazvale su značajne promene u mnogim drugim sferama života. Pored brojnih negativnih posledica, koje se u najvećoj meri ogledaju kroz gubitak života ljudi, kolapsa u zdravstvenom sistemu, ekonomske krize, smanjenje privrednog razvoja, dešavanja tokom pandemije doprinela su da se stanje u životnoj sredini u mnogim zemljama poboljša (Hammad i koautori, 2023; Rume i Islam, 2020). Posebno istaknut zaključak brojnih naučnih radova, koji su proučavali vezu između pandemijskih mera ograničenog kretanja i stanja životne sredine, jeste da je novonastala situacija širom sveta indirektno doprinela poboljšanju kvaliteta vazduha (Mousazadeh i koautori, 2021; Saha i koautori, 2022b). Ova zapažanja dodatno su potkrepljena satelitskim snimcima, koji su pružali uverljive vizuelne dokaze o značajnom poboljšanju kvaliteta vazduha iznad mnogih urbanih sredina koje su pre pandemije bile suočene s izraženim problemima zagađenja (Gautam, 2020; Muhammad i koautori, 2020a).

Politika uvođenja karantina, fizičkog distanciranja i smanjenja svih oblika saobraćaja, industrijskih i privrednih aktivnosti, nesumnjivo je dovela do smanjenja antropogenog doprinosa emisiji mnogih zagađujućih materija u vazduh. Međutim u mnogim regionima ovo smanjenje je bilo kratkog daha, jer je postepeno ukidanje mera i povećanje aktivnosti ljudi dovelo do ponovnog porasta emisija zagađujućih materija i povratka na prethodne nivoe (Acosta-Ramírez & Higham, 2022; Faridi i koautori, 2021).

Većina studija koje su istraživale uticaj pandemije na kvalitet vazduha bila je usmerena na promene koncentracija uobičajeno praćenih zagađujućih materija kao što su $PM_{2,5}$, PM_{10}, NOx, SO_2, CO i O_3 (Amouei Torkmahalleh i koautori, 2021; Cai i koautori, 2022; Saha i koautori, 2022; Siciliano i koautori, 2020; Silva i koautori, 2022; Wijnands i koautori, 2022). U okviru ove disertacije poseban akcenat je stavljen na prostorno-vremensku raspodelu koncentracija benzena tokom pandemije, unutar složene smeše velikog broja drugih gasovitih jedinjenja koji sadrže ugljenik poznatih pod zajedničkim nazivom isparljiva organska jedinjenja (IOJ, eng. *volatile organic compounds* – *VOC*). Zbog velikog broja potencijalnih izvora emisije, ali i zbog svojih specifičnih fizičko-hemijskih svojstava, ova jedinjenja, naročito u urbanim i industrijski orijentisanim sredinama, mogu se posmatrati kao nosioci zagađenja vazduha iz antropogenih izvora. I pored činjenice da veliki broj IOJ ne beleže direktan negativni uticaj na zdravlje ljudi, ova široka grupa jedinjenja podrazumeva i ona koja se odlikuju izrazitom toksičnošću i koja doprinose razvoju najozbiljnijih zdravstvenih stanja, kao što su hronična oštećenja unutrašnjih organa i sistema organa, kao i kancerogene i mutagene bolesti. Pored hroničnih zdravstvenih rizika, pri ekspoziciji visokim koncentracijama, mnoga jedinjenja iz ove grupe, mogu

uzrokovati akutne efekte, kao što su iritacija nosa, grla i očiju, umor, glavobolja, mučnina, vrtoglavica, alergijske reakcije na koži, problemi u funkcionisanju respiratornih organa i slično (Rumchev i koautori, 2007). Isparljiva organska jedinjenja poput benzena, toluena, etilbenzena i ksilena okarakterisana su kao izrazito opasne zagađujuće materije koje dospevaju u vazduh iz brojnih prirodnih i antropogenih izvora, dok se benzen, prema smernicama za procenu rizika zasnovanim na izlaganju ljudi i studijama na životinjama, klasifikuje kao poznati kancerogen za ljude kategorije 1 (US EPA, 2024). Pored navedenog, isparljiva organska jedinjenja se odlikuju i velikom reaktivnošću. Kao takva lako stupaju u reakciju sa drugim komponentama vazduha dajući kao proizvode reakcije sekundarne zagađujuće materije i reakcione intermedijere koji takođe igraju značajnu ulogu u zagađenju vazduha urbanih sredina (Galán Madruga, 2021; Xiang i koautori, 2023).

Razumevanje dinamike benzena, kao jednog od predstavnika IOJ, od suštinskog je značaja za efikasno upravljanje životnom sredinom i razvoj politika (Zahed i koautori, 2024). Sve promene izazvane pandemijom nesumnjivo su imale značajan uticaj na kvalitet vazduha, odnosno koncentracije zagađujućih materija, uključujući i IOJ, a posebno benzen (Cardito i koautori, 2023; Hyman i koautori, 2023). Singh i saradnici (2023) ukazali su na značajan pad ukupnih IOJ u Indiji tokom pandemije (od 9 do 61% na različitim mernim stanicama). Prema izveštajima Ling i saradnika (2023), pad koncentracija benzena zabeležen je u Indiji (23,6%), Evropi (21,9%), Sjedinjenim Američkim Državama (16,2%) i Kini (15,6%), što se uglavnom pripisuje smanjenju industrijske aktivnosti i saobraćaja. Takođe, u urbanim sredinama poput Delhija i Mumbaja, gde su tokom pandemije uvedene stroge industrijske restrikcije, koncentracije benzena su drastično opale: u Mumbaju za 72% (sa prosečnih 1,65 na 0,47 $\mu g/m^3$), dok je u Delhiju smanjenje iznosilo 93% (sa 6,08 na 0,38 $\mu g/m^3$) (Pakkattil i koautori, 2021).

Cilj ove disertacije bio je da se primenom naprednih analitičkih metoda i različitih skupova podataka unapredi razumevanje načina na koji su društvene promene tokom pandemije COVID-19 uticale na koncentracije benzena u Beogradu. Sveobuhvatna analiza sprovedena je korišćenjem analitičkog alata razvijenog u okviru projekta crAIRsis (*Characterizing crises-caused air pollution alterations using an artificial intelligence-based framework*), zasnovanog na metodama veštačke inteligencije (a*rtificial intelligence – AI*) optimizovanih pomoću metaheuristika, kao i metodama za objašnjavanje modela mašinskog učenja (*explainabile artificial intelligence – XAI*), zasnovanim na teoriji igara. Metode XAI tehnike kao što su *Shapley Additive Explanations* (SHAP) i *Shapley Additive Global Explanations* (SAGE)

korišćene su u svrhu osveljavanja uticaja svakog faktora na rezultate modela, dok je metoda klasterizacije *Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (HDBSCAN) poslužila za identifikaciju različitih režima životne sredine koji su uticali na nivoe benzena u posmatranom periodu. U istraživanju su korišćeni podaci o koncentracijama isparljivih organskih jedinjenja, mereni masenim spektrometrom sa transferom protona (*Proton Transfer Reaction-Mass Spectrometry* – PTR-MS) i osnovnih zagađujućih materija (CO, NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10} i SO_2), meteorološki podaci, epidemiološki faktori, socio-ekonomski indikatori (OxCGRT - *Oxford COVID-19 Government Response Tracker*), izveštaji o mobilnosti kompanija *Google* i *Apple*, kao i berzanski indeksi. Baza podataka je dopunjena lagovanim varijablama (sa vremenskim pomakom od jednog, dva i tri dana), kako bi se uz trenutne efekte epidemioloških podataka, vladinih mera i promena u mobilnosti tokom COVID-19, uočili i njihovi odloženi efekti.

S obzirom na to da emisije lako isparljivih organskih jedinjenja u sve većoj meri postaju predmet interesovanja i pažnje javnosti, ali i zakonske regulative, uključivanje pandemijskih varijabli dalo je mogućnost za slojevitu analizu, što je od posebnog značaja za razvoj nauke o životnoj sredini. Ovakav pristup ne samo da unapređuje razumevanje podataka o životnoj sredini, već pruža dragocene uvide donosiocima odluka i zdravstvenim institucijama koje nastoje da efikasno upravljaju rizicima po životnu sredinu i javno zdravlje u sličnim kriznim situacijama.

2. Ciljevi i hipoteze naučnog istraživanja

2. 1 Ciljevi naučnog istraživanja

Polazeći od pretpostavke da je pandemija, kroz promene u ponašanju ljudi i mobilnosti, značajno uticala na raspodelu zagađujućih materija u vazduhu urbane sredine (uključujući i IOJ), ovaj rad ima za cilj da pruži dublji uvid u dinamiku koncentracija benzena u takvim okolnostima. Kombinovanjem više izvora podataka i primenom statističkih metoda i veštačke inteligencije, ova disertacija nudi osnovu za bolje razumevanje međuzavisnosti ekoloških faktora i formulisanje budućih mera za kontrolu i smanjenje antropogenih emisija u gradskim sredinama.

Osnovni cilj ove disertacije jeste da doprinese boljem razumevanju uticaja mera uvedenih tokom pandemije COVID-19 na koncentraciju IOJ u vazduhu u rezidencijalnom urbanom delu Beograda, upoređujući stanje pre i tokom vanrednog stanja.

Specifični ciljevi istraživanja su:

1. Analizirati promene u koncentracijama IOJ pre i tokom vanrednog stanja u Beogradu, i dovesti ih u vezu sa promenama u mobilnosti stanovništva i privrednih aktivnosti;
2. Identifikovati dominantne izvore emisije IOJ i njihov doprinos izmerenim koncentracijama pre i tokom trajanja restriktivnih mera;
3. Ispitati i objasniti uticaj faktora životne sredine, društvenih mera i obrazaca ponašanja stanovništva na dinamiku benzena, kao karakterističnog predstavnika IOJ, u periodima pre i tokom uvođenja vanrednog stanja.

2.2 Hipoteze

Opšta hipoteza od koje se krenulo u istraživanje je: Uvođenje vanrednog stanja usled pandemije COVID-19 dovelo je do značajnih promena u prostorno-vremenskim raspodelama IOJ u urbanom vazduhu Beograda.

Posebna hipoteza koja proizilazi iz opšte je: Primena naprednih statističkih metoda i veštačke inteligencije omogućava otkrivanje složenih i nelinearnih odnosa između koncentracija benzena i faktora životne sredine, što predstavlja validan osnov za razumevanje mehanizama emisije i dizajniranje efikasnijih mera kontrole zagađenja u urbanim sredinama.

Pojedinačne hipoteze su:

1. Postoji značajna veza između antropogenih aktivnosti i koncentracija IOJ u urbanom ambijentu;
2. Uvođenje vanrednih mera dovodi do promene antropogenih aktivnosti koje se odražavaju na promene intenziteta i strukture izvora emisije IOJ;
3. Uvođenje vanrednih mera i izmenjene antropogene aktivnosti dovode do promene i preraspodele uticaja faktora životne sredine koji oblikuju raspodele benzena.

2.3 Sadržaj doktorske disertacije

U nastavku teksta ukratko će biti reči o sadržaju svakog poglavlja koje će biti obrađeno u okviru ove disertacije.

U trećem i četvrtom poglavlju opisane su karakteristike pandemije COVID-19, koja predstavlja osnovu za istraživački deo disertacije. U trećem poglavlju dat je prikaz uticaja pandemije, odnosno restriktivnih mera, na kvalitet vazduha u zemljama koje su bile najviše pogođene, dok je u četvrtom poglavlju data analiza dinamike i specifičnosti mera koje su na predlog Vlade uvedene u Republici Srbiji.

Fizičko-hemijske specifičnosti IOJ, s posebnim akcentom na benzen, u složenom sistemu fizičko-hemijskih procesa, meteoroloških pojava i fotohemijskih reakcija prikazane su u okviru petog poglavlja. U okviru istog poglavlja date su informacije o prirodnim i antropogenim izvorima zagađenja, ali i potencijalnoj opasnosti koje ova grupa jedinjenja bilo direktno ili indirektno može imati na zdravlje ljudi i životnu sredinu.

U šestom poglavlju detaljno je opisan proces prikupljanja podataka koji su korišćeni u analizi. To uključuje merenje koncentracija isparljivih organskih jedinjenja (IOJ) pomoću uređaja PTR-MS i meteoroloških parametara korišćenjem Vaisala meteorološke stanice. Takođe, korišćeni su podaci o zagađenju vazduha iz Nacionalne mreže za kvalitet vazduha (SEPA, 2022), kao i modelirani meteorološki parametri preuzeti iz Globalnog sistema za asimilaciju podataka (GDAS, 2022). Dodatno, korišćeni su i podaci o vladinim merama, toku pandemije, ekonomskim pokazateljima i obrascima mobilnosti ljudi, preuzeti iz baza podataka *Oxford* (2022), *Worldometer* (2022), *Apple* (2022) i *Google* (2022).

U okviru sedmog poglavlja dat je prikaz najvažnijih analitičkih metoda korišćenih u disertaciji. Za potrebe određivanja moguće prostorne distribucije izvora emisije benzena pre i tokom vanrednog stanja, primenjena je analiza polarnog dijagrama (*Bivariate polar plot analysis*). Za

identifikaciju i grupisanje sličnih karakteristika kao i kvatifikovanje udela događaja povezanih sa dobijenim klasterima korišćena je analiza polarnih klastera. Veza između faktora životne sredine u vanrednim okolnostima i benzena utvrđena je primenom okvira za analizu podataka razvijenog u okviru projekta *crAIRsis* zasnovanog na sedam regresionih modela mašinskog učenja (*AdaBoost, CatBoost, EktraTrees, Gradient Boosting, Histogram Gradient Boosting, LightGBM i KSGBoost*). U okviru osmog poglavlja dat je prikaz metoda za evaluacije i optimizacije modela. Optimizacija hiperparametara tri modela mašinskog učenja sa najboljim performansama sprovedeno je primenom 6 algoritama metaheuristika (*Firefly Algorithm, Artificial Bee Colony, Harris Hawks Optimization, Sine Cosine Algorithm, Slime Mould Algorithm i Quantum Superposition Algorithm*). Za interpretaciju, objašnjenje modela sa najboljim predviđanjem korišćene su XAI metode SAGE i SHAP. Za svođenje visokodimenzionalnih podataka na niždimenzioni prostor korišćena je tehnika *Uniform Manifold Approximation and Projection* (UMAP), dok je za hijerarhijsko grupisanje i identifikaciju klastera primenjen algoritam *Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (HDBSCAN).

Prikaz rezultata dat je u osmom poglavlju i podeljen u četiri segmenta. Prvi segment analizira stanje kvaliteta vazduha u Beogradu pre i tokom vanrednog stanja, s posebnim fokusom na promene koncentracija osnovnih zagađujućih materija, benzena i drugih organskih jedinjenja obuhvaćenih analizom. Drugi segment istraživanja posvećen je identifikaciji i kvantifikaciji dominantnih izvora emisije benzena pre i tokom vanrednog stanja uvedenog kao odgovor na pandemiju COVID-19. Treći segment ispituje uticaj faktora životne sredine na raspodelu benzena u istom periodu, s naglaskom na tri specifična režima koja su obeležila početak pandemije. I poslednji, četvrti segment, rezultata istraživanja obuhvata analizu posledica ograničenja mobilnosti i promena u ponašanju stanovništva na koncentracije benzena tokom trajanja vanrednog stanja.

Promene u aktivnostima ljudi i izmenjeni uticaji na životnu sredinu tokom pandemije mogu se posmatrati kao svojevrsni prirodni „eksperiment“ koji pruža jedinstvenu priliku za identifikaciju i razumevanje veza između izvora emisije zagađujućih materija, antropogenih aktivnosti, atmosferske hemije i meteoroloških uslova koji zajedno utiču na koncentracije benzena u urbanim sredinama. Polazeći od tog okvira, ova disertacija, primenom veštačke inteligencije, doprinosi otkrivanju i objašnjenju značajnih odnosa između ekoloških i društvenih promena i kvaliteta vazduha u kriznim situacijama, konkretno u periodu pandemije COVID-19.

Upotreba veštačke inteligencije u analizi kvaliteta vazduha predstavlja ne samo važan naučno-tehnološki doprinos, već i ključnu komponentu u ostvarivanju ciljeva Strategije razvoja veštačke inteligencije u Republici Srbiji (Vlada Republike Srbije, 2020a). Takođe, ona čini značajan korak ka izgradnji sveobuhvatne baze podataka koja može unaprediti efikasnost delovanja u oblasti zaštite vazduha, očuvanja životne sredine i unapređenja javnog zdravlja.

3. Pandemija virusa SARS-CoV-2 (COVID 19) i njen uticaj na kvalitet vazduha u svetu

U mnogim zemljama u razvoju, ekonomski prosperitet je neretko pratio porast emisije zagađujućih materija u vazduh, često sa ozbiljnim posledicama po životnu sredinu i zdravlje stanovništva. Procenjuje se da je dugotrajna izloženost samo čestičnom zagađenju vazduha povezana sa oko 8,9 miliona dodatnih smrtnih slučajeva godišnje (Burnett i koautori, 2018). Kao glavni izvori zagađenja vazduha navode se proizvodnja električne energije, industrijski procesi, saobraćaj, korišćenje energije u domaćinstvima i poljoprivreda (Kukolj i koautori, 2024).

Pandemija COVID-19, uzrokovana virusom SARS-CoV-2, uticala je na gotovo sve zemlje sveta od početka njenog izbijanja u decembru 2019. godine. Prvi put je virus detektovan u kineskom gradu Wuhan, nakon čega se velikom brzinom proširio i na ostale delove sveta (Mathieu, 2020; Sadeghmoghadam i koautori, 2023; Zhu i koautori, 2020). Brzo širenje virusa dovelo je do toga da SZO 30. januara 2020. proglašava vanrednu situaciju od međunarodnog značaja za javno zdravlje (*Public health emergency of international concern* – PHEIC), nakon čega je usledilo i proglašenje pandemije 11. marta 2020. godine.

Pandemija COVID-19 pokrenula je reakcije vlada širom sveta, u vidu implementacije čitavog niza mera koje su imale za cilj sprečavanje širenja virusa. Uobičajene mere uključivale su restrikcije putovanja u vidu delimičnog ili potpunog zatvaranje međunarodnih granica, zatvaranje škola, neesencijalnih poslova, ograničenje mobilnosti građana, kao i zabrane javnih okupljanja. Situacija je potpuno izmenila pa čak i u pojedinim periodima potpuno zaustavila ekonomske aktivnosti povezane sa transportom i mobilnošću. Ove intervencije, efikasne u ublažavanju širenja COVID-19, izazvale su značajne promene u svakodnevnom ponašanju i rutini ljudi, što je, kako se kasnije pokazalo, u velikoj meri uticalo na stanje kvaliteta vazduha.

Novonastala situacija, u kojoj se mogla ispratiti veza pandemije COVID-19 i kvaliteta vazduha, privukla je značajnu pažnju. Činjenica je da je ova društvena kriza dovela do niza zdravstvenih, socijalnih, ekonomskih i političkih posledica, sa jedne strane, ali je i doprinela da mnogi regioni iskuse prolazna poboljšanja kvaliteta vazduha usred vrhunca pandemije.

Postoje mnoge studije koje su analizirale uticaj pandemije COVID-19 i uvođenje restriktivnih mera na kvalitet vazduha u zemljama koje su bile najviše pogođene virusom. Uopšteno, većina ovih studija sugeriše da su mere, poput ograničavanja kretanja, redukovanje saobraćaja i preporuke za rad od kuće imale pozitivan uticaj na kvalitet vazduha, posebno u gradskim

sredinama (Addas & Maghrabi, 2021; Gautam, 2020; Mousazadeh i koautori, 2021; Rume & Islam, 2020; Venter i koautori, 2020).

U nekim zemljama, poput Kine, nivo zagađenja vazduha je drastično opao tokom prvih nekoliko meseci pandemije, kada su uvedene najstrože mere (Hasnain i koautori, 2021). Prema istraživanju sprovedenom od strane Zhang i saradnika (Y. Zhang i koautori, 2023), u okviru kog je praćena promena koncentracije zagađujućih materija u 345 gradova Kine, rezultati su pokazali značajno smanjenje koncentracija NO_2, SO_2 i PM_{10}, u rasponu od 15 do 30%. Posebno značajan pad koncentracija zagađujućih materija u vazduhu beleži se u periodu januar-mart 2020. godine, sa najvećim smanjenjem u februaru, kada su u većini gradova na snazi bile najoštrije restriktivne mere. U tom periodu se procenjuje smanjenje emisije SO_2, NOx, CO, ne-metanskih isparljivih organskih jedinjenja i primarnih $PM_{2,5}$ za 27%, 36%, 28%, 31% i 24%, respektivno, u poređenju sa istim periodom 2019. godine. Međutim, tokom sprovođenja najstrožih mera zatvaranja koncentracije O_3 beležile su porast u poređenju sa istim periodom 2019. godine u mnogim urbanim područjima Kine, što se dovodi u vezu sa smanjenjem koncentracija NOx i IOJ, osnovnih prekursora koji učestvuju u reakcijama sa O_3. U aprilu kada je zabeležena blaža epidemiološka slika, antropogene emisije u Kini su se postepeno vraćale na stari režim rada što je doprinelo brzom povratku kvaliteta vazduha na stanje iz 2019. godine (K. Zhang i koautori, 2022; Zheng i koautori, 2021).

Slični trendovi u pogledu izmena kvaliteta vazduha tokom pandemije primećeni su i u drugim zemljama širom sveta, uključujući Italiju, Španiju, Francusku, Indiju i Sjedinjene Američke Države (Saha i koautori, 2022). Tako je u Italiji analiziranjem stanja kvaliteta vazduha u 104 provincije zabeleženo da su tokom sprovođenja mera zatvaranja usled pandemije COVID-19 koncentracije NO_2 pokazali najveći pad, do čak 48%, što je doprinelo značajnom poboljšanju kvaliteta vazduha urbanih sredina. Međutim, za razliku od azotovih oksida u nekim provincijama Italije nije zabeležen značajniji pad koncentracija suspendovanih čestica. Naprotiv u nekim provincijama je zabeleženo povećanje koncentracija PM_{10} što se dovelo u vezu sa individualnim ložištima, kao i koncentracije SO_2 koji može biti poreklom iz prehrambene industrije, sektora koji je samo donekle pogođen restriktivnim merama zbog svog statusa esencijalnog. Napoli je jedina provincija u Italiji u kojoj je zabeleženo smanjenje koncentracija svih praćenih zagađujućih materija, uključujući i ozon (7%) (Aragão i koautori, 2024; Donzelli i koautori, 2020), što može biti posledica regionalnih karakteristika.

Tokom pandemije COVID-19 i u velikim gradovima u Španiji uočene su promene u kvalitetu vazduha. Smanjenje mobilnosti tokom karantina dovelo je do redukcije saobraćaja od čak 80%,

što se održalo na sličnom nivou i tokom postepenog popuštanja mera. Posledično, analiza koncentracija zagađujućih materija ukazuje na pad vrednosti NO_2 ispod polovine preporučenih koncentracija u smernicama SZO, dok su nivoi $PM_{2,5}$ zabeležili manji pad zbog doprinosa drugih izvora, uključujući emisije iz industrije, poljoprivrede, sagorevanja biomase i domaćinstava (Lorenzo-Sáez i koautori, 2022; Querol i koautori, 2021). Prema istraživanju Briz-Redón-a i saradnika (2021), koje je obuhvatilo 11 reprezentativnih gradova Španije u periodu od sredine marta do sredine aprila 2020. godine, uzimajući u obzir osim koncentracija zagađujućih materija i meteorološke parametre, uočeno je značajno smanjenje koncentracija azotovih oksida u 10 gradova među kojima su i najnaseljeniji Madrid, Barselona, Sevilja i Valensija. Tokom razmatranog perioda zatvaranja došlo je do smanjenja i drugih zagađujućih materija kao što su CO_2, CO i PM. Mada, kao i u većini analiziranih zemalja, koncentracije ozona su pokazale kompleksne odgovore u mnogim urbanim sredinama, što se uglavnom ogleda kroz porast njegove koncentracije tokom pandemije.

Pandemija COVID-19, uprkos svojim izazovima, pružila je retku priliku Indiji da prikupi važne podatke o zagađenju vazduha. Tokom pandemije, kvalitet vazduha u ovoj zemlji je bio podložan značajnim promenama, pri čemu su neke regione pogodili izuzetno visoki nivoi zagađenja. Prema podacima SZO nekoliko gradova u Indiji se našlo na listi gradova sa najzagađenijim vazduhom na svetu u periodu pandemije. Međutim, uprkos svim okolnostima, nacionalno zatvaranje koje je stupilo na snagu 25. marta 2020. godine dovelo je do značajnog smanjenja nivoa zagađenja vazduha. Zabeležena su smanjenja koncentracija PM_{10}, $PM_{2,5}$, CO, NO_2 i SO_2 u rasponu od 33 do 53% u poređenju sa nivoima pre uvođenja mera zatvaranja. Kao i u većini navedenih zemalja, koncentracije O_3 pokazale blagi porast tokom trajanja mera zatvaranja, najverovatnije kao posledica smanjenih koncentracija prekursora NOx i IOJ koji učestvuju u reakcijama atmosferske hemije u kojima se troši O_3. U svakom slučaju, ukupni trend ukazuje na poboljšanje kvaliteta vazduha (Verma & Kamyotra, 2021). Prema istraživanju Mishra i saradnika (2021), koje je obuhvatilo analizu stanja kvaliteta vazduha tokom pandemije u 16 glavnih gradova Indije, pokrivajući time veliki deo teritorije od severa ka jugu zemlje, zabeleženo je značajno smanjenje vrednosti indeksa kvaliteta vazduha (AQI) u poređenju sa referentnim periodom (2017-2019. godina), što je rezultat smanjenja vrednosti koncentracija $PM_{2,5}$, PM_{10} i CO u intervalu od 30 do 50%. Maksimalno smanjenje od 40 do 60% zabeleženo je za koncentracije NO_2. U zavisnosti od brojnih faktora koji utiču na kretanje koncentracija pojedinih zagađujućih materija u vazduhu, podaci pokazuju regionalne varijacije, pri čemu su severni, zapadni i južni regioni Indije doživeli različite nivoe smanjenja zagađenja.

Ispitivanja kvaliteta vazduha širom Sjedinjenih Američkih Država tokom pandemije COVID-19 takođe ukazuju na značajan pad nivoa zagađenja, uključujući i smanjenje od oko 30% u koncentracijama NO_2. Ovakav nalaz u direktnoj vezi je sa smanjenjem saobraćaja usled prelaska na rad od kuće i ograničenja putovanja unutar zemlje (Muhammad i koautori, 2020b). Važno je napomenuti da su urbani okruzi, u poređenju sa ruralnim, pokazali veće procentualno smanjenje NO_2 (26,0% naspram 16,5%), pri čemu je apsolutno smanjenje gotovo pet puta bilo veće u urbano orijentisanim sredinama. Iako je uočen ukupan pad vrednosti koncentracija $PM_{2,5}$, razlike su bile posebno izražene u urbanim okruzima i okruzima sa ranim zatvaranjem neesencijalnih preduzeća. Procenat promene $PM_{2,5}$ nije bio toliko veliki kao u slučaju NO_2, što može biti posledica toga da nivou $PM_{2,5}$ doprinose i drugi izvori mimo saobraćaja, uključujući emisije iz prehrambene industrije i sagorevanje biomase (Berman & Ebisu, 2020).

Globalni odgovor na pandemiju COVID-19 nesumnjivo je doveo do smanjenja ekonomske i saobraćajne aktivnosti širom sveta. Paralelno sa socioekonomskim posledicama, ove promene su imale i neposredan uticaj na kvalitet vazduha, jer su smanjena mobilnost i usporavanje privrednih aktivnosti rezultirali kratkotrajnim smanjenjem emisija zagađujućih materija. Iako je u većini zemalja tokom trajanja restriktivnih mera zabeleženo privremeno poboljšanje kvaliteta vazduha, važno je napomenuti da su se, po ukidanju tih mera, koncentracije zagađujućih materija uglavnom vratile na prethodne nivoe. U tom kontekstu, pandemija COVID-19 može se posmatrati kao katalizator dugoročnih promena, poput ubrzanog prelaska na čistije izvore energije i sve raširenijeg modela rada na daljinu – faktora koji potencijalno dugoročno utiču na dinamiku kvaliteta vazduha (Gollakota & Shu, 2023; Hernandez Carballo i koautori, 2022). Štaviše, aktuelna istraživanja nastoje da razjasne kompleksne veze između zagađenja vazduha i ishoda bolesti COVID-19, dodatno naglašavajući važnost rešavanja problema kvaliteta atmosfere kako u kontekstu pandemije, tako i u širem okviru javnog zdravlja i održivog razvoja.

4. Pandemija COVID 19 u Republici Srbiji – hronologija uvođenja i relaksacije restriktivnih mera

Od kraja 2019. godine kada je respiratorna bolest COVID-19 izazvana virusom SARS-CoV-2 prvi put zabeležena u kineskom gradu Wuhan, ubrzano je počela da se rasprostire širom sveta. Vođeni iskustvima i preporukama drugih zemlja, pre svega Italije, gde je epidemiološka situacija bivala sve lošija, u Republici Srbiji je krajem februara 2020. godine započela primena prvih blagih mera. One su na početku bile na nivou preporuka i obustave putovanja u severne delove Italije, kao i saveta za pojačanjem mera lične higijene i nošenja zaštitnih maski. Prvi slučaj infekcije virusom SARS-CoV-2 u Republici Srbiji zvanično je potvrđen 6. marta 2020. godine, nakon što je testiranje obavljeno u Institutu „Torlak“, ovlašćenom za laboratorijsku dijagnostiku virusa. Drugi slučaj zaražavanja zabeležen je tri dana kasnije, nakon čega su uvedene prve mere radi sprečavanja širenja i suzbijanja epidemije. Prve mere podrazumevale su obustavu ekskurzija u inostranstvo[1], privremenu obustavu letova kompanije *Air Serbia* iz Niša ka Italiji[2], kao i privremenu zabranu ulaska ljudi u Srbiju iz ugroženih područja Italije, određenih delova Švajcarske, Kine, Južne Koreje, kao i iz Irana[3]. Sve mere koje su propisane u cilju sprečavanja širenja epidemije bile su u skladu Zakonom o zaštiti stanovništva od zaraznih bolesti (Sl. glasnik RS, broj 15/2016), Zakonom o zdravstvenoj zaštiti (Sl. glasnik RS", br. 25/2019), Zakonom o javnom zdravlju (Sl. glasnik RS, br. 15/2016), kao i sa uslovima koje je diktirala epidemiološka situacija.

Kao prvi zvanični odgovor na epidemiju, Vlada Republike Srbije je 10. marta 2020. godine donela Odluku o proglašenju bolesti COVID-19 izazvane virusom SARS-CoV-2 (Sl. glasnik RS, br. 23/2020) koja je u skladu sa razvojem epidemiološke situacije menjana i dopunjavana više puta. Aktivnosti koje su se sprovodile pre proglašenja vanrednog stanja su se uglavnom ticale pridržavanja preventivnih mera poput preporuka za nošenje zaštitnih maski, pojačane higijene ruku, dezinfikovanja predmeta za ličnu upotrebu i prostorija u kojima ljudi borave, kao i pridržavanja propisane fizičke distance. U tom periodu, tačnije 12. marta, kada je virus bio potvrđen kod 24 osobe[4], doneta je Naredba o zabrani okupljanja na javnim mestima u

---

[1] *Slobodna Evropa (2020, 9. mart). Srbija zabranila đačke ekskurzije u inostranstvo, dostupno na: . https://www.slobodnaevropa.org/a/30477632.html*

[2] *RTS. (2020, 9. mart). Er Srbija suspendovala letove za Italiju zbog koronavirusa. RTS., dostupno na: https://www.rts.rs/vesti/drustvo/3880822/er-srbija-letovi-italija-sispenzija-koronavirus.html*

[3] *RTS. (2020, 9. mart). Vučić: Zabranićemo ulaz u Srbiju ljudima iz ugroženih područja. RTS., dostupno na: https://www.rts.rs/vesti/politika/3882011/vucic-srbija-koronavirus.html*

[4] *RTS. (2020, 12. mart). Srbija 24: Zaražena virusom korona. RTS., dostupno na: https://www.rts.rs/lat/tv/rts1/3886325/srbija-24-zarazena-virusom-korona.html*

zatvorenom prostoru, koja je podrazumevala zabranu okupljanja više od 100 ljudi. Istog dana doneta je odluka o preusmeravanju međunarodnog putnog saobraćaja na glavne granične prelaze. Vlada Republike Srbije je 14. marta sa potvrđenim 46. slučajem zaražavanja[5], donela nove mere koje su se odnosile na zabranu izvoza osnovnih životnih namirnica i sredstava za higijenu, kao i privremeno ograničenje ulaska na teritoriju Republike Srbije svim stranim državljanima koji dolaze iz Nemačke, Francuske, Slovenije, Grčke, Španije, Austrije i svih delova Švajcarske[6].

Zbog sve većeg broja zaraženih, 15. marta 2020. godine, kada je Srbija brojala 55 pozitivnih slučajeva na COVID-19[7], doneta je Odluka o proglašenju vanrednog stanja (Sl. glasnik RS, br. 29/2020), da bi dan kasnije, bila doneta Uredba o merama za vreme vanrednog stanja (u daljem tekstu Uredba) (Vlada Republike Srbije, 2020b). Mere propisane Uredbom podrazumevale su obustavu rada škola, vrtića, fakulteta, održavanja sportskih, kulturnih i drugih manifestacija, zabranu javnog okupljanja više od 50 ljudi u zatvorenim prostorijama, prelazak na rad na daljinu za sve poslove koji su mogli da isprate takav režim rada, skraćenje radnog vremena ugostiteljskih objekata (restorana, kafića, barova i drugih) do 20 časova, zatvaranje granica, obavezu karantina za državljane koji dolaze iz inostranstva u trajanju od 14 do 28 dana i smanjenje obima javnog gradskog prevoza sa radom po subotnjem režimu. Tri dana nakon uvođenja vanrednog stanja, 18. marta 2020. godine sa potvrđenim 89. slučajem zaražavanja[8], na snagu je stupila Naredba o ograničenju i zabrani kretanja lica na teritoriji Republike Srbije (u daljem tekstu Naredba) kada je proglašena potpuna zabrana kretanja licima sa navršenih 65 godina života u urbanim područjima (preko 5000 stanovnika), a sa navršenih 70 godina života, i u ruralnim sredinama (do 5000 stanovnika), dok je za ostala lica zabrana kretanja važila u periodu od 20 do 05 časova (Sl. glasnik RS, br. 39/2020).

Pored zabrane kretanja građana, od 19. marta kada je broj zaraženih dostigao prvu stotinu (103 slučaja zaraze)[9] proglašena je i potpuna obustava javnog prevoza na teritoriji cele zemlje.

---

[5] *Ministarstvo zdravlja Republike Srbije. (2020, 14. mart). Informacije o novom koronа virusu na dan 14.03. u 20 časova. Zdravlje.gov.rs., dostupno na: https://www.zdravlje.gov.rs/vest/346482/informacije-o-novom-korona-virusu-na-dan-1403-u-20-casova-14-mart-2020.php*

[6] *Info Press. (2020, 16. mart). Zabranjen izvoz osnovnih namirnica, proširen spisak za zabranu ulaska u Srbiju. Info Press., dostupno na: https://www.infopress.rs/drustvo/zabranjen-izvoz-osnovnih-namirnica-prosiren-spisak-za-zabranu-ulaska-u-srbiju/*

[7] *BBC. (2020, 16. mart). Korona virus i vanredno stanje u Srbiji: Šta to znači i koje mere su uvedene. BBC Serbian., dostupno na: https://www.bbc.com/serbian/lat/srbija-51905122*

[8] *Slobodna Evropa (2020, 18. mart). Šest novih slučajeva korona virusa u Srbiji, narednih dana ubrzanje širenja zaraze. Slobodna Evropa., dostupno na: https://www.slobodnaevropa.org/a/30495697.html*

[9] *BBC. (2020, 19. mart). Korona virus: Od sutra u Srbiji potpuno zatvorene granice, ukida se međugradski saobraćaj. BBC Serbian., dostupno na: https://www.bbc.com/serbian/lat/srbija-51957746*

Uvedene su nove mere obustave međunarodnog putničkog avio, drumskog, železničkog i rečnog saobraćaja, kao i međugradskog autobuskog i železničkog saobraćaj uz ostavljanje mogućnost prevoza automobilima. Prvi smrtni slučaj desio se 20. marta 2020. godine[10].

Naredba je u toku trajanja vanrednog stanja menjana četiri puta (Golubović i koautori, 2020). Prva izmena Naredbe bila je 21. marta 2020. godine kojom su lica sa navršenih 65/70 godina života dobili dozvolu kretanja subotom od 3 do 8 časova. Takođe, u okviru ove dopune Naredbe doneta je i zabrana kretanja u svim parkovima i javnim površinama namenjenim za rekreaciju i sport. U istom periodu proglašene su mere za potpuni prestanak rada ugostiteljskih objekata i tržnih centra, a okupljanje ljudi je ograničeno na najviše pet osoba u zatvorenom prostoru[11]. Drugom izmenom Naredbe, 22. marta 2020. godine propisana je zabrana kretanja svim licima u periodu od 17 do 5 časova. Dozvoljeno je bilo jedino izvođenje kućnih ljubimaca u periodu od 20 do 21, u trajanju od 20 minuta, najviše 200 m udaljenosti od mesta prebivališta. Istog dana zabeležen je drugi smrtni slučaj, kao i nagli porast zaraženih koji je prešao drugu stotinu (222 slučaja zaražavanja)[12]. Treća izmena Naredbe bila je 6 dana kasnije u okviru koje je zbog sve lošije epidemiološke situacije uvedena potpuna zabrana kretanja svim licima vikendom u periodu od 15 do 5 sati, a ukinuta je odluka o dozvoljenoj šetnji kućnih ljubimaca. U istom periodu zabranjuje se rad svih pijaca na otvorenom i zatvorenom. Kada je broj zaraženih premašio prvu hiljadu (1117 zaraženih) i kada se broj žrtava popeo na 31, 3. aprila 2020. godine desila se i poslednja izmena Naredbe koja je ujedno bila i najduža zabrana kretanja do tada, obuhvatajući period od subote. 4. aprila 2020. godine u 13, do ponedeljka, 6. aprila u 5 časova, uz izuzetak za šetanje kućnih ljubimaca.

Od 18. marta 2020. godine do 9. aprila 2020. godine ograničenje kretanja u toku vanrednog stanja regulisano je Naredbom o ograničenju i zabrani kretanja lica na teritoriji Republike Srbije, da bi od 9. aprila 2020. godine, pa sve do ukidanja vanrednog stanja 6. maja 2020. godine, ograničenje regulisano izmenama Uredbe o merama za vreme vanrednog stanja.

Prva izmena Uredbe bila je 09. aprila 2020. godine kada je uvedena potpuna zabrana kretanja licima sa navršenih 65/70 godina života, izuzev petkom od 4 do 7 časova. Zabrana kretanja ostalim licima bila je svakog radnog dana od 17 do 5 i vikendom od petka u 17 do ponedeljka

[10] *Slobodna Evropa (2020, 20. mart). Prva žrtva korona virusa u Srbiji. Slobodna Evropa. https://www.slobodnaevropa.org/a/30499974.html*
[11] *RTS. (2020, 21. mart). Borba za živote: Kako se Srbija priprema za borbu sa koronavirusom. RTS. https://www.rts.rs/lat/tv/rts1/3897586/borba-za-zivote.html*
[12] *Slobodna Evropa (2020, 22. mart). Broj zaraženih u Srbiji porastao na 222, dvoje ljudi umrlo. Slobodna Evropa. https://www.slobodnaevropa.org/a/30502715.html*

u 5 sati. Kretanje ljudi koji nisu navršili 65 godina, bilo je dozvoljeno u periodu od 23 do 1 radnim danima, kao i subotom i nedeljom od 8 do 10, u trajanju od 20 minuta, najviše do 200 m udaljenosti od mesta prebivališta, odnosno boravišta u cilju izvođenja kućnih ljubimaca. Druga izmena Uredbe bila je 16. aprila 2020. godine, kada je licima koja nisu navršila 65 godina bilo zabranjeno kretanje za vreme Uskršnjih praznika, odnosno od petka 17. aprila u 17, do utorka 21. aprila u 5 časova, s tim što je izvođenje kućnih ljubimaca dozvoljeno, osim u ranije definisanom vremenskom okviru i u ponedeljak, 20. aprila od 8 do 10 časova.

Izmena Uredbe od 21. aprila 2020. godine predstavljala je ujedno i prvi set mera relaksacije, kada je licima starijim od 65 odnosno 70 godina utorkom, petkom i nedeljom dozvoljeno kretanje u periodu od 18 do 1 časova narednog dana, u trajanju od 30 minuta, u prečniku do 600 m udaljenosti od mesta prebivališta, odnosno boravišta. Pored relaksacije mera po pitanju zabrane kretanja, dozvoljen je rad uslužnim delatnostima (automehaničarskim i vulkanizerskim radnjama, obućarima, krojačima, hemijskom čišćenju, školama za obuku vozača), trgovinama na malo (knjižare, trgovci motornim vozilima, biciklima, nautikom, tehničkom robom, građevinskim materijalom) i u oblasti građevinarstva (visokogradnja i niskogradnja).[13] Takođe, dozvoljen je rad zelenih pijaca na otvorenom i zatvorenom prostoru.[27]

Izmenom Uredbe, 25. aprila 2020. godine bilo je dozvoljeno svakodnevno kretanje licima starijim od 65, odnosno 70 godina u periodu od 18 do 1 čas narednog dana, u trajanju od 60 minuta, u prečniku do 600 m udaljenosti od mesta prebivališta, odnosno boravišta. Kako su parkovi i šetališta, kao i treninzi na otvorenom omogućeni od 28. aprila 2020. godine, zbog sprečavanja okupljanja većeg broja ljudi u duhu prvomajskih praznika, usledio je još jedan duži policijski čas licima koja nisu navršila 65/70 godina, od četvrtka 30. aprila u 18 do subote 2. maja u 5 časova. U tom periodu bilo je jedino dozvoljeno izvođenje kućnih ljubimaca i u periodu od 8 do 10 sati.

Od 4. maja, uz poštovanje distance i korišćenje sredstava zaštite, puštene su u rad i bašte ugostiteljskih objekata, kao i obavljanje drumskog međumesnog prevoza putnika i regionalnog i daljinskog prevoza putnika u železničkom saobraćaju[14]. Narodna skupština Republike Srbije je 6. maja 2020. proglasila ukidanje vanrednog stanja. Zabrana kretanja i upotreba vojske u

[13] *Paragraf. (2020, 20. april). Ublažavanje pojedinih restriktivnih mera za sprečavanje širenja koronavirusa. Paragraf.rs. https://www.paragraf.rs/dnevne-vesti/210420/210420-vest2.html*

[14] *Čekos. (2020.). Odluka o ublažavanju mera zabrane obavljanja javnog prevoza putnika za vreme vanrednog stanja. Čekos. http://www.cekos.rs/odluka-o-ubla%C5%BEavanju-mera-zabrane-obavljanja-javnog-prevoza-putnika-za-vreme-vanrednog-stanja*

civilne svrhe su prestale da važe kao deo mera u vanrednom stanju, pri čemu su na snazi i dalje ostale pojedine mere u cilju smanjenja mogućnosti širenja virusa COVID-19.

Dva dana kasnije, 8. maja 2020, gradski prevoz je vraćen na stari režim rada, a u rad je pušten i železnički i drumski međugradski saobraćaj, uz poštovanje epidemioloških mera distanciranja, nošenja maski, rukavica i redovne dezinfekcije. Istog dana otvoreni su i tržni centri uz veliku dozu opreza, naročito po pitanju broja posetilaca, upotrebe zaštitnih sredstava i od strane korisnika i od strane pružalaca usluga. Od 11. maja dozvoljen je rad vrtića i omogućen je produženi boravak dece u istim[15]. Avio-saobraćaj je pušten 18. maja, ali se odvijao po preporukama i uz sagledavanje epidemiološke situacije u drugim zemljama[16]. Od juna donet je novi set ukidanja restriktivnih mera koji je podrazumevao dozvoljeno okupljanje do 1000 ljudi na otvorenom prostoru i maksimalno 500 u zatvorenom prostoru[17], otvaranje granica za više zemalja u regionu, kao i realizaciju đačkih ekskurzija i nastave u prirodi. Školske i visokoškolske ustanove nastavile su rad na daljinu sve do septembra 2020. godine.

4.1 Restriktivne mere u okviru privrednih aktivnosti

Pandemija virusa COVID-19 i mere koje su preduzete u cilju njenog suzbijanja u Republici Srbiji značajno su promenile način na koji ljudi žive, komuniciraju i rade. Drugim rečima, epidemija je imala značajan uticaj na sve aspekte života, ekonomske, političke i socijalne, što je za posledicu imalo i izmene u pogledu stanja kvaliteta vazduha u Republici Srbiji.

Pored smanjene mobilnosti stanovništva, tokom trajanja vanrednog stanja izmene su se desile u i okviru privrednih aktivnosti. Tako su neke privredne grane bile primorane da sasvim obustave svoju proizvodnju, većina privrednih subjekata je redukovala svoju potrošnju, dok je bilo i onih industrijskih aktivnosti, koje su zbog tehnologije i prirode posla nastavile da posluju po neizmenjenom režimu rada. Polazeći od toga da su glavni antropogeni izvori zagađenja vazduha u Srbiji energetika, individualna ložišta, industrija i saobraćaj, važno je kratko se osvrnuti i na dinamiku poslovanja ovih sektora tokom trajanja vanrednog stanja. Prema analizi koju je sprovela grupa stručnjaka iz Elektromreže Srbije, potrošnja električne energije tokom trajanja vanrednog stanja zabeležila je pad od 3% u odnosu na prosek potrošnje u istom periodu

---

[15] *Propisi. (2020). Mere vlade donete nakon ukidanja vanrednog stanja. Propisi.com. http://www.propisi.com/mere-vlade-donete-nakon-ukidanja-vanrednog-stanja.html*

[16] *Moj Novi Sad. (2020, 18. maj). Počeli komercijalni letovi sa aerodroma Nikola Tesla. Moj Novi Sad. https://www.mojnovisad.com/vesti/poceli-komercijalni-letovi-s-aerodroma-nikola-tesla-id33407.html l*

[17] *Južne Vesti. (2020, 5. jul). Dupliran broj pozitivnih na kovid, a vlada dodatno relaksira mere. Južne Vesti. https://www.juznevesti.com/Servisne-informacije/Dupliran-broj-pozitivnih-na-kovid-a-Vlada-dodatno-relaksira-mere.sr.html*

2015-2019. godine (Jurišević i koautori, 2020). Jedini porast potrošnje električne energije vezuje se za prvih dvadesetak dana vanrednog stanja, što je posledica hladnog perioda sa nižim temperaturama od prosečnih martovskih temperatura i sprovođenja politike karantina. Mada, već početkom aprila kada je nastupio period neuobičajeno toplog vremena, ali i sve lošija epidemiološka situacija, pooštravanje mera karantina, redukovanje aktivnosti privrednih subjekata kao i prestanak rada transportnih, uslužnih i trgovinskih delatnosti, doprineli su padu potrošnje električne energije u odnosu na prosek.

Izmene u domenu saobraćaja, kao važnog izvora emisije zagađujućih materija u vazduh, tokom trajanja vanrednog stanja dostigle su ekstremne vrednosti, naročito od 20. marta kada je došlo do ukidanja svakog vida javnog prevoza.

Restriktivne mere u domenu industrijske proizvodnje bile su uslovljene prirodom tehnološkog procesa i potrebom za redovnim snabdevanjem tržišta. S tim u vezi, naftna industrija nije beležila veće oscilacije u radu, dok su s druge strane hemijska, farmaceutska i industrija duvana zabeležile porast u proizvodnji tokom vanrednog stanja. Proizvodnja prehrambene industrije je imala oscilacije u proizvodnji tokom trajanja vanrednog stanja, što je i bilo u skladu sa dinamikom pooštravanja mera karantina tokom aprila, kada je zabeležen pad proizvodnje od 11% u odnosu na isti mesec 2019. godine. Međutim, već u maju proizvodnja je dostigla obim iz prethodne godine (Vukotić-Cotić i koautori, 2020).

5. Osnovne karakteristike isparljivih organskih jedinjenja

Organska jedinjenja su hemijska jedinjenja koja sadrže ugljenik, obično u kombinaciji s vodonikom, kiseonikom, azotom, sumporom ili drugim elementima. Ugljenik je ključni element zbog svoje sposobnosti da formira stabilne kovalentne veze, međusobno i sa drugim elementima. Ova svojstva ugljenika omogućavaju raznovrsnost struktura i karakteristika organskih molekula.

Organska jedinjenja se mogu podeliti na neisparljiva i isparljiva, a ključna razlika između njih leži u sposobnosti da pređu iz tečnog ili čvrstog stanja u gasovito pri normalnim uslovima temperature i pritiska. Neisparljiva organska jedinjenja često uključuju supstance visoke molekulske mase, kao što su polimeri, ulja, masti i drugi materijali sa složenijom strukturom, koja zadržavaju svoje tečno ili čvrsto stanje pri normalnim uslovima. Obično imaju više tačke ključanja zbog čega nalaze primenu u industrijskim procesima gde je stabilnost na visokim temperaturama jedna od poželjnijih karakteristika.

S druge strane, isparljiva organska jedinjenja predstavljaju klasu hemijskih jedinjenja male molekulske mase, koji u svom sastavu sadrže do 15 ugljenikovih atoma. Karakteriše ih sposobnost brze konverzije iz tečnog ili čvrstog u gasovito stanje pri relativno niskim temperaturama (ispod 250°C) i normalnom atmosferskom pritisku od 101,3 kPa (WHO, 1989). Prema definiciji Agencije za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (*United States Environmental Protection Agency* – USEPA), isparljiva organska jedinjenja su ona jedinjenja koja imaju pritisak pare veći od 10 Pa na 25°C, tačku ključanja do 260°C na atmosferskom pritisku i 15 ili manje atoma ugljenika (R. M. Harrison i R. E. Hester, 1995; Ralf Koppmann, 2007).

Grupa IOJ broji više od 10 hiljada jedinjenja koja se u zavisnosti od molekulske strukture i funkcionalnih grupa mogu podeliti u nekoliko kategorija: hlorovani, oksidovani, azotni aromatični ugljovodonici, alkoholi, etri, estri, aldehidi, ketoni, jedinjena sumpora i dr. I pored toga što veliki broj jedinjena spada u grupu IOJ, u životnoj sredini su najzastupljeniji benzen i njegovi derivati toluen, etilbenzen i o-, m- i p-ksilen (grupa jedinjenja BTEX), koji čine više od 60% ukupne koncentracije IOJ u urbanim sredinama, naročito u zonama sa intenzivnim saobraćajem (Montero-Montoya i koautori, 2018).

5.1 Izvori emisije isparljivih organskih jedinjenja

Isparljiva organska jedinjenja potiču kako iz prirodnih, tako i iz antropogenih izvora. Globalno gledano, uz izuzimanje metana (NASA, 2024) prirodni izvori IOJ su dominantni, a pretežno proizlaze iz biogenih emisija. Zbog raznolikosti načina na koji dospevaju u atmosferu, kao i klimatskih uticaja na njihovu emisiju, teško je napraviti procenu emitovanih količina biogenih isparljivih organskih jedinjenja (BIOJ) u atmosferu. Prema različitim istraživanjima globalne biogene emisije IOJ kreću se od 312 do 1300 TgC godišnje (A. Guenther i koautori, 1999; A. Guenther i koautori, 1995; Wiedinmyer i koautori, 2004; Williams i koautori, 2013), što je nekoliko puta više od procenjenih globalnih antropogenih emisija IOJ od 98-156 TgC godišnje (Yeoman i Lewis, 2021).

Većina biogenih emisija potiče iz krošnji drveća šumskih ekosistema, sa manjim doprinosom druge kopnene vegetacije, vodenih ekosistema i zemljišta (Guenther i koautori, 1999). Vodeća BIOJ su izoprenoidi, poput izoprena i monoterpena. Zbog visoke reaktivnosti i kratkog životnog veka, BIOJ veoma brzo oksiduju sa gotovo svim troposferskim oksidansima, pri čemu mogu značajno uticati na oksidacioni kapacitet atmosfere (Taraborrelli i koautori, 2012).

Bez obzira na to što globalno gledano prirodni izvori ovih jedinjenja dominiraju, koncentracija IOJ u urbanim sredinama je u najvećoj meri determinisana brojem i raspodelom antropogenih izvora. Mogu poticati iz gotovo svih aktivnosti ljudi. Različiti procesi poput petrohemijskih industrijskih procesa, emisije iz saobraćaja, proizvodnja energije iz ugalja, sagorevanje biomase, građevinski projekti, hemijsko čišćenje i dr. značajno doprinose emisiji IOJ u urbanim sredinama (Banaszkiewicz i koautori, 2022; David i Niculescu, 2021).

Doprinos saobraćaja u emisiji isparljivih organskih jedinjenja može biti značajan, posebno u urbanim sredinama koje obično karakterišu guste saobraćajne mreže. Za razliku od zagađujućih materija koje potiču iz izduvnih gasova motornih vozila, pojedina IOJ se emituju u vazduh i kada motor nije u radu. Grube procene su da evaporativne emisije (iz zagrejanog karburatora i rezervoara) mogu činiti i do 40% ukupne emisije IOJ iz vozila (Đarmati, 2009). Na kraju, doprinos saobraćaja u ukupnoj emisiji IOJ može varirati u zavisnosti od lokacije, tipa vozila, kvaliteta goriva i tehničkog stanja vozila. Dok automobili na benzin emituju velike količine aromatičnih i alifatičnih ugljovodonika tokom hladnog starta, dizel automobili emituju dvostruko manje IOJ, posebno karbonile i nezasićene ugljovodonike (Alvaro Martinez, 2019; Baek i koautori, 2022). Takođe, intenzivnija vožnja u poređenju sa uobičajenim stilom vožnje

može povećati emisiju IOJ u rasponu od 15% do 400% (De Vlieger, 2000; Alvaro Martinez, 2019; Baek i koautori, 2000; Stanković i koautori, 2021).

Kako ova jedinjenja imaju široku primenu kao rastvarači u procesima, poput farbanja, čišćenja, štampanja, proizvodnje plastike i dr, značajan doprinos ukupnoj količini IOJ u vazduhu sa oko 49%-64% predstavljaju industrijska postrojenja (W. Wang i koautori, 2023; Hsu i koautori, 2018). Takođe, isparljivi hemijski proizvodi, koji uključuju proizvode za ličnu higijenu, mogu biti potencijalno značajni izvori IOJ u urbanom okruženju (McDonald i koautori, 2018; Palmisani i koautori, 2020).

5.2 Dinamika isparljivih organskih jedinjenja u atmosferi

Isparljiva organska jedinjenja, imaju značajnu ulogu u atmosferskoj hemiji. Učestvujući u hemijskim i fotohemijskim reakcijama doprinose proizvodnji sekundarnih zagađujućih materija vazduha, prizemnog ozona i sekundarnih organskih aerosola, što je naročito izraženo u urbanim sredinama (L. Cao i koautori, 2024).

Sudbina i ponašanje isparljivih organskih jedinjenja, emitovanih u atmosferu kao posledica aktivnosti ljudi i/ili prirodnih izvora, značajno su određeni emisijom, procesima disperzije, njihovim fizičko-hemijskim karakteristikama, ali i uslovima koji vladaju u životnoj sredini. Ovi faktori utiču na njihov srednji životni vek u atmosferi, koji se može kretati od samo nekoliko minuta do nekoliko meseci pa i godina (Hong i koautori, 2019; Koppmann, 2020; Ragothaman i Anderson, 2017).

Kada dospeju u atmosferu, IOJ prolaze kroz niz procesa koji dovode do njihovog uklanjanja ili transformacije (slika 1). Fizičko uklanjanje može se vršiti na dva načina – mokrom i suvom depozicijom. Mokra depozicija podrazumeva proces uklanjanja putem padavina, dok suva depozicija podrazumeva njihovo direktno taloženje na podlogu ili vezivanje za suspendovane čestice koje ih transportuju do podloge (R. M. Harrison i R. E. Hester, 1995).

Mokra depozicija mnogih IOJ u funkciji je rastvorljivosti u vodi, i može se definisati Henrijevom konstantom. Pri uspostavljanju dinamičke ravnoteže između gasovite faze i kapi, koncentracija posmatranog jedinjena u vodi – C_W (u jedinicama g/m^3 vode), može se izračunati iz koncentracije tog jedinjenja u vazduhu – C_A (u jedinicama g/m^3 vazduha), korišćenjem formule:

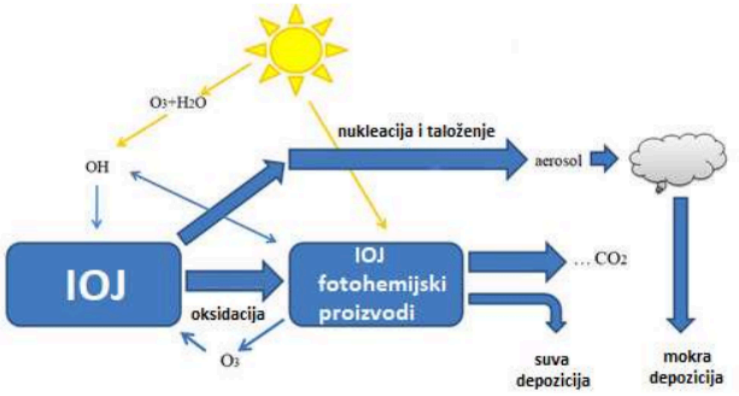
$$C_W = C_A / K_{AW,}$$

gde je K_{AW} temperaturno zavisni koeficijent raspodele vazduh-voda (Radonić, 2009).

U slučaju suve depozicije vreme poluživota IOJ ($t_{1/2}$) može se oceniti primenom brzine depozicije – Vd, ako se pretpostavi visina h, na kojoj je supstanca dobro izmešana (Radonić, 2009):

$$t_{1/2} = 0{,}693h/\ Vd$$

Hemijsko uklanjanje IOJ uključuje proces hemijske oksidacije u gasnoj fazi od strane hidroksilnih radikala ($^{\bullet}OH$) i ozona (O_3), a u manjoj meri i od strane nitratnih ($NO_3^{\bullet}$) radikala.



Slika 1. Uklanjanje IOJ iz atmosfere

Tokom dana, $^{\bullet}OH$ radikal ima centralnu ulogu u oksidaciji IOJ. Nastaje kao rezultat fotolize vode pod uticajem sunčevog zračenja, prema sledećim reakcijama:

$$H_2O + h\nu \rightarrow H^{\bullet} + {}^{\bullet}OH$$

$$H^{\bullet} + H_2O \rightarrow H_2 + {}^{\bullet}OH$$

$$H^{\bullet} + O_2 \rightarrow {}^{\bullet}OH + O^{\bullet}$$

$$O^{\bullet} + H_2O \rightarrow 2\ {}^{\bullet}OH$$

Oksidacija IOJ se obično odvija tako što $^{\bullet}OH$ radikal uklanja atom vodonika iz molekula IOJ, pri čemu, u zavisnosti od strukture jedinjenja, nastaju ili alkilni radikal ($R^{\cdot}$) ili alkoksi radikal ($RO^{\cdot}$), prema reakciji:

$$IOJ + {}^{\bullet}OH \rightarrow R^{\cdot} + H_2O$$

ili

$$IOJ + {}^{\bullet}OH \rightarrow RO^{\cdot} + H_2O$$

Ove reakcije predstavljaju osnovni korak u procesu oksidacije IOJ u atmosferi. Kao vrlo reaktivni molekuli zbog nesparenog elektrona, R• radikali mogu dalje reagovati, na primer, sa O_2 i formirati RO_2• (alkilperoksilni radikal), prema reakciji:

$$R^{\cdot} + O_2 \rightarrow RO_2^{\cdot}$$

U slučaju direktno formiranog alkoksi radikal ($RO^{\cdot}$), takođe dolazi do reakcije sa O_2, s tim što se on češće razlaže na karbonilne produkte i hidroperoksilni radikal (HO_2•):

$$RO^{\cdot} \rightarrow R'CHO + HO_2^{\cdot}$$

U nekim slučajevima, $RO_2^{\cdot}$ može reagovati sa drugim radikalima ili molekulima u atmosferi, pri čemu takođe dolazi do formiranja hidroperoksilnog radikala ($HO_2^{\cdot}$) i oksidacionih karbonilnih produkata poput aldehida, ketona ili organskih kiselina.

$$RO_2^{\cdot} \rightarrow HO_2^{\cdot} + \text{karbonilni produkti}$$

Formiranje međuprodukata $RO_2^{\cdot}$ i $HO_2^{\cdot}$ (D. Chen i koutori, 2022; R. M. Harrison i R. E. Hester, 1995) predstavlja vodeću kariku u lancu reakcija i ima fundamentalnu ulogu, naročito u brzim reakcijama sa NO. U tim reakcijama dolazi do oksidacije NO u NO_2, prema reakcijama:

22

$$RO_2^{\cdot} + NO \rightarrow RO^{\cdot} + NO_2$$

$$HO_2^{\cdot} + NO \rightarrow {}^{\cdot}OH + NO_2$$

Molekul NO_2 predstavlja osnov za odigravanje prirodnog procesa produkcije O_3 u nižim slojevima atmosfere koji se zasniva na fotolizi NO_2 prema reakciji:

$$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O(^3P)$$

Formirani atom kiseonika u tripletnom stanju O (^3P)[18] potom stupa u reakciju sa O_2 formirajući molekul O_3, prema reakciji:

$$O(^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M,$$

[18] *$O(^3P)$ je osnovno stanje atomskog kiseonika (tripletno stanje) i najstabilniji oblik pri normalnim atmosferskim uslovima. Pored ovog stanja, kiseonik može biti prisutan u pobuđenom (singletnom) stanju $O(^1D)$, što je reaktivnije stanje od $O(^3P)$, kao i još više pobuđeno stanje $O(^1S)$, iako se ovo poslednje veoma retko javlja u atmosferi.*

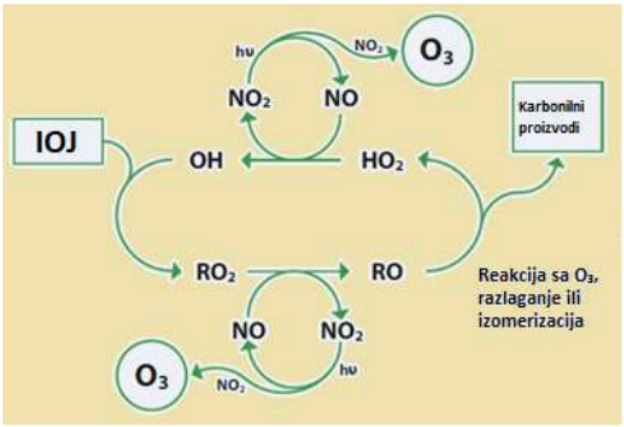
pri čemu je M bilo koji molekul koji može apsorbovati višak energije koji nastaje tokom reakcije, čime pomaže u stabilizaciji sistema.

S druge strane, molekul O_3 uz učešće NO opet generiše NO_2 i O_2, prema reakciji:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

Time se uspostavlja ravnoteža između koncentracija NO, NO_2 i O_3 .

Međutim, kada reakcije formiranja prizemnog ozona iz NO_2 odigravaju u prisustvu IOJ, koja doprinose porastu koncentracije NO_2, dolazi do narušavanja fotohemijske ravnoteže u smeru povećanja koncentracije O_3 (slika 2) u nižim slojevima atmosfere (Đarmati, 2009).



Slika 2. Šematski prikaz formiranja ozona u prisustvu IOJ i NOx (izvor slike: Forsberg i koautori, 2008)

U toku noći kada je koncentracija ˙OH radikala svedena na minimum, glavnu ulogu u oksidaciji IOJ preuzima NO_3˙ radikal (H. Hu i koautori, 2023). Tokom dana, NO_3˙ se brzo gubi usled fotolize i u reakciji sa NO, ali noću, kada sunčeva svetlost nije prisutna, koncentracija NO_3˙ radikala raste i postaje dominantni reaktivni radikal u troposferi. Formira se kao rezultat reakcije NO_2 sa O_3 prema reakciji:

$$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3^{\cdot} + O_2$$

Zbog visoke reaktivnosti, NO_3˙ radikal može učestvovati u različitim reakcijama, regulišući životni vek i koncentracije mnogih hemijskih vrsta gasova u tragovima. Tokom noći, kada je koncentracija NO_3˙ najviša, postoje dve vrste reakcije koje imaju veliki uticaj na stanje kvaliteta vazduha. Jedna od njih je reakcija NO_3˙ radikala i IOJ koja dovodi do formiranja nitriranih organskih molekula i HO_2˙ radikala, što je važno sa stanovišta stvaranja sekundarnih

zagađujućih materija i aerosola. Reakcija između $NO_3^{\cdot}$ i IOJ može se opisati sledećom hemijskom jednačinom:

$$IOJ + NO_3^{\cdot} \rightarrow RNO_3 + HO_2^{\cdot}$$

Pored reakcije sa IOJ, $NO_3^{\cdot}$ može stupati u reakciju i sa NO_2 što dovodi do produkcije N_2O_5 (azotni pentaoksid) koji se dalje uklanja kroz heterogenu hidrolizu.

$$NO_3^{\cdot} + NO_2 \rightarrow N_2O_5$$

$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$$

Ovaj proces ima važnu ulogu u smanjenju koncentracije NOx u atmosferi, dok istovremeno doprinosi formiranju nitratnih aerosola i drugih sekundarnih zagađujućih materija, kao što je nitril hlorid.

Tokom procesa oksidacije, molekuli IOJ mogu reagovati i sa kiseonikom, što dovodi do povećanja njihove molekulske mase i dodavanja polarizovanih funkcionalnih grupa, usled čega postaju manje isparljivi (Nie i koautori, 2022; Robinson i koautori, 2007). Kao rezultat toga, novonastala, manje isparljiva organska jedinjenja pokazuju veću sklonost kondenzaciji ili adsorpciji na površini postojećih čestica u atmosferi, a takođe mogu učestvovati i u formiranju novih čestica. Ovaj fenomen, poznat kao raspodela gasa na česticu, doprinosi stvaranju sekundarnih organskih aerosola (Kulmala i koautori, 2013; Liu i koautori, 2023; Perraud i koautori, 2012). Ovi procesi su posebno značajni u urbanim sredinama, gde je ambijentalnim merenjima utvrđen značajan doprinos antropogenih sekundarnih organskih aerosola (SOA) naspram biogenih u ukupnoj masi organskih aerosola, što dodatno utiče na kvalitet vazduha i zdravlje ljudi (Ding i koautori, 2012).

Reakcije atmosferske hemije u kojima učestvuju isparljiva organska jedinjenja imaju značajnu ulogu u formiranju visoko reaktivnih isparljivih supstanci, što doprinosi formiranju troposferskog ozona, stvaranju organskih aerosola i fotohemijskog smoga u atmosferi, taloženju kiselina i stvaranju drugih sekundarnih zagađujućih materija. Prema brojnim studijama koje se bave stanjem kvaliteta vazduha i njegovim štetnim uticajima, zagađujuće materije, bilo da su primarne ili nastale u procesima transformacije, štetno utiču na zdravlje ljudi, kvalitet životne sredine i pojačavaju efekte klimatskih promena (DEFRA, 2007).

5.3 Uticaj IOJ na zdravlje ljudi i životnu sredinu

Isparljiva organska jedinjenja ispoljavaju različite direktne ili indirektne uticaje na životnu sredinu, materijalna dobra i zdravlje ljudi. Direktni štetni uticaji ove grupe jedinjenja uglavnom

se ogledaju u toksičnim, mutagenim ili kancerogenim efektima na zdravlje ljudi, povećanju globalnog efekta staklene bašte, čime dodatno doprinose klimatskim promenama, kao i oštećenju materijalnih dobara (David i Niculescu, 2021; R. M. Harrison i R. E. Hester, 1995). Izloženost, čak i veoma niskim koncentracijama pojedinih IOJ može dovesti do kratkoročnih ili dugoročnih efekata, što naročito zavisi od njihove prirode, koncentracije i perioda izloženosti (tabela 1).

Tabela 1. Kratkoročni i dugoročni efekti IOJ na zdravlje ljudi[19]

Efekti	Kratkoročni	Dugoročni
Glavobolja	✓	
Iritacija nosa, očiju	✓	
Iritacija kože i sluzokože	✓	
Umor	✓	
Kašalj, bolno disanje	✓	
Pneumonija	✓	✓
Bronhitis	✓	✓
Oštećenje CNS	✓	✓
Kardiovaskularne bolesti		✓
Astma		✓
Karcinomi		✓
Uticaj na jetru, slezinu, krv		✓
Uticaj na reproduktivni system		✓

Shodno tome, neka od IOJ mogu izazvati nadražujuće efekte, druga mogu delovati kao narkotici, dok se pojedina mogu klasifikovati kao toksična i kancerogena. Posebna zabrinutost izražava se za IOJ koja su prisutna u ambijentalnom vazduhu, a koja imaju ili se sumnja da imaju potencijal da izazovu karcinom u populaciji ljudi. Određena IOJ (tabela 2), poput vinil hlorida, benzena, 1,2-dihloropropana, trihloroetilena i 1,3-butadiena klasifikovana su kao kancerogeni agensi od strane Međunarodne agencije za istraživanje raka (IARC, 2024).

[19] *https://meersens.com/volatile-organic-compounds-cov-sources-and-impacts-on-health/?lang=en*

Tabela 2. Spisak kancerogenih i potencijalno kancerogenih IOJ (EWG, 2024)

Jedinjenje	Klasifikacija	Grupa
1,2,3-Trihloropropan	Verovatno	2A
Vinil hlorid	Kancerogen	1
Tetrahloretilen (PCE/PERC)	Verovatno	2A
Ugljen tetrahlorid	Moguće	2B
Benzen	Knacerogen	1
1,1,2-Trihloroetan	Nije klasifikovan	3
1,4-Dioksan	Moguće	2B
1,2-Dihloroetan	Moguće	2B
Stiren	Verovatno	2A
1,2-Dihloropropan	Kancerogen	1
Trihloretilen (TCE)	Kancerogen	1
Dihlorometan (metilen hlorid)	Nije klasifikovan	3
1,3-butadien	Kancerogen	1

IOJ mogu imati štetan uticaj i na određene materijale u njihovoj blizini (AEA Technology, 1999; David i Niculescu, 2021). Zbog svojih oksidacionih i korozivnih svojstava izazivaju direktna oštećenja, poput korozije metala, degradacije plastike i propadanja drugih materijala koji su dugotrajno izloženi njihovom delovanju. Ovi efekti ne samo da narušavaju estetski izgled materijala, već i povećavaju troškove održavanja i zamene.

Kada su u pitanju indirektni uticaji, značajna je uloga IOJ u produkciji troposferskog ozona koji utiče nadražajno na oči i gornje disajne puteve kod ljudi i životinja, šteti rastu biljaka, predstavlja vodeći indikator za procenu intenziteta fotohemijskog smoga i smatra se gasom koji doprinosi efektu staklene bašte. Prizemni ozon, kao snažan oksidant, može uzrokovati oštećenja prirodnih i sintetičkih guma, smola, tekstila i drugih materijala koji se koriste u proizvodnji površinskih premaza, čime se smanjuje njihova trajnost i funkcionalnost. Takođe, brojni su štetni efekti i SOA, koji mogu nastati transformacijom IOJ, od kojih se najčešće navode potencijal za razvoj astme, bronhitisa i drugih ozbiljnih bolesti pluća kod ljudi, kao i neuroloških i kardiovaskularnih bolesti (D. Chen i koautori, 2022).

5.4 Benzen

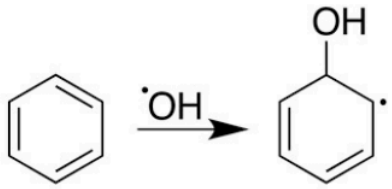
Benzen predstavlja najjednostavniji aromatični ugljovodonik i začetnik je svih aromatičnih jedinjenja koja sadrže jedan ili više benzenovih prstenova. Bezbojna je tečnost molekulske mase od 78,11 g mol^{-1} (NCBI, 2024). Pri koncentracijama od 1,5 ppm karakteriše se slatkastim mirisom (Sekar i koautori, 2019). Nepolarano je jedinjenje, relativno rastvorljivo u vodi, dok se sa polarnim organskim rastvaračima, kao što su hloroform, ugljen-tetrahlorid i ugljen-

disulfid, dobro meša (ATSDR, 2007). Neke od osnovnih fizičkih i hemijskih osobina benzena prikazane su u Tabeli 3. Benzen se može emitovati u ambijentalni vazduh iz različitih prirodnih i antropogenih izvora. Dominantni prirodni izvori benzena su vulkanske aktivnosti, šumski požari, kao i određene biljke koje ga prirodno sadrže. Benzen brzo isparava, a njegova isparenja, koja su teža od vazduha, mogu se spustiti do nivoa tla. Nakon kontakta sa zemljom, benzen brzo prodire kroz tlo i na taj način može doći do kontaminacije podzemnih voda. Prirodno se javlja kao sastojak sirove nafte, a njenom daljom preradom i proizvodnjom motornog goriva, lož ulja, kerozina i bitumena, emisija se nastavlja i putem mnogobrojnih antropogenih procesa, poput petrohemijske industrije, pretakanja, transporta goriva i sl. Osim toga, do emisije benzena dolazi i iz rezervoara za skladištenje goriva, kao i korišćenjem hemijskih rastvarača u mnogim industrijskim procesima i domaćinstvima. Značajni izvori su i izduvni gasovi vozila, sagorevanje fosilnih goriva, dim cigareta, upotreba boja, lakova i drugih materijala. Benzen u atmosferu može dospeti i procesima isparavanja sa zagađenih površina vode ili tla.

Tabela 3. Osnovne fizičko- hemijskih osobina benzena (Šoštarić, 2017)

Parametar	Vrednost
Molarna masa [g/mol]	78,11
Tačka topljenja [°C]	5,558
Tačka ključanja [°C]	80,08
Gustina na 20°C [g/mL]	0,8756
Rastvorljivost u vodi na 25°C [mg/L]	1790
Logaritam koeficijenta raspodele između oktanola i vode (logK$_{OW}$)	2,13
Napon pare na 25°C [mm Hg]	94,8
Henrijeva konstanta na 25°C [mol/atm]	0,21
Jonizacioni potencijal [eV]	9,24
Van-der Waals-ova površina [Å²]	88
Standardna molarna entalpija rastvaranja [kJ/mol]	30,3

Kada se nađe u atmosferi benzen stupa u reakcije sa drugim jedinjenjima, pre svega sa reaktivnim vrstama poput $^{\bullet}OH$, O_3 i $NO_3^{\bullet}$, pri čemu je reakcija sa $^{\bullet}OH$ (slika 3) dominantan proces njegovog uklanjanja iz troposfere. Na to ukazuje i podatak da se prosečno vreme života benzena tokom oksidacije sa $^{\bullet}OH$ procenjuje se na oko 9,5 dana, dok se sa $NO_3^{\bullet}$ i O_3 može meriti i više od 4 godine (R. Atkinson, 2000; R. Atkinson, 1990; Priestley i koautori, 2021).



Slika 3. Reakcija benzena sa •OH

Benzen spada u jedan od najzastupljenijih aromatičnih ugljovodonika u urbanoj atmosferi i prema smernicama za procenu rizika zasnovanim na izlaganju ljudi i studijama na životinjama, klasifikuje kao „poznati kancerogen za ljude“. Iz tog razloga, Evropska unija (EU) je, putem Evropske direktive o kvalitetu vazduha 2008/50/EC[20], uspostavila graničnu vrednost od 5μg/m^3 za prosečnu godišnju koncentraciju benzena u ambijentalnom vazduhu. Pri kratkoročnoj izloženosti ljudi visokim koncentracijama benzena dolazi do iritacije kože, očiju, grla, do pojava glavobolje, mučnine, stanja kome, pa čak i iznenadne smrti (Kumari i koautori, 2023). Dugotrajna izloženost može izazvati pojavu aplastične anemije (Smith, 1996), mijeloidne leukemije (Shallis i koautori, 2021; Snyder, 2012), respiratornih bolesti (Hajrah i koautori, 2020), i drugih zdravstvenih problema kod ljudi (ATSDR, 2007; Halliday i koautori, 2016). Mnoge studije su pokazale da izloženost benzenu može uticati na plodnost izazivajući pojavu hromozomskih oštećenja sperme, što može dovesti do povećanja rizika od spontanih pobačaja, mentalnih i drugih poremećaja kod potomstva (Marchetti i koautori, 2012). Takođe, tokom perioda trudnoće povećane koncentracije benzena u vazduhu mogu povećati rizik od pojave urođenih malformacija i uticati na rast i težinu bebe (Tanner i koautori, 2015; Zahran i koautori, 2012).

[20] *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918&from=DE*

6. Metode uzorkovanja, merenja i preuzimanja podataka iz drugih baza za potrebe analize

Za potrebe ove disertacije vršeno je kontinuirano merenje koncentracija IOJ i meteoroloških parametara, dok su podaci o koncentracijama ostalih zagađujućih materija preuzeti sa najbliže stanice za automatski monitoring (Zemun, Tošin Bunar[21]). Za merenje koncentracija IOJ korišćen je uređaj PTR-MS sa kvadrupolom (model *Standard PTR-quad-MS,* proizvođača *Ionicon Analytik, GmbH, Austrija*), smešten u Laboratoriji za fiziku životne sredine, Instituta za fiziku u Beogradu (slika 4).



Slika 4: Uređaj PTR-MS (model Standard PTR-quad-MS)

6.1 Mesto uzorkovanja

Na vrhu zgrade Instituta za fiziku (*44.86°N, 20.39°E*), na visini 10 metara iznad tla i 2 metra iznad površine krova postavljen je *inlet* uređaja za uzorkovanje, sa pozicijom koja obezbeđuje neometan protok vazduha iz svih pravaca uz maksimalnu minimizaciju lokalnih uticaja. Merna lokacija (slika 5) smeštena je u mirnom stambenom području na obali reke Dunav, 8 km severozapadno od centra Beograda (1) i 2 km od centralnog dela opštine Zemun (2). Oko lokacije smeštene su male stambene zgrade sa individualnim sistemima za grejanje, dok se most Mihajla Pupina (3), značajno saobraćajno čvorište, nalazi 1 km severozapadno od mernog mesta.

[21] http://www.beoeko.com/?lng=hu



Slika 5. Prikaz lokacije mernog mesta

6.2 Eksperimentalna postavka

Eksperimentalna postavka obuhvatala je dve različite linije merenja, jednu za uzorkovanje ambijentalnog vazduha i drugu liniju namenjenu za merenje pozadinskog nivoa i kalibraciju. Uzorkovanje sa krova je vršeno korišćenjem teflonskog creva dužine 10 metara i unutrašnjeg prečnika 3 mm. Implementacijom membranske pumpe, obezbeđen je kontinualni protok vazduha i postignuto minimalno zadržavanje uzorka tokom analize i osiguranje reprezentativnosti prikupljenih uzoraka. Tokom merenja kvantifikovano je 249 protonizovanih molekulskih masa IOJ u opsegu od 21 do 270 amu (*atomskih jedinica mase*), sa ciklusom merenja u trajanju oko 50 sekundi (Lindinger i koautori, 1998; Stojić i koautori, 2015; Radić i koautori, 2025).

Tokom merenja koncentracija IOJ simultano su beleženi podaci o vrednostima osnovnih meteoroloških parametara korišćenjem stanice proizvođača *Vaisala*[22], instalirane takođe na krovu Instituta za fiziku u Beogradu. Na taj način su dobijene desetominutne vrednosti temperature, pritiska, vlažnosti vazduha, pravca i brzine vetra, kao i količine padavina.

Kontinuirana merenja IOJ i meteoroloških podataka vršena su svakodnevno u periodu od 2. marta do 15. maja 2020. godine, osim na dan proglašenja vanrednog stanja, 15. marta. Tokom analiziranog perioda postojali su kraći prekidi merenja, od po 10 minuta dnevno, za određivanje pozadinskog nivoa koncentracija, a tri puta je merenje prekinuto da bi se uradila kalibracija

[22] https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/weather-transmitter-wxt530-series

uređaja. Ograničenja izazvana policijskim časom tokom pandemije uticala su na učestalost kalibracije i merenja pozadinskog nivoa koncentracija.

6.3 Merenje koncentracija isparljivih organskih jedinjenja primenom masene spektrometrije sa transferom protona

Metoda masene spektrometrije sa transferom protona predstavlja visoko osetljivu tehniku za detekciju i kvantifikaciju isparljivih organskih jedinjenja (IOJ) u realnom vremenu, bez potrebe za prethodnom pripremom uzorka. Zasniva se na hemijskoj jonizaciji analiziranih molekula putem transfera protona sa primarnih H_3O^+ jona, pri čemu se dobijaju protonizovani molekuli koji se dalje analiziraju masenim spektrometrom. Metodu karakteriše meka jonizacija, jer je energija oslobođena u hemijskim reakcijama protonizacije molekula nedovoljna da dođe do fragmentacije molekula. Uslov za detekciju IOJ je da imaju afinitet prema protonu (AP) veći od molekula vode (166,5 kcal mol^{-1} = 697 kJ mol^{-1} ~ 7,2 eV) i da im molekulska masa bude u opsegu od 21 do 512 amu (Šoštarić, 2017; Stojić, 2015).

PTR-MS se koristi za analizu IOJ poreklom iz različitih, kako prirodnih tako i antropogenih izvora. Pored primene u atmosferskoj hemiji za praćenje emisije, distribucije i hemijske evolucije IOJ u vazduhu (Hewitt i koautori, 2003; Yuan i koautori, 2017), ova tehnika se može koristiti i u medicinskim ispitivanjima za analizu daha (Löser i koautori, 2020; Pugliese i koautori, 2019), kao i u prehrambenoj industriji za analizu kvaliteta hrane na osnovu emisije IOJ (Majchrzak i koautori, 2021; Mazzucotelli i koautori, 2022). Njena široka primena zasniva se na mogućnosti merenja koncentracija gasova u realnom vremenu, bez potrebe za prethodnom pripremom uzorka, uz visoku osetljivost, nizak prag detekcije i jednostavne spektre koji omogućavaju kvantifikaciju. Zahvaljući navedenim performansama, PTR-MS omogućava detekciju i kvantifikaciju širokog spektra IOJ prisutnih u tragovima, uključujući i one sa visokom reaktivnošću, odnosno kratkim vremenom zadržavanja u atmosferi. Pored navedenog, mogućnost identifikacije i analize brzih promena u atmosferskim uslovima, kao i indentifikacija lokalizovanih izvora zagađenja, čine ovu tehniku dragocenim alatom u istraživanju atmosferske hemije i kvaliteta vazduha, pružajući detaljan uvid u dinamiku i kompleksnost hemijskih procesa koji se odvijaju u atmosferi.

Tehnika, kako je ranije navedeno, temelji se na konceptu meke jonizacije, pri kojoj dolazi do reakcije između analiziranih molekula i H_3O^+ jona. Ova reakcija rezultira formiranjem protonizovanih molekula, koji se potom razdvajaju i analiziraju putem masene spektrometrije. Karakteristika meke jonizacije je visoka efikasnost – gotovo svaki sudar sa H_3O^+ jonom dovodi

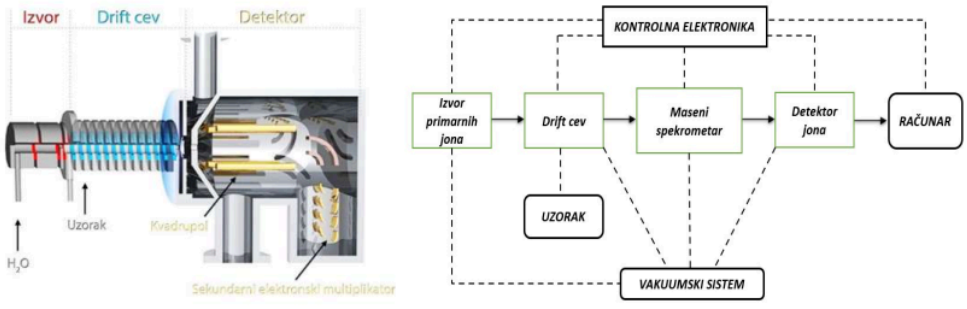
do jonizacije IOJ. Za razliku od drugih metoda jonizacije koje često dovode do fragmentacije, ova tehnika omogućava minimalno raspadanje molekula, čime se povećava tačnost identifikacije i kvantifikacije.

PTR-MS se odlikuje visokom osetljivošću i selektivnošću, što je čini posebno pogodnom za detekciju IOJ u tragovima. Jedna od ključnih prednosti ove tehnike je što analit zadržava u nepromenjenom obliku, čime se poboljšava kvalitet podataka i olakšava interpretacija spektra. U poređenju s drugim analitičkim metodama, PTR-MS se izdvaja brzinom i mogućnošću merenja koncentracija u realnom vremenu. Nasuprot tome, gasna hromatografija (GC), iako izuzetno tačna i specifična, često zahteva složene korake uzorkovanja i prekoncentracije, što može dovesti do gubitka analita i kontaminacije (Ligor, 2009; Majchrzak i koautori, 2018). S druge strane, tehnike kao što je jonizaciona mobilna spektrometrija (IMS) obezbeđuju brzu analizu, ali su ograničene kada je reč o osetljivosti i specifičnosti (Chow i koautori, 2012).

PTR-MS nesumnjivo nudi značajne pogodnosti u istraživanju atmosferske hemije IOJ i kvaliteta vazduha, mada poznavanje i razumevanje ograničenja u okviru iste predstavlja ključ za pravilnu interpretaciju rezultata i njeno efikasno korišćenje u praksi.

6.3.1 Maseni spektrometar sa transferom protona

Osnovni delovi uređaja PTR-MS su izvor primarnih jona, drift cev, maseni spektrometar, detektor jona i računar sa softverom za kontrolu rada uređaja (slika 4 i slika 6). Kako bi se sprečila neutralizacija ili rasejavanje jona usled sudara sa molekulima vazduha tokom njihovog prolaska kroz uređaj, svi osnovni delovi PTR-MS sistema, u koje spadaju izvor jona, drift cev, maseni spektrometar i detektor, održavaju se na određenom nivou vakuuma. Zbog toga su vakuumske pumpe sastavni deo PTR-MS uređaja.



Slika 6. Prikaz osnovnih delova uređaja PTR-MS

Kako osnovu masene spektrometrije čini meka jonizacija u kojoj učestvuju H_3O^+ joni, u uređaju PTR-MS produkcija ovih jona odvija se u izvoru – šupljoj katodi, gde se molekuli vodene pare jonizuju u električnom praženjenju. Protok vodene pare u izvor precizno se reguliše pomoću kontrolera protoka pri niskom pritisku (*Low-Δp Flow Controller – FC*) radi održavanja stabilnog protoka gasa unutar definisanog opsega pritisaka i brzina. Produkcija H_3O^+ jona nastaje pri sudarima molekula vodene pare sa elektronima u dvostepenoj reakciji:

$$H_2O + e^- \rightarrow H_2O^+ + 2e^-$$

$$2H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH$$

Krećući se od katode, energija elektrona se povećava u blizini ose simetrije izvora, tako da se jonizacija molekula vode uglavnom dešava uz katodu (jonizacioni potencijal, JP = 12,7 eV). Proces fragmentacije molekula vodene pare dominira u blizini ose simetrije, pri čemu pored H_2O^+ jona nastaju i OH^+, H_2^+, H^+ i O^+ joni. U pretkomori, između izvora i drift cevi, pri reakciji formiranih jona sa molekulima vode dolazi ili do direktne produkcije H_3O^+ jona ili do produkcije H_2O^+ jona u nekoj od navedenih reakcija:

$$OH^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + O$$

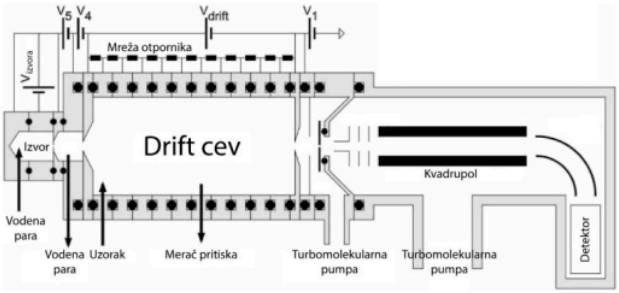
$$OH^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + OH$$

$$O^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + O$$

$$H_2^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + H$$

$$H_2^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + H_2$$

$$H^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + H$$



Slika 7. Drift cev PTR-MS uređaja (izvor slike: Blake i koautori, 2009)

Nakon produkcije H_3O^+ jona, isti se ubrzavaju i usmeravaju do drift cevi (slika 7). Drift cev ili reakciona komora je deo uređaja prstenaste konstrukcije u kome dolazi do jonizacije molekula IOJ. Reakciona komora je napravljena od prstenova od nerđajućeg čelika koji su međusobno povezani otpornicima i razdvojeni teflonskim pristenovima. U ovom delu uređaja, pri konstantnom pritisku, kroz sistem za uzorkovanje uvodi se uzorak analiziranog gasa, nakon čega započinju reakcije između formiranih H_3O^+ jona i svih hemijskih vrsta koje imaju AP veći nego voda (tabela 4), prema reakciji:

$$R + H_3O^+ \rightarrow RH^+ + H_2O, \quad AP(R) > AP(H_2O)$$

Tabela 4. IOJ koja se mogu detektovati uređajem PTR-MS

Jedinjenje	Formula	AP	Molekulska masa	Protonizovana masa	Hemijska funkcionalna grupa
Cijanovodinik	HCN	**712**	27	28	**Nitril**
Formaldehid	CH_2O	**713**	30	31	**Karbonil**
Metilamin	CH_5N	**899**	31	32	**Amin**
Metanol	CH_4O	**754**	32	33	**Alkohol**
Propin (metilacetilen)	C_3H_4	**748**	40	41	**Alkin**
Acetonitril (metil cijanid)	C_2H_3N	**779**	41	42	**Nitril**
Propen	C_3H_6	**752**	42	43	**Alken**
Etenamin	C_2H_5N	**921**	43	44	**Amin**
Acetaldehid	C_2H_4O	**769**	44	45	**Karbonil**
Etilamin	C_2H_7N	**912**	45	46	**Amin**
Dimetilamin (DMA)	C_2H_7N	**930**	45	46	**Amin**
Etanol	C_2H_6O	**776**	46	47	**Alkohol**
Mravlja kiselina	CH_2O_2	**742**	46	47	**Organska kiselina**
Metantiol	CH_4S	**773**	48	49	**Organski sumpor**
Akrilonitril	C_3H_3N	**756**	53	54	**Nitril**
1,3-butadien	C_4H_6	**784**	54	55	**Dien**
Propan-nitril (etil cijanid)	C_3H_5N	**764**	55	56	**Nitril**
Buten (butilen)	C_4H_8	**747**	56	57	**Alken**
2-metilpropen (izobutilen)	C_4H_8	**802**	56	57	**Alken**
Akrolein	C_4H_8	**749**	56	57	**Karbonil**
Propanal	C_3H_6O	**786**	58	59	**Karbonil**
Aceton	C_3H_6O	**812**	58	59	**Karbonil**

Trimetilamin (TMA)	C_3H_9N	**949**	59	60	**Amin**
Izopropilamin	C_3H_9N	**924**	59	60	**Amin**
1-propanol	C_3H_8O	**787**	60	61	**Alkohol**
2-propanol	C_3H_8O	**793**	60	61	**Alkohol**
Sirćetna kiselina	$C_2H_4O_2$	**784**	60	61	**Organska kiselina**
Metil format	$C_2H_4O_2$	**783**	60	61	**Ester**
Etilendiamin	$C_2H_8N_2$	**916**	60	61	**Amin**
Dimetil sulfid	C_2H_6S	**831**	62	63	**Organski sumpor**
Ethanethiol	C_2H_6S	**790**	62	63	**Organski sumpor**
Pirol	C_4H_5N	**876**	67	68	**Aromatni amin**
Ciklopenten	C_5H_8	**767**	68	69	**Alken**
1,3-pentadien (piperilen)	C_5H_8	**835**	68	69	**Dien**
Furan	C_4H_4O	**804**	68	69	**Aromatično jedinjenje**
3-buten-2-on (metil vinil keton, MVK)	C_4H_6O	**835**	70	71	**Karbonil**
Metakrolein (MACR)	C_4H_6O	**831**	70	71	**Karbonil**
3-aminopropionitril	$C_3H_6N_2$	**834**	70	71	**Nitril**
Pirolidin	C_4H_9N	**913**	71	72	**Aromatični amin**
Tetrahidro-furan	C_4H_8O	**823**	72	73	**Aromatično jedinjenje**
2-metil-propanal	C_4H_8O	**798**	72	73	**Karbonil**
Butanal	C_4H_8O	**789**	72	73	**Karbonil**
Butanon (metil etil keton - MEK)	C_4H_8O	**827**	72	73	**Karbonil**
1-butanol	$C_4H_{10}O$	**790**	74	75	**Alkohol**
2-butanol	$C_4H_{10}O$	**816**	74	75	**Alkohol**
Propionska kiselina	$C_3H_6O_2$	**797**	74	75	**Organska kiselina**
Metil acetat	$C_3H_6O_2$	**822**	74	75	**Ester**
Etil format	$C_3H_6O_2$	**799**	74	75	**Ester**
Benzen	C_6H_6	**750**	78	79	**Aromatično jedinjenje**
2-hloretanol	C_2H_5ClO	**738**	80	81	**Halogenovano jedinjenje**
Cikloheksan	C_6H_{10}	**785**	82	83	**Ciklički alkan**
Heksin	C_6H_{10}	**800**	82	83	**Alkin**
Dimetilbutadien	C_6H_{10}	**804**	82	83	**Dien**
1-penten-3-on (etil vinil keton, EVK)	C_5H_8O	**760**	84	85	**Karbonil**

2-metil-2-penten	C_6H_{12}	**782**	84	85	**Alken**
1-heksen	C_6H_{12}	**805**	84	85	**Alken**
Pentanal	$C_5H_{10}O$	**797**	86	87	**Karbonil**
Metil propanoate	$C_4H_8O_2$	**799**	88	89	**Ester**
Toluen	C_7H_8	**784**	92	93	**Aromatika**
Anilin	$C_6H_5NH_2$	**883**	93	94	**Aromatika**
Fenol	C_6H_6O	**817**	94	95	**Aromatika**
Dimetil disulfide	$C_2H_6S_2$	**815**	94	95	**Organski sumpor**
Ciklohepten	C_7H_{12}	**756**	96	97	**Ciklički alken**
Heksenal	$C_6H_{10}O$	**781**	98	99	**Karbonil**
Cikloheksanamin	$C_6H_{13}N$	**900**	99	100	**Amin**
cis-3-heksenol	$C_6H_{12}O$	**816**	100	101	**Alkohol**
Heksanal	$C_6H_{12}O$	**794**	100	101	**Karbonil**
Stiren	C_8H_8	**840**	104	105	**Aromatično jedinjenje**
Ksilen	C_8H_{10}	**794**	106	107	**Aromatično jedinjenje**
Etilbenzen	C_8H_{10}	**788**	106	107	**Aromatično jedinjenje**
Benzaldehid	C_7H_6O	**834**	106	107	**Aromatično jedinjenje**
Benzil alcohol	C_7H_8O	**779**	108	109	**Aromatično jedinjenje**
Ciklooktan	C_8H_{16}	**760**	112	113	**Cikloalkan**
Hlorbenzen	C_6H_5Cl	**754**	112	113	**Halogenovano jedinjenje**
Inden	C_9H_8	**849**	116	117	**Aromatično jedinjenje**
Metilstiren	C_9H_{10}	**864**	118	119	**Aromatično jedinjenje**
Acetofenon (metil fenil keton, MPK)	C_8H_8O	**862**	120	121	**Karbonil**
Benzojeva kiselina	$C_7H_6O_2$	**830**	122	123	**Aromatično jedinjenje**
Naftalin	$C_{10}H_8$	**803**	128	129	**Aromatično jedinjenje**
Azulen	$C_{10}H_8$	**926**	128	129	**Aromatično jedinjenje**
Metilnaftalen	$C_{11}H_{10}$	**835**	142	143	**Aromatično jedinjenje**

U drift cevi formirani H_3O^+ joni vrše jonizaciju putem prenosa protona na molekule IOJ, što može dovesti do njihove fragmentacije. Pored toga, prisutni fragmenti ili drugi jonizovani produkti mogu doprineti signalu, što potencijalno vodi do netačne kvantifikacije zbog doprinosa koji ne potiču isključivo od protonizovanih molekula ciljanog IOJ. Ovaj neželjeni

doprinos se može smanjiti odgovarajućom postavkom relevantnih parametara. Kako bi se obezbedila sredina u kojoj srednji slobodni put ispitivanih molekula pruža dovoljno vremena da dođe do reakcije jonizacije, pre nego što se sudare sa drugim molekulom, u drift cevi su tokom merenja korišćeni sledeći parametri: pritisak u reakcionoj komori održavan je u intervalu od 2,05 do 2,14 mbar, temperatura je bila podešena na 60°C, napon na 600 V, dok je odnos između električnog polja i broja molekula neutralnog gasa (E/N) iznosio 145 Td (1 Td = 10^{-17} V cm^2). Navedena konfiguracija parametara uslovila je vreme reakcije od oko 90 μs.

Kvantifikacija IOJ u uređaju PTR-MS temelji se na merenju koncentracije primarnih i produktnih jona pri jasno definisanim uslovima u drift cevi, koji obezbeđuju konstantnu brzinu jona i stabilan odnos između klasterizacije i fragmentacije. Usled poznatih osobina reakcije transfera protona i poznatih preseka sudara, moguće je veoma precizno izračunati koncentracije ciljnih jedinjenja putem kinetičkog modela reakcije. Osnovni niz reakcija može se predstaviti sledećim izrazima:

$$A^+ + R_1 \overset{k_1}{\rightarrow} P_1^+ + N_1$$

$$A^+ + R_2 \overset{k_2}{\rightarrow} P_2^+ + N_2$$

$$\dots$$

$$A^+ + R_n \overset{k_n}{\rightarrow} P_n^+ + N_n$$

Gde je A^+ – primarni jon (H_3O^+), R_n – molekuli koji se analiziraju (IOJ), P_n^+ – produktni stabilni joni (molekulski, kvazimolekulski ili fragmentni – protonizovano IOJ), N_n – neutralni produkti reakcije (H_2O) i k_n – koeficijenti brzine reakcije. S obzirom na to da su primarni joni u uređaju PTR MS molekuli H_3O^+, osnovna reakcija transfera protona se može prikazati na sledeći način:

$$H_3O^+ + R_n \overset{k_n}{\rightarrow} P_n^+ + H_2O$$

Prema zakonu o očuvanju mase jona u sistemu, ukupan pad koncentracije primarnih jona H_3O^+ u svim reakcijama, jednak je ukupnom porastu koncentracije novonastalih jona P_i^+ i iznosi:

$$-\frac{d[H_3O^+]}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \frac{d[P_i^+]}{dt} = [H_3O^+] \sum_{i=1}^{n} k_i\,[R_i]$$

Ovom jednačinom dat je prikaz ukupne brzine gubitka primarnih jona usled reakcija sa različitim reaktantima. Na desnoj strani nalazi se proizvod koncentracije primarnih jona i zbira konstanti reakcija, svaka pomnožena odgovarajućom koncentracijom reaktanata.

Ukoliko se pretpostavi da je zbir koncentracija reaktanata konstantan, integracijom prethodne diferencijalne jednačine, uz početni uslov $[H_3O^+]$=$[H_3O^+]_0$, dobija se eksponencijalni pad koncentracije primarnih jona u funkciji vremena:

$$[H_3O^+] = [H_3O^+]_0 e^{-t\sum_{i=1}^{n} k_i [R_i]}$$

Promena koncentracije protonizovanih IOJ vrste *j* (P_j^+) može prikazati kao:

$$dP_j^+ = k_j[R_j][H_3O^+]$$

$$\frac{d[P_j^+]}{dt} = k_j[R_j][H_3O^+]_0 \, e^{-t\sum_{i=1}^{n} k_i [R_i]}$$

Integracijom prethodne jednačine dobija se ukupna koncentracija protonizovanih IOJ vrste *j* izražena jednačinom:

$$[P_j^+] = \frac{k_j[R_j]}{\sum_{i=1}^{n} k_i[R_i]} \, [H_3O^+]_0 \left(1 - e^{-t\sum_{i=1}^{n} k_i [R_i]}\right)$$

koja pokazuje kao se količina jona P_j^+, u zavisnosti od relativnog učešća reaktanata R_j, polazne koncentracije primarnih jona i eksponencijalnog izraza koji prati dinamiku reakcije, povećava u funkciji vremena. Kada reakcija dovoljno dugo traje, odnosno kada vreme teži beskonačnosti (t $\rightarrow \infty$), izraz: $e^{-t\sum_{i=1}^{n} k_i [R_i]} \rightarrow 0$ postaje $1 - e^{-x} \rightarrow 1$, a jednačina za izračunavanje koncentracije protonizovanih IOJ dobija sledeći oblik:

$$[P_j^+] = \frac{k_j[R_j]}{\sum_{i=1}^{n} k_i[R_i]} \, [H_3O^+]_0$$

To znači da se u eksperimentalnim uslovima postiglo kvazistacionarno stanje i da se koncentracija produktnog jona više ne menja s vremenom, odnosno da ukupna koncentracija svih jonskih vrsta ostaje konstantna:

$$\sum_{j=1}^{n} [P_j^+] + [H_3O^+] = [H_3O^+]_0 = const$$

Koncentracija neutralnih molekula IOJ (R_i) moguće je izračunati prema jednačini:

$$[R_i] = \frac{[P_j^+]}{k_i t \sum_{j=1}^{n}[P_i^+]} ln\frac{[H_3O^+]_0}{[H_3O^+]}$$

gde $ln\frac{[H_3O^+]_0}{[H_3O^+]}$ predstavlja prirodni logaritam odnosa početne i preostale koncentracije H_3O^+jona, što odražava promenu njegove koncentracije tokom reakcije. Da bi se dobila jednačina koja zavisi isključivo od merljivih veličina, koristi se sledeća relacija:

$$[H_3O^+]_0 - [H_3O^+] = \sum_{j=1}^{n}[P_i^+]$$

što dovodi do:

$$ln\frac{[H_3O^+]_0}{[H_3O^+]} = ln\left(1 + \frac{\sum_{j=1}^{n}[P_i^+]}{[H_3O^+]}\right)$$

Međutim, kako je u praksi koncentracija primarnih jona uvek mnogo veća od koncentracije nastalih jona, što znači da je količnik $\frac{\sum_{j=1}^{n}[P_i^+]}{[H_3O^+]} \ll 1$, primenom Tejlorovog reda, $ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3}$..., i zanemarivanjem viših stepena, koncentracija neutralnih molekula IOJ može se izračunati kao:

$$[R_j] = \frac{[P_i^+]}{kt[H_3O^+]}$$

ili u slučaju samo jednog molekula IOJ:

$$[R] = \frac{1}{kt_R}\frac{[RH^+]}{[H_3O^+]}$$

gde je t_R efektivno vreme reakcije u drift cevi. Ono se određuje parametrima sistema prema izrazu:

$$t_R = \frac{L}{\upsilon_d} = \frac{L^2}{U_\mu}$$

gde je L – dužina cevi, υ_d – srednja brzina drifta jona, U – električni napon u cevi i μ – pokretljivost jona određena kao:

$$\mu = \mu_0 \frac{T[K]}{273{,}15K}\frac{1013mbar}{p\,[mbar]}$$

gde je μ_0 – pokretljivost jona pri normalnim uslovima, T – temperatura i p – pritisak u komori.

Za uobičajene parametre reakcione komore, koncentracija IOJ može se izraziti u jedinicama ppb kao:

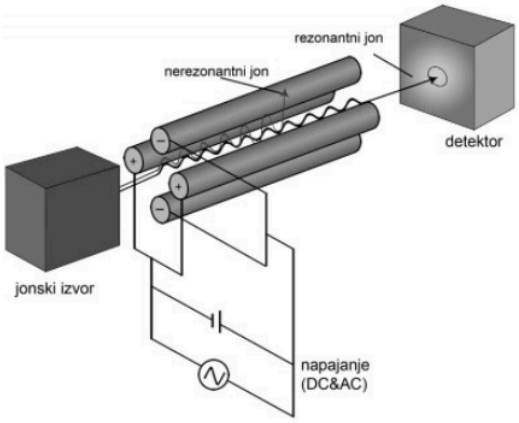
$$R_{[ppb]} = \frac{[RH^+] * 10^9 U[V] * \mu_0 * 22400 * 1013^2 mbar^2 * T^2[K^2] * Tr_{H_3O^+}}{k[cm^3 s^{-1}] * L^2[cm]^2 * [H_3O^+] * p^2[mbar]^2 * 6{,}022 * 10^{23} cm^{-3} * 273{,}15^2[K]^2 * Tr_{RH^+}}$$

gde su: $[RH^+]$ – broj jona produkata, U – napon u drift cevi, μ_0 – mobilnost jona u standardnim uslovima, *22400* – zapremina 1 mola idealnog gasa pri standardnoj temperaturi i pritisku, 1013 mbar – standardni pritisak u , T– temperatura, k – brzina reakcije između neutralnog molekula i H_3O^+jona, L– dužina drift cevi, p – pritisak, $6{,}022 * 10^{23} cm^{-3}$ – Avogadrov broj (broj molekula u 1 molu) i *273,15 K*– standardna temperatura, Tr – transmisioni koeficijent koji predstavlja efikasnost prenosa signala za jone.

Umesto direktne detekcije najzastupljenijih $H_3{}^{16}O^+$ jona na m/z 19, koja može preopteretiti detektor zbog visokog intenziteta signala, koristi se ređi izotopski oblik $H_3{}^{18}O^+$, detektovan na m/z 21. Ovo je omogućeno zahvaljujući stabilnom prirodnom izotopskom odnosu između ^{18}O i ^{16}O u vodi (~1:500), što višestruko rasterećuje detektor i obezbeđuje pouzdanije merenje primarnih jona (Stojić, 2015).

Molekuli IOJ koji su u reakciji primili proton zadržavajući svoju strukturu, postaju pozitivno naelektrisani molekulski joni i kao takvi se putem sistema elektrostatičkih sočiva sprovode u sledeći deo sistema – detekcionu komoru. Uređaj PTR-MS, koji se nalazi u Laboratoriji za fiziku životne sredine u Institutu za fiziku, opremljen je detekcionim sistemom koji se sastoji od kvadrupolnog masenog analizatora (*QMA 400*), sekundarnog elektronskog multiplikatora (*SEV-217*) i odgovarajuće brojačke elektronike (*CP 400*) (Stojić, 2015).

U masenoj spektometriji kvadrupol je jedan od najzastupljenijih analizatora koji se koriste. Razlog široke primene leži pre svega u njegovim dobrim performansama (jednostavnost i male dimenzije) i pristupačnoj ceni. Sastoji se od četiri cilindrične paralelno postavljene elektrode grupisane u po dva para naspramno postavljenih elektroda (slika 8). Na jedan par naspramno postavljenih elektroda dovodi se napon koji se sastoji od jednosmerne i naizmenične komponente, dok se na drugi par elektroda dovodi napon jednosmerne komponente suprotnog polariteta i napon naizmenične komponente sa faznom razlikom od 180^0.



Slika 8. Kvadrupolni maseni analizator

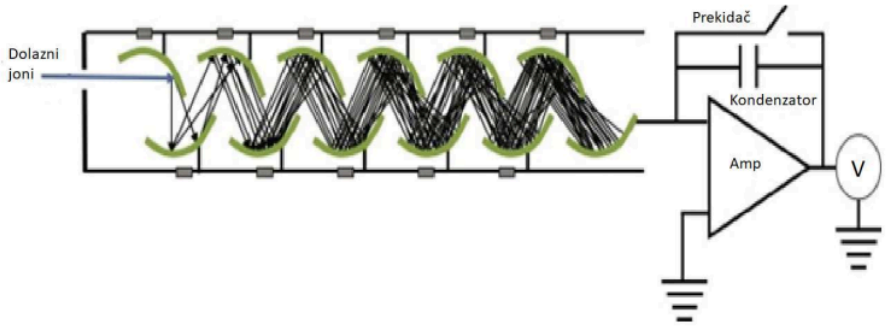
Princip rada masenog spektrometra sa kvadrupolom opisan je sledećom jednačinom :

$$\phi = \cup - V cos 2\pi v t$$

pri čemu je ϕ ukupni primenjeni električni potencijal u trenutku *t*, *U* je napon jednosmerne komponente, *V* je maksimalna amplituda naizmenične komponente i *v* njena oscilatorna frekvencija. Na ovaj način se u masenom spektrometru kvadrupolom obrazuje hiperbolično električno polje, koje ima osobinu propuštanja samo jona određenog odnosa mase i naelektrisanja (m/z) kroz prostor između elektroda. Ovaj proces omogućava selektivnu analizu jona prema odnosu m/z. Varijacijom parametara (nivoa napona *U* i *V*, kao i oscilatorne frekvencije *v)*, vrši se odabir jona koji imaju odnos mase i naelektrisanja takav da mogu proći dalje ka detektoru. Takvi joni se nazivaju rezonantni joni. Nasuprot tome, joni koji nisu u rezonanciji sa parametrima kvadrupola, poznati kao nerezonantni joni, skreću sa ose kvadrupola i završavaju na njegovim zidovima.

Kvantifikacija jona koji prođu kroz kvadrupol zasniva se na merenju jačine struje koju ovi joni generišu. U kontekstu uređaja PTR-MS, čija je konstrukcija usmerena na analizu gasova u tragovima, struje koje bi proizveli joni analita bile bi izuzetno male. Za registrovanje tako malih vrednosti struje, vrši se pojačanje signala korišćenjem sekundarnog elektronskog multiplikatora (*Secondary Electron Multiplier – SEM*). Ovaj multiplikator sastoji se od katode, dinoda i anode i koristi princip sekundarne emisije elektrona sa površine čvrstih tela pri njihovom bombardovanju snopom elektrona (slika 9). Kada jon analiziranog IOJ udari u katodu, dolazi do izbijanja elektrona, koji zatim pokreće kaskadu elektrona prema anodi preko

dinoda. Ovaj proces lavine elektrona rezultira višestrukim pojačanjem struje, često reda veličine od 10^5-10^7.



Slika 9. Sekundarni elektronski multiplikator (izvor slike: Carlson, 2025)

Svi prethodno opisani procesi dovode do generisanja izlaznog signala uređaja PTR-MS, koji se manifestuje kao vremenska serija.

Vreme odgovora uređaja PTR-MS zavisi od mnogo činilaca među kojima su: vreme boravka uzorka u drift cevi, memorijski efekti, vreme integracije i broj analiziranih masa. Broj protonizovanih molekula koji se detektuje u jedinici vremena, odnosno odbroj u sekundi (*counts per second – cps*), dobija se za jako kratko vreme, pa je praćenje promena koncentracija u uzorku moguće ostvariti u gotovo realnom vremenu, što je i jedna od najvećih komparativnih prednosti uređaja PTR-MS u odnosu na druge analitičke uređaje sličnih karakteristika.

Jedno od glavnih ograničenja uređaja PTR-MS sa kvadrupolnim analizatorom potiče od njegove rezolucije, koja iznosi 1 amu, što za posledicu ima nemogućnost razdvajanja izobarnih jedinjenja, odnosno jedinjenja koja imaju istu molekulsku masu. U takvim slučajevima može doći do spektrometrijskih interferencija i ograničenja u tačnoj detekciji jedinjenja sa istom molekulskom masom do na ceo broj (Bielik i koautori, 2024; Coggon i koautori, 2024). Ovo može dovesti do pogrešne identifikacije i precenjivanja koncentracija pojedinih supstanci, što predstavlja značajan izazov prilikom određivanja porekla i identifikacije specifičnih molekula u složenim smešama. Dodatno, hemijske reakcije zastupljene u PTR-MS mogu uticati na reaktivnosti i stabilnosti jona, usled varijacija u vremenu ili uslovima merenja (F. Li i koautori, 2024). Takve promene mogu izazvati varijabilnost rezultata, što zahteva dodatnu kalibraciju i optimizaciju parametara merenja. Osim navedenog, uređaj PTR-quad-MS može pokazati ograničenu efikasnost u detekciji određenih supstanci, naročito onih koje se nalaze u veoma

niskim koncentracijama ili imaju specifična hemijska svojstva koja otežavaju njihovu jonizaciju ili detekciju.

6.4 Merenje meteoroloških parametara

Osnovni meteorološki parametri kao što su temperatura, relativna vlažnost vazduha, atmosferski pritisak, pravac i brzina vetra, količina i intenzitet padavina, kontinuirano su mereni pomoću meteorološke stanice *Vaisala Weather Transmitter WXT520.* Rad ove stanice zasniva se na Vaisala WINDCAP® tehnologiji, koja koristi tri ravnomerno raspoređena supersonična predajnika. Brzina ultrazvuka između predajnika zavisi od pravca i brzine vetra, čime se izračunavaju ove veličine. Količina i intenzitet padavina mereni su pomoću Vaisala RAINCAP® tehnologije, koja koristi piezoelektrični efekat za generisanje signala koji su proporcionalni zapremini kišnih kapi. Merenje temperature, relativne vlažnosti vazduha i atmosferskog pritiska obavljeno je pomoću THERMOCAP®, HUMICAP®180 i BAROCAP® senzora koji korišćenjem RC oscilatora i referentnih otpornika za merenje kapacitativnosti oscilatora vrše izračunavanje željenih parametra. Svi navedeni parametri mereni su u realnom vremenu sa periodom usrednjavanja od 10 minuta.

6.5 Podaci korišćeni za kontekstualizaciju

Za bolje razumevanje dinamike zagađujućih materija na određenom području, posebno u vanrednim okolnostima kao što je bila pandemija COVID-19, neophodno je analizirati koncentracije iz više uglova i uz uvažavanje što većeg broja faktora životne sredine. U cilju prikupljanja relevantnih informacija za područje Beograda tokom pandemijskog perioda, osim izmerenih vrednosti, u analizu su uključeni i podaci iz drugih dostupnih izvora. To su koncentracije CO, NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10} i SO_2, modelirani meteorološki parametri, kao i podaci o vladinim merama, pandemiji, ekonomskim pokazateljima i obrascima mobilnosti stanovništva. Navedeni skupovi podataka pribavljani su iz Nacionalne mreže za kvalitet vazduha SEPA (SEPA, 2022), Globalnog sistema za asimilaciju podataka GDAS (GDAS, 2022) i baza podataka koje su obezbedili Oksford (Oxford, 2022), Worldometer (Worldometer, 2022), Apple (Apple Inc, 2022) i Google (Google LLC., 2022).

Kako bi se procenili odloženi efekti demografskih varijabli, skup je proširen lagovanim vrednostima varijabli za mere suzbijanja pandemije, epidemiološke podatke i podatke o mobilnosti, i to sa vremenskim zakašnjenjem od jedan, dva i tri dana (indeksirane kao lag1, lag2 i lag3). Uvođenjem ovih vrednosti omogućena je analiza vremenskih promena njihovih

uticaja. Razlog primene lagovanih vrednosti do tri dana najviše uslovljen je kratkom vremenskom serijom podataka. Veće zakašnjenje bi dodatno smanjilo broj dostupnih podataka za analizu, što bi značajno uticalo na preciznost i pouzdanost rezultata. Osim toga, korišćenje lagovanih vrednosti sa većim zakašnjenjem moglo bi dovesti do gubitka ključnih događaja i faktora koji utiču na ponašanje benzena, čime se takođe povećava rizik od dobijanja nevalidnih rezultata analize.

6.5.1 Podaci o koncentracijama osnovnih zagađujućih materija

Nacionalna mreža za monitoring kvaliteta vazduha, koju koordinira SEPA, igra važnu ulogu u praćenju i ocenjivanju stanja kvaliteta vazduha u Republici Srbiji. Primenom savremenih analitičkih instrumenata i metoda, agencija vrši kontinuirana merenja osnovnih zagađujućih materija u vazduhu, kao što su suspendovane čestice PM_{10} i $PM_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO i ozon O_3, pružajući trenutnu sliku o stanju kvaliteta vazduha, kao i identifikaciju dugoročnih trendova i sezonskih varijacija. Putem svoje web stranice[23], ali i drugih platformi, SEPA već godinama pruža transparentni pristup podacima o kvalitetu vazduha što građanima, istaživačima i donosiocima odluka omogućava da prate stanje vazduha u cilju preduzimanja potrebnih koraka od značaja za očuvanje javnog zdravlja i životne sredine. Osim toga, ovi podaci su vodeći inputi za usklađivanje sa evropskim standardima i regulativama u oblasti kvaliteta vazduha. Tokom 2022. godine, SEPA je nastavila da unapređuje tehnologiju i metodologiju merenja, čime je obezbedila još preciznije i relevantnije podatke (SEPA, 2022).

Za potrebe analize u okviru disertacije, podaci su preuzeti sa mernog mesta *Tošin Bunar*, lociranog u rezidencijalnom delu Zemuna. Razlog za odabir ove stanice leži u činjenici da je time pokriven maksimalan broj zagađujućih materija koje se mogu preuzeti sa mernih mesta pod ingerencijom SEPA, kao i okolnostima da je odabrana stanica najbliža Institutu za fiziku, gde su vršena merenja.

6.5.2 Modelirani meteorološki podaci

Globalni sistem za asimilaciju podataka GDAS predstavlja vodeći alat koji koristi Globalni sistem prognoze (*Global Forecast System* – GFS) za integraciju opservacija sa ciljem preciznog započinjanja vremenskih prognoza baziranih na zapaženim podacima. Ovaj sistem razvija i održava Nacionalni centar za ekološke predikcije (*National Centers for Environmental Information* – NCEP) pri Nacionalnoj okeanskoj i atmosferskoj administraciji (*National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA) (NOAA, 2023).

[23] http://www.amskv.sepa.gov.rs/

Asimilacija u ovoj bazi započinje prikupljanjem sirovih meteoroloških podataka iz različitih izvora, poput satelita, radijskih sondi, zemaljskih stanica, aviona, balona i brodova. Prikupljeni podaci se potom kombinuju sa numeričkim modelima atmosfere kroz proces asimilacije podataka, koji integriše stvarne opservacije sa modelskim podacima kako bi se poboljšala tačnost vremenskih prognoza.

GDAS koristi napredne tehnike asimilacije podataka, kao što je trodimenzionalna varijacijska asimilacija podataka (3D-Var), koje optimizuju vremenske i prostorne podatke kako bi se dobila najtačnija slika trenutnih atmosferskih uslova (Kleist i koautori, 2009). Prikupljeni i obrađeni podaci koriste se za kratkoročne i dugoročne vremenske prognoze, klimatske analize, proučavanje sezonskih i godišnjih varijacija, kao i za istraživanje ekoloških i meteoroloških fenomena. Podaci se ažuriraju svakih šest sati, omogućavajući pravovremene prognoze i analize.

Zbog raznovrsnosti tipova podataka koji se asimiluju, ulazni podaci su dostupni u različitim formatima, uglavnom u univerzalnom binarnom formatu za predstavljanje meteoroloških podataka (*Binary Universal Form for the Representation of meteorological data* – BUFR) i binarnom formatu Instituta elektrotehničkih i elektronskih inženjera (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* – IEEE). Izlazni podaci iz baze GDAS su u mrežnom binarnom formatu Svetske meteorološke organizacije (SMO, eng. *World Meteorological Organization* – WMO) poznatom kao *Gridded Binary* GRIB (NOAA, 2022).
Podaci korišćeni u ovoj disertaciji i interpolirani za merno mesto na kome su vršena merenja IOJ prikazani su u Tabeli 5. Razlog njihovog korišćenja je mogućnost dobijanja informacija o meteorološkim parametrima koji nisu obuhvaćeni merenjima na samoj lokaciji. Neki od tih podataka su vlažnost zemljišta, fluksevi koji govore o vertikalnim kretanjima vazduha, različitom zagrevanju vazduha i tla i dr.

Za potrebe ovog istraživanja od odgovarajućih U i V komponenti fluksa momenta kretanja i brzine vetra izračunati su odgovarajući intenziteti i pravci. Takođe, baza podataka je proširena podacima o iradijansi izračunatoj za merno mesto.

Tabela 5. Meteorološki podaci sadržani u GDAS arhivi (NOAA, 2023)

Meteorološki podaci	**Jedinice**	**Oznaka**	**Redosled podataka**
Pritisak na površini	hPa	prss	S1
Pritisak redukovan na srednji nivo mora	hPa	mslp	S2
Akumulirane padavine (6-satna akumulacija)	m	tpp6	S3
U-komponenta fluksa momenta (prosek za 3- ili 6-h)	N/m²	umof	S4
V-komponenta fluksa momenta (prosek za 3- ili 6-h)	N/m²	vmof	S5
Fluks neto osetljive toplote na površini (prosek za 3- ili 6-h)	W/m²	shtf	S6
Fluks zračenja kratkih talasa nadole (prosek za 3- ili 6-h)	W/m²	dswf	S7
Relativna vlažnost na 2m AGL	%	rh2m	S8
U-komponenta vetra na 10m AGL	m/s	u10m	S9
V-komponenta vetra na 10m AGL	m/s	v10m	S10
Temperatura na visini od 2m AGL	K	t02m	S11
Ukupna oblačnost (prosek za 3- ili 6-h)	%	tcld	S12
Geopotencijalna visina	gpm*	shgt	S13
Konvektivno dostupna potencijalna energija	J/Kg	cape	S14
Konvektivna inhibicija	J/kg	cinh	S15
Standardni indeks podizanja	K	lisd	S16
Najbolji indeks podizanja u 4 sloja	K	lib4	S17
Visina planetarnog graničnog sloja	M	pblh	S18
Temperatura na površini	K	tmps	S19
Akumulirana konvektivna količina padavina (6-satna akumulacija)	m	cpp6**	S20
Volumetrijski sadržaj vlažnosti tla	frac.	solm	S21
Prisustvo snega (da=1, ne=0) (prosek za 3- ili 6-h)		csno	S22
Prisustvo leda (da=1, ne=0) (prosek za 3- ili 6-h)		cice	S23
Prisustvo ledene kiše (da=1, ne=0) (prosek za 3- ili 6-h)		cfzr	S24
Prisustvo kiše (da=1, ne=0) (prosek za 3- ili 6-h)		crai	S25
Neto fluks latentne toplote na površini (prosek za 3- ili 6-h)	W/m²	lhtf	S26
Niska pokrivenost oblacima (prosek za 3- ili 6-h)	%	lcld	S27
Srednja pokrivenost oblacima (prosek za 3- ili 6-h)	%	mcld	S28
Visoka pokrivenost oblacima (prosek za 3- ili 6-h)	%	hcld	S29

*Geopotencijalni metri
**Počevši od 00 UTC 15. jula 2019. godine, cppa (ukupna akumulacija) umesto cpp6 (6-satna akumulacija)

6.5.3 Podaci o pandemiji COVID-19 i merama odgovora

Podaci preuzeti iz baze Oxford COVID-19 *Government Response Tracker* (Oxford, 2022) omogućili su sveobuhvatan uvid u tok pandemije COVID-19, uključujući informacije o broju zaraženih, testiranju, vakcinaciji i merama koje su preduzimane u cilju suzbijanja širenja virusa. Ova baza obuhvata i globalne i nacionalne podatke, uključujući broj potvrđenih

slučajeva i smrtnih ishoda, broj sprovedenih testiranja, kao i podatke o vakcinaciji koji uključuju broj primenjenih doza, tipove vakcina i stope vakcinacije kroz vreme.

Takođe, baza sadrži detaljne informacije o reakcijama vlada širom sveta, kao što su mere zaključavanja, ograničenja kretanja, obaveze nošenja maski i druge intervencije u javnom zdravstvu. Uključeni su i podaci o ekonomskim i zdravstvenim pokazateljima, kao i indeksima globalne mobilnosti koji prate promene u obrascima kretanja – poput prisustva na radnom mestu, poseta maloprodajnim objektima, rekreativnim lokacijama i korišćenja javnog prevoza. Tabela 6 prikazuje vrednosti relevantnih varijabli za Srbiju i šire područje Beograda.

Tabela 6. Spisak korišćenih varijabli iz baze podataka Oxford (Kira i koautori, 2023; Radić i koautori, 2025)

Indikatori OxCGRT /varijable		
Ograničenja i zatvaranja	C1	Zatvaranje škola,
	C2	Zatvaranje radnih mesta,
	C3	Otkazivanje javnih događaja,
	C4	Ograničenja okupljanja,
	C5	Obustava javnog prevoza,
	C6	Naredba o ostanku kod kuće,
	C7	Ograničenja kretanja unutar zemlje,
	C8	Kontrole međunarodnih putovanja.
Zdravstveni sistemi	H1	Javne informativne kampanje,
	H2	Politika testiranja,
	H3	Praćenje kontakata,
	H4	Hitna ulaganja u zdravstvo,
	H5	Ulaganja u vakcine,
	H6	Nošenje maski,
	H7	Politika vakcinacije,
	H8	Zaštita starijih osoba.
Ekonomski odgovor	E1	Podrška prihodima,
	E2	Vraćanje kredita,
	E3	Fiskalne mere,
	E4	Međunarodna podrška.
Politike vakcinacije	V1	Pregled prioriteta vakcinacije,
	V2A	Pregled dostupnosti vakcina
	V3	Pregled finansijske podrške za vakcine.
Razno		Potvrđeni slučajevi,
		Potvrđeni smrtni ishodi,
		Indeks restriktivnosti uvedenih mera,
		Istorijski pregled promena mera.
		Indeks odgovora vlade,
		Indeks zdravstvenih i kontrolnih mera,
		Indeks ekonomske podrške.

6.5.4 Epidemiološki podaci sa platforme *Worldometer*

Worldometer je referentna internet platforma osnovana 2004. godine, namenjena pružanju statističkih podataka u realnom vremenu iz različitih oblasti, uključujući stanovništvo, ekonomiju, zdravlje, životnu sredinu, medije, resurse poput hrane, vode i energije, kao i politike i društvena kretanja (Dyer, 2020; Worldometer, 2022). Američka asocijacija biblioteka ju je 2011. godine prepoznala kao jednu od najboljih besplatnih referentnih stranica.

Posebnu pažnju javnosti *Worldometer* je privukao početkom 2020. godine, kada je postao jedan od najkorišćenijih izvora za praćenje statistika vezanih za pandemiju COVID-19. Platforma je omogućila korisnicima da u realnom vremenu prate trendove širenja virusa, brojeve zaraženih, aktivne slučajeve, oporavke i smrtne ishode, čime je značajno doprinela boljem razumevanju pandemijske situacije širom sveta.

U okviru ove disertacije korišćeni su podaci sa sajta *Worldometer*, sa posebnim fokusom na vizuelizacije koje prikazuju broj aktivnih slučajeva, ukupan broj obolelih, preminulih i dr. Kako na globalnom nivou, tako i na nivou Republike Srbije, kako bi se dodatno osvetlila dinamika pandemije i njen uticaj.

6.5.5 Podaci o mobilnosti iz baza *Apple* i *Google*

Podaci o mobilnosti koje su tokom pandemije COVID-19 obezbedile kompanije *Apple Inc.* (2022) i *Google LLC.* (2022) omogućili su detaljan uvid u promene u obrascima kretanja stanovništva. Obe kompanije razvile su napredne alate koji prate mobilnost korisnika na osnovu anonimizovanih i agregiranih podataka sa mobilnih uređaja, uz očuvanje privatnosti korisnika. Ovi podaci su prikupljani i analizirani u realnom vremenu, što ih čini izuzetno korisnim za praćenje ponašanja populacije u uslovima epidemioloških mera i ograničenja. Vrednosti varijabli izražene su kao procentualne promene u odnosu na referentni period za koji je uzeto stanje 20. januara 2020. godine, kada u Evropi i Americi nisu zvanično zabeleženi slučajevi oboljevanja od korona virusa.

Iz baze podataka *Apple* korišćene su varijable: vožnja (*Driving*) i pešačenje (*Walking*), dok su iz baze podataka *Google* analizirane sledeće varijable: posete maloprodajnim objektima i mestima za rekreaciju, posete prodavnicama prehrambenih proizvoda i apotekama, prisustvo u parkovima, prisustvo na tranzitnim stanicama (javni prevoz), prisustvo na radnim mestima, prisustvo u stambenim oblastima. Ovi podaci su pružili značajnu osnovu za analizu uticaja pandemijskih mera na svakodnevne obrasce kretanja i ponašanja stanovništva.

7. Metode korišćene za analizu podataka

Dinamika zagađujućih materija u urbanim sredinama, koje karakterišu brojni izvori emisije i složeni meteorološki uslovi, može biti izuzetno kompleksna. Faktori poput topografije, gustine naseljenosti, saobraćaja, kao i društvenih i industrijskih aktivnosti, ključni su u oblikovanju kvaliteta vazduha. Ovakva složenost utiče i na transport, disperziju i hemijske transformacije zagađujućih materija, otežavajući tako njihovo razumevanje i predviđanje. Dodatni izazov predstavljala je pandemija COVID-19, koja je uvela nove obrasce ponašanja i emisija, čineći situaciju još kompleksnijom, ali i otvarajući prostor za redefinisanje pristupa zaštiti vazduha i životne sredine.

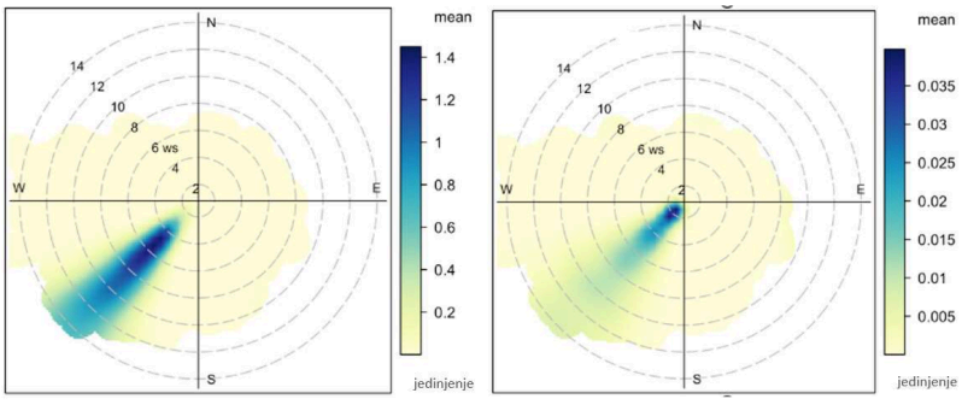
Za dublje razumevanje zagađenja vazduha i dinamike benzena i drugih IOJ u urbanim područjima, kao što je Beograd, u nesvakidašnjim uslovima izazvanim pandemijom, važno je bilo istražiti međusobne veze i kompleksne odnose svih raspoloživih faktora životne sredine. U ovoj disertaciji to je ostvareno primenom različitih analitičkih metoda, detaljno opisanih u nastavku, uz oslonac na programski jezik *Python* zbog njegove fleksibilnosti i bogate biblioteke.

7.1 Identifikacija prostorne raspodele izvora emisije

Utvrđivanje međusobnih odnosa između varijabli čini neophodan aspekt analize podataka u statistici, sa posebnim značajem u oblasti nauka koje proučavaju atmosferu. Istraživanje veza između hemijskih jedinjenja i meteoroloških parametara je veoma zastupljeno, pri čemu se koriste različite tehnike za upoređivanje, utvrđivanje korelacija i analizu odnosa.

U cilju identifikacije moguće prostorne distribucije izvora emisije benzena, koncentracije su prikazane u zavisnosti od pravca i brzine vetra korišćenjem polarnog dijagrama (Carslaw i Beevers, 2013). Ova vrsta dijagrama predstavlja korisno dijagnostičko sredstvo koje omogućava brzu procenu i karakterizaciju potencijalnih izvora zagađenja, budući da pruža vizuelni prikaz srednjih koncentracija zagađujućih materija na osnovu brzine i pravca vetra. Omogućeno je intuitivno predstavljanje pravca vetra (od 0 do 360° u smeru kazaljke na satu od severa) na uglovnoj skali, dok se brzina vetra prikazuje na radijalnoj skali (Grange i koautori, 2016). Brzina vetra je jedna od najkorisnijih varijabli za razlikovanje tipova izvora zagađenja. Na primer, emisije koje dolaze iz dimnjaka, gde se gasovi i čestice ispuštaju na većim visinama pokazuju različite obrasce disperzije u zavisnosti od brzine vetra, tako da pod uticajem jakih vetrova, koncentracije zagađujućih materija mogu biti značajne i u prizemnim slojevima. S druge strane, emisije koje potiču iz relativno niskih ili površinskih izvora

zagađenja obično dovodi do većih koncentracija zagađujućih materija u prizemnom sloju pri malim brzinama vetra (slika 10).



Slika 10. Primer emisija iz visoko (levo) i nisko (desno) pozicioniranih izvora

Zavisnost koncentracija od pravca i brzine vetra prikazuju se odgovarajućim bojama, što efikasno ukazuje i na intenzitet potencijalnih izvora emisije. Kreiranje polarnih dijagrama zasnivaju se na podeli svih podataka (brzini, pravcu vetra i koncentracijama) u binove prema pravcu vetra, a zatim se za svaki bin izračunava srednja koncentracija. Pri analizi višenedeljnih, višemesečnih ili višegodišnjih baza podataka, neretko može doći do značajnih odstupanja u izmerenim vrednostima pravca vetra, što postupak usrednjavanja čini poželjnim kako bi dobijene slike bile jasnije i manje difuzne. Na ovaj način postiže se značajno smanjuje broja podataka bez negativnog uticaja na rezultat (Carslaw i Davison, 2025).

Pored brzine vetra, na radijalnoj skali mogu se koristiti i druge varijable, kao što su temperatura, ili atmosferska stabilnost, ali i odnosi izmerenih koncentracija zagađujućih materija (korelacija i *slope* faktor) čime se omogućava razdvajanje izvora različitih karakteristika.

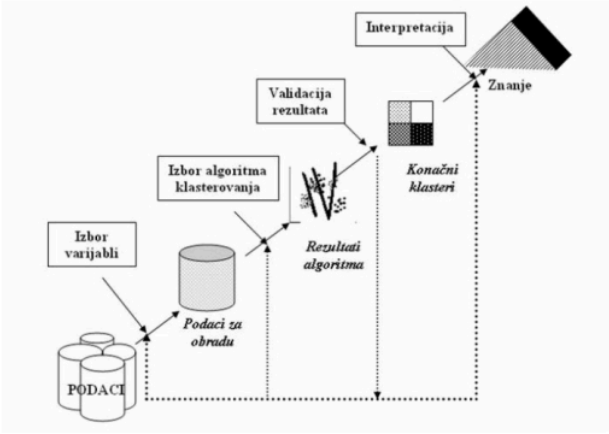
U okviru disertacije analiza je obavljena za periode pre i tokom vanrednog stanja, sa fokusom na razgraničenje razlika u izmerenim koncentracijama u odnosu na karakteristike vetra. Ovakav pristup je omogućio procenu moguće redukcije ili intenziviranja specifičnih izvora benzena u okolini mernog mesta, kao i pojave novih izvora u različitim vremenskim intervalima.

7.2 Klaster analiza

Klaster analiza predstavlja grupu multivarijantnih tehnika čija je osnovna svrha grupisanje podataka na osnovu njihovih karakteristika. Podaci se grupišu tako da svaki element unutar

klastera pokazuje visok stepen sličnosti sa ostalima, pri čemu formirane grupe odlikuje interna homogenost i izražena međusobna različitost. Ovaj pristup omogućava identifikaciju grupa varijabli koje zajedno doprinose određenom fenomenu ili rezultatu, kao i bolje razumevanje interakcija između različitih faktora.

Klaster analiza se sastoji od nekoliko ključnih koraka: izbora varijabli, određivanja algoritma klasterizacije (uključujući izbor mere sličnosti/različitosti i kriterijuma grupisanja), validacija dobijenih klastera i interpretacije rezultata (slika 11).



Slika 11. Koraci u postupku klaster analize (Dragnić, 2016)

Klaster analiza predstavlja koristan pristup za identifikaciju obrazaca i lokalnih uticaja na koncentraciju benzena. Iako brojni algoritmi klasterizacije uspešno rade na malim skupovima podataka, njihova primena na velikim i kompleksnim skupovima može biti izazovna. Efikasan algoritam bi trebalo da identifikuje klastere različitih oblika i veličina, bude otporan na šum i ekstremne vrednosti, podržava rad sa raznovrsnim podacima i dimenzionalnostima, zahteva minimalan broj parametara i omogućava interpretabilne rezultate.

Postoji više kategorija klaster metoda:

1) Hijerarhijske metode organizuju podatke u formi stabla (dendrogram), bez potrebe za unapred definisanim brojem klastera. Mogu biti aglomerativne ili dekompozitivne, ali su osetljive na šum i nefleksibilne za kasnije promene u strukturi klastera.
2) Nehijerarhijske metode (npr. k-*means*) zahtevaju zadat broj klastera i optimizuju raspodelu objekata kroz iterativni proces. Brze su i pouzdane za sferične klastere, ali manje efikasne za kompleksne oblike ili velike skupove podataka.

3) Metode zasnovane na modelu koje pretpostavljaju određenu distribuciju podataka (npr. GMM), tražeći najbolje statističko uklapanje. Omogućavaju precizno grupisanje, ali zavise od tačnosti pretpostavljenog modela.
4) Mrežne metode dele prostor u ćelije i brzo obrađuju podatke, ali ograničeno detektuju kompleksne oblike klastera zbog pojednostavljene prostorne strukture.
5) Metode zasnovane na gustini (npr. DBSCAN) grupišu tačke prema lokalnoj gustini, ne zahtevaju unapred definisan broj klastera i uspešno prepoznaju klastere različitih oblika i veličina, uz otpornost na šum.

U ovoj disertaciji klaster analiza se primenjuje radi identifikacije obrazaca emisije benzena u urbanim sredinama, uz uvažavanje složenih lokalnih uticaja. Koristi se u dva specifična konteksta: za otkrivanje potencijalnih izvora emisije na osnovu odnosa između koncentracije benzena i meteoroloških parametara primenom polarne klaster analize, kao i za analizu varijabilnih SHAP vrednosti korišćenjem tehnika smanjenja dimenzionalnosti i napredne klasterizacije (videti poglavlje 8.4).

7.2.1 Klaster analiza u identifikaciji izvora emisije – polarna klaster analiza

Polarna klaster analiza je metoda za formiranje grupa sličnih elemenata putem pristupa k-srednjih vrednosti (*k-means*). Postupak započinje slučajnim odabirom k tačaka koje služe kao inicijalni centri klastera, dok se preostale tačke pridružuju onoj grupi čiji je centar najbliži. Kada sve tačke budu dodeljene, novi centri klastera se ponovo izračunavaju biranjem novih k tačaka. Ovaj ciklus se ponavlja sve dok se pozicije centara više ne pomeraju, što označava postizanje optimalne podela podataka u klastere, pri čemu su elementi unutar klastera bliži jedni drugima nego što su to udaljenosti između klastera.

Nakon identifikacije prostorne distribucije potencijalnih izvora emisije benzena pomoću polarnog dijagrama, primenjena je polarna klaster analiza s ciljem prepoznavanja i grupisanja izvora sa sličnim karakteristikama, kao i za procenu procentualnog učešća događaja unutar definisanih klastera.

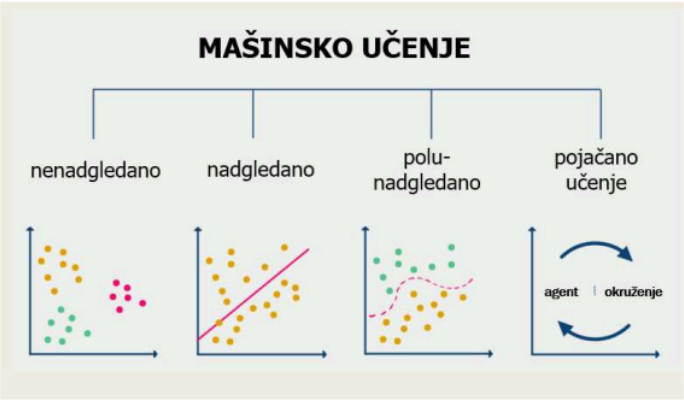
7.3 Mašinsko učenje

Za analizu stanja kvaliteta vazduha u vanrednim okolnostima, pre svega posmatrano kroz promene u koncentraciji benzena pre, tokom i nakon pandemije, korišćena je platforma razvijena u okviru projekta *crAIRsis* (*crAIRsis*, 2024). Platforma je zasnovana na metodama veštačke inteligencije i dizajnirana za analizu kvaliteta vazduha u kriznim situacijama (Jovanović i koautori, 2023; Bačanin i koautori, 2024; Stanišić i koautori, 2021; Stojić i

koautori, 2019; Stojić i koautori, 2022). Platforma integriše sedam regresionih modela mašinskog učenja za predikciju i to: ExtraTrees, AdaBoost, Gradient Boosting, XGBoost, CatBoost, LightGBM i Histogram-based Gradient Boosting, od kojih je svaki izabran zbog svojih posebnih osobina. Njihove karakteristike biće razmotrene u naradnim delovima teksta.

Mašinsko učenje (*Machine Learning – ML*) predstavlja granu veštačke inteligencije koja se fokusira na razvoj algoritama i tehnika koji računarima omogućavaju učenje iz podataka, a potom i primenu naučenog u cilju poboljšanja svojih performansi u rešavanju specifičnih zadataka, bez eksplicitnog programiranja. Mašinsko učenje predstavlja širok pojam koji podrazumeva nadgledano i nenadgledano mašinsko učenje, kao i druge vrste učenja, kao što su polu-nadgledano i pojačano učenje (slika 12) (Geron i koautori, 2021).

Nenadgledano mašinsko učenje se fokusira na pronalaženje obrazaca u podacima bez potrebe za prethodnim iskustvom. Polu-nadgledano mašinsko učenje je kombinacija nadgledanog i nenadgledanog učenja, gde se modeli treniraju na malom broju označenih i velikom broju neoznačenih podataka. Ovo je korisno kada je označavanje podataka skupo ili teško, ali i kada postoji pristup velikom broju neoznačenih podataka. Pojačano učenje je tehnika učenja koja se fokusira na razvoj sistema koji uče kako da donose odluke u dinamičkim okruženjima.



Slika 12: Vrste mašinskog učenja (izvor: https://databasecamp.de/en/ml/semi-supervised-learning-en pristupljeno 22.1.2025. godine)

U kompleksnom urbanom okruženju analiza kvaliteta vazduha može predstavljati pravi izazov, naročito uzimajući u obzir važnost razmatranja kompleksnih veza velikog broja faktora koji igraju važnu ulogu u distribuciji zagađujućih materija u vazduhu. Zarad postizanja boljeg razumevanja i predviđanja uticaja različitih faktora na koncentraciju benzena u vazduhu, za

potrebe ove disertacije korišćeni su algoritmi nadgledanog mašinskog učenja koje predstavlja specifičan podskup tehnika i algoritama unutar šireg ML koncepta.

7.3.1 Nadgledano mašinsko učenje

Algoritmi nadgledanog mašinskog učenja su poseban segment mašinskog učenja, gde se model trenira na osnovu ulaznih podataka i odgovarajućih ciljnih izlaza ili oznaka (Hariom Tatsat i koautori, 2020; Praveena, 2017). To znači da su podaci unapred označeni, što omogućava modelima da nauče kako da pravilno klasifikuju ili predviđaju nove, nepoznate podatke na osnovu prethodnih iskustava.

Postoje dve osnovne vrste problema koji se rešavaju primenom nadgledanog učenja: regresija i klasifikacija (Indeed, 2024). Regresija daje predikciju kontinualne vrednosti na osnovu ulaznih podataka, dok klasifikacioni daje predikciju klase ili kategorije kojoj pripadaju ulazni podaci. Klasifikacione metode donose odluke na osnovu verovatnoće, što znači da klasa sa najvećom verovatnoćom postaje krajnji rezultat. Nasuprot tome, regresione netode procenjuju neprekidne izlazne vrednosti, što znači da mogu imati beskonačan broj mogućih rezultata.

7.3.1.1 Stabla odlučivanja

Stabla odlučivanja predstavljaju neparametarski metod u oblasti nadgledanog mašinskog učenja koji se koristi za probleme klasifikacije i regresije, i jedan je od često primenjivanih metoda pri analizi kvaliteta vazduha (Eliyati i koautori, 2022; Hussain i koautori, 2021; Kumar i koautori, 2020). Primenjuju se za kontekstualizaciju faktora koji utiču na nivoe zagađenja i predikciju koncentracija zagađujućih materija na osnovu različitih varijabli kao što su meteorološki uslovi, industrijske aktivnosti, saobraćaj, individualna ložišta i slično (Birant, 2011; C. Cao, 2024; Jamal i Nodehi, 2017; Venter i koautori, 2020; Wei i Kao, 2023). Ovi modeli imaju oblik stabla sa čvorovima i granama, gde svaki čvor predstavlja testiranje određene karakteristike podataka, a grane predstavljaju rezultate testa. Na kraju svake grane nalaze se listovi koji sadrže klasifikacione ili regresione vrednosti (Pelin Okutan, 2024).

Stabla odlučivanja[24] omogućavaju intuitivno razumevanje procesa donošenja odluka tokom procesa obučavanja, jer se mogu lako vizualizovati i interpretirati. Njihove prednosti uključuju otpornost na nedostatke u podacima, kao što su nedostajuće vrednosti i šum (nasumične ili nerelevantne informacije). Takođe, efikasno obrađuju skupove koji sadrže kombinaciju numeričkih i kategoričkih varijabli. Obučavanje modela zasnovano na stablu odlučivanja je

[24] *https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html*

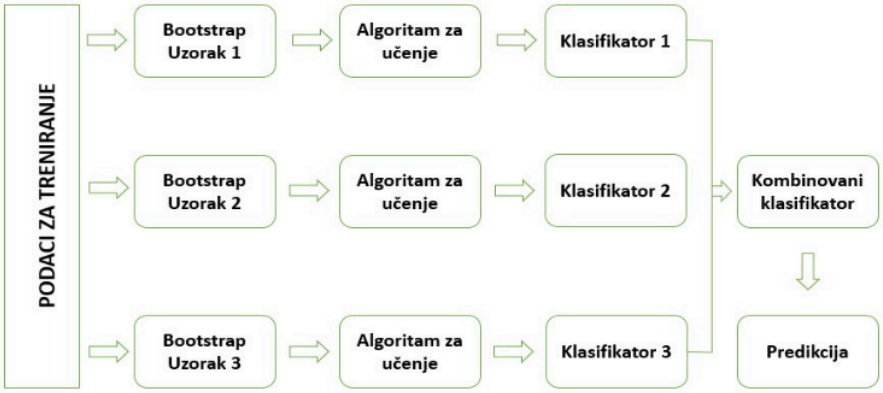
brzo i skalabilno, jer algoritam omogućava paralelizaciju i prilagodljiv je velikim količinama podataka. Jednom obučeno stablo omogućava brzo donošenje predikcija, budući da se nove instance lako propagiraju kroz strukturu stabla.

Međutim, stabla odlučivanja mogu biti podložna preprilagođenosti (*overfitting*), naročito ako su previše duboka ili ako podaci sadrže kompleksne obrasce. U takvim slučajevima, koriste se ansambli (kao što su *Random Forest* ili *Gradient Boosting*), koje kombinuju više stabala radi poboljšanja tačnosti i generalizacije modela.

7.3.1.2 Ansambli stabala odlučivanja

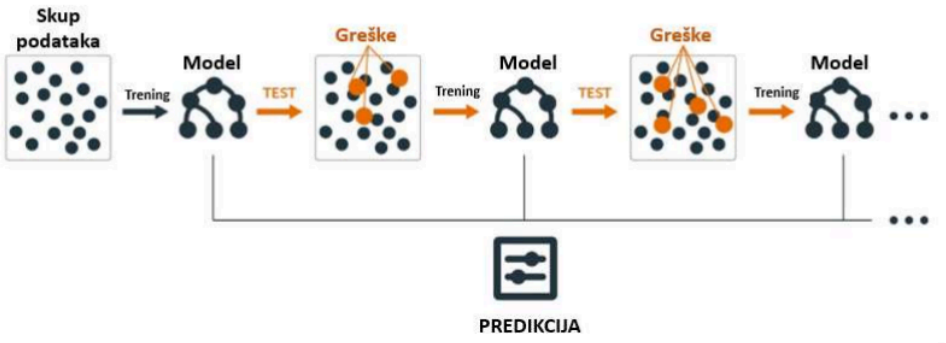
Ansambli metoda u mašinskom učenju kombinuju više modela kako bi poboljšale tačnost, robusnost i stabilnost predikcija. Spajanjem više slabijih modela u jedan snažan, ove tehnike ublažavaju slabosti pojedinačnih modela i smanjuju preprilagođenost (Dietterich, 2000). Dve najzastupljenije strategije su *Bagging* i *Boosting*.

Bagging (*Bootstrap Aggregating*) trenira više modela na različitim podskupovima podataka, generisanim uzorkovanjem sa ponavljanjem (slika 13). Ovi modeli se kombinuju korišćenjem proseka (za regresiju) ili većinskog glasanja (za klasifikaciju), čime se smanjuje varijansa i povećava preciznost. Najpoznatiji predstavnici su *Random Forest* i *ExtraTrees*. *Random Forest* pravi stabla na osnovu nasumičnih podskupova i bira optimalne podele. *ExtraTrees* dodatno uvodi nasumičnost birajući i podele potpuno slučajno, čime povećava raznolikost među stablima, smanjuje korelaciju i ubrzava treniranje (Emmanuella Budu, 2023). Zahvaljujući ovim svojstvima, *Bagging* metode su robusne na šum i pogodne za rad sa visoko-dimenzionalnim podacima (DHH, 2023).



Slika 13. Glavni koraci rada koncepta *Bagging* (CFI, 2025)

Boosting obučava stabla sekvencijalno, gde svako novo stablo uči iz grešaka prethodnih (slika 14). Ovaj pristup smanjuje i varijansu i pristrasnost (*bias*), što vodi ka visokoj tačnosti predikcija. Algoritmi kao što su *AdaBoost, Gradient Boosting, XGBoost, CatBoost* i *LightGBM* često se koriste u složenim predikcionim zadacima (Divya Gera, 2023; GeeksforGeeks, 2023). Glavna prednost *Boostinga* je njegova sposobnost da modelira kompleksne obrasce, dok mu je mana sklonost preprilagođavanje ukoliko se ne primeni pravilna regulacija.



Slika 14. Glavni koraci rada u Boosting-a (izvor: https://mlvu.github.io/lecture10/ pristupljeno 22.1.2025. godine)

Izbor između koncepata *Bagging* i *Boosting* zavisi od karakteristika podataka i ciljeva analize (Roshmita Dey, 2023). U analizi kvaliteta vazduha, ansambli stabala odlučivanja pokazali su se posebno efikasnim za modeliranje složenih međuzavisnosti između brojnih faktora (Ma i koautori, 2023; Mampitiya i koautori, 2023; Ravindiran i koautori, 2023).

7.3.1.2.1 AdaBoost

AdaBoost je jedan od prvih i najpoznatijih *boosting* algoritama, razvijen 1997. godine (Freund i Schapire, 1997). Namenjen je prvenstveno binarnoj klasifikaciji i zasniva se na iterativnom jačanju slabih klasifikatora. Nakon svakog koraka obučavanja, težina nepravilno klasifikovanih primera se povećava, čime novi modeli usmeravaju pažnju na najteže slučajeve. Konačna odluka donosi se otežinjenim glasanjem svih modela, u skladu sa njihovom tačnošću. Iako može biti osetljiv na šum, *AdaBoost* značajno poboljšava performanse jednostavnih modela.

7.3.1.2.2 Gradient Boosting

Gradient Boosting (Friedman, 2001) koristi sekvencijalno treniranje modela s ciljem minimizacije funkcije gubitka putem gradijentnog spusta. Svaki sledeći model koriguje greške

prethodnog, čime se postupno poboljšava ukupna tačnost. Ovaj pristup je osnova za brojne savremene algoritme.

7.3.1.2.3 XGBoost (Extreme Gradient Boosting)

XGBoost je efikasan i skalabilan algoritam koji koristi optimizovani *boosting* sa stabla odlučivanja kao baznim modelima (T. Chen, 2024). Omogućava brzu obradu velikih skupova podataka zahvaljujući paralelizaciji, fleksibilnoj konfiguraciji hiperparametara i tehnikama za kontrolu preprilagođavanja. Pogodan je za zadatke klasifikacije, regresije i rangiranja.

7.3.1.2.4 CatBoost (Categorical Boosting)

CatBoost je posebno dizajniran za obradu kategoričkih podataka, uz automatsko kodiranje pomoću *Ordered Target Encoding* (Dorogush i koautori, 2018; Prokhorenkova i koautori, 2018). Koristi simetrična stabla, *Ordered Boosting* i ugrađene metode balansiranja klasa. Efikasno rukuje nebalansiranim skupovima i idealan je za primene u realnom vremenu, kao što su sistemi za preporuke i praćenje kvaliteta vazduha.

7.3.1.2.5 LightGBM (Light Gradient Boosting Machine)

LightGBM je optimizovan za velike i visoko-dimenzionalne skupove podataka. Koristi učenje bazirano na histogramima, paralelno procesiranje i diskretizaciju varijabli, što značajno ubrzava obuku modela i štedi memoriju (Yang i koautori, 2024). Međutim, zbog nedostatka ugrađene selekcije varijabli, preporučuje se prethodna analiza podataka.

7.3.1.2.6 HGBT (Histogram-based Gradient Boosting)

HGBT poboljšava klasični *Gradient Boosting* primenom dve ključne inovacije *binning* varijabli, gde se kontinuirane vrednosti preslikavaju na diskretne binove, što ubrzava računanje optimalnih podela i smanjuje memorijske zahteve, kao i efikasna obrada nedostajućih vrednosti, kod koje automatski mehanizmi prepoznaju i optimizuju rukovanje nedostajućim podacima (Jason Brownlee, 2021; Scikit-learn developers, 2024). Glavni nedostatak ovog pristupa je potencijalni gubitak informacija usled diskretizacije i povećana složenost podešavanja hiperparametara.

7.3.2 Metode optimizacije parametara modela

Problemi optimizacije predstavljaju jedan od većih izazova u oblasti mašinskog učenja i veštačke inteligencije i njihovo rešavanje je od izuzetnog značaja za postizanje efikasnijeg funkcionisanja realnih sistema. Stoga, razvoj modela i odgovarajućih metoda za rešavanje raznovrsnih problema optimizacije ima značajnu praktičnu važnost.

Prema pristupu razlikuju se dve glavne kategorije metoda optimizacije: egzaktne i približne (Micev, 2020). Egzaktne metode obezbeđuju optimalna rešenja, ali su resursno zahtevne naročito u pogledu vremena izvršavanja, dok približne metode pružaju brza rešenja sa određenom preciznošću u kratkom vremenskom periodu. Mnogi optimizacioni problemi su eksponencijalne složenosti, što ih svrstava u klasu NP-teških problema (nedeterminističkih problema teških za rešavanje u polinomskom vremenu). Egzaktne metode pokazuju se efikasnim za rešavanje ovih problema samo kada se radi o malim dimenzijama podataka, dok je primena istih na velikim dimenzijama praktično nemoguća. Često se dešava da ove metode ne uspevaju da obezbede ni rešenje koje bi se smatralo zadovoljavajućim, zbog čega je razvoj i primena efikasnih približnih metoda od ključne važnosti. Povećanje računarske snage omogućilo je rešavanje mnogih problema korišćenjem približnih metoda optimizacije, koje postižu prihvatljiv nivo tačnosti.

Metode optimizacije se mogu klasifikovati još i prema predvidljivosti rezultata i to na determinističke i stohastičke metode (Brajević, 2015). Determinističke metode se karakterišu time da daju isti rezultat za iste ulazne parametre i uslove početne tačke. One prate precizan set koraka kako bi pronašle optimalno rešenje ili konvergirale ka njemu. Nasuprot determinističkim metodama, stohastičke metode koriste slučajne promenljive ili procese kako bi pretražile prostor rešenja, čineći ih probabilističkim. Ove metode mogu da istraže širi prostor rešenja i pronađu bolja rešenja koja determinističke metode ne bi lako pronašle.

7.3.2.1 Podešavanje hiperparametara

Efikasno podešavanje hiperparametara ključno je za postizanje optimalne preciznosti modela i njegove sposobnosti generalizacije. Hiperparametri određuju strukturu i ponašanje modela i moraju se postaviti pre obučavanja. Loš izbor hiperparametara može dovesti do veoma jednostavnih modela (*underfitting*) ili prekomerno kompleksnih (*overfitting*), što negativno utiče na performanse.

Modeli koriste različite hiperparametre, npr. parametar regularizacije (C), tip kernela ili broj stabala, maksimalnu dubinu i brzinu učenja u algoritmima baziranim na stablima (Keylabs AI, 2024).

Za njihovo podešavanje koriste se sledeće metode:

1) *Grid Search* – iscrpno testiranje svih kombinacija unapred definisanih vrednosti; pouzdana, ali skupa metoda u smislu konzumiranja resursa i vremena izvršavanja.

2) *Random Search* – nasumično testiranje vrednosti; brža i često dovoljno efikasna za velike prostore pretrage.
3) *Bayesian Optimization* – koristi probabilističke modele za usmeravanje pretrage ka obećavajućim regionima prostora hiperparametara.
4) *Metaheuristike* – naročito korisne za složene, visokodimenzionalne podatke. Njihova primena opisana je u narednom odeljku.

7.3.2.1.1 Metaheuristička optimizacija

Metaheuristike su stohastički algoritmi za približno rešavanje NP-teških optimizacionih problema. Njihova prednost leži u kombinovanju eksploatacije (korišćenje poznatih dobrih rešenja) i eksploracije (istraživanje novih delova prostora). Prema strategiji pretrage, dele se na: *single-solution,* gde je fokus na jednom rešenju (npr. *Simulated Annealing*); *population-based*, koga karakteriše rad sa više rešenja paralelno (npr. PSO, GA), i hibridne metode koje kombinuju više pristupa.

U ovoj disertaciji, metaheuristike su korišćene za fino podešavanje hiperparametara tri najbolja modela mašinskog učenja dobijena za benzen kao ciljnu varijablu i sve ostale varijable kao prediktore. Primenjeni su sledeći algoritmi:

Firefly Algorithm (FFA)

Inspirisan ponašanjem svitaca, FFA koristi mehanizam privlačenja ka svetlijim jedinkama u prostoru pretrage. Svetlost predstavlja kvalitet rešenja, a privlačnost opada s rastojanjem. Efikasno balansira između lokalne i globalne pretrage (Yang, 2009).

Artificial Bee Colony (ABC)

Baziran na ponašanju pčela u potrazi za hranom, ABC kombinuje lokalnu pretragu (radne pčele) i globalnu pretragu (izviđači), uz mehanizam pamćenja boljih rešenja. Pogodan je za optimizaciju u složenim, višedimenzionalnim prostorima (Karaboga, 2010).

Harris Hawks Optimization (HHO)

Modelira kooperativno ponašanje jastrebova u lovu. Sastoji se od faze istraživanja, prelazne faze i faze eksploatacije, uz prilagodljive strategije lova u zavisnosti od energije plena (Heidari i koautori, 2019).

Sine Cosine Algorithm (SCA)

Koristi sinusne i kosinusne funkcije za ažuriranje pozicija agenata u prostoru rešenja. Obezbeđuje dobru ravnotežu između istraživanja i eksploatacije zahvaljujući stohastičkim mehanizmima i kontrolnim parametrima (Mirjalili, 2016).

Slime Mould Algorithm (SMA)

Zasniva se na biološkom ponašanju sluzave plesni koja efikasno pronalazi optimalne puteve do izvora hrane. Algoritam koristi faze „pristupa“ i „obavijanja“ cilja, čime balansira globalnu i lokalnu pretragu (Li i koautori, 2020).

Quantum Superposition Algorithm (QSA)

Inspirisan kvantnom superpozicijom, koristi kvantne bitove za simultano istraživanje više stanja. Ova svojstva omogućavaju brzu konvergenciju i visoku efikasnost, posebno u velikim prostorima rešenja (Zhang i koautori, 2018).

Metaheuristike su se pokazale kao efikasan pristup za optimizaciju hiperparametara, naročito u slučajevima kada tradicionalne metode postaju nepraktične zbog složenosti i veličine prostora pretrage.

7.3.3 Proces evaluacije i izbor optimalnog modela

Evaluacija i optimizacija su ključni koraci u izgradnji pouzdanih modela mašinskog učenja. Evaluacija identifikuje tačnost i ograničenja modela, dok optimizacija poboljšava performanse i sposobnost generalizacije na nove podatke. U ovoj disertaciji, evaluacija je sprovodena pomoću unakrsne validacije, dok je optimizacija hiperparametara izvršena primenom metaheuristika.

7.3.3.1 Unakrsna validacija

Unakrsna validacija (*cross-validation*) je tehnika za proveru generalizacione sposobnosti modela. Koristi se kako bi se smanjio rizik od prenaučenosti i dobila pouzdanija procena performansi. Najčešći oblik je *k-fold* validacija, gde se podaci nasumično podele na *k* jednakih delova (*foldova*). U svakoj iteraciji jedan fold se koristi za testiranje, a preostalih *k–1* za obučavanje. Proces se ponavlja *k* puta, a rezultati se agregiraju.



Slika 15: 5-fold cross-validacija (Rebecca Patro, 2021)

U ovoj disertaciji primenjena je 5-*fold* unakrsna validacija, pri čemu su podaci podeljeni na pet jednakih delova. Svaki deo je jednom korišćen kao test skup, a četiri puta kao skup za obučavanje (slika 15). Ovaj pristup obezbedio je sveobuhvatnu upotrebu podataka i smanjio rizik od preprilagođavanja.

7.3.3.2 Evaluacija modela pomoću R^2 metrike

Za procenu performansi korišćena je R-kvadrat vrednost (R^2), statistička mera koja pokazuje koliko dobro model objašnjava varijaciju u zavisnoj promenljivoj i koautori, 2012). R^2 se kreće između 0 i 1 (ili može biti negativan), pri čemu veća vrednost označava veću prediktivnu moć:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

RSS (*Residual Sum of Squares* – suma kvadrata reziduala) koja meri razliku između stvarnih vrednosti (y_i) i predviđenih vrednosti modela ($\check{y}_i$),

$$RSS = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \check{y}_i)^2$$

TSS (*Total Sum of Squares* – ukupna suma kvadrata) koja meri ukupnu varijaciju stvarnih vrednost u odnosu na njihovu srednju vrednost ($\bar{y}$).

$$TSS = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$$

- $R^2 \approx 1$: model uspešno objašnjava varijaciju
- $R^2 \approx 0$: model ne pruža bolje predikcije od srednje vrednosti
- $R^2 < 0$: model ima slabije performanse od naivnog pristupa

Na primer, $R^2 = 0.8$ znači da model objašnjava 80% varijacije (slika 16).



Slika 16. Interpretacija R^2 vrednosti – $R^2 = 1$ (levo), $R^2 = 0{,}8$ (u sredini) i $R^2 = 0$ (desno) (izvor: https://tinyurl.com/mphs5fuy pristupljeno 27.1.2025. godine)

Primenom svih ranije opisanih algoritama, omogućena je identifikacija optimalnih hiperparametara modela mašinskog učenja kako bi se poboljšali rezultati. Nakon što je određen optimalni skup hiperparametara za tri modela najboljih performansi, izabran je najbolji model na osnovu njegove R^2 vrednosti i primenjen na skupu podataka radi interpretacije. Performanse modela dodatno su ocenjene korišćenjem metrika kao što su MAE MSE, RMSE, MAPE i maksimalna greška, čime je potvrđena njegova stabilnost i preciznost. Ovaj metodološki pristup omogućio je da konačni model ima visoku tačnost i pouzdanost u svojim predikcijama, čime su postignute najbolje moguće prediktivne performanse modela.

7.3.3.3 Srednja apsolutna greška (MAE)

Srednja apsolutna greška (*Mean Absolute Error* – MAE) predstavlja meru kvaliteta predikcije u regresionim modelima i pokazuje prosečno apsolutno odstupanje predviđenih vrednosti od stvarnih. Računa se kao srednja vrednost apsolutnih razlika između predviđenih i stvarnih vrednosti, pri čemu ne uzima u obzir smer greške, već samo njen intenzitet. Izražava se u istim jedinicama kao i ciljna varijabla, što olakšava interpretaciju. Manja vrednost MAE ukazuje na veću preciznost modela.

Izračunava se prema formuli:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i - \widehat{x_i}|$$

Gde je:

n ukupan broj vrednosti u skupu za testiranje,

x_i stvarna vrednost ciljne varijable,

$\widehat{x_i}$ predikcija modela.

7.3.3.4 Srednja kvadratna greška (MSE)

Srednja kvadratna greška (*Mean Squared Error* – MSE) predstavlja prosečnu kvadratnu razliku između predviđenih i stvarnih vrednosti. Ova metrika je posebno važna u projektima u realnom vremenu, jer omogućava kvantitativno merenje preciznosti modela i identifikaciju odstupanja u predikcijama. Niža vrednost ukazuje na manju razliku između stvarnih i predviđenih vrednosti znači manji kompromis između pristrasnosti i varijanse, što doprinosi boljoj generalizaciji modela.

Izračunava se prema formuli:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \widehat{x_i})^2$$

7.3.3.5 Srednja kvadratna greška (RMSE)

Srednja kvadratna greška (*Root Mean Squared Error* – RMSE) predstavlja kvadratni koren MSE. Predstavlja meru prosečne greške modela u predikciji, pri čemu se kvadriraju razlike između stvarnih i predviđenih vrednosti, zatim računa njihov prosek i kvadratni koren. Na taj način se izražava u istim jedinicama kao i ciljna varijabla, što omogućava intuitivnu interpretaciju. Niža vrednost RMSE ukazuje na veću tačnost modela i bolju sposobnost predikcije.

Izračunava se prema formuli:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \widehat{x_i})^2}$$

7.3.3.6 Srednja apsolutna procentualna greška (MAPE)

Srednja apsolutna procentualna greška (*Mean Absolute Percentage Error* – MAPE) meri prosečno relativno odstupanje između stvarnih vrednosti i predikcije, izraženo u procentima. Izračunava se kao srednja vrednost apsolutnih procentualnih grešaka za sve podatke u skupu. Ova metrika omogućava lakšu interpretaciju greške bez obzira na jedinice posmatranih vrednosti. Niža vrednost MAPE ukazuje na veću tačnost modela, dok visoke vrednosti sugerišu značajna odstupanja u predikcijama.

Izračunava se prema formuli:

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{x_i - \widehat{x_i}}{x_i}\right|$$

7.3.3.7 Maksimalna greška (Max Error)

Maksimalna greška (*Maximum error – Max Error*) pokazuje najveću razliku između predviđene vrednosti modela i stvarne vrednosti. Drugim rečima, ona govori koliko najviše model može da pogreši u pojedinačnom slučaju. Izračunava se prema formuli:

$$Max\ Error = max|x_i - \hat{x_i}|$$

7.4 Metode interpretacije modela mašinskog učenja

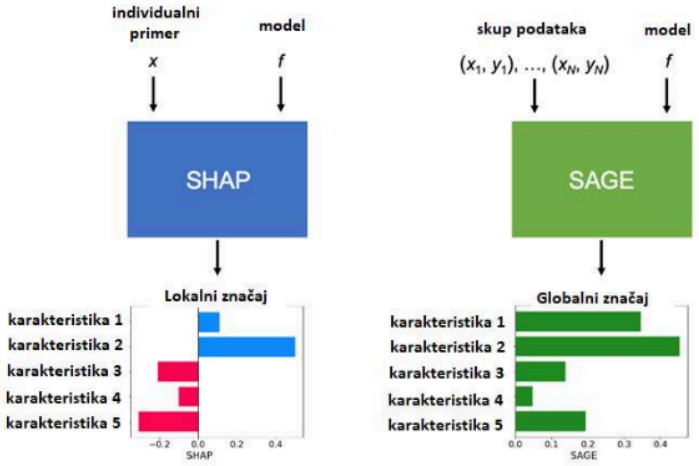
Metode interpretacije modela mašinskog učenja (*Explainable Artificial Intelligence – XAI*) igraju ključnu ulogu u razumevanju odluka koje donose modeli mašinskog učenja, posebno kada se radi o složenim modelima kao što su ansambli stabala odlučivanja.

Nakon identifikacije modela sa najboljim performansama, primenjene su XAI metode SAGE i SHAP kako bi se obezbedila interpretabilnost modela (Covert i koautori, 2020; Lundberg & Lee, 2017). Cilj je bio da se objasni način na koji model koristi pojedinačne ulazne varijable prilikom donošenja predikcija i time omogući bolje razumevanje njegovog ponašanja.

Obe metode se zasnivaju na Šeplijevim vrednostima iz teorije igara, koje omogućavaju fer kvantifikaciju doprinosa svake ulazne varijable predikciji modela. SAGE se koristi za procenu globalne važnosti prediktora na nivou celog skupa podataka. Ona pokazuje koliko model zavisi od svake varijable i time omogućava identifikaciju ključnih faktora koji najviše utiču na performanse modela. SHAP obezbeđuje lokalna objašnjenja, tj. prikazuje kako svaka ulazna varijabla doprinosi pojedinačnim predikcijama, što pomaže u analizi specifičnih slučajeva i otkrivanju obrazaca u podacima.

Na Slici 17 prikazani su primeri SHAP i SAGE analiza. Kod SHAP prikaza, plave vrednosti označavaju pozitivne doprinose (povećavaju vrednost predikcije), dok crvene vrednosti ukazuju na negativne doprinose (smanjuju vrednost predikcije). Na primer, „karakteristika 2“ ima jak pozitivan uticaj, dok „karakteristika 5“ ima negativan uticaj na konkretnu predikciju. Kod SAGE prikaza, zelene vrednosti označavaju globalni značaj varijabli. Što je veća vrednost, to je veći uticaj varijable na ukupne performanse modela. Na primer, „karakteristika 2“ je najznačajnija za performanse modela, dok „karakteristika 4“ ima minimalan uticaj.

Ovakva analiza ne samo da povećava poverenje korisnika u model, već omogućava i detaljniju interpretaciju rezultata i bolje donošenje odluka u realnim primenama.



Slika 17. Primer lokalne (SHAP, levo) i globalne (SAGE, desno) interpretacije uticaja varijabli (Ian Covert, 2020)

7.4.1 Shapley Additive Global Importance

Shapley Additive Global Importance je metoda za globalnu interpretaciju modela mašinskog učenja, kojom se kvantifikuje ukupni doprinos svake ulazne varijable smanjenju greške modela. Zasniva se na Šeplijevim vrednostima iz teorije igara i poredi performanse modela kada se pojedinačne varijable uključuju ili isključuju iz predikcija.

U osnovi, SAGE procenjuje koliko se tačnost modela poboljšava uključivanjem određene varijable, analizirajući sve moguće kombinacije prediktora. Iako bi potpuna analiza svih permutacija bila najpreciznija, zbog velike računarske složenosti primenjuju se aproksimacije kako bi se postigla efikasnost.

Ova metoda ne samo da identifikuje najuticajnije varijable, već otkriva i njihove međusobne interakcije, pružajući dublji uvid u ponašanje modela i povećavajući transparentnost i poverenje u njegove odluke.

7.4.2 Shapley Additive Explanations

Shapley Additive Explanations je savremena metoda za lokalnu interpretaciju modela mašinskog učenja, takođe zasnovana na Šeplijevim vrednostima iz teorije igara. Omogućava kvantifikaciju doprinosa svake ulazne varijable na pojedinačna predviđanja modela, čime doprinosi transparentnosti i boljem razumevanju njegovog ponašanja.

Metod poredi predikciju modela u odsustvu određene varijable sa predikcijom u njenom prisustvu, pri čemu se kao osnova koristi referentna vrednost, prosečna predikcija modela.

Svaki doprinos se računa kao prosečna promena u predikciji kroz sve moguće rasporede ulaznih karakteristika.

Dobijene SHAP vrednosti ukazuju na smer (pozitivan/negativan) i intenzitet uticaja svake karakteristike na konkretnu predikciju. Na osnovu njih moguće je identifikovati najuticajnije prediktore i usmeriti dalju analizu ili optimizaciju modela.

U ovom istraživanju, pored apsolutnih SHAP vrednosti, analizirane su i:

- relativne SHAP vrednosti, koje omogućavaju upoređivanje značaja varijabli za datu instancu podataka (REF) (Stojić i koautori, 2022),
- normalizovane SHAP vrednosti, koje skaliranjem na očekivanu vrednost ciljne promenljive omogućavaju interpretaciju nezavisnu od jedinica ili domena vrednosti,
- inherentne SHAP vrednosti, koje uvode kategorizaciju doprinosa varijabli na osnovu raspodele njihovi apsolutnih uticaja (REF) (Radić i koautori, 2025). Ovakav sistem omogućava precizniju procenu relativnog značaja svake varijable, bez obzira na njenu apsolutnu vrednost, i naglašava njihov potencijalni doprinos ukupnim predikcijama modela. Razvrstavanje uticaja svake varijable na predikciju modela izvršeno je u pet kategorija:
  - visok negativan uticaj: ispod srednje vrednosti svih negativnih SHAP vrednosti,
  - umeren negativan: između srednje vrednosti negativnih SHAP vrednosti i -10% od 95. procentnog kvantila apsolutnih SHAP vrednosti,
  - nizak uticaj: između -10% i +10% 95. procentnog kvantila,
  - umeren pozitivan: između +10% i srednje vrednosti pozitivnih SHAP vrednosti i
  - visok pozitivan uticaj: iznad srednje vrednosti pozitivnih SHAP vrednosti.

7.5 Klaster analiza uticaja

Kombinovanjem tehnike redukcije dimenzionalnosti UMAP i algoritma klasterizacije HDBSCAN omogućena je dublja analiza faktora koji utiču na koncentraciju benzena. Ovaj pristup otkriva obrasce i grupiše slične podatke, čime se poboljšava razumevanje lokalnih uticaja i složenih međuzavisnosti među varijablama.

7.5.1 Redukcija dimenzionalnosti

Kod visoko-dimenzionalnih podataka, analiza postaje složena, algoritmi postaju manje efikasni, a modeli skloniji preprilagođenosti. Redukcija dimenzionalnosti može omogućiti prevazilaženje ovi problema transformacijom originalnog prostora u niže-dimenzionalni, uz

očuvanje ključnih informacija. Time se eliminišu redundantnost i šum, poboljšava generalizacija i olakšava vizualizacija.

Među savremenim metodama posebno se ističe UMAP, koji uspešno zadržava lokalne i globalne strukture podataka, skalabilan je i robustan na šum, te omogućava efikasnu analizu i interpretaciju kompleksnih odnosa.

7.5.1.1 *Uniform Manifold Approximation and Projection*

Uniform Manifold Approximation and Projection je napredna tehnika nelinearne redukcije dimenzionalnosti (McInnes i koautori, 2018), koja čuva strukture podataka prilikom projektovanja u prostor manjeg broja dimenzija. Proces se sastoji od:

- konstrukcije grafa koji definiše odnose između instanci u prostoru visoke dimenzionalnosti,
- aproksimacije neodređenosti korišćenjem fuzzy pristupa i
- optimizacije rasporeda instanci pomoću stohastičkog gradijentnog spusta koji nalazi njihov raspored u prostoru niže dimenzionalnosti.

Rezultat je komprimovana, ali informativna reprezentacija podataka, pogodna za dalje analize poput klasterizacije.

7.5.1.2 Klasterizacija zasnovana na hijerarhijskoj gustini

Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise je napredni algoritam klasterizacije koji prevazilazi ograničenja klasičnog pristupa DBSCAN, omogućavajući identifikaciju klastera različitih gustina bez fiksnih parametara. Zasniva se na:

- konstrukciji minimalnog stabla povezanosti,
- identifikaciji komponenti gustine i
- oceni stabilnosti klastera koji se izdvajaju iz hijerarhijske strukture.

Za razliku od metode DBSCAN, HDBSCAN se prilagođava lokalnim varijacijama gustine i automatski prepoznaje šum (nepripadajuće tačke). Ova fleksibilnost čini ga pogodnim za analizu kompleksnih i realnih skupova podataka sa izraženim varijacijama u strukturi.

8. Rezultati i diskusija

Rezultati istraživanja, kao i diskusija dobijenih rezultata u skladu sa ostvarivanjem naučnih ciljeva ove disertacije, predstavljeni su u ovom poglavlju. Kao što je ranije navedeno, poglavlje je podeljeno na četiri segmenta koji obuhvataju: analizu stanja kvaliteta vazduha pre i tokom vanrednog stanja, identifikaciju i kvantifikaciju dominantnih izvora benzena pre i tokom vanrednog stanja, procenu uticaja faktora životne sredine, kao i razmatranje uticaja ograničenja mobilnosti i promena u ponašanju stanovništva tokom vanrednog stanja izazvanih pandemijom na koncentracije benzena u Beogradu.

8.1 Stanje kvaliteta vazduha u Beogradu pre i tokom trajanja pandemije

U skladu sa ciljem analize, podaci su podeljeni na dva perioda: pre-COVID period (2.- 15. mart 2020. godine) i COVID period (15. mart-15. maj 2020. godine). Kako je tokom pandemije zabeleženo poboljšanje kvaliteta vazduha u mnogim gradovima širom sveta, i podaci za Beograd (tabela 7) ukazuju na značajno smanjenje prosečnih koncentracija azotnih oksida sa 36,9 ppb u pre-COVID periodu na 12,2 ppb tokom COVID perioda (u slučaju NOx), kao i ugljen-monoksida sa 0,5 ppb na 0,3 ppb. Budući da su NOx i CO ključni indikatori zagađenja iz saobraćaja, ovo smanjenje može se direktno povezati sa redukovanom mobilnošću i smanjenim intenzitetom saobraćaja.

Nasuprot tome, prosečne koncentracije SO_2 i PM_{10} blago su porasle u COVID periodu: SO_2 sa 30,5 ppb na 33,6 ppb, a PM_{10} sa 10,2 ppb na 12,4 ppb. Ovakav trend verovatno se može objasniti zadržavanjem aktivnosti u pojedinim sektorima poput korišćenja individualnih ložišta, termoelektrana, prehrambene i petrohemijske industrije, koje su, kao deo esencijalne infrastrukture, nastavile s radom u uobičajenom režimu.

U pre-COVID periodu, najveće koncentracije benzena (protonizovana masa m79) iznosile su 2,26 ppb, sa prosečnom koncentracijom od 0,49 ppb, što je bilo uzrokovano izvorima emisije i vremenskim uslovima karakterističnim za hladniji deo godine. Nakon uvođenja vanrednog stanja 15. marta, prosečna koncentracija benzena smanjena je na 0,24 ppb, dok je maksimalna koncentracija u tom periodu bila 1,61 ppb. Smanjenje prosečnih vrednosti koncentracija tokom pandemije primećeno je gotovo kod svih organskih jedinjenja, osim kod metanola (m33). S druge strane, iako su prosečne vrednosti koncentracija ovih jedinjenja, među kojima su i toluen (m93) i C_8-aromatici (m107) beležile pad, kod značajnog broja jedinjenja primećeno je povećanje maksimalno zabeleženih koncentracija kada se uporede podaci iz pre-COVID i

COVID perioda. U okviru ove grupe IOJ posebno se mogu izdvojiti etanol (m47) i benzil alkohol (m109) čije su maksimalno zabeležene koncentracije višestruko premašile vrednosti iz pre-COVID perioda. Ovaj trend može ukazivati na opšte smanjenje emisija ovih jedinjenja usled smanjenja emisija iz industrije i saobraćaja tokom pandemije, ali i na povremene epizode povećanih emisija koje mogu poticati od specifičnih izvora, kao što je povećana upotreba proizvoda za dezinfekciju i čišćenje (Johnson i koautori, 2017).

Koncentracije O_3 zabeležile su porast sa prosečnih 31,6 $\mu g/m^3$ u pre-COVID periodu na 55,3 $\mu g/m^3$ u COVID periodu. Ovakav rezultat je verovatna posledica smanjenja koncentracije azotovih oksida i IOJ, glavnih prekursora za reakcije u kojima se troši O_3 (Hashim i koautori, 2021; K. Zhang i koautori, 2022).

Tabela 7. Deskriptivna statistika za merene parametre pre i posle uvođenja vanrednog stanja (Radić i koautori, 2025).

Varijable	**Jedinica**	**Pre-COVID/COVID**						
		Mean	*Std*	*Min*	*25%*	*50%*	*75%*	*Max*
m33	ppb	8,22/ 9,07	3,12/ 4,79	3,86/ 2,56	6,31/ 5,56	7,16/ 7,53	9,11/ 11,53	22,97/ 28,29
m34	ppb	6,11/ 0,2	0,38/ 0,62	5,2/ 0,03	5,85/ 0,06	6,1/ 0,11	6,3/ 0,17	7,3/ 6,96
m35	ppb	0,04/ 0,04	0,03/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04	0,21/ 0,53
m36	ppb	0,14/ 0,05	0,04/ 0,03	0,05/ 0,03	0,11/ 0,03	0,15/ 0,05	0,17/ 0,06	0,23/ 0,18
m38	ppb	0,08/ 0,25	0,09/ 0,52	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,08/ 0,14	0,55/ 3,46
m39	ppb	0,22/ 0,65	0,31/ 1,46	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,03	0,27/ 0,3	1,51/ 9,4
m40	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,08
m41	ppb	0,73/ 0,19	0,85/ 0,36	0,03/ 0,03	0,19/ 0,03	0,45/ 0,04	0,93/ 0,16	5,02/ 3,9
m42	ppb	0,12/ 0,09	0,08/ 0,06	0,03/ 0,03	0,07/ 0,05	0,11/ 0,07	0,15/ 0,11	0,51/ 0,49
m43	ppb	1,3/ 0,46	1,73/ 1,0	0,03/ 0,03	0,18/ 0,03	0,63/ 0,05	1,78/ 0,47	10,56/ 21,6
m44	ppb	0,08/ 0,05	0,07/ 0,04	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,06/ 0,04	0,1/ 0,05	0,54/ 0,74
m45	ppb	1,02/ 0,53	1,08/ 0,7	0,05/ 0,03	0,24/ 0,07	0,62/ 0,24	1,45/ 0,72	5,88/ 6,46
m46	ppb	0,12/ 0,06	0,17/ 0,11	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,12/ 0,04	1,12/ 1,22
m47	ppb	0,99/ 0,59	1,17/ 2,43	0,04/ 0,03	0,28/ 0,09	0,49/ 0,26	1,23/ 0,62	6,27/ 83,83
m48	ppb	0,04/ 0,04	0,02/ 0,05	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,17/ 1,83

m49	ppb	0,05/ 0,04	0,03/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,05/ 0,04	0,22/ 0,48
m50	ppb	0,41/ 0,07	0,08/ 0,04	0,2/ 0,03	0,35/ 0,04	0,43/ 0,06	0,47/ 0,09	0,54/ 0,34
m51	ppb	0,04/ 0,04	0,01/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04	0,05/ 0,05	0,11/ 0,15
m52	ppb	0,11/ 0,05	0,03/ 0,04	0,04/ 0,03	0,09/ 0,03	0,11/ 0,03	0,12/ 0,05	0,26/ 0,55
m53	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,18/ 0,11
m54	ppb	0,1/ 0,05	0,03/ 0,02	0,05/ 0,03	0,08/ 0,03	0,09/ 0,04	0,11/ 0,06	0,37/ 0,3
m55	ppb	0,1/ 0,13	0,13/ 0,3	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,12/ 0,06	0,9/ 2,41
m56	ppb	0,38/ 0,12	0,14/ 0,22	0,1/ 0,03	0,3/ 0,03	0,36/ 0,03	0,44/ 0,12	0,96/ 2,44
m57	ppb	0,27/ 0,06	0,39/ 0,11	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,13/ 0,03	0,3/ 0,03	2,32/ 1,78
m58	ppb	0,03/ 0,04	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,04	0,15/ 0,19
m59	ppb	1,86/ 1,61	1,01/ 0,83	0,65/ 0,41	1,26/ 1,02	1,53/ 1,37	2,29/ 2,03	8,48/ 6,49
m60	ppb	0,08/ 0,08	0,06/ 0,05	0,03/ 0,03	0,05/ 0,04	0,07/ 0,06	0,1/ 0,1	0,43/ 0,48
m61	ppb	2,85/ 1,2	2,01/ 1,33	0,24/ 0,03	1,63/ 0,37	2,2/ 0,85	3,39/ 1,6	14,86/ 25,76
m62	ppb	0,13/ 0,07	0,11/ 0,05	0,03/ 0,03	0,07/ 0,03	0,1/ 0,05	0,16/ 0,08	0,74/ 0,7
m63	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,12/ 0,11
m64	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m65	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,19
m66	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03
m67	ppb	0,04/ 0,03	0,03/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,23/ 0,28
m68	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,18/ 0,26
m69	ppb	0,11/ 0,05	0,2/ 0,07	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,09/ 0,03	1,29/ 1,66
m70	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,11/ 0,12
m71	ppb	0,05/ 0,04	0,07/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,47/ 0,5
m72	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m73	ppb	0,18/ 0,1	0,15/ 0,09	0,03/ 0,03	0,08/ 0,04	0,13/ 0,07	0,21/ 0,13	0,87/ 0,76
m74	ppb	0,07/ 0,05	0,02/ 0,02	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,06/ 0,04	0,08/ 0,05	0,17/ 0,17
m75	ppb	0,1/ 0,05	0,2/ 0,08	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,03	1,54/ 1,35
m76	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m77	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,05
m78	ppb	0,03/	0,0/	0,03/	0,03/	0,03/	0,03/	0,06/

		0,03	0,0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07
m79	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
m81	ppb	0,13/ 0,05	0,13/ 0,04	0,03/ 0,03	0,06/ 0,03	0,09/ 0,03	0,15/ 0,05	0,75/ 0,47
m82	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,08
m83	ppb	0,1/ 0,04	0,15/ 0,06	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,11/ 0,03	1,01/ 1,1
m84	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,1/ 0,08
m85	ppb	0,04/ 0,03	0,06/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,59/ 0,35
m86	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,09
m87	ppb	0,14/ 0,07	0,16/ 0,07	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,09/ 0,04	0,17/ 0,08	1,13/ 0,88
m88	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,1
m89	ppb	0,04/ 0,03	0,04/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,4/ 0,3
m90	ppb	0,03/ 0,04	0,0/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,3
m91	ppb	0,03/ 0,04	0,0/ 0,04	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,34
m92	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,08
m93	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
m95	ppb	0,09/ 0,04	0,13/ 0,05	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,09/ 0,03	1,0/ 0,64
m96	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,09
m97	ppb	0,23/ 0,08	0,3/ 0,13	0,03/ 0,03	0,06/ 0,03	0,14/ 0,03	0,27/ 0,08	2,02/ 1,82
m98	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,19/ 0,15
m99	ppb	0,07/ 0,04	0,09/ 0,04	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,03	0,7/ 0,51
m100	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,06
m101	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,22/ 0,83
m102	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m103	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,13
m104	ppb	0,05/ 0,04	0,02/ 0,02	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,04/ 0,03	0,05/ 0,05	0,12/ 0,14
m105	ppb	0,06/ 0,04	0,04/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,07/ 0,05	0,29/ 0,35
m106	ppb	0,04/ 0,04	0,01/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,05/ 0,03	0,09/ 0,34
m107	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
m108	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,13
m109	ppb	0,04/ 0,07	0,04/ 0,11	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,36/ 1,94

m110	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,15
m111	ppb	0,07/ 0,04	0,1/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,07/ 0,03	0,73/ 0,64
m112	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,07
m113	ppb	0,04/ 0,03	0,04/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,3/ 0,23
m114	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,08
m115	ppb	0,03/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,16/ 0,15
m116	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,04
m117	ppb	0,05/ 0,03	0,05/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,45/ 0,28
m118	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,04/ 0,03	0,09/ 0,07
m119	ppb	0,07/ 0,04	0,03/ 0,02	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,06/ 0,03	0,08/ 0,05	0,29/ 0,21
m120	ppb	0,03/ 0,04	0,0/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,04	0,03/ 0,17
m121	ppb	0,14/ 0,1	0,16/ 0,13	0,03/ 0,03	0,06/ 0,04	0,09/ 0,06	0,16/ 0,11	0,96/ 2,09
m122	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,1/ 0,2
m123	ppb	0,06/ 0,03	0,07/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,5/ 0,76
m124	ppb	0,05/ 0,05	0,02/ 0,06	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,06/ 0,03	0,1/ 0,37
m125	ppb	0,07/ 0,04	0,09/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,07/ 0,03	0,66/ 0,47
m126	ppb	0,03/ 0,05	0,0/ 0,06	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,45
m127	ppb	0,03/ 0,03	0,02/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,18/ 0,71
m128	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,07
m129	ppb	0,07/ 0,04	0,07/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,08/ 0,03	0,53/ 0,31
m130	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,06
m131	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,13/ 0,51
m132	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m133	ppb	0,06/ 0,04	0,04/ 0,02	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,05/ 0,03	0,07/ 0,04	0,26/ 0,66
m134	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m135	ppb	0,1/ 0,05	0,08/ 0,04	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,07/ 0,04	0,11/ 0,05	0,56/ 0,38
m136	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,07
m137	ppb	0,1/ 0,04	0,09/ 0,02	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,06/ 0,03	0,12/ 0,03	0,47/ 0,38
m138	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,1/ 0,07
m139	ppb	0,05/	0,05/	0,03/	0,03/	0,03/	0,05/	0,41/

		0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,29
m140	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,05
m141	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,11/ 0,22
m142	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m143	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,18/ 0,42
m144	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m145	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,06
m146	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m147	ppb	0,04/ 0,03	0,03/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,19/ 0,2
m148	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,06
m149	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,18/ 0,15
m150	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,07/ 0,07
m151	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,2/ 0,19
m152	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03
m153	ppb	0,05/ 0,04	0,05/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,03	0,37/ 0,26
m154	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,09/ 0,08
m155	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,12/ 0,1
m156	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03
m157	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,62
m158	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,08
m159	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,06
m160	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m161	ppb	0,05/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,05/ 0,03	0,17/ 0,46
m162	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,12
m163	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,14/ 0,21
m164	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,07
m165	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,17/ 0,1
m166	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,04
m167	ppb	0,04/ 0,03	0,02/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,18/ 0,19
m168	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,05

m169	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,13/ 0,1
m170	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,08
m171	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,13/ 0,19
m172	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m173	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,06
m174	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,04
m175	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,09/ 0,37
m176	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,08
m177	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,02	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,12/ 0,77
m178	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,13
m179	ppb	0,04/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,12/ 0,1
m180	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m181	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,07
m182	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m183	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,12
m184	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,04
m185	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,11
m186	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,04
m187	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,12
m188	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,08
m189	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,12
m190	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m191	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,22
m192	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m193	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,23
m194	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m195	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,26
m196	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m197	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,15
m198	ppb	0,03/	0,0/	0,03/	0,03/	0,03/	0,03/	0,04/

		0,03	0,0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
m199	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,08
m200	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m201	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,13/ 0,09
m202	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m203	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,11
m204	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,04
m205	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,1
m206	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,07
m207	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,03	0,09/ 0,08
m208	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,07/ 0,04
m209	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,07
m210	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m211	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,17
m212	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m213	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m214	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m215	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m216	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m217	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,1
m218	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m219	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,07
m220	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m221	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03
m222	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m223	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m224	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m225	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m226	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m227	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05

m228	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m229	ppb	0,03/ 0,03	0,01/ 0,01	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,13/ 0,19
m230	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,07
m231	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,11
m232	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,07
m233	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,06
m234	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m235	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m236	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m237	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m238	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m239	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,12
m240	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m241	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m242	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m243	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,07
m244	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m245	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m246	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m247	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,08
m248	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,14
m249	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,1
m250	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m251	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m252	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,04
m253	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,07
m254	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m255	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,08
m256	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
m257	ppb	0,03/	0,0/	0,03/	0,03/	0,03/	0,03/	0,06/

		0,03	0,0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07
m258	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,07
m259	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m260	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m261	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,05
m262	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,06/ 0,06
m263	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,14
m264	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m265	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,06
m266	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,06
m267	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,13
m268	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,05/ 0,07
m269	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,08/ 0,05
m270	ppb	0,03/ 0,03	0,0/ 0,0	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,03/ 0,03	0,04/ 0,05
prss (pritisak na površini)	hPa	995,7/ 997,6	6,0/ 6,1	982,0/ 983,1	993,8/ 992,8	997,0/ 997,8	999,2/ 1001,5	1010,5/ 1014,5
mslp (pritisak sveden na nivo mora)	hPa	1016,1/ 1017,5	6,1/ 6,4	1002,7/ 1003,3	1013,9/ 1012,5	1017,2/ 1017,6	1019,8/ 1021,7	1030,6/ 1034,7
tpp6 (padavine u poslednjih 6 sati)	m	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0,0/ 0,01
shif (vertikalno smicanje vetra)	W/m^2	17,8/ 37,4	41,1/ 72,9	-32,7/ -67,0	-16,8/ -26,7	3,0/ 14,4	45,9/ 98,0	157,2/ 243,8
dswf (silazni tok kratkotalasnog zračenja)	W/m^2	128,9/ 247,8	144,7/ 244,1	-2,8/ -1,3	2,6/ 1,7	71,5/ 186,8	229,0/ 466,5	511,0/ 755,6
rh2m (relativna vlažnost na 2 metra visine)	%	68,8/ 61,1	11,8/ 15,0	41,9/ 27,1	62,2/ 49,3	69,7/ 61,5	77,3/ 71,4	89,4/ 97,5
t02m (temperatura na 2 metra visine)	℃	8,5/ 12,1	3,6/ 6,0	2,8/ -1,3	6,0/ 8,2	8,0/ 12,1	10,0/ 16,3	21,3/ 26,4
tcld (ukupna oblačnost)	%	73,9/ 49,2	35,2/ 37,4	0/ 0	58,6/ 11,9	93,5/ 46,3	99,8/ 89,8	100,0/ 100,0
cape (konvektivno dostupna potencijalna energija)	J/Kg	1,6/ 21,5	4,5/ 61,4	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 9,8	27,7/ 547,5
cinh (konvektivna inhibicija)	J/Kg	-0,4/ -9,6	1,5/ 28,9	-8,6/ -330	-0,07/ -3,84	0/ -0,1	0,05/ 0,02	0,5/ 0,5

lisd (standaqrdni indeks podizanja)	K	282,9/ 281,6	3,4/ 5,7	275,9/ 270,3	280,5/ 277,1	282,8/ 281,4	285,2/ 285,7	291,5/ 297,9
lib4 (najbolji indeks podizanja u 4 sloja)	ºC	7,4/ 6,5	3,2/ 5,0	0,1/ -2,5	5,3/ 2,0	7,5/ 6,2	9,4/ 10,1	14,4/ 20,2
pblh (visina planetarnog graničnog sloja)	m	428,8/ 645,7	341,3/ 584,8	19,0/ 8,8	158,6/ 115,5	350,7/ 473,8	645,2/ 1068,9	1413,8/ 2796,2
tmps (temperatura na određenoj visini)	ºC	8,9/ 12,6	4,4/ 7,0	2,1/ -1,8	5,5/ 7,7	8,0/ 12,0	11,0/ 17,6	24,1/ 29,6
solm (vlažnost zemljišta)	frac.	0,3/ 0,2	0,01/ 0,02	0,3/ 0,2	0,3/ 0,2	0,3/ 0,2	0,3/ 0,2	0,3/ 0,3
csno (vodeni ekvivalent snega)		0/ 0,01	0/ 0,1	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 1
crai (akumulirana količina kiše)		0,01/ 0,02	0,1/ 0,1	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 0	1/ 1
lcld (niska oblačnost)	%	51,4/ 22,7	36,0/ 29,1	0/ 0	12,6/ 0	61,5/ 8,7	83,0/ 35,4	100/ 100
lhtf (tok latentne toplote)	W/m^2	35,7/ 90,1	28,6/ 85,7	0,6/ -3,3	13,2/ 11,3	27,4/ 63,4	53,7/ 160,6	116,9/ 319,2
mcld (srednja oblačnost)	%	45,1/ 23,1	39,8/ 31,8	0/ 0	4,5/ 0	34,1/ 5,8	90,6/ 38,2	100/ 100
hcld (visoka oblačnost)	%	49,0/ 31,6	38,1/ 35,9	0/ 0	9,4/ 0	52,0/ 14,8	88,6/ 60,3	100/ 100
wd (pravac vetra)	Deg	206,9/ 188,2	108,2/ 105,6	0,5/ 0,1	136,6/ 102,2	223,4/ 182,1	299,6/ 290,6	357,7/ 359,3
ws (brzina vetra)	m/s	2,9/ 3,2	1,4/ 1,8	0,6/ 0,1	1,8/ 1,8	2,7/ 2,9	3,8/ 4,3	9,5/ 10,7
mofd (srednja divergencija fluiksa ozona)	Deg	172,8/ 187,42	96,0/ 98,0	1,4/ 0,0	113,5/ 113,1	162,4/ 180,0	201,9/ 279,91	354,7/ 359,4
mofi (Indeks prosečnog fluiksa ozona)	N/m^2	0,1/ 0,2	0,1/ 0,2	0,01/ 0	0,05/ 0,04	0,1/ 0,1	0,2/ 0,2	0,6/ 1,2
CO	mg/m^3	0,5/ 0,3	0,2/ 0,1	0,2/ 0	0,4/ 0,2	0,5/ 0,3	0,6/ 0,4	1,5/ 1,0
NO_2	$\mu g/m^3$	19,7/ 7,8	16,5/ 8,0	0,2/ 0	8,3/ 2,4	15,9/ 5,7	24,1/ 10,4	94,5/ 52,9
NO	$\mu g/m^3$	11,3/ 3,0	23,2/ 2,8	1,2/ 0	3,0/ 1,6	4,6/ 2,2	7,6/ 3,4	185,0/ 37,3
Nox	$\mu g/m^3$	36,9/ 12,2	49,5/ 11,4	2,7/ 0	13,0/ 5,0	23,2/ 9,3	36,1/ 15,9	376,8/ 103,1
O_3	$\mu g/m^3$	31,6/ 55,3	19,3/ 28,5	1,5/ 0	15,3/ 33,3	28,4/ 56,5	48,0/ 75,5	74,5/ 121,0
PM_{10}	$\mu g/m^3$	30,5/ 33,6	15,4/ 46,5	3,9/ 0	18,5/ 14,4	29,2/ 22,4	40,0/ 34,9	88,7/ 446,2
SO_2	$\mu g/m^3$	10,2/ 12,4	8,3/ 9,4	3,3/ 0,0	7,0/ 8,8	8,5/ 10,1	10,4/ 12,8	83,6/ 139,5
Ozračenost	W/m^2	-0,1/ 0,1	0,5/ 0,5	-0,7/ -0,7	-0,6/ -0,4	-0,1/ 0,1	0,4/ 0,6	0,8/ 0,9

C1 (zatvaranje škola)		0/ 3,0	0,1/ 0,2	0/ 0	0/ 3	0/ 3	0/ 3	1,5/ 3
C2 (zatvaranje radnih mesta)		0/ 2,5	0/ 0,5	0/ 0	0/ 2	0/ 3	0/ 3	0,5/ 3
C3 (otkazivanje javnih događaja)		0,2/ 2	0,6/ 0,1	0/ 0	0/ 2	0/ 2	0/ 2	2/ 2
C4 (ograničenja okupljanja)		1,2/ 4	1,3/ 0,2	0/ 0	0/ 4	0/ 4	2/ 4	4/ 4
C5 (obustava javnog prevoza)		0/ 1,9	0/ 0,4	0/ 0	0/ 2	0/ 2	0/ 2	0/ 2
C6 (naredba o ostanku kod kuće)		0,2/ 2,6	0,6/ 0,8	0/ 0	0/ 3	0/ 3	0/ 3	2/ 3
C7 (ograničenja kretanja unutar zemlje)		0/ 1,9	0/ 0,4	0/ 0	0/ 2	0/ 2	0/ 2	0/ 2
C8 (kontrole međunarodne putovanja)		2/ 4	1/ 0,5	1/ 0	1/ 4	1/ 4	3/ 4	3,5/ 4
E1 (podrška prihodima)		0/ 0,8	0/ 0,4	0/ 0	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1
E2 (oslobađanje od dugova)		0,0/ 0,84	0,0/ 0,37	0/ 0	0/ 1	0/ 1	0/ 1	0/ 1
H1 (javne informativne kampanje)		2/ 2	0,0/ 0,1	2/ 0	2/ 2	2/ 2	2/ 2	2/ 2
H1 Flag		1/ 1	0/ 0,03	1/ 0	1/ 1	1/ 1	1/ 1	1/ 1
H2 (politika testiranja)		1/ 1	0,0/ 0,03	1/ 0	1/ 1	1/ 1	1/ 1	1/ 1
H3 (praćenje kontakata)		2/ 2	0,4/ 0,1	0/ 0	2/ 2	2/ 2	2/ 2	2/ 2
H4 (hitna ulaganja u zdravstvo)		0/ $2{,}2\times10^{6}$	0/ $14{,}2\times10^{6}$	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 0	0/ 109×10^{6}
H8 (zaštita starijih osoba)		0,2/ 2,6	0,6/ 0,8	0/ 0	0/ 3	0/ 3	0/ 3	2/ 3
Potvrđeni slučajevi		16,3/ 5755,2	18,2/ 3769,6	0/ 0	1/ 1908	5/ 6630	35/ 9557	52/ 10716
Potvrđeni smrtni ishodi		0/ 119	0/ 78,4	0/ 0	0/ 51	0/ 125	0/ 197	0/ 232
Indeks uvedenih restriktivnih mera		21,6/ 94,4	10,5/ 10,0	13,9/ 0	13,9/ 93,5	13,9/ 100	25/ 100	57,9/ 100
Istorijski pregled promena mera		27,1/ 96,0	10,7/ 8,0	17,9/ 0	17,9/ 96,4	17,9/ 100	33,6/ 100	62,5/ 100
Indeks odgovora vlade		20,6/ 70,7	7,3/ 7,0	9,9/ 0	16,2/ 70,8	16,2/ 73,4	22,4/ 75,5	45,0/ 75,5
Indeks zdravstvenih i		23,6/ 76,3	8,34 8,1	11,3/ 0	18,4/ 76,8	18,4/ 81,0	25,6/ 81,0	51,5/ 81,0

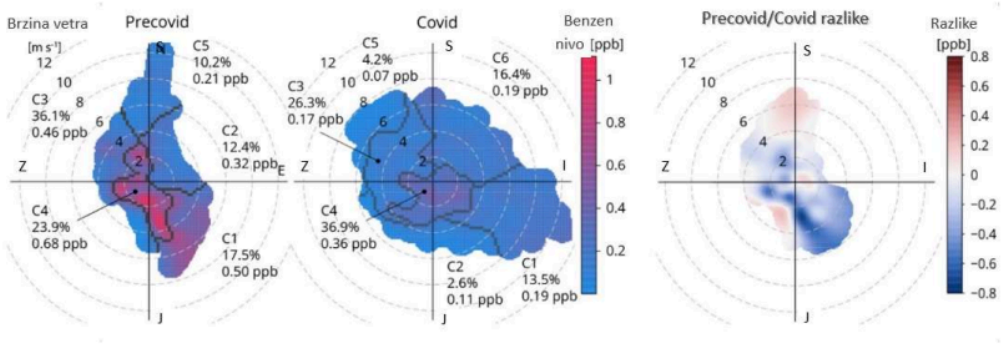
kontrolnih mera								
Indeks ekonomske podrške		0/ 31,4	0/ 13,8	0/ 0	0/ 37,5	0/ 37,5	0/ 37,5	0/ 37,5
Vožnja		82,1/ 36,4	18,4/ 16,0	47,6/ 0	71,1/ 26,2	83,5/ 31,3	98,6/ 46,4	114,2/ 72,5
Hodanje		86,9/ 33,1	21,0/ 15,3	41,2/ 0	78,2/ 22,6	86,8/ 27,8	101,6/ 41,7	118,5/ 66,0
Promena frekvencije poseta maloprodajnim objektima i centrima za rekreaciju u odnosu na osnovni nivo		-0,02/ -55,2	11,0/ 25,3	-22/ -97	-9/ -70	4/ -58	7/ -40	13/ 0
Promena frekvencije poseta prodavnicama i apotekama u odnosu na osnovni nivo		11,8/ -31,9	5,9/ 30,4	4/ -97	6/ -39	12/ -23	16/ -9	24/ 15
Promena posećenosti parkova u odnosu na osnovni nivo		1,4/ -31,6	16,0/ 34,0	-16/ -87	-10/ -60	-4/ -31	2/ -5	41/ 41
Promena broja korisnika javnog prevoza u odnosu na osnovni nivo		0,6/ -60,1	8,2/ 19,1	-21/ -93	-4/ -70	4/ -62	5/ -47	12/ 0
Promena prisustva na radnim mestima u odnosu na osnovni nivo		1,3/ -52,8	5,2/ 17,7	-13/ -91	-3/ -61	1/ -54	4/ -42	12/ 0
Promena vremena provedenog kod kuće u odnosu na osnovni nivo		-0,6/ 16,4	1,8/ 8,3	-2/ -1	-2/ 11	-1/ 17	1/ 22	6/ 37
Ukupan broj aktivnih slučajeva zaraze		17,3/ 4430,1	18,1/ 2647,2	0/ 0	1/ 1803	5/ 5632	35/ 6704	52/ 7786

8.2 Indentifikacija izvora benzena tokom vanrednog stanja

Na Slici 18 dat je prikaz prostorne raspodele potencijalnih izvora benzena u periodima pre i tokom pandemije, uz razliku između ta dva perioda. Vizuelizacija omogućava direktno

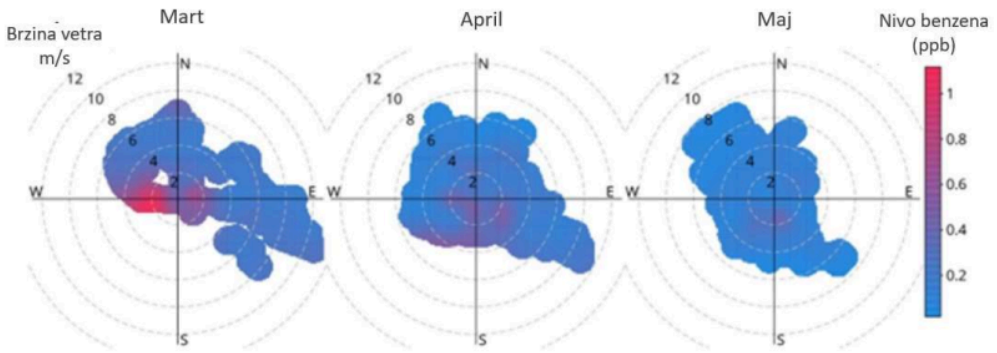
poređenje promena u srednjim koncentracijama benzena i njihovoj povezanosti sa pravcem i brzinom vetra, što ukazuje na promene u intenzitetu izvora. Osim toga, ova vrsta analize pomoću polarnih dijagrama, pruža mogućnost i praćenja pojave novih, odnosno gašenja postojećih izvora emisije.

Pre pandemije, najveće koncentracije benzena (0,68 ppb) beleže se na lokacijama jugozapadno od mernog mesta, dok se potencijalni izvori uočavaju i u pravcu zapada, juga, jugoistoka, severa i severozapada. Tokom pandemije, u većini ovih oblasti beleže se niže koncentracije, što je najizraženije na jugoistoku i istoku, gde su vrednosti opale za do 0,8 ppb, prema analizi razlika. Smanjenje intenziteta izvora posebno je vidljivo u zapadnim i jugoistočnim oblastima, što može ukazivati na smanjenje emisija iz saobraćaja i industrijskih izvora duž tih pravaca. Ipak, analiza ukazuje i na pojavu novih izvora emisije, posebno u oblastima severno i jugozapadno od mernog mesta. Ovi porasti mogu ukazivati na izvore emisije koji su ostali aktivni tokom pandemije ili na promene u režimu transporta zagađujućih materija.



Slika 18. Indikacija prostorne raspodele i razlika u nivoima benzena pre i tokom pandemije (Radić i koautori, 2025)

Uvođenje vanrednog stanja u martu imalo je značajan uticaj na kvalitet vazduha, prvenstveno zbog uvođenja prvih restriktivnih mera koje su podrazumevale ograničenje kretanja, smanjenje industrijske aktivnosti, zatvaranje institucija i redukovanje saobraćaja. Ovi kombinovani faktori nesumnjivo su doprineli postepenom smanjenju koncentracija benzena (slika 19). Iako su u martu još uvek primećene povišene vrednosti benzena, posebno u zapadnim sektorima, gde su koncentracije dostizale i preko 1 ppb, tokom aprila dolazi do primetnog pada, dok su u maju zabeležene najniže vrednosti u celom posmatranom periodu. Ovaj trend ukazuje na značajno smanjenje emisija, pri čemu su izvori iz marta postepeno slabili, a njihova raspodela postajala sve ujednačenija.



Slika 19. Indikacija mesečne prostorne raspodele nivoa benzena tokom pandemije (Radić i koautori, 2025)

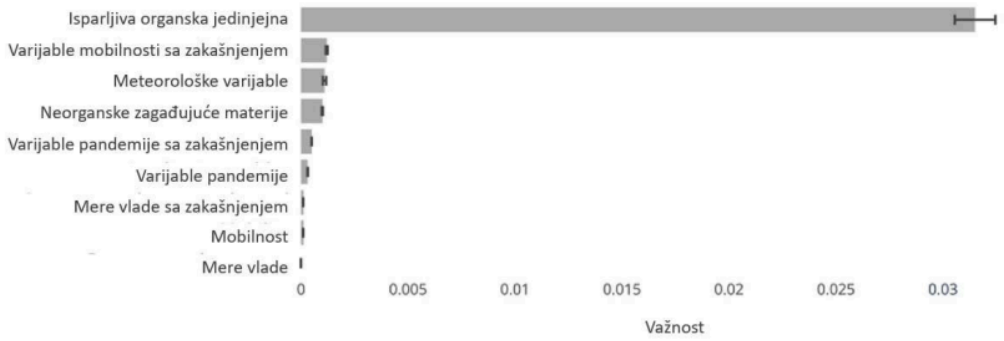
Merno mesto bilo je pod uticajem slabih do umerenih vetrova (2 do 10 m/s) koji su pretežno duvali sa severa i istoka. Iako se te oblasti mogu dovesti u vezu sa intenzivnim antropogenim emisijama, njihov uticaj na koncentracije benzena ostao je minimalan, što je verovatno rezultat vladinih restriktivnih mera i promena u obrascima ponašanja ljudi.

Osim uticaja vanrednih mera, važno je istaći da se početak vanrednog stanja podudario s prelaskom u topliji deo godine, što ukazuje na sinergijski efekat sezonskih atmosferskih promena, meteoroloških faktora i smanjenih izvora emisije.

8.3 Uticaj faktora životne sredine na koncentracije benzena u vanrednim okolnostima

Najbolje rezultate u predikciji nivoa benzena tokom vanrednog stanja imao je model *Gradient Boosting*, čiji su parametri optimizovani metaheurističkim algoritmom SCA. Ovaj model ostvario je sledeće metrike: prosečna apsolutna greška 0,034, maksimalna greška 0,34, prosečna kvadratna greška 0,003, koren prosečne kvadratne greške 0,056, prosečna apsolutna procentualna greška 0,168 i $R^2 = 0,94$, što ukazuje na njegovu visoku tačnost i pouzdanost u predikciji koncentracija benzena u uslovima vanrednog stanja.

Kako bi se procenio uticaj mera uvedenih tokom vanrednog stanja na koncentracije benzena, sprovedena je analiza faktora koji su najviše doprineli njegovoj dinamici. Na Slici 20 prikazane su SAGE vrednosti, koje ilustruju značaj različitih grupa varijabli u predikciji benzena.



Slika 20. Globalna važnost grupa varijabli na koncentracije benzena tokom vanrednog stanja izazvanog pandemijom COVID-19

Rezultati pokazuju da su isparljiva organska jedinjenja najuticajniji prediktori, što se može objasniti njihovim zajedničkim izvorima emisije i sličnim atmosferskim transformacijama kroz koje prolaze. Varijable mobilnosti sa vremenskim zakašnjenjem rangirane su kao druga po značaju grupa, ukazujući na odloženi efekat smanjenog saobraćaja i industrijske aktivnosti tokom trajanja restriktivnih mera. Meteorološki parametri zauzimaju treće mesto, što potvrđuje njihovu ključnu ulogu u transportu, disperziji i akumulaciji zagađujućih materija u atmosferi. Neorganske zagađujuće materije, i pored činjenice da su rezultovale slabijim ukupnim uticajem, uzete su u razmatranje zbog mogućih zajedničkih izvora sa benzenom, naročito u domenu saobraćaja i industrijskih procesa, kao i zbog njihove potencijalne uloge u atmosferskim hemijskim reakcijama, koje su naročito izražene u urbanim sredinama. S druge strane, faktori povezani s pandemijom i merama restrikcija nisu pokazali značajan neposredan uticaj na koncentracije benzena, ali su uključeni u analizu kako bi se ispitao njihov posredni efekat kroz promene u mobilnosti ljudi i industrijskoj proizvodnji.

Takođe, prema analizi modela sa najboljim performansama sprovedenoj metodom SAGE, čak 95% ukupnog uticaja na predikciju nivoa benzena tokom vanrednog stanja poticalo je od 81 od ukupno 404 analizirane varijable (tabela 8). Među njima, svega 15 varijabli imalo je globalni uticaj veći od 1%, i to po opadajućem redosledu: m129, m41, m105, m97, m42, m45, m107, m95, m135, m62, m133, PM_{10}, m93, m163 i m73.

Tabela 8. SAGE statistika (Radić i koautori, 2025)

Varijabl10	Globalni uticaj [ppb]	Standardna d10vijacija globalnog uticaja [ppb]	Os10tljivost [ppb]	Standardna d10vijacija os10tljivosti [ppb]	R10lativni globalni uticaj [%]	Kumulativni zbir r10lativnog globalnog uticaja [%]
m129	$7{,}0 \times 10^{-3}$	$1{,}8 \times 10^{-4}$	$7{,}2 \times 10^{-3}$	$1{,}8 \times 10^{-4}$	17,08	17,08
m41	$4{,}3 \times 10^{-3}$	$7{,}0 \times 10^{-5}$	$4{,}3 \times 10^{-3}$	$7{,}0 \times 10^{-5}$	10,62	27,71
m105	$3{,}5 \times 10^{-3}$	$1{,}0 \times 10^{-4}$	$3{,}8 \times 10^{-3}$	$1{,}1 \times 10^{-4}$	8,53	36,24
m97	$2{,}8 \times 10^{-3}$	$3{,}5 \times 10^{-5}$	$2{,}8 \times 10^{-3}$	$3{,}4 \times 10^{-5}$	6,83	43,07
m42	$2{,}7 \times 10^{-3}$	$5{,}2 \times 10^{-5}$	$2{,}7 \times 10^{-3}$	$5{,}3 \times 10^{-5}$	6,71	49,78
m45	$2{,}1 \times 10^{-3}$	$2{,}3 \times 10^{-5}$	$2{,}2 \times 10^{-3}$	$2{,}3 \times 10^{-5}$	5,11	54,89
m107	$1{,}8 \times 10^{-3}$	$3{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-3}$	$3{,}1 \times 10^{-5}$	4,38	59,27
m95	$1{,}3 \times 10^{-3}$	$3{,}8 \times 10^{-5}$	$1{,}3 \times 10^{-3}$	$3{,}7 \times 10^{-5}$	3,19	62,46
m135	$1{,}1 \times 10^{-3}$	$3{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-3}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	2,74	65,20
m62	$9{,}7 \times 10^{-4}$	$2{,}3 \times 10^{-5}$	$9{,}2 \times 10^{-4}$	$2{,}2 \times 10^{-5}$	2,37	67,57
m133	$6{,}3 \times 10^{-4}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$	$6{,}7 \times 10^{-4}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$	1,54	69,11
PM_{10}	$6{,}3 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$5{,}8 \times 10^{-4}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	1,54	70,65
m93	$5{,}9 \times 10^{-4}$	$1{,}0 \times 10^{-5}$	$5{,}6 \times 10^{-4}$	$8{,}9 \times 10^{-6}$	1,45	72,10
m163	$4{,}8 \times 10^{-4}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$	$4{,}6 \times 10^{-4}$	$1{,}4 \times 10^{-5}$	1,18	73,29
m73	$4{,}2 \times 10^{-4}$	$6{,}0 \times 10^{-6}$	$4{,}6 \times 10^{-4}$	$5{,}5 \times 10^{-6}$	1,03	74,32
tcld (totalna oblačnost)	$3{,}6 \times 10^{-4}$	$9{,}6 \times 10^{-6}$	$2{,}4 \times 10^{-4}$	$8{,}6 \times 10^{-6}$	0,88	75,20
CO	$2{,}9 \times 10^{-4}$	$7{,}8 \times 10^{-6}$	$3{,}7 \times 10^{-4}$	$8{,}2 \times 10^{-6}$	0,72	75,92
m130	$2{,}7 \times 10^{-4}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	$3{,}3 \times 10^{-4}$	$2{,}7 \times 10^{-5}$	0,67	76,59
lib4 (najbolji ind10ks podizanja u 4 sloja)	$2{,}7 \times 10^{-4}$	$6{,}8 \times 10^{-6}$	$1{,}7 \times 10^{-4}$	$5{,}5 \times 10^{-6}$	0,66	77,25
m150	$2{,}6 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$2{,}3 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-5}$	0,64	77,88
t02m (t10mp10ratur10 na visini od 2 m)	$2{,}6 \times 10^{-4}$	$5{,}4 \times 10^{-6}$	$2{,}2 \times 10^{-4}$	$5{,}0 \times 10^{-6}$	0,63	78,52
m75	$2{,}6 \times 10^{-4}$	$8{,}5 \times 10^{-6}$	$2{,}8 \times 10^{-4}$	$7{,}9 \times 10^{-6}$	0,62	79,14
m99	$2{,}3 \times 10^{-4}$	$5{,}3 \times 10^{-6}$	$2{,}4 \times 10^{-4}$	$5{,}7 \times 10^{-6}$	0,55	79,69
m170	$2{,}2 \times 10^{-4}$	$1{,}0 \times 10^{-5}$	$2{,}0 \times 10^{-4}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	0,54	80,23
Proc10ntualna prom10na na radnim m10stima u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 3	$2{,}2 \times 10^{-4}$	$3{,}4 \times 10^{-6}$	$1{,}8 \times 10^{-4}$	$3{,}3 \times 10^{-6}$	0,53	80,76
m83	$-2{,}0 \times 10^{-4}$	$6{,}3 \times 10^{-6}$	$-2{,}0 \times 10^{-4}$	$5{,}3 \times 10^{-6}$	0,50	81,26
m98	$2{,}0 \times 10^{-4}$	$7{,}6 \times 10^{-6}$	$2{,}0 \times 10^{-4}$	$7{,}0 \times 10^{-6}$	0,49	81,75
m121	$2{,}0 \times 10^{-4}$	$3{,}8 \times 10^{-6}$	$2{,}4 \times 10^{-4}$	$3{,}8 \times 10^{-6}$	0,48	82,23
m46	$1{,}9 \times 10^{-4}$	$7{,}7 \times 10^{-6}$	$1{,}9 \times 10^{-4}$	$7{,}8 \times 10^{-6}$	0,47	82,70
m125	$-1{,}9 \times 10^{-4}$	$5{,}2 \times 10^{-6}$	$-1{,}8 \times 10^{-4}$	$4{,}9 \times 10^{-6}$	0,46	83,16
Potvrđ10ni smrtni ishodi	$1{,}8 \times 10^{-4}$	$2{,}9 \times 10^{-6}$	$1{,}6 \times 10^{-4}$	$3{,}1 \times 10^{-6}$	0,44	83,60
m147	$1{,}8 \times 10^{-4}$	$8{,}5 \times 10^{-6}$	$1{,}6 \times 10^{-4}$	$7{,}8 \times 10^{-6}$	0,44	84,04

m53	$1,8 \times 10^{-4}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{-6}$	0,43	84,48
Proc10ntualna prom10na na stanicama javnog pr10voza u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 2	$1,6 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-6}$	0,38	84,86
m68	$1,5 \times 10^{-4}$	$7,3 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-6}$	0,36	85,22
m35	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-6}$	0,36	85,58
pblh (visina plan10tarnog graničnog sloja)	$-1,4 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-6}$	$-1,6 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-6}$	0,35	85,93
m49	$-1,3 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$-1,4 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-6}$	0,33	86,26
m69	$-1,3 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-6}$	$-1,5 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-6}$	0,32	86,57
m161	$1,3 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-6}$	0,31	86,88
lhtf (n10to fluks lat10ntn10 toplot10 na površini – pros10k za 3 ili 6 h)	$1,2 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-6}$	0,30	87,19
Iridacija	$-1,2 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-6}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-6}$	0,30	87,49
Proc10ntualna prom10na na stanicama javnog pr10voza u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 3	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-6}$	0,30	87,78
Proc10ntualna prom10na u odnosu na osnovnu vr10dnost za stamb10n10 obj10kt10 lag 2	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-5}$	$2,9 \times 10^{-6}$	0,27	88,05
Ukupni aktivni slučaj10vi lag 1	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-6}$	0,26	88,32
m136	$1,1 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-6}$	0,26	88,58
Ukupni aktivni slučaj10vi lag 2	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-6}$	0,25	88,83
m87	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-6}$	0,25	89,08
m47	$-1,0 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-6}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-6}$	0,25	89,33
m153	$-9,8 \times 10^{-5}$	$6,6 \times 10^{-6}$	$-1,0 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-6}$	0,24	89,57
m85	$-9,8 \times 10^{-5}$	$5,4 \times 10^{-6}$	$-9,6 \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-6}$	0,24	89,81
Potvrđ10ni slučaj10vi	$9,4 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$	0,23	90,04
m61	$-9,4 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$-1,1 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-6}$	0,23	90,27
m189	$9,3 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-6}$	0,23	90,50
lisd (standardni ind10ks podizanja)	$9,0 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-5}$	$3,1 \times 10^{-6}$	0,22	90,72
Prom10na proc10nta za parkov10 u	$8,8 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-6}$	0,21	90,93

odnosu na poč10tnu vr10dnost lag 2						
m141	-8,6 x10^{-5}	6,2 x10^{-6}	-9,3 x10^{-5}	6,0 x10^{-6}	0,21	91,14
m151	8,6 x10^{-5}	5,7 x10^{-6}	6,6 x10^{-5}	5,4 x10^{-6}	0,21	91,35
m157	-8,5 x10^{-5}	6,5 x10^{-6}	-6,1 x10^{-5}	5,5 x10^{-6}	0,21	91,56
m169	8,3 x10^{-5}	4,4 x10^{-6}	8,7 x10^{-5}	4,8 x10^{-6}	0,20	91,76
m40	8,0 x10^{-5}	5,0 x10^{-6}	1,1 x10^{-4}	4,7 x10^{-6}	0,20	91,96
Prom10na proc10nta za maloprodaju i r10kr10aciju u odnosu na poč10tnu vr10dnost lag 3	7,9 x10^{-5}	2,5 x10^{-6}	6,3 x10^{-5}	2,1 x10^{-6}	0,19	92,15
m179	7,7 x10^{-5}	2,1 x10^{-6}	6,2 x10^{-5}	1,9 x10^{-6}	0,19	92,34
hcld (visoka pokriv10nost oblacima)	7,7 x10^{-5}	3,6 x10^{-6}	4,7 x10^{-5}	3,4 x10^{-6}	0,19	92,53
Potvrđ10ni smrtni slučaj10vi lag 3	7,4 x10^{-5}	1,5 x10^{-6}	6,8 x10^{-5}	1,4 x10^{-6}	0,18	92,71
Proc10ntualna prom10na na radnim m10stima u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 2	6,8 x10^{-5}	1,9 x10^{-6}	5,3 x10^{-5}	1,7 x10^{-6}	0,17	92,87
Proc10ntualna prom10na u prodavnicama i apot10kama u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 2	6,5 x10^{-5}	1,9 x10^{-6}	5,0 x10^{-5}	1,6 x10^{-6}	0,16	93,03
Proc10ntualna prom10na u parkovima u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 3	6,5 x10^{-5}	1,3 x10^{-6}	5,2 x10^{-5}	1,2 x10^{-6}	0,16	93,19
cap10 (konv10ktivno dostupna pot10ncijalna 10n10rgija)	6,4 x10^{-5}	1,7 x10^{-6}	5,6 x10^{-5}	1,6 x10^{-6}	0,16	93,35
m167	-6,4 x10^{-5}	3,0 x10^{-6}	-6,0 x10^{-5}	2,9 x10^{-6}	0,16	93,51
ws (brzina v10tra)	-6,3 x10^{-5}	2,8 x10^{-6}	-6,4 x10^{-5}	2,7 x10^{-6}	0,15	93,66
m70	-6,3 x10^{-5}	3,7 x10^{-6}	-9,3 x10^{-5}	3,7 x10^{-6}	0,15	93,81
m165	6,1 x10^{-5}	1,8 x10^{-6}	5,6 x10^{-5}	1,8 x10^{-6}	0,15	93,96
m103	-6,1 x10^{-5}	4,2 x10^{-6}	-7,6 x10^{-5}	4,0 x10^{-6}	0,15	94,11
m43	6,0 x10^{-5}	2,7 x10^{-6}	6,1 x10^{-5}	2,6 x10^{-6}	0,15	94,26
m59	-5,9 x10^{-5}	2,8 x10^{-6}	-9,5 x10^{-5}	3,1 x10^{-6}	0,15	94,40
Potvrđ10ni smrtni slučaj10vi lag 1	5,9 x10^{-5}	1,3 x10^{-6}	5,3 x10^{-5}	1,2 x10^{-6}	0,14	94,55
Prom10na proc10nta za maloprodaju i	5,8 x10^{-5}	1,8 x10^{-6}	4,9 x10^{-5}	1,7 x10^{-6}	0,14	94,69

r10kr10aciju u odnosu na poč10tnu vr10dnost lag 2						
m137	5,7 x10^{-5}	4,5 x10^{-6}	5,3 x10^{-5}	4,4 x10^{-6}	0,14	94,83
Proc10ntualna prom10na u stamb10nim obj10ktima u odnosu na osnovnu vr10dnost lag 3	5,4 x10^{-5}	3,2 x10^{-6}	3,2 x10^{-5}	2,2 x10^{-6}	0,13	94,96
Potvrđ10ni sučaj10vi lag 2	5,3 x10^{-5}	1,4 x10^{-6}	5,3 x10^{-5}	1,4 x10^{-6}	0,13	95,09
m89	-5,3 x10^{-5}	6,6 x10^{-6}	-8,5 x10^{-5}	5,9 x10^{-6}	0,13	95,22
m71	-5,1 x10^{-5}	3,5 x10^{-6}	-5,0 x10^{-5}	3,8 x10^{-6}	0,12	95,34
cinh (konv10ktivna inhibicija)	4,9 x10^{-5}	1,7 x10^{-6}	3,2 x10^{-5}	1,7 x10^{-6}	0,12	95,46
Proc10ntualna prom10na u maloprodajnim i r10kr10ativnim obj10ktima u odnosu na osnovnu vr10dnost	4,7 x10^{-5}	1,1 x10^{-6}	4,2 x10^{-5}	1,1 x10^{-6}	0,12	95,58
Potvrđ10ni slučaj10vi lag 1	4,6 x10^{-5}	1,0 x10^{-6}	3,7 x10^{-5}	9,7 x10^{-7}	0,11	95,69
Ind10ks zdravstv10n10 kontrol10 lag 1	4,1 x10^{-5}	1,1 x10^{-6}	2,9 x10^{-5}	1,3 x10^{-6}	0,10	95,79
m60	-4,0 x10^{-5}	2,3 x10^{-6}	-3,4 x10^{-5}	2,1 x10^{-6}	0,10	95,89
O_3	3,8 x10^{-5}	2,5 x10^{-6}	6,2 x10^{-5}	2,7 x10^{-6}	0,09	95,98
dswf (fluks zrač10nja kratkih talasa nadol10 (pros10k za 3- ili 6-h))	-3,7 x10^{-5}	2,9 x10^{-6}	-3,7 x10^{-5}	2,9 x10^{-6}	0,09	96,07
m127	-3,6 x10^{-5}	2,4 x10^{-6}	-3,2 x10^{-5}	2,3 x10^{-6}	0,09	96,16
Potvrđ10ni smrtni slučaj10vi lag 2	3,6 x10^{-5}	1,4 x10^{-6}	3,5 x10^{-5}	1,4 x10^{-6}	0,09	96,25
m123	-3,6 x10^{-5}	2,3 x10^{-6}	-2,8 x10^{-5}	2,1 x10^{-6}	0,09	96,34
m131	3,5 x10^{-5}	2,7 x10^{-6}	5,0 x10^{-5}	3,0 x10^{-6}	0,09	96,42
m55	-3,5 x10^{-5}	1,5 x10^{-6}	-3,6 x10^{-5}	1,2 x10^{-6}	0,09	96,51
m84	-3,4 x10^{-5}	2,6 x10^{-6}	-1,8 x10^{-5}	2,1 x10^{-6}	0,08	96,59
Ind10ks strogosti lag 1	3,4 x10^{-5}	7,0 x10^{-7}	2,8 x10^{-5}	7,1 x10^{-7}	0,08	96,67
m67	3,3 x10^{-5}	3,8 x10^{-6}	2,7 x10^{-5}	3,9 x10^{-6}	0,08	96,75
m109	3,3 x10^{-5}	1,8 x10^{-6}	2,3 x10^{-5}	1,8 x10^{-6}	0,08	96,83
SO_2	3,2 x10^{-5}	3,9 x10^{-6}	3,6 x10^{-5}	3,5 x10^{-6}	0,08	96,91
m110	-3,2 x10^{-5}	2,2 x10^{-6}	-3,0 x10^{-5}	2,0 x10^{-6}	0,08	96,99
Hodanj10 lag 3	3,1 x10^{-5}	1,3 x10^{-6}	3,0 x10^{-5}	1,2 x10^{-6}	0,08	97,06
mofi (R10lativna vlažnost na 2m AGL)	3,1 x10^{-5}	1,2 x10^{-6}	2,6 x10^{-5}	1,0 x10^{-6}	0,08	97,14
m149	-2,9 x10^{-5}	2,9 x10^{-6}	-2,5 x10^{-5}	2,8 x10^{-6}	0,07	97,21

m113	$-2{,}9 \times 10^{-5}$	$1{,}4 \times 10^{-6}$	$-4{,}1 \times 10^{-5}$	$1{,}4 \times 10^{-6}$	0,07	97,28
lcld (niska pokriv10nost oblacima)	$2{,}9 \times 10^{-5}$	$9{,}0 \times 10^{-7}$	$2{,}2 \times 10^{-5}$	$7{,}2 \times 10^{-7}$	0,07	97,35
Ind10ks vladin10 r10akcij10 lag 3	$2{,}8 \times 10^{-5}$	$9{,}9 \times 10^{-7}$	$1{,}7 \times 10^{-5}$	$9{,}3 \times 10^{-7}$	0,07	97,42
Proc10ntualna prom10na broja osoba na radnim m10stima u odnosu na osnovnu vr10dnost	$2{,}6 \times 10^{-5}$	$1{,}3 \times 10^{-6}$	$1{,}9 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-6}$	0,06	97,49
tmps (t10mp10ratura na površini)	$2{,}5 \times 10^{-5}$	$1{,}3 \times 10^{-6}$	$2{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-6}$	0,06	97,55
m122	$2{,}3 \times 10^{-5}$	$1{,}8 \times 10^{-6}$	$2{,}6 \times 10^{-5}$	$1{,}5 \times 10^{-6}$	0,06	97,60
m143	$-2{,}3 \times 10^{-5}$	$4{,}9 \times 10^{-6}$	$-1{,}7 \times 10^{-5}$	$4{,}8 \times 10^{-6}$	0,06	97,66
Vožnja lag 1	$2{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-6}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$	$9{,}6 \times 10^{-7}$	0,05	97,71
m154	$-2{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}6 \times 10^{-6}$	$-2{,}1 \times 10^{-5}$	$1{,}6 \times 10^{-6}$	0,05	97,77
Proc10ntualna prom10na broja pos10ta stanicama javnog pr10voza u odnosu na osnovnu vr10dnost	$2{,}2 \times 10^{-5}$	$1{,}1 \times 10^{-6}$	$1{,}6 \times 10^{-5}$	$1{,}2 \times 10^{-6}$	0,05	97,82
m63	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$2{,}0 \times 10^{-6}$	$2{,}5 \times 10^{-5}$	$1{,}8 \times 10^{-6}$	0,05	97,87
Ukupni aktivni slučaj10vi	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$9{,}3 \times 10^{-7}$	$2{,}2 \times 10^{-5}$	$9{,}5 \times 10^{-7}$	0,05	97,92
m82	$-2{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-6}$	$-1{,}9 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-6}$	0,05	97,97
rh2m (r10lativna vlažnost na 2m AGL)	$2{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-6}$	$1{,}8 \times 10^{-5}$	$1{,}6 \times 10^{-6}$	0,05	98,02

Klaster analizom SHAP vrednosti, primenom kombinacije UMAP za redukciju dimenzionalnosti i HDBSCAN za identifikaciju grupa, identifikovano je devet različitih klastera uticaja varijabli (označenih kao E0–E8). Svaki klaster predstavlja karakterističan režim životne sredine, definisan specifičnim obrascem doprinosa ulaznih varijabli predikciji koncentracija benzena.

Grupa označena kao E–1 nije dodeljena nijednom stabilnom klasteru. Ovaj skup obuhvata podatke koji najverovatnije predstavljaju netipične vrednosti, prelazne ili nestabilne režime, te je zbog svoje heterogenosti isključen iz daljih analiza. Rezultati klasterizacije omogućili su detaljnije razumevanje uticaja vodećih faktora na ekološke uslove koji određuju koncentraciju benzena. Uključivanjem u analizu varijabli koje se odnose na mobilnost ili primenu restriktivnih mera u cilju suzbijanja pandemije omogućeno je identifikovanje režima karakterističnih za vanredne situacije, u kojima promene u obrascima ponašanja ljudi imaju poseban uticaj na kvalitet vazduha (tabela 9).

Radi lakše interpretacije rezultata analize, definisana su tri opsega uticaja na osnovu normalizovanih SHAP vrednosti: nizak (1-5%), srednji (5-15%) i visoki (15-100%), kao i tri opsega normalizovanog nivoa benzena: nizak (0-33%), srednji (33-66%) i visok (66-100%)

Tabela 9. Statistika uticaja u pojedinim režimima životne sredine (Radić i koautori, 2025).

Režim životne sredine	Srednji uticaj [ppb]	Srednji normalizovani uticaj [%]	Srednji apsolutni uticaj [ppb]	Procenat populacije [%]	Dominantan inherentni uticaj	Prevalenca dominantnog inherentnog uticaja [%]
E-1	0,04	15,76	0,37	15,9		
E0	-0,12	-48,47	0,3	2,9	Umereno negativan	36,9
E1	-0,09	-38,51	0,38	38,6	Visoko negativan Umereno negativan	22,8 35,4
E2	0,02	8,89	0,27	4,0	Umereno negativan Umereno pozitivan Visoko pozitivan	23,4 22,9 29,0
E3	-0,04	-15,67	0,22	10,5	Umereno negativan Umereno pozitivan	29,2 27,1
E4	-0,01	-2,33	0,25	5,4	Umereno negativan Umereno pozitivan	24,4 26,5
E5	0,26	107,84	0,63	3,2	Umereno pozitivan Visoko pozitivan	23,7 25,2
E6	-0,11	-45,15	0,32	6,5	Umereno negativan Umereno pozitivan	27,9 21,3 24,6
E7	0,37	151,86	0,87	7,2	Umereno pozitivan Visoko pozitivan	29,6 25,3
E8	-0,07	-27,26	0,32	5,8	Umereno negativan Umereno pozitivan	26,8 26,6

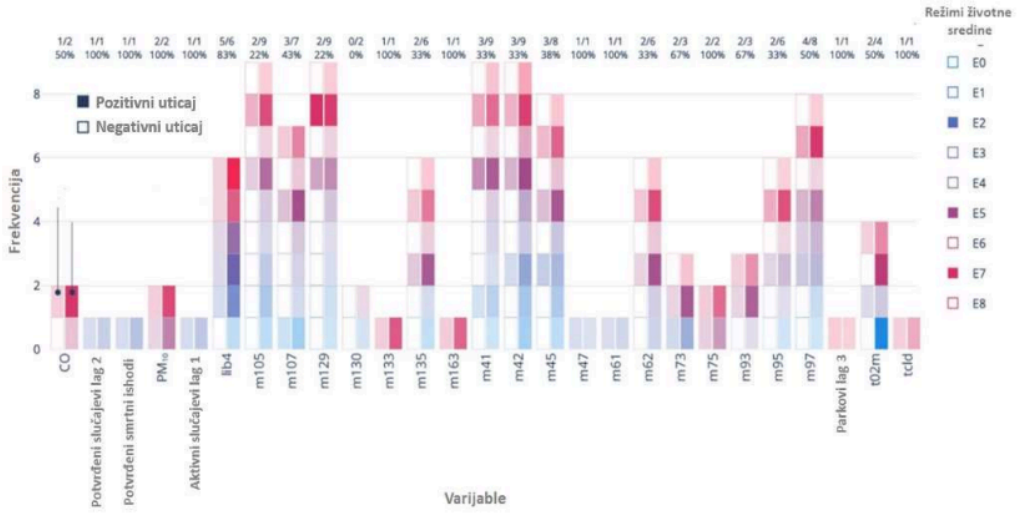
Režim životne sredine označen kao E1 obuhvatio je najveći broj instanci (38,6%), što ukazuje na činjenicu da je predstavljao dominantne uslove tokom trajanja vanrednog stanja. U okviru ovog režima, prosečna promena koncentracije benzena iznosila je 0,38 ppb. Slede režimi E3 (10,5% instanci), E7 (7,2% instanci) i E6 (6,5% instanci), sa prosečnim promenama u koncentraciji benzena od 0,22 ppb, 0,87 ppb i 0,32 ppb, redom.

Pet režima sa najmanjim brojem instanci, između 2,9% i 5,8%, verovatno odražavaju nestabilne ili kratkotrajne režime u životnoj sredini. Povećanje nivoa benzena u odnosu na očekivane vrednosti zabeleženo je u tri od devet režima i to: E7 (0,37 ppb, 151,86%), E5 (0,26 ppb, 107,84%) i E2 (0,02 ppb, 8,89%). Ova tri režima iako čine svega 14,4% svih instanci, pokazuju izraženiji uticaj na koncentracije benzena. Nasuprot njima, šest režima životne sredine bilo je povezano sa smanjenjem nivoa benzena i to: E0 (-0,12 ppb, -48,47%), E6 (-0,11

ppb, -45,15%), E1 (-0,09 ppb, -38,51%), E8 (-0,07 ppb, -27,26%), E3 (-0,04 ppb, -15,67%) i E4 (-0,01 ppb, -2,33%).

Prema raspodeli dominantnih normalizovanih inherentnih uticaja svih varijabli unutar režima, režimi životne sredine E2, E3, E4, E6 i E8 pokazuju i umereno negativne i umereno pozitivne uticaje, sugerišući uravnotežen međusobni odnos faktora koji ili povećavaju ili smanjuju koncentraciju benzena, u zavisnosti od konkretnih uslova. Prisustvo visokih pozitivnih uticaja u režimima E2, E5 i E7 može se povezati sa određenim varijablama koje pozitivno utiču na nivo benzena, dok nasuprot tome, visok negativan uticaj zabeležen u režimu životne sredine E1 sugeriše da određene varijable konkretno smanjuju nivoa benzena ispod očekivanih vrednosti.

Analizom nivoa pojedinih varijabli i njihovog uticaja u različitim režimima životne sredine (slika 21), identifikovano je 27 varijabli koje, svaka na svoj način i sa različitim intenzitetom, dominantno utiču na dinamiku benzena u životnoj sredini. Na Slici 21 opacitet kvadrata koristi se kao kvalitativni indikator intenziteta (normalizovanih nivoa i normalizovanih lokalnih uticaja), dok je znak uticaja prikazan popunjenošću kvadrata: popunjeni kvadrati označavaju pozitivne, a prazni kvadrati negativne uticaje. Među najznačajnijim varijablama nalazi se 18 IOJ (m41, m42, m45, m47, m62, m73, m75, m93, m95, m135, m61, m97, m105, m107, m129, m130, m133 i m163), 2 neorganske zagađujuće materije vazduha (PM_{10} i CO), 3 meteorološke varijable (ukupna oblačnost – tcld, najbolji indeks podizanja u 4 sloja – lib4 i temperatura na 2 m visine – t02m), pandemijska varijabla (potvrđeni smrtni slučajevi) i 3 lagovane pandemijske varijable (ukupni aktivni slučajevi sa kašnjenjem od 1 dana, potvrđeni slučajevi da kašnjenjem od 2 dana i procentualna promena u parkovima u odnosu na osnovne vrednosti sa kašnjenjem od 3 dana).



Slika 21. Normalizovani nivoi i normalizovani lokalni uticaji varijabli u različitim režimima životne sredine (Radić i koautori, 2025).

Među navedenim varijablama, kao ključni faktori u svim režimima životne sredine istakla su se IOJ m41, m42, m105 i m129. Važno je napomenuti da signali na ovim masama mogu odgovarati različitim jedinjenjima. Na primer, ispitivanja fragmenata u spektru uređaja PTR-MS pokazala su da se jonski signal na m41 može povezati sa alkoholima kao što su propanol, butanol, pentanol i oktanol (Buhr i koautori, 2002), zatim izoprenom (Taipale i koautori, 2008a), kao i 1-okten-3-olom (Tasin i koautori, 2012) i naftalenom, od kojih su poslednja dva identifikovana i na m129 u spektru. Dunne i koautori (2012) dalje naglašavaju da u urbanim sredinama, jonski signal na m41 takođe može biti povezan sa acetonitrilom iako se obično meri na m42 (Dunne i koautori, 2012). Ovaj signal je često znatno veći nego kod m42 zbog različitih puteva hemijskih reakcija u kojima učestvuju H_3O^+, O_2^+ i NO^+ sa uobičajenim atmosferskim IOJ, stvarajući kao produkt jon na m41. Međutim, na osnovu navedene literature na masi m41 najverovatnije se identifikuje propin (tabela 10). Propin proizilazi iz različitih industrijskih proizvodnih procesa, uključujući izdvajanje i preradu naftnih derivata, a takođe je prisutan u malim količinama u prirodnom gasu i sirovoj nafti. Pored toga, neke studije ukazuju na njegovo prisustvo tokom početnih faza sagorevanja fosilnih goriva za grejanje i kuvanje (Awasthi i koautori, 2024). Takođe, signali na m42, m105 i m129 najverovatnije odgovaraju acetonitrilu, stirenu i naftalenu, respektivno (tabela 10).

Tabela 10. Identifikacija protonizovanih molekula IOJ dobijenih merenjem uzoraka ambijentalnog vazduha uređajem PTR-MS

Protonovana masa	Jedinjenje	Fragmenti/ jedinjenja	Opis	Reference
m41	Propin (Metilacetilen)	Fragment izoprena; Fragment limonena	Gasno (autogeno) zavarivanje	(Buhr i koautori, 2002; Dunne i koautori, 2012; Taipale i koautori, 2008b)
m42	Acetonitril (Metil cijanid)	Alkani + O_2^+	Sagorevanje biomase; Hemijska industrija (rastvarač)	(Dunne i koautori, 2012)
m45	Acetaldehid		Fotohemijsko razlaganje propena; Saobraćaj; Hrana i piće	(Blake i koautori, 2009; Zannoni i koautori, 2016);
m47	Dimetil-eter	Fragment izoprena	Sagorevanje LPG goriva (domaćinstvo i industrija); Dizel vozila; Industrijska upotreba/proizvodi (rashladna sredstva)	(Nakajima i koautori, 2001; R. Wang i koautori, 2024)
	Etanol		Sagorevanje goriva; Industrijske aktivnosti	(Brown i koautori, 2010)
	Mravlja kiselina		Agrohemijska industrija; Farmaceutska industrija	(Brown i koautori, 2010)
m61	1-Propanol	Fragment etil-acetata; Fragment metil-akrilata	Procesi fermentacije; Farmaceutska industrija (rastvarač); Domaćinstvo i proizvodi	(Brown i koautori, 2010)
	2-Propanol	Fragment etil-acetata; Fragment metil-akrilata	Procesi fermentacije; Farmaceutska industrija (rastvarač); Domaćinstvo i proizvodi	(Baasandorj i koautori, 2015)
	Ocat	Fragment etil-acetata; Fragment metil-akrilata	Ozonoliza	(Blake i koautori, 2009; Brown i koautori, 2010)
	Metil format	Fragment etil-acetata; Fragment metil-akrilata	Industrijska upotreba/proizvodi (rashladna sredstva, insekticidi)	(Inomata i koautori, 2010)
	Etilendiamin	Fragment etil-acetata; Fragment metil-akrilata	Hemijska industrija; Farmaceutska industrija	(Pal & Banat, 2016)
	Glikolaldehid	Fragment etil-acetata; Fragment metil-akrilata	Petrohemija; Metabolički procesi	(Inomata i koautori, 2010)
m62	Izopren	Fragmenti monoterpena; Fragment metilbutenola; Fragment oktanala;	Biogene emisije; Saobraćaj; Petrohemija (nusproizvod termalnog razlaganja nafte ili naftnih derivata)	(Awasthi i koautori, 2024)

		Fragment 3-metil butanala; Fragment 2-metil-3-buten-2-ola		
m73	Klaster molekula vode		Klaster molekula vode	(Awasthi i koautori, 2024)
	Tetrahidro-furan	Fragmentacija etra	Hemijska industrija (polimerizacija, rastvarač, laboratorijska upotreba)	
	2-Metil-propanal	Fragmentacija etra	Hemijska industrija	
	Butanal	Fragmentacija etra	Petrohemija	
	Butanon (Metil etil keton - MEK)	Fragmentacija etra	Hemijska industrija (rastvarač, plastika)	
m75	1-Butanol	Fragmenti hidroksiaceton a; Dietil etar; Fragment sumpor-dioksida	Hemijska industrija (rastvarač; biogorivo); Saobraćaj (aditivi u gorivima)	(Blake i koautori, 2009)
	2-Butanol	Fragmenti hidroksiaceton a; Dietil etar; Fragment sumpor-dioksida	Hemijska industrija (rastvarač; biogorivo); Saobraćaj (aditivi u gorivima)	(Brown i koautori, 2010)
	Propionska kiselina	Fragmenti hidroksiaceton a; Dietil etar; Fragment sumpor-dioksida	Hemijska industrija; Prehrambena industrija	(Van Huffel i koautori, 2014)
	Metil-acetat	Fragmenti hidroksiaceton a; Dietil etar; Fragment sumpor-dioksida	Hemijska industrija (rastvarač)	(Inomata i koautori, 2010)
	Etil format	Fragmenti hidroksiaceton a; Dietil etar; Fragment sumpor-dioksida	Industrijski i domaći proizvodi/korisnici (voće; hrana); Dim (duvan)	(L. Chen i koautori, 2023)
m79	Benzen	Klaster acetatne kiseline; Fragmenti etilbenzena; Fragmenti limonena	Petrohemijska industrija; Benzinska vozila; Dizel vozila; Isparavanje goriva; Domaći i industrijski proizvodi (gume, podmazivači, boje, deterdženti, lekovi, eksplozivi i pesticidi)	(Blake i koautori, 2009; de Gouw & Warneke, 2007)
m93	Toluen		Benzinska vozila; Dizel vozila; Domaći i industrijski proizvodi (rastvarači, boje, goriva, premazi); Sagorevanje uglja; Sagorevanje biomase	(Blake i koautori, 2009)
m95	Fenol		Farmaceutska industrija	(Blake i koautori, 2009)

	Dimetil disulfid	Fragmenti monoterpena; Fragmenti seskviterpena	Hemijska industrija; Prehrambena industrija; Petrohemijska industrija; Poljoprivreda	(Perraud i koautori, 2016)
m97	Ciklohepten			(Papurello i koautori, 2016)
m105	Stiren	Fragment peroksi-izobutil-nitrata; Fragment ketone	Hemijska industrija; Petrohemija; Domaći i industrijski proizvodi (punila, masa, gips, modelarska glina, premazi, tečnosti/deterdženti, proizvodi za negu automobila, lepkovi, mirisi)	(Blake i koautori, 2009)
m107	C_8-aromatici		Benzinska vozila; Dizel vozila; Hemijska industrija; Petrohemija; Domaći i industrijski proizvodi (rastvarači, boje, goriva, premazi); Sagorevanje uglja, gasa i nafte; Sagorevanje biomase	(Blake i koautori, 2009)
	Ksileni		Benzinska vozila; Dizel vozila; Hemijska industrija; Petrohemija; Domaći i industrijski proizvodi (rastvarači, boje, goriva, premazi); Sagorevanje uglja, gasa i nafte; Sagorevanje biomase	(de Gouw i Warneke, 2007)
	Etilbenzen		Benzinska vozila; Dizel vozila; Domaći i industrijski proizvodi (rastvarači, boje, goriva, premazi); Sagorevanje uglja, gasa i nafte; Sagorevanje biomase	(de Gouw i Warneke, 2007)
	Benzaldehid		Hemijska industrija; Farmaceutska industrija; Prehrambena industrija	(Mallette i koautori, 2012)
m129	Naftalen		PAH; Pušenje; Sagorevanje goriva i drveća	(Blake i koautori, 2009; Tasin i koautori, 2012)
	Oktan			(Blake i koautori, 2009)
	Azulen	Izomer naftalena		
m130	Metilovani furan			(Bruns i koautori, 2017)
m133	Benzen, $C_6H_5CH_3^+$ (Toluen)	U PTR-MS, toluen može da se pojavi na m93 kao primarni jon, što predstavlja jon $C_7H_7^+$. Međutim, u nekim uslovima i sa specifičnim tehnikama jonizacije, može se pojaviti preuređeni ili manje uobičajeni		(Westphal i Junge, 2012)

		fragment na m133		
m135	C_{10}-aromatici			(Blake i koautori, 2009)
m163	Izomeri ksilena	Metoksifenoli; Određena bromovana ili hlorovana aromatična jedinjenja		(Erickson i koautori, 2014)

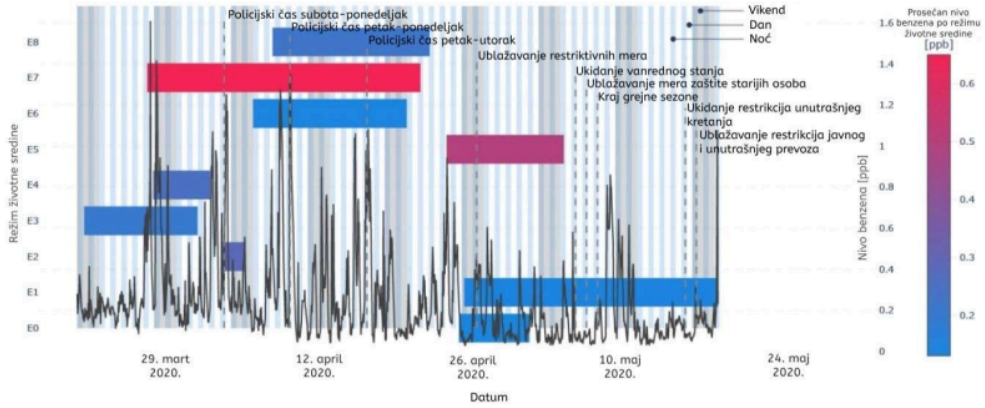
Varijable koje imaju ključnu ulogu u predikciji koncentracija benzena u različitim režimima životne sredine, mogu se klasifikovati i prema stepenu uticaja koji ostvaruju. Među najdominantnijima su m45 (acetaldehid) i m97 (ciklohepten), koji pokazuju izražen uticaj u gotovo svim identifikovanim režimima. Jedinjenja m107 (C_8-aromatici) imaju značajan doprinos u sedam od devet režima. Takođe se izdvajaju varijable lib4, m62 (vinil hlorid), m95 (fenol ili dimetil sulfid) i m135 (C_{10}-aromatici), koje imaju važnu ulogu u šest režima, iako je njihov uticaj selektivniji. Ostale varijable, iako manje zastupljene po značaju, doprinose boljem razumevanju izvora benzena u specifičnim uslovima. Posebno su važne one koje odražavaju trenutne ili vremenski odložene promene u aktivnostima ljudi tokom pandemije (slika 20).

8.3.1 Dinamika režima životne sredine tokom trajanja vanrednog stanja

Radi procene uticaja vladinih mera, promena u aktivnostima ljudi i sezonskih faktora na ekološke parametre, sprovedena je analiza pojavljivanja režima životne sredine po mesecima. Posmatrano na mesečnom nivou, prosečne promene u zastupljenosti pojedinih režima pokazuju sledeće trendove: režim E7 beleži značajan pad uticaja od 127,7%, E0 i E5 beleže umeren pad od oko 8%, dok je kod E1, E3 i E4 registrovan porast uticaja od 18,3%, 16,8% i 10,2%, redom.

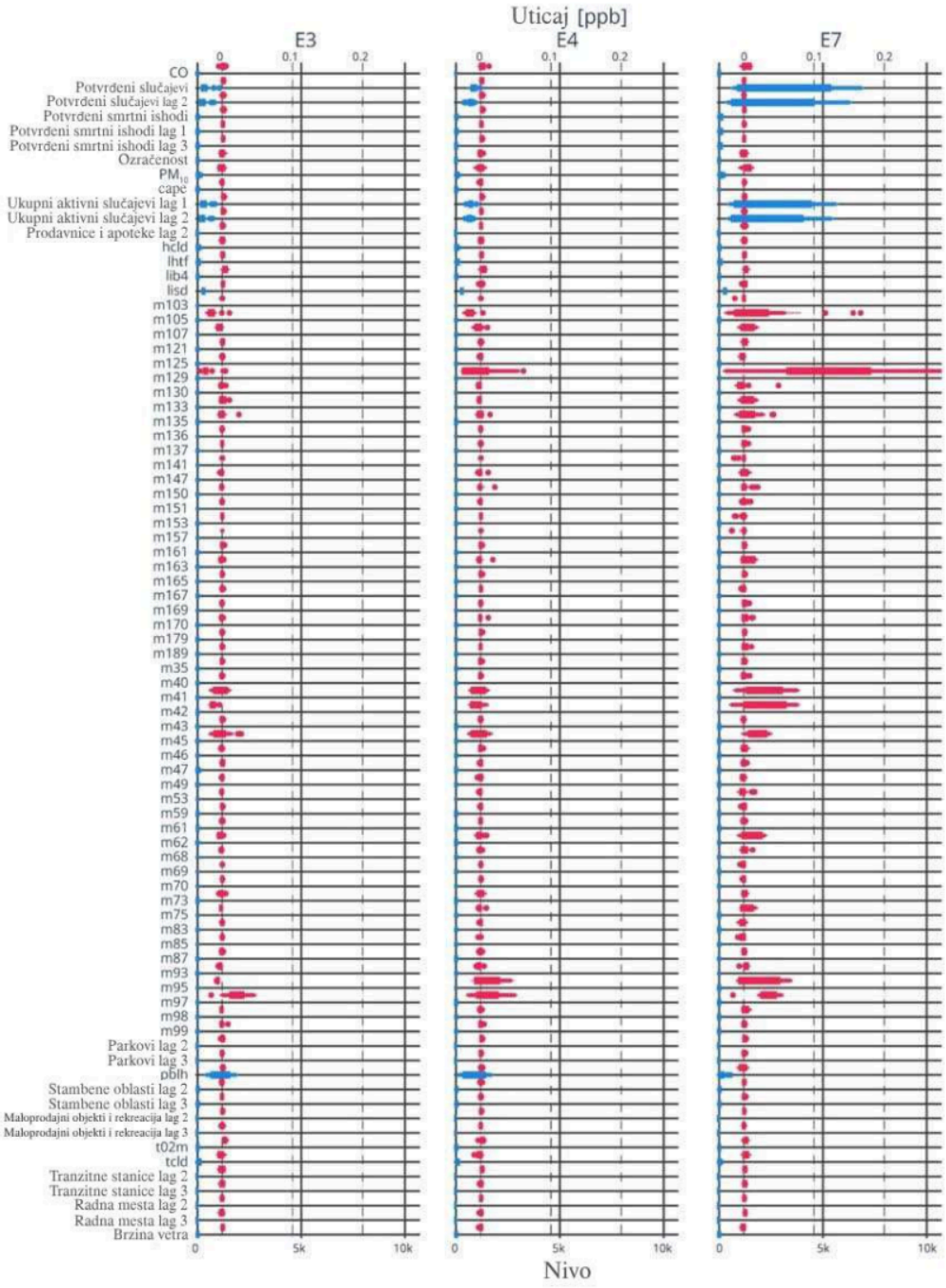
Vanredno stanje u Srbiji započelo je u martu pojavom tri režima, E3, E4 i E7, koji su bili prisutni i tokom aprila (slika 22). Ovaj period obeležile su oštre restriktivne mere: zabrana kretanja, zatvaranje institucija, smanjenje industrijske proizvodnje i drastično smanjen saobraćaj. Istovremeno je grejna sezona bila u toku, sa čestim korišćenjem čvrstih goriva (ugalj i drva) u domaćinstvima u blizini mernog mesta. Tokom aprila, u vreme najstrožih mera, pojavljuju se dodatna tri režima – E2, E6 i E8. Ovaj mesec karakterišu i izražene meteorološke promene, uključujući iznadprosečne temperature koje su ubrzale vegetaciju u okolini mernog mesta. Krajem aprila, sa ukidanjem zabrana i postepenom normalizacijom društvenih i ekonomskih aktivnosti, beleži se smanjenje prisustva režima E2, E6 i E8, a formiraju se tri nova, E0, E1 i E5, koji obeležavaju završnu fazu vanrednog stanja.

U celini, početak i kraj vanrednog stanja obeležava prisustvo po tri dominantna režima, dok se svih devet režima sukcesivno javljaju tokom različitih faza krize, odražavajući promene u okruženju izazvane pandemijom.



Slika 22. Vremenske serije nivoa benzena i režima životne sredine

U okviru ove disertacije, detaljnija analiza režima životne sredine fokusirana je na režime E3, E4 i E7, koji su obeležili početak vanrednog stanja usled pandemije COVID-19. Ovi režimi predstavljaju specifične ekološke i meteorološke uslove, uključujući lokalne izvore emisija, procese sagorevanja, hemijske reakcije i meteorološke faktore, koji su uticali na ponašanje benzena u atmosferi tokom tog perioda. Svaki od tri režima povezan je sa odgovarajućim izvorima emisija i specifičnim ekološkim faktorima: režim E3 sa hemijskom proizvodnjom, sagorevanjem i emisijama povezanim sa naftnom industrijom, režim E4 sa procesima koji nisu povezani sa sagorevanjem, dok je režim E7 pod uticajem specifičnih meteoroloških faktora i industrijskih aktivnosti. Na Slici 23 prikazani su uticaji najznačajnijih prediktora u odabranim režimima životne sredine.



Slika 23. Distribucija najvažnijih nivoa (plavo) i uticaja (crveno) za režime E3, E4 i E7

8.3.1.1 Režim životne sredine E3 – hemijska proizvodnja, sagorevanje i emisije povezane sa naftom

Režim životne sredine označen kao E3 bio je jedan od dominantnih tokom početne faze vanrednog stanja, sa učešćem od 10,5% u svim instancama (tabela 9, slika 22). U ovom periodu, prosečne koncentracije benzena bile su za 15,67% niže od očekivane vrednosti od 0,244 ppb. Na formiranje ovog režima uticalo je 12 ključnih varijabli, uključujući deset IOJ (m 41, m 42, m 45, m 62, m 93, m 95, m 97, m 105, m 107 i m 129) i dva meteorološka parametra (t02m i lib4). Najveće uticaje među ovim varijablama imala su IOJ identifikovana kao ciklohepten (m 97), acetonitril (m 42), stiren (m 105) i naftalen (m 129), sa relativnim uticajima od 11,0%, -7,0%, -7,9% i 11,9%, kao i srednjim normalizovanim uticajima od 8,5%, 5,2%, 6,0% i -8,9%, respektivno (tabele 10 i 11, slika 23). Različite industrijske aktivnosti, kao što su prerada nafte, emisije iz proizvodnje hemikalija i plastike, sagorevanje fosilnih goriva i biomase mogu dovesti do emisije ovih IOJ. Takođe isti mogu poticati i iz saobraćaja, grejanja u domaćinstvima i procesa sagorevanja uglja i drveta (Kong i koautori, 2023; L. Zhang i koautori, 2024), koji su između ostalog prisutni u okolini mernog mesta.

Tabela 11. Osnovne karakteristike režima životne sredine E3

Varijabla	Nivo	Normalizovani nivo [%]	Uticaj [ppb]	Normalizovani uticaj [%]	Relativni uticaj [%]	Inherentni uticaj	Dnevni nivo	Noćni nivo	Dnevni normalizovani uticaj [%]	Noćni normalizovani uticaj [%]
m97	0,08	23,8	0,02	8,5	11	Umereno pozitivan	0,07	0,1	7,1	10,8
lib4	12,46	75,9	0	1,7	2,3	Umereno pozitivan	13,22	11,22	1,8	1,5
t02m	2,92	12,4	0	1,4	1,9	Visoko pozitivan	3,85	1,38	1,5	1,3
m45	0,53	15,2	0	-1,1	-1,5	Umereno negativan	0,74	0,19	-0,1	-2,7
m93	0,03	0,1	0	-1,2	-1,6	Visoko negativan	0,03	0,03	-1,1	-1,4
m62	0,04	9,7	0	-1,3	-1,6	Visoko negativan	0,04	0,04	-1,3	-1,2
m41	0,08	5,2	0	-1,4	-1,8	Umereno negativan	0,09	0,07	-0,7	-2,6
m107	0,1	7,2	0	-1,9	-2,6	Umereno negativan	0,1	0,08	-1,7	-2,3
m95	0,03	0	-0,01	-2,6	-3,5	Umereno negativan	0,03	0,03	-2,7	-2,5
m42	0,05	12,7	-0,01	-5,2	-7	Visoko negativan	0,05	0,05	-5,5	-4,7
m105	0,03	5	-0,01	-6	-7,9	Visoko negativan	0,03	0,03	-5,7	-6,6
m129	0,03	0,8	-0,02	-8,9	-11,9	Umereno negativan	0,03	0,03	-9,6	-7,9

Dok su emisije benzena prisutne u širokom spektru aktivnosti, njihova kombinacija sa specifičnim jedinjenjima ukazuje na potencijalne izvore emisije. Pozitivna korelacija između benzena i cikloheptena (m97) unutar ovog režima ukazuje na to da potiču iz zajedničkih izvora koji doprinose povećanju koncentracije benzena. Nasuprot tome, negativna korelacija sa stirenom (m105) i acetonitrilom (m42), kao i još izraženija negativna povezanost sa naftalenom (m129), sugeriše da ova jedinjenja dele izvore koji su povezani sa smanjenjem koncentracije benzena. Pri tome, izvori naftalena verovatno imaju najmanji uticaj na benzen ili su najviše redukovani u poređenju s ostalima. Kao uobičajeni izvori cikloheptena i benzena mogu se navesti industrijske aktivnosti, poput procesa prerade nafte, skladištenja i distribucije goriva, proizvodnje plastike i sintetičke gume, kao i različiti procesi sagorevanja, uključujući emisije iz saobraćaja i spaljivanje biomase. Međutim, isti ti procesi nisu nužno odgovorni za emisije stirena, acetonitrila i naftalena, što znači da ove supstance mogu dolaziti iz drugačijih izvora. Tokom trajanja režima E3, duvali su umereni vetrovi prosečne brzine 5 m/s, uglavnom sa severnog i istočnog pravca, pri čemu se Rafinerija nafte Pančevo, kao značajan industrijski izvor emisija, nalazi na istočnom delu, na oko 20 kilometara od mernog mesta. Međutim, kako brzina vetra nije bila dovoljna za efikasno raspršivanje zagađenja na široj površini, što ukazuje na ograničen uticaj udaljenih izvora, uključujući rafineriju, relevantni doprinos povećanim koncentracijama zagađujućih materija može se pripisati lokalnim aktivnostima koje uključuju naftu u neposrednoj blizini mernog mesta. Pored toga, iako su tokom ovog perioda zabeležene povećane vrednosti lib4 (srednja vrednost 12,5°C), njihov uticaj na predikciju koncentracije benzena bio je zanemarljiv. To ukazuje na stabilne atmosferske uslove, sa ograničenim vertikalnim i delimično smanjenim horizontalnim mešanjem, što je dovelo do zadržavanja zagađujućih materija blizu površine.

Uzimajući u obzir da je režim E3 zabeležen u periodu kada je grejna sezona još uvek bila u toku, lokalni izvori, posebno sagorevanje biomase u domaćinstvima, verovatno su imali glavni doprinos u zabeleženom povećanju koncentracija benzena. Ovo dodatno potvrđuju i rezultati da su nivoi i uticaji naftalena bili viši noću, jer je produženo vreme provedeno kod kuće zbog ograničenja kretanja produžilo period grejanja u večernjim satima.

Smanjenje emisija iz hemijske proizvodnje, posebno u vezi sa proizvodnjom akrilonitrila i polistirena, imalo je značajan uticaj na smanjenje koncentracija benzena u atmosferi. Kako su emisije iz ovih industrijskih aktivnosti opale, smanjena je i količina acetonitrila i stirena (koji su prethodno doprinosili povećanju koncentracija benzena), što je rezultiralo opadanjem nivoa benzena u atmosferi.

Negativan uticaj naftalena, koji je nusproizvod nepotpunog sagorevanja benzina i dizela (Marques i koautori, 2022), na predikciju benzena može biti posledica uvođenja prvih mera zatvaranja (škola i institucija), što je značajno smanjilo upotrebu vozila i doprinelo smanjenju saobraćajne aktivnosti u blizini mernog mesta. Smanjenje saobraćajne aktivnosti rezultovalo je i smanjenjem koncentracije azotnih oksida, koji su prekursori u procesu formiranja ozona, a indirektno i benzena. Redukovanje emisija NOx imalo je indirektan efekat na koncentracije sekundarnih zagađujućih materija, pre svega kroz promene u koncentracijama ozona. Poznato je da primarne komponente koje doprinose nivou benzena i njegovi prekursori reaguju sa hidroksilnim radikalima, nitratnim radikalima i ozonom, što dovodi do njihove razgradnje i formiranja sekundarnih zagađujućih materija, poput acetaldehida. Takođe, povećane koncentracije ozona, što se povezuje sa smanjenjem koncentracije azotovih oksida i aerosola usled restriktivnih mera, mogu ubrzati oksidaciju ovih jedinjenja i dodatno doprineti smanjenoj koncentraciji benzena (Nussbaumer i koautori, 2022).

Ostali faktori povezani s ovim ekološkim režimom nisu imali značajan uticaj na nivo koncentracije benzena. Naime, supstance kao što su propen (m42), acetaldehid (m45), C_8-aromatici (m107), fenol/dimetil sulfid (m95), vinil hlorid (m62) i toluen (m93) bile su prisutne u zanemarljivim količinama, što je rezultovalo gotovo neprimetnim efektima na predikciju benzena. Ovaj ograničeni uticaj, u kombinaciji sa vrlo niskim koncentracijama, ukazuje na drastičan pad emisija koje potiču od njihovih uobičajenih izvora.

Početak vikenda u prvoj nedelji vanrednog stanja doneo je promene u dinamici benzena, koja je tada bila pod uticajem novih režima životne sredine, konkretno E7 i E4 (slika 22). Režim E3 se ponovo pojavio sredinom druge nedelje, ali je nestao pre početka drugog vikend, u trenutku kada su na snagu stupile prve mere policijskog časa.

8.3.1.2 Režim životne sredine E4 – lokalni industrijski procesi

Režim životne sredine E4, obuhvata 5,4% posmatranih instanci podataka i zabeležen je tokom prvog vikenda vanrednog stanja kao izdvojen obrazac, koji se zadržao do narednog vikenda (slika 24). Ovaj režim bio je povezan s dodatnim, ali umerenim smanjenjem koncentracije benzena, pri čemu je prosečna zabeležena vrednost bila 2,33% niža od očekivane (tabela 9).

Ovaj režim pretežno je determinisan uticajem 8 varijabli, uključujući kombinaciju 7 IOJ (m41, m42, m95, m97, m105, m107 i m129) i jedan meteorološki parametar (lib4) (slika 23). Glavni doprinos među ovim varijablama imala su IOJ identifikovana kao ciklohepten (m97), naftalen (m129), acetonitril (m42) i stiren (m105) sa relativnim uticajima od 5,0%, -3,3%, - 3,4%

i -8,3% i sa prosečnim normalizovanim uticajima na predikciju nivoa benzena od 4,4%, -1,1%, -2,4% i -6,2%, respektivno (tabela 12).

Tabela 12. Osnovne karakteristike režima životne sredine E4

Varijabla	Nivo	Normalizovani nivo [%]	Uticaj [ppb]	Normalizovani uticaj [%]	Relativni uticaj [%]	Inherentni uticaj	Dnevni nivo	Noćni nivo	Dnevni normalizovani uticaj [%]	Noćni normalizovani uticaj [%]
m97	0,07	21,5	0,01	4,4	5	Umereno pozitivno	0,06	0,09	1,7	8,3
m95	0,04	19,1	0,01	2,3	2	Umereno negativno	0,03	0,04	-0,7	6,7
lib4	10,1	63,1	0	1,5	2	Visok pozitivan	9,99	10,26	1,5	1,5
m41	0,1	7,3	0	-1	-1,6	nizak	0,09	0,11	-1,5	-0,3
m129	0,03	13,5	0	-1,1	-3,3	Umereno negativno	0,03	0,04	-3	1,8
m107	0,13	11,8	0	-1,6	-2,1	Umereno negativno	0,14	0,12	-1,1	-2,4
m42	0,08	30,5	-0,01	-2,4	-3,4	Umereno negativno	0,08	0,09	-2,7	-1,9
m105	0,04	9,8	-0,02	-6,2	-8,3	Visok negativan	0,03	0,04	-5,8	-6,8

Razlike između cikloheptena i benzena, naftalena, acetonitrila i benzena i stirena i benzena prvenstveno proizlazi iz specifičnih industrijskih aktivnosti i procesa sagorevanja. Iako ciklohepten, naftalen, acetonitril dele zajedničke izvore poput izduvnih gasova vozila i industrijskih emisija, naftalen i acetonitril su specifičnije povezani sa hemijskim proizvodnim aktivnostima, koje imaju manje istaknutu ulogu u poreklu cikloheptena. Izvori cikloheptena su usko povezani sa procesima sagorevanja kao što su izduvni gasovi vozila, grejanje u domaćinstvima i sagorevanje biomase, kao i emisijama koje potiču iz rafinerija nafte. Smanjeno putovanje i povećano vreme provedeno kod kuće zbog restriktivnih mera intenziviralo je emisije koje potiču od zagrevanja domaćinstava i sagorevanja biomase. Nasuprot tome, naftalen i acetonitril su više povezani sa hemijskom proizvodnjom i obradom katrana uglja gde se proizvode zajedno sa benzenom. Stiren se pretežno povezuje s proizvodnjom plastike i smola, gde predstavlja ključnu komponentu, a njegovo prisustvo uz benzen ukazuje na emisije iz industrijskih procesa specifičnih za ovu vrstu proizvodnje. Blagi do umereni vetar (1,5–6 m s^{-1}) sa severa i severozapada u ovom okruženju donosio je čistiji vazduh iz oblasti u kojima su se nalazili izvori emisija acetonitrila, naftalena i stirena (hemijska industrija i proizvodnja plastike) koji su zbog vanrednog stanja radili smanjenim kapacitetom.

Ovi uslovi dodatno su umanjili njihov uticaj, što je doprinelo nižim koncentracijama benzena od očekivanih.

Slično kao u režimu E3, povišene vrednosti lib4 (srednja vrednost 10,1°C), koje su imale slab uticaj na koncentraciju benzena, ukazuju kako na vertikalno tako i na delimično horizontalnu stabilnost atmosfere. Ova stabilnost atmosfere verovatno je ograničila vertikalno mešanje, pri čemu su slojevite vazdušne mase zadržavale zagađujuće materije blizu površine, smanjujući uticaj udaljenih industrijskih izvora.

8.3.1.3 Režim životne sredine E7 – emisije iz izvora koje nisu posledice sagorevanja, noćna hemija i meteorološki kontekst

Neposredno pre prvog vikenda vanrednog stanja, pojavio se režim životne sredine E7 (slika 22), koji je obuhvatao 7,2% instanci podataka. Iako je bio zastupljen u manjoj meri, ovaj režim je imao značajan uticaj na povećanje nivoa benzena, sa prosečnom vrednošću od 0,37 ppb. Visoki nivoi benzena, karakteristični za ovaj režim, povremeno su se javljali i trajali sve do poslednjeg policijskog časa, uglavnom pred kraj radne nedelje u noćnim i ranim jutarnjim satima (22-8h).

U ovom režimu, fluktuacije u nivoima benzena značajno su varirale, krećući se od 0,02 ppb (- 8,2%) do 1.03 ppb (420,9%), sa prosekom od 0,37 ppb (151,9%) u odnosu na očekivanu vrednost. Na ove fluktuacije u najvećoj meri je uticalo 19 varijabli, uključujući 14 IOJ (m41, m42, m45, m62, m75, m93, m95, m97, m105, m107, m129, m133, m135 i m163), 3 meteorološka parametra (t02m, tcld i lib4) i dve neorganske zagađujuće materije (CO i $PM_{2,5}$) (slika 23). Najuticajnije varijable iz grupe IOJ u predikciji nivoa benzena u ovom režimu bile su naftalen (m129), ciklohepten (m97), propen (m41) i fenol/dimetil sulfide (m95) sa relativnim uticajima od 21,4%, 7,8%, 5,2% i 4,0%, i sa prosečnim normalizovanim uticajima na predikciju nivoa benzena od 50%, 14%, 13% i 12%, respektivno (tabela 13).

Tabela 13. Osnovne karakteristike režima životne sredine E7

Varijabla	Nivo	Normalizovani nivo [%]	Uticaj [ppb]	Normalizovani uticaj [%]	Relativni uticaj [%]	Inherentni uticaj	Dnevni nivo	Noćni nivo	Dnevni normalizovani uticaj [%]	Noćni normalizovani uticaj [%]
m129	0,1	72	0,12	50	21,4	Visoko pozitivan	0,09	0,11	49,1	50,4
m97	0,34	74	0,03	14	7,8	Visoko pozitivan	0,22	0,39	10,6	15,4
m41	0,57	49,3	0,03	13,2	5,2	Visoko pozitivan	0,66	0,52	14,6	12,6
m95	0,14	61,6	0,03	11,8	4	Visok pozitivan	0,18	0,12	11,2	12
m105	0,07	63,5	0,03	10,7	2,7	Niži	0,06	0,08	2,6	14,2
m42	0,18	69,9	0,02	10,1	3,1	Visoko pozitivan	0,14	0,19	5,2	12,2
m45	1,37	53,1	0,02	7,6	3,5	Visoko pozitivan	1,53	1,3	8	7,4
m62	0,17	63,4	0,01	3,8	1,4	Visoko pozitivan	0,18	0,17	2,1	4,6
m135	0,1	43,3	0,01	3,3	0,6	Umereno pozitivan	0,12	0,1	5,1	2,5
m107	0,33	37,9	0,01	2,6	1,1	Umereno pozitivan	0,39	0,3	4,2	2
m75	0,19	50,4	0,01	2,6	0,8	Visoko pozitivan	0,26	0,16	2,2	2,7
m163	0,04	53	0,01	2,5	0,9	Visoko pozitivan	0,05	0,04	1,9	2,8
m133	0,06	58,6	0	2	0,5	Visoko pozitivan	0,07	0,06	2,1	1,9
PM_{10}	68,34	65,7	0	1,9	0,8	Visoko pozitivan	59,95	71,94	1,6	2,1
CO	0,49	74,7	0	1,4	0,8	Visoko pozitivan	0,39	0,53	0,6	1,8
t02m	8,28	35,7	0	1,3	0,9	Visoko pozitivan	6,81	8,91	1,3	1,3
tcld	19,02	19	0	1,2	1	Visoko pozitivan	11,11	22,41	1,5	1,1
m93	0,26	30,7	0	1,1	0,7	Visoko pozitivan	0,27	0,25	0,9	1,2
lib4	9,04	55,5	0	1,1	0,8	Umereno pozitivan	12,49	7,55	1,8	0,8

Ovaj režim karakterišu tri nivoa uticaja različitih varijabli koji doprinose povećanju nivoa benzena u odnosu na očekivane vrednosti. Visoko pozitivan uticaj na nivoe benzena beleže sve varijable osim C_{10}-aromatika (m135) i lib4 koji su imali umereno pozitivne uticaje, kao i stirena (m105) koji je imao niži uticaj. Među jedinjenjima prednjače naftalen (m129), ciklohepten (m97) i acetonitril (m42) sa visokim i umerenim uticajem, dok je u slučaju CO on niži (tabela 13). Sva ova jedinjenja odražavaju emisiju iz sagorevanja fosilnih goriva, industrijskih aktivnosti i verovatno noćne hemije u specifičnim atmosferskim uslovima (H. Hu i koautori,

2023), što je u skladu sa dobijenim rezultatima koji ukazuju na povećane nivoe i uticaje stirena, cikloheptena, acetonitrila, PM_{10} i CO tokom noći. Polazeći od činjenice da je ovaj režim doveo do najvećeg povećanja koncentracije benzena, sa maksimalnim relativnim porastom od 420,9%, važno je napomenuti da je 70% tih događaja, koji su izazvali značajan porast koncentracija benzena, vezano baš za noćne uslove. Tokom noći, atmosfera postaje stabilnija, vlažnost je visoka, a granični sloj mešanja atmosfere nizak, što stvara uslove koji pogoduju akumulaciji zagađujućih materija poput benzena. Ovi uslovi omogućavaju odvijanje specifičnih hemijskih reakcija koje tokom dana nisu izražene. Jedna od ključnih reakcija je formiranje nitratnog radikala ($NO_3^{\bullet}$), glavnog noćnog oksidansa u troposferi. $NO_3^{\bullet}$ se tokom noći stvara u visokim koncentracijama i karakteriše ga velika reaktivnost, što značajno utiče na sudbinu brojnih gasova u tragovima, uključujući isparljiva organska jedinjenja. Kao dominantan oksidans u noćnim uslovima, $NO_3^{\bullet}$ učestvuje u razgradnji mnogih nezasićenih ugljovodonika, pri čemu nastaju složeni oksidacioni produkti, koji mogu doprineti povećanju koncentracija sekundarnih zagađujućih materija. Primera radi, povećane koncentracije stirena, koji kao nezasićeni ugljovodonik je visoko reaktivan sa $NO_3^{\bullet}$, ukazuju na to da se upravo reaktivnost $NO_3^{\bullet}$ radikala intenzivirala, jer su prisutne više koncentracije IOJ kao što je stiren omogućile intenzivnije hemijske reakcije. Prema tome stiren se u ovom slučaju može smatrati pogodnim indikatorom noćne reaktivnosti $NO_3^{\bullet}$, ali i korisnim za procenu potencijala $NO_3^{\bullet}$ radikala da oksiduje druga IOJ prisutna u atmosferi (H. Hu i koautori, 2023). Na ovaj način, analize bazirane na stirenu mogu pružiti uvid u mehanizme oksidacije i noćnu hemiju, koja se često zanemaruje u odnosu na dnevne procese. Nasuprot tome, za propin, C_8-aromatike, C_{10}-aromatike, fragmentacione jone na m/z 133 i lib4 primećen je suprotan trend, sa smanjenim nivoima i uticajima tokom noćnih sati (tabela 13).

Među jedinjenjima čije vrednosti su na umerenim nivoima, propin, stiren, acetaldehid i fenol/dimetil sulfide, zabeleženi su srednji uticaji, dok su C_8-aromatici, C_{10}-aromatici, vinil hlorid, fragmentacioni joni na m133, PM_{10}, C_{12}-aromatici i hidroksi aceton imali nizak uticaj na predikciju benzena.

Da sagorevanje ima manju ulogu u ovom okruženju u poređenju sa drugim potencijalnim izvorima benzena ukazuje relativno mali uticaji CO i PM_{10}. Ovaj zaključak dodatno je podržan periodičnom prirodom ovog režima životne sredije. Pored toga, analiza intenziteta saobraćaja tokom radne nedelje u periodu pre početka policijskog časa nije pokazala povećanje aktivnosti što takođe ukazuje da ni izduvni gasovi iz saobraćaja nisu značajno doprineli zapaženim nivoima benzena. Takođe, snažna korelacija između benzena i naftalena, koji beleže povećanje

koncentracija tokom radne nedelje i opadanje koncentracija tokom vikenda mogu ukazati na procese različite od sagorevanja. Zajednički izvor ovih emisija može se povezati sa aktivnostima različitih procesa u blizini, kao što su rafinerije nafte (severoistok i istok), postrojenja za reciklažu tekstila (istok i jugoistok), fabrike papira (severozapad, zapad, jugozapad, jug i jugoistok), proizvodnju gume i plastike (zapad, severozapad, jug, jugoistok, istok i sever) i pogoni za proizvodnju nameštaja (zapad, jugozapad, jug, jugoistok i istok).

Nivoi i uticaji IOJ su postepeno opadali tokom trajanja ovog perioda, što se poklapa sa smanjenjem aktivnosti stanovništva zbog pooštrenih mera ograničenja. Osim toga, uočen je porast uobičajenih dnevnih aktivnosti neposredno pre svakog policijskog časa vikendom, dok su se građani pripremali za predstojeće zatvaranje, što je verovatno doprinelo promenama u uslovima u životnoj sredini.

Meteorološki uslovi su takođe imali veoma važnu ulogu u definisanju ovog režima životne sredine, oblikujući dinamiku koncentracija benzena, posebno tokom noćnih sati. Podaci o temperaturi vazduha (t02m), ukupnoj oblačnosti (tcld) i atmosferskoj stabilnosti (lib4) pružili su uvid u procese koji utiču na nivoe benzena tokom posmatranog perioda.

Blagi vetar (0-3,3 m s^{-1}) i umerene vrednosti lib4, koji su imali mali uticaj na predikciju benzena, ukazali su na ograničenu disperziju i vertikalno mešanje, što je omogućilo zadržavanje zagađenja bliže površini. Temperatura vazduha direktno utiče na brzinu hemijskih reakcija u atmosferi, pri čemu više temperature obično ubrzavaju formiranje sekundarnih zagađujućih materija, poput ozona i SOA (J. Hu i koautori, 2021). Iako su zapažene srednje vrednosti temperature (do 13°C) verovatno pospešile određene hemijske reakcije, noćni uslovi zbog izostanka fotohemijskih procesa, smanjile su mogućnost značajnijeg formiranja sekundarnih zagađujućih materija, što potvrđuju i niže koncentracije ozona u ranim jutarnjim satima. Rezultati takođe pokazuju da su zabeleženi nivoi temperature imali umeren uticaj na dinamiku benzena, s prosečnim doprinosom od 1,3%.

Ukupna oblačnost (tcld) pokazala je mali, ali značajan pozitivan uticaj na koncentracije benzena, pri čemu se njen efekat razlikovao između noćnih i dnevnih sati. Tokom noći, oblačnost može delovati kao termoizolacioni pokrivač, smanjujući radiativno hlađenje i gubitak toplote sa površine, što stabilizuje donji sloj atmosfere i ograničava vertikalno mešanje (Luo i koautori, 2019). Ovaj mehanizam zadržava zagađujuće materije bliže površini, omogućavajući njihovu akumulaciju. Tokom dana, tcld igra glavnu ulogu u modulaciji solarne radijacije, potencijalno snižavajući temperaturu površine, što može ili smanjiti brzinu

isparavanja pojedinih IOJ ili usporiti fotohemijske reakcije neophodne za formiranje sekundarnih zagađujućih materija (Dowd i koautori, 2001). Veći pozitivni uticaj oblačnosti na koncentracije benzena zabeležen tokom dana, sugeriše da je ovaj faktor imao značajniju ulogu u oblikovanju predikcije benzena u dnevnim satima u ovom režimu životne sredine.

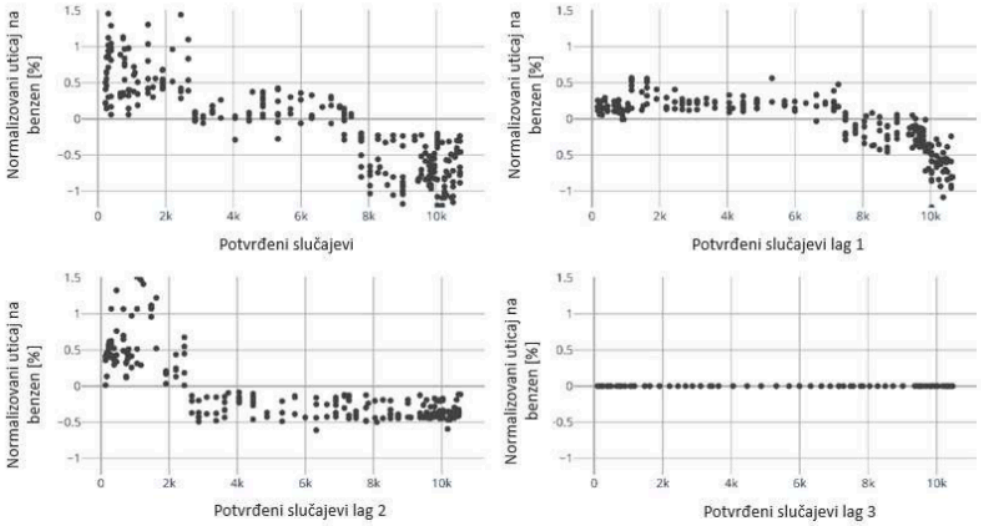
8.4 Uticaj mobilnosti i pandemijskih varijabli na koncentraciju benzena tokom pandemije

U cilju razumevanja kako su se društvene promene tokom pandemije odrazile na kvalitet vazduha i nivo benzena, sprovedena je analiza normalizovanog SHAP uticaja. Ovaj pristup je omogućio preciznu procenu značaja ključnih varijabli i njihovih lagovanih vrednosti u oblikovanju koncentracija benzena. Posebna pažnja posvećena je varijablama socijalne dinamike sa najvećim uticajem, uključujući promene u mobilnosti u odnosu na period pre pandemije i indikatore vezane za pandemijske mere. Rezultati su prikazani putem dijagrama raspršenja (*scatter plot*), gde x-osa predstavlja analizirane faktore, dok y-osa pokazuje njihov normalizovan uticaj na koncentracije benzena.

8.4.1 Uticaj potvrđenih slučajeva COVID-19 na dinamiku benzena

Odnos između broja potvrđenih slučajeva COVID-19 (OxCGRT) i koncentracija benzena prikazan je na Slici 24. Analiza obuhvata kako trenutne, tako i lagovane efekte, pokazujući značajnu dinamiku u različitim fazama pandemije. Nakon što su uvedene hitne restriktivne mere, prosečna koncentracija benzena opala je za 50%. Ipak, u početnim fazama pandemije, kada je broj potvrđenih slučajeva bio manji od 2 500, ova varijabla beleži pozitivan uticaj na koncentracije benzena, uz povećanje od 1,5%. Ovaj porast se može objasniti kombinacijom više faktora, uključujući hladnije vreme, koje je podstaklo povećano grejanje usled dužeg boravka kod kuće, zajedno sa rastućom mobilnošću pre zvaničnih restrikcija. Privremeno povećanje emisija može se povezati sa pojačanom aktivnosti građana koji su, vodeći se trendovima uvođenja mera iz drugih zemalja, nastojali da završe neophodne poslove pre nego što nastupe rigoroznije mere zatvaranja. Ovo povećanje aktivnosti postalo je posebno uočljivo nakon prijavljivanja prvih smrtnih slučajeva, što je izazvalo veliku javnu zabrinutost. Dodatno, ovaj efekat mogao je biti pojačan upotrebom fosilnih goriva za grejanje, što je kompenzovalo početni pad emisija izazvanih smanjenjem saobraćaja. Takođe, postepeno i nesinhronizovano uvođenje mera rezultovalo je i privremenim usponima i padovima u emisijama benzena. Tokom umerene faze pandemije, kada je broj potvrđenih slučajeva COVID-19 varirao između 2 500 i 7 500 slučajeva, uticaj ove varijable na koncentracije benzena ostao je prilično konstantan, što se može povezati sa stabilizovanim obrascima ponašanja usled postepenog

uvođenja restriktivnih mera. Iako su putovanja i društvena okupljanja bila ograničena, osnovne aktivnosti poput povremenih napuštanja domova za potrebe nabavke i šetnju kućnih ljubimaca, nužnih putovanja i kontinuirano zagrevanje domaćinstava omogućile su održavanje stabilnih nivoa emisija. Istovremeno, smanjenje saobraćaja i industrijskih aktivnosti sprečili su veće promene u koncentracijama benzena. Kako je broj slučajeva nastavio da raste, ali je javni odgovor postao uravnotežen, koncentracije benzena su ostale relativno stabilne. Ova stabilnost ukazuje na to da su restriktivne mere stvorile novu ravnotežu u kojoj su lokalne aktivnosti i dalje održavale osnovnu dinamiku emisija.



Slika 24. Normalizovani uticaj potvrđenih slučajeva na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana)

Međutim, kako je pandemija napredovala i broj potvrđenih slučajeva prešao 7 500, koncentracije benzena počele su da opadaju, smanjujući se za do 1%. Ova smanjenja poklopila su se sa primenom strožijih restriktivnih mera, uključujući češća i duža zaključavanja, intenziviranje rada na daljinu i redukovanje industrijske aktivnosti. U tom periodu mnoge firme su usvojile strože sigurnosne protokole, koji su podrazumevali kraće radne smene, manji broj zaposlenih na radnim mestima, kao i periodičnu, a u određenim sektorima i potpunu obustavu rada, što se indirektno odrazilo na značajno smanjenje emisija iz saobraćaja i mnogih industrija. Pored toga, celokupna situacija bila je podržana toplijim vremenom i povoljnim meteorološkim uslovima, posebno višim nivoima planetarnog graničnog sloja, što je smanjilo potrebu za grejanjem u domaćinstvima i verovatno dodatno doprinosilo smanjenju emisija benzena. S

obzirom na to da je broj slučajeva nastavio da raste, povećano oprezno ponašanje građana i reakcije vlasti verovatan su razlog za dodatno smanjenje emisije.

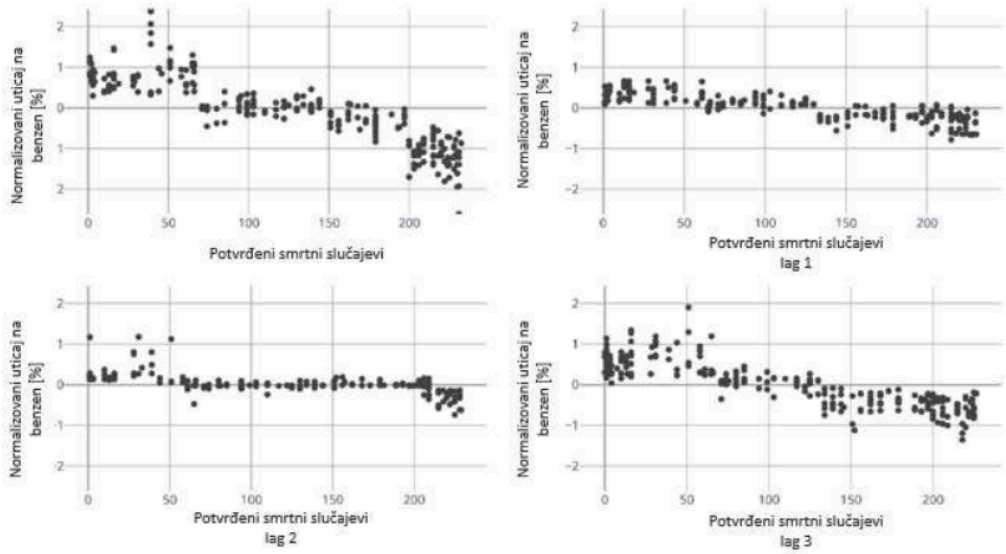
Analiza je takođe ukazala na postojanje odloženih efekata između broja slučajeva i koncentracija benzena, sugerišući da su odluke i odgovori na promene broja zaraženih uticali na obrasce emisije. Na primer, kašnjenje od jednog dana imalo je umereni uticaj, sa promenama u opsegu od -1% do 0,5%. Ovaj kratki vremenski period reflektovao je brze reakcije na ažurirane informacije o slučajevima, koje su dovele do smanjenog saobraćaja i prilagođenih radnih rasporeda. Vremenski pomak od dva dana doveo je do šireg opsega promena, sa uticajem na koncentracije benzena u rasponu od -0,5% do 1,5%. Ove promene mogle su biti povezane sa kompleksnijim reakcijama usled postepenog sprovođenja restriktivnih mera, prilagođavanja u lancima snabdevanja i dnevnim ritmovima, kao i periodičnim faktorima, poput razlika između vikenda i radnih dana. Na kraju, odloženi efekat od tri dana nije izazvao značajnije promene, što ukazuje na to da su ključne reakcije na porast broja slučajeva usledile u prvih 48 sati, dok su efekti nakon tog perioda opali. Ovaj smanjeni uticaj nakon pomenutog vremenskog okvira sugeriše da su efekti javne zabrinutosti i vladinih odgovora bili kratkoročni.

8.4.2 Uticaj potvrđenih smrtnih slučajeva COVID-19 na dinamiku benzena

Na Slici 25 prikazan je uticaj kumulativnih potvrđenih smrtnih ishoda od COVID-19 (OxCGRT) na koncentracije benzena. U periodu kada je broj registrovanih smrtnih slučajeva bio manji od 50, koncentracije benzena zabeležile su povećanje od 2%. Ovo se može povezati sa odsustvom strogih restriktivnih mera u tom periodu, kada svakodnevna kretanja, naročito u pogledu saobraćaja i industrijske aktivnosti, nisu izazvala veće promene pa samim tim nisu uticala pad emisije zagađujućih materija. Verovatno je da je umereni odgovor javnosti na manji broj potvrđenih smrtnih slučajeva omogućio nastavak glavnih privrednih tokova i mobilnosti stanovništva, što je imalo uticaja na očuvanje nivoa koncentracija benzena.

U međuperiodu, kada je broj smrtnih slučajeva bio između 50 i 150, uočene su veće fluktuacije u koncentracijama benzena. Ove promene mogu biti rezultat balansiranja između lokalnih restrikcija, koje su verovatno doprinele smanjenju emisija, i povećane potrošnje energije u domaćinstvima, aktivnosti u vezi sa zdravstvenom zaštitom, kao i regionalnih promena u saobraćaju koje su mogle kompenzovati ta smanjenja. Regionalno neslaganje u vremenu i sprovođenju zdravstvenih mera zaštite takođe je moglo doprineti ovoj varijabilnosti. Međutim, kada je broj kumulativnih smrtnih ishoda premašio vrednost od 150, koncentracija benzena je zabeležila pad od 2%, što bi moglo biti povezano sa povećanom opreznošću javnosti, kao i sprovođenjem strožijih mera zaključavanja, što je smanjilo saobraćaj i industrijsku aktivnost.

Takođe, treba istaći i to da je porast zvanično potvrđenih smrtnih slučajeva nastao u periodu toplijeg vremena, kraj aprila i početak maja, što je dovelo do smanjene potrebe za grejanjem, a time i dodatnog pada koncentracije benzena.



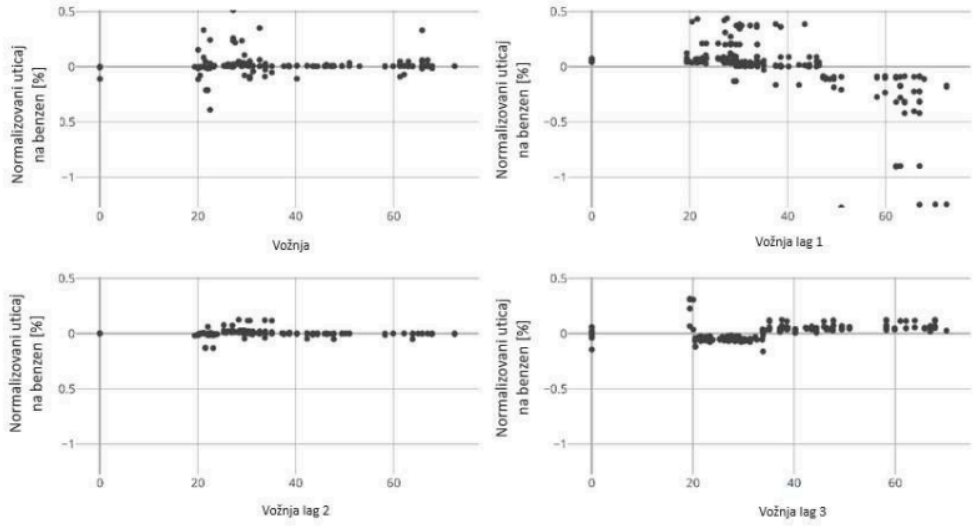
Slika 25. Normalizovani uticaj potvrđenih smrtnih slučajeva na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana)

Dodatna složenost u promenama koncentracija benzena tokom ovog perioda vidljiva je kroz analize lagovanih vrednosti ove varijable. Umereni efekat primetan je sa kašnjenjem od jednog dana, gde je manji broj smrtnih slučajeva bio povezan sa porastom koncentracija benzena do 0,5%, dok su viši brojevi smrtnih slučajeva dovodili do smanjenja koncentracija benzena u sličnom opsegu. Ove promene mogu ukazivati na rane reakcije u društvenim ponašanjima i operativnim procedurama nakon što su počeli da se prijavljuju zvanični izveštaji o smrtnim ishodima. Kašnjenje od dva dana pokazalo je blaga povećanja koncentracija benzena u periodima kada su smrtni slučajevi beležili niže vrednosti, dok su u periodima sa umerenim ili visokim vrednostima smrtnih ishoda efekti bili minimalni, što sugeriše da su se obrasci ponašanja stabilizovali tokom ovog perioda. Nakon tri dana, postojala je jasna razlika između perioda sa niskim i visokim vrednostima smrtnih slučajeva. Niski brojevi smrtnih slučajeva nastavili su da izazivaju povećanje koncentracija benzena do 1,5%, što može biti posledica održavanja uobičajenih dnevnih aktivnosti, dok su viši brojevi smrtnih slučajeva bili povezani sa smanjenjem koncentracija benzena, koje su pale i do 1,5%, verovatno kao rezultat produženih restrikcija i smanjenja emisija iz domaćinstava zbog smanjene potrebe za

grejanjem. Ovi rezultati upućuju na dva različita obrasca. U periodima s većim brojem smrtnih slučajeva, uvođenje strožijih mera zajedno sa povoljnim vremenskim uslovima smanjilo je potrošnju fosilnih goriva za potrebe grejanja, što je dovelo do opadanja koncentracija benzena. S druge strane, kada su brojevi smrtnih slučajeva bili niži, nastavak uobičajenih socijalnih i ekonomskih aktivnosti omogućio je postepeno povećanje nivoa benzena.

8.4.3 Uticaj izmenjene mobilnosti na nivo benzena – varijabla vožnja

Povezanost smanjenja intenziteta saobraćaja i promena u koncentraciji benzena (*Apple*) ilustrovana je na Slici 26. Na horizontalnoj osi prikazane su procentualne promene u vožnji u odnosu na uobičajene nivoe, pri čemu vrednost od 100% označava normalan intenzitet saobraćaja pre pandemije.



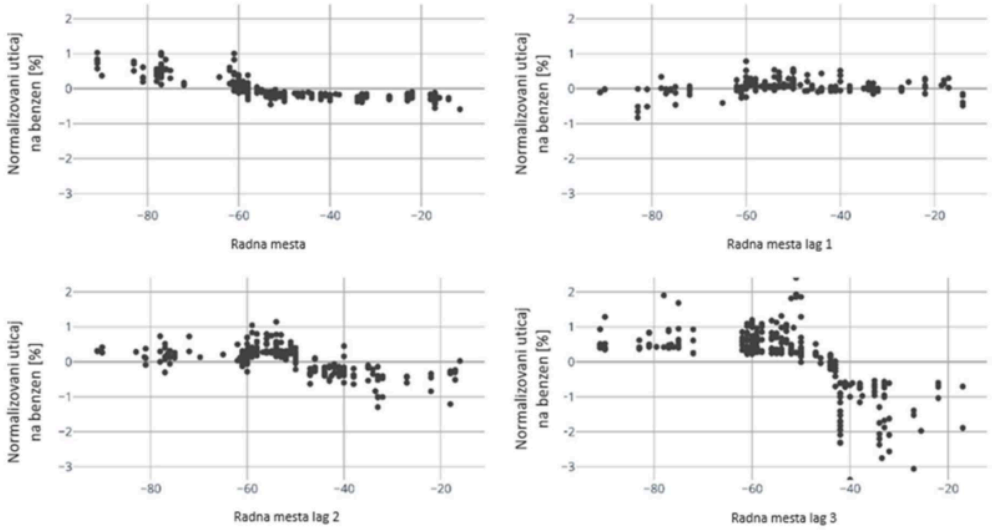
Slika 26. Normalizovani uticaj smanjene vožnje na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana)

Da smanjenje intenziteta saobraćaja nije bio jedini faktor koji je određivao koncentracije benzena tokom pandemije, ukazuje to da je u realnim uslovima, čak i pri smanjenju obima vožnje za 20-40%, došlo do kolebanja u koncentracijama benzena, pri čemu su zabeležena i povećanja do 0,4% i smanjenja do 0,2%. Čak i kada je redukcija vožnje prelazila 40%, nivoi benzena su ostajali relativno stabilni, što takođe potvrđuje prisustvo dodatnih izvora emisija, o čemu bilo reči u ranijem delu teksta. Kašnjenje od jednog dana pokazalo je sličan obrazac varijacija. Umereno smanjenje saobraćaja (20-40%) bilo je povezano s blagim porastom koncentracija benzena do 0,5%, dok su značajnija smanjenja (40-60%) dovela do blagog

opadanja. S druge strane, zakašnjenje od dva dana rezultovao je minimalnim promena, krećući se u rasponu od -0,05% do 0,1%, pri čemu čak ni drastična smanjenja u vožnji nisu proizvela primetne efekte, što takođe ukazuje na uticaj dodatnih faktora van saobraćaja. Sa kašnjenjem od tri dana beleže se određene promene. Redukcija vožnje u rasponu od 20-40% rezultovala je nižim koncentracijama benzena, dok su veća smanjenja (40-60%) neočekivano rezultirala blagim rastom koncentracija (do 0,1%). Ovaj scenario može biti posledica povećane upotrebe fosilnih goriva za grejanje u domaćinstvima, kao i specifičnih meteoroloških uslova, koji su verovatno neutralisali smanjenje emisija iz drumskog saobraćaja u periodima kada su ljudi provodili više vremena u zatvorenom prostoru.

8.4.4 Uticaj promene prisustva zaposlenih na radnim mestima na dinamiku benzena

Na Slici 27 prikazan je uticaj smanjenog prisustva zaposlenih na radnim mestima tokom vanrednog perioda (*Google*) na koncentracije benzena, kako u trenutku promene, tako i sa vremenskim kašnjenjem od 1 do 3 dana. Nula na horizontalnoj osi označava uobičajeni nivo prisutnosti radnika na radnim mestima.



Slika 27. Normalizovani uticaj promene prisustva zaposlenih na radnim mestima na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana)

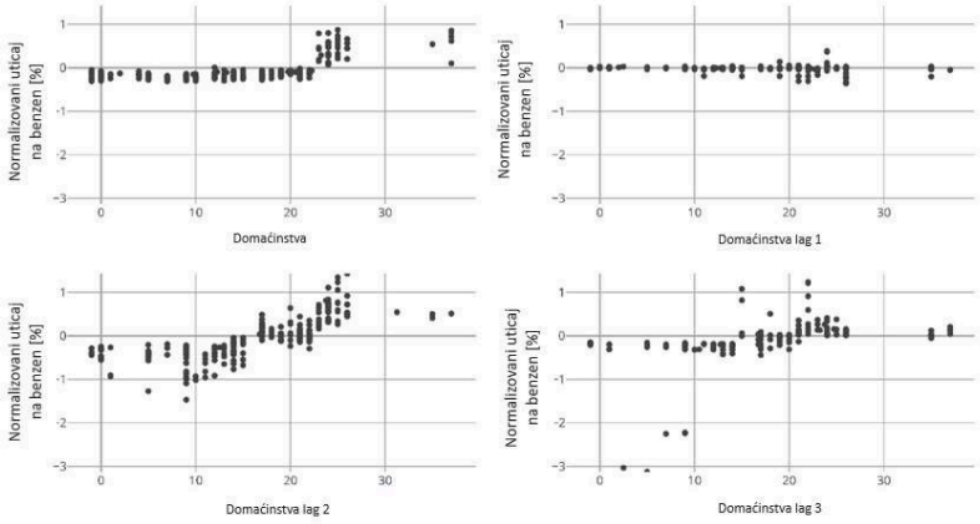
Rezultati pokazuju kompleksnu vezu između aktivnosti ljudi i kvaliteta vazduha. Blago smanjenje prisutnosti zaposlenih na radnim mestima od 20-40% (na slici 27, od -80 do -60) dovelo je do povećanja koncentracija benzena do 0,4% odmah nakon promene, što može ukazivati na povećanu emisiju iz domaćinstava. Nasuprot tome, značajnije smanjenje prisutnosti zaposlenih na radnim mestima (40-80% i više, na slici 27, od -60 do -20) uzrokovalo

je pad koncentracija benzena, što sugeriše da su redukcije u saobraćaju i industriji imale dominantan efekat na ukupne emisije.

Analizom lagovanih vrednosti, obrasci su postali još složeniji. Nakon jednog dana, umereno smanjenje broja zaposlenih na radnim mestima rezultovalo je smanjenjem koncentracija benzena za do 0,5%, dok je veće smanjenje ponekad izazivao i blagi porast koncentracija za istu vrednost. Sa zakašnjenjem od dva dana (lag2), beleži se drugačija situacija. Smanjenje broja zaposlenih na radnim mestima do 50% bilo je praćeno povećanjem koncentracije benzena za do 1%, dok su veće redukcije dovele do njegovog opadanja za istu vrednost. Najizraženiji efekti primećeni su nakon tri dana, kada su manje redukcije broja zaposlenih na radnim mestima uzrokovale porast koncentracije benzena za do 2%, dok su drastičnija smanjenja dovela do njegovog pada za do 3%. Ova analiza ukazuje na to da promena mobilnosti zaposlenih ne utiče linearno na koncentracije benzena. Umesto toga, efekti zavise od vremenskog kašnjenja, emisija iz različitih izvora i meteoroloških faktora.

8.4.5 Uticaj promene vremena provedenog kod kuće na dinamiku benzena

Složena veza između dužine boravka kod kuće (*Google*) i koncentracija benzena ilustrovana je na Slici 28.



Slika 28. Normalizovani uticaj promene vremena provedenog kod kuće na dinamiku benzena (u realnom vremenu i sa zakašnjenjem od jednog, dva i tri dana)

Procentualna promena vremena provedenog kod kuće, koja odražava odstupanja od uobičajenih obrazaca kretanja, pokazuje da su umerena povećanja boravka u kući (0-20%)

dovela do blagog smanjenja nivoa benzena do 0,4%, verovatno kao posledica manjeg saobraćaja i smanjenja industrijskih emisija. Međutim, kada je vreme provedeno u kući poraslo za više od 20%, beleženo je trenutno povećanje benzena (0,8%), koje je nakon tri dana dostiglo 1,5%. Ovi rezultati sugerišu da su emisije iz domaćinstava, poput grejanja i kuvanja, postale dominantan izvor emisije.

Analizom lagovanih vrednosti ove varijable, može se konstatovati da jednodnevno zakašnjenje nije imalo značajniji efekat. Međutim, kašnjenja od dva i tri dana su značajno pojačala uticaj. U drugom danu, promene su varirale od -1,5% do 1,5%, dok su trećeg dana fluktuacije bile još izraženije krećući se od -3% do 1%. Ova kašnjenja ukazuju na to da se zagađenje koje potiču iz individualnih ložišta akumulira s vremenom, dok se preostali uticaji spoljnog zagađenja dodatno odražavaju kroz odložene efekte.

Nalazi jasno ukazuju na ključnu ulogu grejanja u domaćinstvima na nivo koncentracija benzena u analiziranoj oblasti. Povećano vreme provedeno kod kuće tokom vanrednih stanja verovatno je dovelo do značajnog rasta lokalnih emisija, pri čemu se individualna ložišta na čvrsta goriva ističu kao glavni faktor. Preostali efekti dodatno naglašavaju visoku zavisnost grada od ovih izvora grejanja, posebno tokom perioda kada su ljudi duže boravili u svojim domovima.

9. ZAKLJUČAK

Ova disertacija uvodi inovativan pristup analizi podataka o kvalitetu vazduha, zasnovan na veštačkoj inteligenciji, sa ciljem identifikacije, karakterizacije i tumačenja složenih međusobnih veza različitih faktora životne sredine tokom pandemije COVID-19 i njihovog uticaja na koncentracije isparljivih organskih jedinjenja, sa posebnim fokusom na benzen u urbanom ambijentu Beograda. Analiza integriše prirodne i antropogene faktore, poput meteoroloških prilika, sezonskih varijacija i obrazaca ponašanja ljudi, u sveobuhvatan sistem za modeliranje i predikciju dinamike zagađujućih materija u vazduhu.

Istraživanje je fokusirano na period vanrednog stanja u Republici Srbiji (15. mart-6. maj 2020. godine), koji je obeležen oštrim merama ograničenja kretanja i smanjenim privrednim aktivnostima. Ova situacija pružila je jedinstvenu priliku za analizu uticaja izmenjenih društvenih navika na kvalitet vazduha.

Korišćeni su podaci o koncentracijama 249 IOJ (u opsegu od 21 do 270 amu), mereni uređajem PTR-MS, kao i meteorološki parametri mereni meteorološkom stanicom Vaisala. Dodatni podaci, preuzeti iz dostupnih baza, uključivali su koncentracije neorganskih gasova i PM_{10} sa stanice za regulatorni monitoring vazduha agencije SEPA, modelirane meteorološke parametre iz baze GDAS, kao i pokazatelje mobilnosti stanovništva, mere Vlade Republike Srbije u cilju suzbijanja pandemije i podatke o pandemiji preuzete iz međunarodnih baza (*Oxford*, *Worldometer*, *Apple* i *Google*).

Za analizu podataka je primenjen niz metoda, od osnovne statistike i polarnih dijagrama, do naprednih metoda mašinskog učenja sa optimizacijom hiperparametara putem metaheuristika, metoda interpretacije modela mašinskog učenja, kao i klasterizacije lokalnih uticaja. Ovako koncipiran metodološki okvir omogućio je ne samo precizno modeliranje koncentracija benzena, već i identifikaciju i karakterizaciju ključnih faktora i obrazaca koji oblikuju evoluciju zagađenja vazduha.

Uporedna analiza perioda pre i tokom vanrednog stanja pokazala je značajan pad koncentracija zagađujućih materija poreklom iz saobraćaja: NOx sa 36,9 na 12,2 $\mu g/m^3$ i CO sa 0,5 na 0,3 mg/m^3. Suprotno tome, zabeležen je porast koncentracija SO_2 i PM_{10}, što se može povezati sa nastavkom rada esencijalnih privrednih delatnosti i povećanom upotrebom fosilnih goriva u individualnim ložištima. Značajan porast O_3 sa 31,6 na 55,3 $\mu g/m^3$ tumači se kao posledica smanjenja NOx emisija i smanjenog učešća ozona u reakcijama atmosferske hemije. Iako je benzen zabeležio pad sa 0,49 na 0,24 ppb, vrednosti etanola i benzil alkohola su u pojedinim

periodima višestruko premašile one iz pre-pandemijskog perioda, što se dovodi u vezu sa upotrebom dezinfekcionih sredstava.

Analiza u kojoj su korišćeni polarni dijagrami pokazala je da je uvođenje vanrednog stanja značajno uticalo na prostornu redistribuciju izvora emisija benzena. Smanjenje je zabeleženo u jugoistočnom i istočnom sektoru, dok su se novi izvori pojavili na severu i jugozapadu, potencijalno uslovljeni lokalnim mikroklimatskim uslovima.

Analiza globalnih uticaja modela najboljih performansi (*Gradient Boosting* optimizovan *SCA* algoritmom) pokazala je da su IOJ najvažniji prediktori koncentracije benzena. Pokazalo se da su meteorološki uslovi dodatno doprineli akumulaciji zagađujućih materija u stabilnoj noćnoj atmosferi sa niskim graničnim slojem.

Kombinovanjem UMAP redukcije dimenzionalnosti i HDBSCAN klasterizacije, u kombinaciji sa SHAP analizom, identifikovano je devet režima životne sredine sa specifičnim obrascima uticaja na dinamiku benzena. Iako je prosečan pad koncentracije benzena tokom vanrednog stanja iznosio 50%, režimi E3, E4 i E7, dominantni na početku krize, pokazali su različite efekte: E3 (industrija, sagorevanje biomasa i saobraćaj) je povezan sa padom koncentracija 15,7%, E4 (industrijski uticaj i meteorologija) sa skromnih 2,33%, dok je E7 (noćna hemija i stabilna atmosfera) doveo do porasta koncentracija 51,9%.

SHAP analiza dodatno je kvantifikovala značaj pojedinačnih varijabli, uključujući mobilnosti i pandemijske pokazatelje. Smanjenje saobraćaja od 20-40% imalo je neposredni efekat na fluktuaciju koncentracija benzena, dok je smanjenje za više od 40% izazvalo odloženi porast koncentracija, najverovatnije usled intenzivnijeg grejanja domaćinstava. Smanjenje mobilnosti zaposlenih (40-80%) povezano je sa padom koncentracija benzena, dok je produžen boravak kod kuće (više od 20%) povezan sa njihovim porastom do 3% nakon tri dana.

Rezultati prikazani u ovoj disertaciji potvrđuju da veštačka inteligencija omogućava dublje razumevanje kompleksnih, nelinearnih interakcija između faktora životne sredine koji oblikuju kvalitet vazduha. Za razliku od tradicionalnih metoda koje se oslanjaju na koncentracije najčešće malog broja zagađujućih materija, ovakav pristup integriše širok spektar izvora podataka, omogućavajući identifikaciju i trenutnih i odloženih efekata ponašanja ljudi, ekonomskih aktivnosti i meteoroloških uslova.

Predloženi metodološki koncept pokazao se kao skalabilan i primenljiv i van lokalnog konteksta, nudeći osnov za razvoj adaptivnih, podacima vođenih politika zaštite životne sredine. Nalazi ovog istraživanja ističu važnost prihvatanja integrativnih modela koji

objedinjuju prirodne i društvene dimenzije zagađenja, ali i dvostruku ulogu kriznih situacija, kao faktora destabilizacije, ali i prilike za identifikaciju skrivenih izvora zagađenja i unapređenje javnih politika u cilju održivog oporavka i razvoja.

Literatura:

1. Acosta-Ramírez, C., & Higham, J. E. (2022). Impact of SARS-CoV-2 variants on mobility and air pollution in the United Kingdom. *Science of The Total Environment*, *851*, 158279. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158279
2. Addas, A., & Maghrabi, A. (2021). The Impact of COVID-19 Lockdowns on Air Quality—A Global Review. *Sustainability*, *13*(18), 10212. https://doi.org/10.3390/su131810212
3. AEA Technology. (1999). *Categorisation of Volatile Organic Compounds*. https://www.s-t-a.org/Files Public Area/Documents/The Categorisation of Volatile Organic Compounds HMIP (1996).pdf
4. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). (2007). *Toxicological Profile for Benzene*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK591289/
5. Alvaro Martinez. (2019). *Contribution of volatile organic compounds (VOCs) from vehicle emissions to secondary organic aerosol (SOA) and urban pollution*. Université de Lyon.
6. Amouei Torkmahalleh, M., Akhmetvaliyeva, Z., Omran, A. D., Faezeh Darvish Omran, F., Kazemitabar, M., Naseri, M., Naseri, M., Sharifi, H., Malekipirbazari, M., Kwasi Adotey, E., Gorjinezhad, S., Eghtesadi, N., Sabanov, S., Alastuey, A., de Fátima Andrade, M., Buonanno, G., Carbone, S., Cárdenas-Fuentes, D. E., Cassee, F. R., … Xie, S. (2021). Global Air Quality and COVID-19 Pandemic: Do We Breathe Cleaner Air? *Aerosol and Air Quality Research*, *21*(4), 200567. https://doi.org/10.4209/aaqr.200567
7. Apple Inc. (2022). *COVID-19 - Mobility Trends Reports*.
8. Aragão, L., Ronchieri, E., Ambrosio, G., Ciangottini, D., Cutini, S., Duma, D. C., Lubrano, P., Martelli, B., Salomoni, D., Sergi, G., Spiga, D., Stracci, F., & Storchi, L. (2024). Air quality changes during the COVID-19 pandemic guided by robust virus-spreading data in Italy. *Air Quality, Atmosphere & Health*. https://doi.org/10.1007/s11869-023-01495-x
9. Atkinson, R. (1990). Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: A review. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, *24*(1), 1–41. https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90438-S
10. Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment*, *34*(12–14), 2063–2101. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4
11. Aurelien Geron, Scikit-Learn, K., & TensorFlow. (2021). *Mašinsko učenje,* . Mikro knjiga .
12. Awasthi, A., Sinha, B., Hakkim, H., Mishra, S., Mummidivarapu, V., Singh, G., Ghude, S. D., Soni, V. K., Nigam, N., Sinha, V., & Rajeevan, M. N. (2024). *Biomass burning sources control ambient particulate matter but traffic and industrial sources control VOCs and secondary pollutant formation during extreme pollution events in Delhi*. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-501
13. Baasandorj, M., Millet, D. B., Hu, L., Mitroo, D., & Williams, B. J. (2015). Measuring acetic and formic acid by proton-transfer-reaction mass spectrometry: sensitivity, humidity dependence, and quantifying interferences. *Atmospheric Measurement Techniques*, *8*(3), 1303–1321. https://doi.org/10.5194/amt-8-1303-2015
14. Baek, B. H., Pedruzzi, R., Park, M., Wang, C.-T., Kim, Y., Song, C.-H., & Woo, J.-H. (2022). The Comprehensive Automobile Research System (CARS) – a Python-based automobile emissions inventory model. *Geoscientific Model Development*, *15*(12), 4757–4781. https://doi.org/10.5194/gmd-15-4757-

2022

15. Baldwin, A., & McKee, M. (2023, kolovoz 17). *The when is less important than the what: An epidemic scale as an alternative to the WHO's Public Health Emergency of International Concern*. ReliefWeb. https://reliefweb.int/report/world/when-less-important-what-epidemic-scale-alternative-whos-public-health-emergency-international-concern
16. Banaszkiewicz, K., Marcinkowski, T., & Pasiecznik, I. (2022). Fly Ash as an Ingredient in the Contaminated Soil Stabilization Process. *Energies*, *15*(2), 565. https://doi.org/10.3390/en15020565
17. Berman, J. D., & Ebisu, K. (2020). Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, *739*, 139864. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139864
18. Bielik, N., Correia, D., Rodrigues Crespo, K., Goujon-Ginglinger, C., & Mitova, M. I. (2024). Pitfalls in the Detection of Volatiles Associated with Heated Tobacco and e-Vapor Products When Using PTR-TOF-MS. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, *35*(6), 1261–1271. https://doi.org/10.1021/jasms.4c00062
19. Birant, D. (2011). Comparison of Decision Tree Algorithms for Predicting Potential Air Pollutant Emissions with Data Mining Models. *Journal of Environmental Informatics*, *17*(1), 46–53. https://doi.org/10.3808/jei.201100186
20. Blake, R. S., Monks, P. S., & Ellis, A. M. (2009). Proton-Transfer Reaction Mass Spectrometry. *Chemical Reviews*, *109*(3), 861–896. https://doi.org/10.1021/cr800364q
21. Brajević, I. (2015). *Poboljšanja nekih populacionih metaheuristika za rešavanje optimizacionih problema sa ograničenjima*. Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Nišu.
22. Briz-Redón, Á., Belenguer-Sapiña, C., & Serrano-Aroca, Á. (2021). Changes in air pollution during COVID-19 lockdown in Spain: A multi-city study. *Journal of Environmental Sciences*, *101*, 16–26. https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.029
23. Brown, P., Watts, P., Märk, T. D., & Mayhew, C. A. (2010). Proton transfer reaction mass spectrometry investigations on the effects of reduced electric field and reagent ion internal energy on product ion branching ratios for a series of saturated alcohols. *International Journal of Mass Spectrometry*, *294*(2–3), 103–111. https://doi.org/10.1016/j.ijms.2010.05.028
24. Bruns, E., Slowik, J. G., Haddad, E., Kilic, D., Klein, F., Dommen, J., Temime-Roussel, B., Marchand, N., Baltensperger, U., Prévôt, A. S. H., Bruns, E. A., & Haddad, I. El. (2017). Atmospheric Chemistry and Physics. *Atmos. Chem. Phys*, *17*(1), 705–720. https://doi.org/10.5194/acp-17-705-2017i
25. Buhr, K., van Ruth, S., & Delahunty, C. (2002). Analysis of volatile flavour compounds by Proton Transfer Reaction-Mass Spectrometry: fragmentation patterns and discrimination between isobaric and isomeric compounds. *International Journal of Mass Spectrometry*, *221*(1), 1–7. https://doi.org/10.1016/S1387-3806(02)00896-5
26. Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., … Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(38), 9592–9597. https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115
27. Cai, F., Yin, K., & Hao, M. (2022). COVID-19 Pandemic, Air Quality, and PM2.5 Reduction-Induced

Health Benefits: A Comparative Study for Three Significant Periods in Beijing. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *10*. https://doi.org/10.3389/fevo.2022.885955

28. Cao, C. (2024). How to better predict the effect of urban traffic and weather on air pollution? Norwegian evidence from machine learning approaches. *Journal of Economic Behavior & Organization*, *221*, 544–569. https://doi.org/10.1016/j.jebo.2024.03.018
29. Cao, L., Men, Q., Zhang, Z., Yue, H., Cui, S., Huang, X., Zhang, Y., Wang, J., Chen, M., & Li, H. (2024). Significance of Volatile Organic Compounds to Secondary Pollution Formation and Health Risks Observed during a Summer Campaign in an Industrial Urban Area. *Toxics*, *12*(1), 34. https://doi.org/10.3390/toxics12010034
30. Cardito, A., Carotenuto, M., Amoruso, A., Libralato, G., & Lofrano, G. (2023). Air quality trends and implications pre and post Covid-19 restrictions. *Science of The Total Environment*, *879*, 162833. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162833
31. Carlson, R. W. (2025). Thermal ionization mass spectrometry. U *Treatise on Geochemistry* (str. 473–496). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00061-9
32. 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. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.005
33. Chen, D., Xu, Y., Xu, J., Lian, M., Zhang, W., Wu, W., Wu, M., & Zhao, J. (2022). The Vertical Distribution of VOCs and Their Impact on the Environment: A Review. *Atmosphere*, *13*(12), 1940. https://doi.org/10.3390/atmos13121940
34. Chen, L., Yan, R., Zhao, Y., Sun, J., Zhang, Y., Li, H., Zhao, D., Wang, B., Ye, X., & Sun, B. (2023). Characterization of the aroma release from retronasal cavity and flavor perception during baijiu consumption by Vocus-PTR-MS, GC×GC-MS, and TCATA analysis. *LWT*, *174*, 114430. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114430
35. Chen, T. (2024). *XGBoost Model Documentation*. https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/model.html
36. Chow, K. K., Short, M., & Zeng, H. (2012). A comparison of spectroscopic techniques for human breath analysis. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*, *1*(4), 339–353. https://doi.org/10.3233/BSI-120029
37. Coggon, M. M., Stockwell, C. E., Claflin, M. S., Pfannerstill, E. Y., Xu, L., Gilman, J. B., Marcantonio, J., Cao, C., Bates, K., Gkatzelis, G. I., Lamplugh, A., Katz, E. F., Arata, C., Apel, E. C., Hornbrook, R. S., Piel, F., Majluf, F., Blake, D. R., Wisthaler, A., … Warneke, C. (2024). Identifying and correcting interferences to PTR-ToF-MS measurements of isoprene and other urban volatile organic compounds. *Atmospheric Measurement Techniques*, *17*(2), 801–825. https://doi.org/10.5194/amt-17-801-2024
38. Corporate Finance Institute. (2025). *Bagging (Bootstrap Aggregation)*. https://corporatefinanceinstitute.com/resources/data-science/bagging-bootstrap-aggregation/
39. Covert, I., Lundberg, S., & Lee, S.-I. (2020). *Understanding Global Feature Contributions With Additive Importance Measures*.
40. Data Head Hunters. (2023). *Bagging vs Boosting: Ensemble Techniques Compared*. https://dataheadhunters.com/academy/bagging-vs-boosting-ensemble-techniques-compared/
41. David Carslaw, & Jack Davison. (2025). *The openair book - A Guide to the Analysis of Air Pollution*

Data, Chapter 8 - Polar plots. https://openair-project.github.io/book/sections/directional-analysis/polar-plots.html

42. David, E., & Niculescu, V.-C. (2021). Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Occurrence and Mitigation Using Nanomaterials. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(24), 13147. https://doi.org/10.3390/ijerph182413147
43. de Gouw, J., & Warneke, C. (2007). Measurements of volatile organic compounds in the earth's atmosphere using proton-transfer-reaction mass spectrometry. *Mass Spectrometry Reviews*, *26*(2), 223–257. https://doi.org/10.1002/mas.20119
44. De Vlieger, I., De Keukeleere, D., & Kretzschmar, J. . (2000). Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. *Atmospheric Environment*, *34*(27), 4649–4655. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00217-X
45. DEFRA. (2007). *Climate Change Consequences Of VOC Emission Controls Report to The Department for Environment, Food and Rural Affairs, Welsh Assembly Government, the Scottish Executive and the Department of the Environment for Northern Ireland*.
46. Dietterich, T. G. (2000). *Ensemble Methods in Machine Learning* (str. 1–15). https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1
47. Ding, X., Wang, X., Gao, B., Fu, X., He, Q., Zhao, X., Yu, J., & Zheng, M. (2012). Tracer-based estimation of secondary organic carbon in the Pearl River Delta, south China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *117*(D5). https://doi.org/10.1029/2011JD016596
48. Divya Gera. (2023). *Boosting Algorithms: AdaBoost, Gradient Boosting, XGBoost, LightGBM, and CatBoost*. https://medium.com/@divyagera2402/boosting-algorithms-adaboost-gradient-boosting-xgb-light-gbm-and-catboost-e7d2dbc4e4ca
49. Donzelli, G., Cioni, L., Cancellieri, M., Llopis Morales, A., & Morales Suárez-Varela, M. (2020). The Effect of the Covid-19 Lockdown on Air Quality in Three Italian Medium-Sized Cities. *Atmosphere*, *11*(10), 1118. https://doi.org/10.3390/atmos11101118
50. Dorogush, A. V., Ershov, V., & Gulin, A. (2018). *CatBoost: gradient boosting with categorical features support*.
51. Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, & G. Geoffrey Vining. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*.
52. Dowd, C. D. ., Lowe, J. A. ., & Smith, M. H. (2001). Cloud Cover and the Relative Importance of Nitrogen Dioxide (NO2) and Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ozone Formation in European Air. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D2)*, 2213–2225.
53. Dragnić Nataša. (2016). *Konstrukcija i analiza klaster algoritma sa primenom u definisanju bihejvioralnih faktora rizika u populaciji odraslog stanovništva Srbije*. Univerzitet u Novom Sadu .
54. Dunne, E., Galbally, I. E., Lawson, S., & Patti, A. (2012). Interference in the PTR-MS measurement of acetonitrile at m/z 42 in polluted urban air—A study using switchable reagent ion PTR-MS. *International Journal of Mass Spectrometry*, *319–320*, 40–47. https://doi.org/10.1016/j.ijms.2012.05.004
55. Dyer, H. (2020, svibanj 8). *The story of Worldometer, the quick project that became one of the most popular sites on the internet". New Statesman.* . https://www.newstatesman.com/science-tech/coronavirus/2020/05/story-worldometer-quick-project-became-one-most-popular-sites

56. Edouard Mathieu, Hannah Ritchie, Lucas Rodés-Guirao, Cameron Appel, Charlie Giattino, Joe Hasell, Bobbie Macdonald, Saloni Dattani, Diana Beltekian, Esteban Ortiz-Ospina, & Max Roser. (2020). *Coronavirus Pandemic (COVID-19)*. https://ourworldindata.org/coronavirus
57. Eliyati, N., Rahmayani, M., Wijaya, S., Zayanti, D. A., Kresnawati, E. S., & Resti, Y. (2022). Prediction of Air Quality Index using Decision Tree with discretization. *Indonesian Journal of Engineering and Science*, *3*(3), 061–067. https://doi.org/10.51630/ijes.v3i3.82
58. Emmanuella Budu. (2023, svibanj 15). *Random Forest vs. Extremely Randomized Trees*. https://www.baeldung.com/cs/random-forest-vs-extremely-randomized-trees
59. Environmental Working Group. (2024). *Cancer-causing volatile organic compounds*. https://www.ewg.org/tapwater/reviewed-vocs.php
60. Erickson, M. H., Gueneron, M., & Jobson, B. T. (2014). Measuring long chain alkanes in diesel engine exhaust by thermal desorption PTR-MS. *Atmospheric Measurement Techniques*, *7*(1), 225–239. https://doi.org/10.5194/amt-7-225-2014
61. Faridi, S., Yousefian, F., Janjani, H., Niazi, S., Azimi, F., Naddafi, K., & Hassanvand, M. S. (2021). The effect of COVID-19 pandemic on human mobility and ambient air quality around the world: A systematic review. *Urban Climate*, *38*, 100888. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100888
62. Forsberg, B., Hänninen, O., & Krzyzanowski, M. (2008). *Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution*. www.euro.who.int
63. Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). *Journal of Computer and System Sciences s SS1504 journal of computer and system sciences* (Sv. 55).
64. Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, *29*(5), 1189–1232. https://doi.org/10.1214/aos/1013203451
65. Galán Madruga, D. (2021). Implication of Secondary Atmospheric Pollutants in the Air Quality: A Case-Study for Ozone. U *Environmental Sustainability - Preparing for Tomorrow*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.95481
66. Gautam, S. (2020). COVID-19: air pollution remains low as people stay at home. *Air Quality, Atmosphere & Health 2020 13:7*, *13*(7), 853–857. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00842-6
67. GDAS. (2022). *https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00379*.
68. GeeksforGeeks. (2023). *Gradient Boosting vs AdaBoost vs XGBoost vs CatBoost vs LightGBM*. https://www.geeksforgeeks.org/gradientboosting-vs-adaboost-vs-xgboost-vs-catboost-vs-lightgbm/
69. Gollakota, A. R. K., & Shu, C.-M. (2023). Covid-19 and energy sector: Unique opportunity for switching to clean energy. *Gondwana Research*, *114*, 93–116. https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.014
70. Golubović Katarina, Vasić Milena, Spremo Jovana, & Maljan Marija. (2020). *Ograničenje kretanja i suđenja za vreme vanrednog stanja*. https://www.yucom.org.rs/wp-content/uploads/2020/08/Ograničenje-kretanja-i-suđenja-za-vreme-trajanja-vanrednog-stanja-YUCOM-jul-2020..pdf
71. Google LLC. (2022). *COVID-19 Community Mobility Reports*. https://www.google.com/covid19/mobility/
72. Grange, S. K., Lewis, A. C., & Carslaw, D. C. (2016). Source apportionment advances using polar plots

of bivariate correlation and regression statistics. *Atmospheric Environment*, *145*, 128–134. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.016

73. Guenther, A., Archer, S., Greenberg, J., Harley, P., Helmig, D., Klinger, L., Vierling, L., Wildermuth, M., Zimmerman, P., & Zitzer, S. (1999). Biogenic hydrocarbon emissions and landcover/climate change in a subtropical savanna. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, *24*(6), 659–667. https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00062-3
74. Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., Mckay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., & Zimmerman, P. (1995). A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *100*(D5), 8873–8892. https://doi.org/10.1029/94JD02950
75. Halliday, H. S., Thompson, A. M., Wisthaler, A., Blake, D. R., Hornbrook, R. S., Mikoviny, T., Müller, M., Eichler, P., Apel, E. C., & Hills, A. J. (2016). Atmospheric benzene observations from oil and gas production in the Denver-Julesburg Basin in July and August 2014. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*(18). https://doi.org/10.1002/2016JD025327
76. Hammad, H. M., Nauman, H. M. F., Abbas, F., Jawad, R., Farhad, W., Shahid, M., Bakhat, H. F., Farooque, A. A., Mubeen, M., Fahad, S., & Cerda, A. (2023). Impacts of COVID-19 pandemic on environment, society, and food security. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25714-1
77. Hariom Tatsat, Sahil Puri, & Brad Lookabaugh. (2020). *Machine Learning and Data Science Blueprints for Finance*. O'Reilly Media, Inc.
78. Hashim, B. M., Al-Naseri, S. K., Al-Maliki, A., & Al-Ansari, N. (2021). Impact of COVID-19 lockdown on NO2, O3, PM2.5 and PM10 concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq. *Science of The Total Environment*, *754*, 141978. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141978
79. Hasnain, A., Hashmi, M. Z., Bhatti, U. A., Nadeem, B., Wei, G., Zha, Y., & Sheng, Y. (2021). Assessment of Air Pollution before, during and after the COVID-19 Pandemic Lockdown in Nanjing, China. *Atmosphere*, *12*(6), 743. https://doi.org/10.3390/atmos12060743
80. Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, *97*, 849–872. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028
81. Hernandez Carballo, I., Bakola, M., & Stuckler, D. (2022). The impact of air pollution on COVID-19 incidence, severity, and mortality: A systematic review of studies in Europe and North America. *Environmental Research*, *215*, 114155. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114155
82. Hewitt, C. N., Hayward, S., & Tani, A. (2003). The application of proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS) to the monitoring and analysis of volatile organic compounds in the atmosphere. *Journal of Environmental Monitoring*, *5*(1), 1–7. https://doi.org/10.1039/b204712h
83. Hong, Z., Li, M., Wang, H., Xu, L., Hong, Y., Chen, J., Chen, J., Zhang, H., Zhang, Y., Wu, X., Hu, B., & Li, M. (2019). Characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at a mountainous forest site and two urban sites in the southeast of China. *Science of The Total Environment*, *657*, 1491–1500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.132
84. Hsu, C.-Y., Chiang, H.-C., Shie, R.-H., Ku, C.-H., Lin, T.-Y., Chen, M.-J., Chen, N.-T., & Chen, Y.-C.

(2018). Ambient VOCs in residential areas near a large-scale petrochemical complex: Spatiotemporal variation, source apportionment and health risk. *Environmental Pollution*, *240*, 95–104. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.076

85. Hu, H., Wang, H., Lu, K., Wang, J., Zheng, Z., Xu, X., Zhai, T., Chen, X., Lu, X., Fu, W., Li, X., Zeng, L., Hu, M., Zhang, Y., & Fan, S. (2023). Variation and trend of nitrate radical reactivity towards volatile organic compounds in Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *23*(14), 8211–8223. https://doi.org/10.5194/acp-23-8211-2023
86. Hu, J., Zhao, T., Liu, J., Cao, L., Xia, J., Wang, C., Zhao, X., Gao, Z., Shu, Z., & Li, Y. (2021). Nocturnal surface radiation cooling modulated by cloud cover change reinforces PM2.5 accumulation: Observational study of heavy air pollution in the Sichuan Basin, Southwest China. *Science of The Total Environment*, *794*, 148624. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148624
87. Hussain, M., Afrin, S., Irin, A., & Park, S. K. (2021). Applying Decision Tree Algorithm for Air Quality Prediction in Bangladesh. *2021 5th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/EICT54103.2021.9733443
88. Hyman, S., Zhang, J., Andersen, Z. J., Cruickshank, S., Møller, P., Daras, K., Williams, R., Topping, D., & Lim, Y.-H. (2023). Long-term exposure to air pollution and COVID-19 severity: A cohort study in Greater Manchester, United Kingdom. *Environmental Pollution*, *327*, 121594. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121594
89. Ian Covert. (2020, svibanj 24). *Explaining machine learning models with SHAP and SAGE*. https://iancovert.com/blog/understanding-shap-sage/
90. Indeed. (2024). *Supervised Machine Learning: Examples and Applications*. https://in.indeed.com/career-advice/career-development/supervised-machine-learning-examples
91. Inomata, S., Tanimoto, H., Kato, S., Suthawaree, J., Kanaya, Y., Pochanart, P., Liu, Y., & Wang, Z. (2010). PTR-MS measurements of non-methane volatile organic compounds during an intensive field campaign at the summit of Mount Tai, China, in June 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *10*(15), 7085–7099. https://doi.org/10.5194/acp-10-7085-2010
92. International Agency for Research on Cancer. (2024). *Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–136*. https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/
93. J. Fenger, O. H. F. P. (1999). *Urban Air Pollution - European Aspects*. Springer Science & Business Media, 1999.
94. Jamal, A., & Nodehi, R. N. (2017). Articleinformation predicting Air Quality Index based on meteorologi-cal data: a comparison of Regression Analysis, Arti-ficial Neural Networks and Decision Tree. U *Journal of Air Pollution and Health* (Sv. 2, Izdanje 1). http://japh.tums.ac.ir
95. Jason Brownlee. (2021, travanj 27). *Histogram-Based Gradient Boosting Ensembles in Python*. https://machinelearningmastery.com/histogram-based-gradient-boosting-ensembles/
96. Johnson, W., Bergfeld, W. F., Belsito, D. V., Hill, R. A., Klaassen, C. D., Liebler, D. C., Marks, J. G., Shank, R. C., Slaga, T. J., Snyder, P. W., & Andersen, F. A. (2017). Safety Assessment of Benzyl Alcohol, Benzoic Acid and its Salts, and Benzyl Benzoate. *International Journal of Toxicology*, *36*(3_suppl), 5S-30S. https://doi.org/10.1177/1091581817728996
97. Jovanovic, G., Perisic, M., Bacanin, N., Zivkovic, M., Stanisic, S., Strumberger, I., Alimpic, F., & Stojic,

A. (2023). Potential of Coupling Metaheuristics-Optimized-XGBoost and SHAP in Revealing PAHs Environmental Fate. *Toxics*, *11*(4), 394. https://doi.org/10.3390/toxics11040394

98. Jurišević, I., Đurin, N., Močević, B., & Komazec, M. (2020, listopad 30). *Kako je korona uticala na tržište električne energije u Srbiji*.
99. Karaboga, D. (2010). Artificial bee colony algorithm. *Scholarpedia*, *5*(3), 6915. https://doi.org/10.4249/scholarpedia.6915
100. Keylabs AI. (2024, kolovoz 21). *Hyperparameter Tuning: Grid Search, Random Search, and Bayesian Optimization*. https://keylabs.ai/blog/hyperparameter-tuning-grid-search-random-search-and-bayesian-optimization/
101. Khojasteh, D., Davani, E., Shamsipour, A., Haghani, M., & Glamore, W. (2022). Climate change and COVID-19: Interdisciplinary perspectives from two global crises. *Science of The Total Environment*, *844*, 157142. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157142
102. Kira, B., Saptarshi, M. L., Thayslene, M., Oliveira, M., Nagesh, R., Phillips, T., Pott, A., Sampaio, J., Tatlow, H., Wade, A., Webster, S., Wood, A., Zha, H., Zhang, Y., Torness, W., Vaccaro, A., Laping, S., Kamenkovich, N., Ren, L., … Hallas, L. (2023). *BSG Working Paper Series Variation in government responses to COVID-19*. www.bsg.ox.ac.uk/covidtracker
103. Kleist, D. T., Parrish, D. F., Derber, J. C., Treadon, R., Wu, W.-S., & Lord, S. (2009). Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System. *Weather and Forecasting*, *24*(6), 1691–1705. https://doi.org/10.1175/2009WAF2222201.1
104. Kong, L., Zhou, L., Chen, D., Luo, L., Xiao, K., Chen, Y., Liu, H., Tan, Q., & Yang, F. (2023). Atmospheric oxidation capacity and secondary pollutant formation potentials based on photochemical loss of VOCs in a megacity of the Sichuan Basin, China. *Science of The Total Environment*, *901*, 166259. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166259
105. Koppmann, R. (2020). Chemistry of Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. U *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate* (str. 811–822). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3_24
106. Kulmala, M., Kontkanen, J., Junninen, H., Lehtipalo, K., Manninen, H. E., Nieminen, T., Petäjä, T., Sipilä, M., Schobesberger, S., Rantala, P., Franchin, A., Jokinen, T., Järvinen, E., Äijälä, M., Kangasluoma, J., Hakala, J., Aalto, P. P., Paasonen, P., Mikkilä, J., … Worsnop, D. R. (2013). Direct Observations of Atmospheric Aerosol Nucleation. *Science*, *339*(6122), 943–946. https://doi.org/10.1126/science.1227385
107. Kumar, S., Mishra, S., & Singh, S. K. (2020). A machine learning-based model to estimate PM2.5 concentration levels in Delhi's atmosphere. *Heliyon*, *6*(11), e05618. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05618
108. Kumari, P., Soni, D., Aggarwal, S. G., & Singh, K. (2023). Seasonal and diurnal measurement of ambient benzene at a hightraffic inflation site in Delhi: Health risk assessment and its possiblerole in ozone formation pathways. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, *38*(3), e2023016. https://doi.org/10.5620/eaht.2023016
109. Li, F., Huang, D. D., Tian, L., Yuan, B., Tan, W., Zhu, L., Ye, P., Worsnop, D., Hoi, K. I., Mok, K. M., & Li, Y. J. (2024). Response of protonated, adduct, and fragmented ions in Vocus proton-transfer-

reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-ToF-MS). *Atmospheric Measurement Techniques*, *17*(8), 2415–2427. https://doi.org/10.5194/amt-17-2415-2024

110. Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, *111*, 300–323. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055

111. Ligor, T. A. C. S. K. Z. W. A. A. B. B. (2009). Comparison of Proton Transfer Reaction-Mass Spectrometry and Gas Chromatography–Mass Spectrometry in Analysis of Breath Samples. *Chem. Anal. (Warsaw)*, *54*(329).

112. Lindinger, W., & Jordan, A. (1998). Proton-transfer-reaction mass spectrometry (PTR–MS): on-line monitoring of volatile organic compounds at pptv levels. *Chemical Society Reviews*, *27*(5), 347. https://doi.org/10.1039/a827347z

113. Ling, C., Cui, L., & Li, R. (2023). Global impact of the COVID-19 lockdown on surface concentration and health risk of atmospheric benzene. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *23*(5), 3311–3324. https://doi.org/10.5194/acp-23-3311-2023

114. Liu, Q., Sheng, J., Wu, Y., Ma, Z., Sun, J., Tian, P., Zhao, D., Li, X., Hu, K., Li, S., Shen, X., Zhang, Y., He, H., Huang, M., Ding, D., & Liu, D. (2023). Source characterization of volatile organic compounds in urban Beijing and its links to secondary organic aerosol formation. *Science of The Total Environment*, *860*, 160469. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160469

115. Lorenzo-Sáez, E., Coll-Aliaga, E., Oliver-Villanueva, J.-V., Prieto del Campo, F., & Lerma-Arce, V. (2022). Analysis of the COVID-19 Lockdown's Impact on Air Quality in the Larger Cities of Spain. *Sustainability*, *14*(9), 5613. https://doi.org/10.3390/su14095613

116. Löser, B., Grabenschröer, A., Pugliese, G., Sukul, P., Trefz, P., Schubert, J. K., & Miekisch, W. (2020). Changes of Exhaled Volatile Organic Compounds in Postoperative Patients Undergoing Analgesic Treatment: A Prospective Observational Study. *Metabolites*, *10*(8), 321. https://doi.org/10.3390/metabo10080321

117. Lundberg, S., & Lee, S.-I. (2017). *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*.

118. Luo, H., Han, Y., Lu, C., Yang, J., & Wu, Y. (2019). Characteristics of Surface Solar Radiation under Different Air Pollution Conditions over Nanjing, China: Observation and Simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, *36*(10), 1047–1059. https://doi.org/10.1007/s00376-019-9010-4

119. Ma, J., Ma, X., Yang, C., Xie, L., Zhang, W., & Li, X. (2023). An Air Pollutant Forecast Correction Model Based on Ensemble Learning Algorithm. *Electronics*, *12*(6), 1463. https://doi.org/10.3390/electronics12061463

120. Majchrzak, T., Wojnowski, W., Lubinska-Szczygeł, M., Różańska, A., Namieśnik, J., & Dymerski, T. (2018). PTR-MS and GC-MS as complementary techniques for analysis of volatiles: A tutorial review. *Analytica Chimica Acta*, *1035*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.06.056

121. Majchrzak, T., Wojnowski, W., & Wasik, A. (2021). Revealing dynamic changes of the volatile profile of food samples using PTR–MS. *Food Chemistry*, *364*, 130404. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130404

122. Mallette, N. D., Knighton, W. B., Strobel, G. A., Carlson, R. P., & Peyton, B. M. (2012). Resolution of volatile fuel compound profiles from Ascocoryne sarcoides: a comparison by proton transfer reaction-

mass spectrometry and solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry. *AMB Express*, *2*(1), 23. https://doi.org/10.1186/2191-0855-2-23

123. Mampitiya, L., Rathnayake, N., Leon, L. P., Mandala, V., Azamathulla, H. M., Shelton, S., Hoshino, Y., & Rathnayake, U. (2023). Machine Learning Techniques to Predict the Air Quality Using Meteorological Data in Two Urban Areas in Sri Lanka. *Environments*, *10*(8), 141. https://doi.org/10.3390/environments10080141

124. Marchetti, F., Eskenazi, B., Weldon, R. H., Li, G., Zhang, L., Rappaport, S. M., Schmid, T. E., Xing, C., Kurtovich, E., & Wyrobek, A. J. (2012). Occupational Exposure to Benzene and Chromosomal Structural Aberrations in the Sperm of Chinese Men. *Environmental Health Perspectives*, *120*(2), 229–234. https://doi.org/10.1289/ehp.1103921

125. Marques, B., Kostenidou, E., Valiente, A. M., Vansevenant, B., Sarica, T., Fine, L., Temime-Roussel, B., Tassel, P., Perret, P., Liu, Y., Sartelet, K., Ferronato, C., & D'Anna, B. (2022). Detailed Speciation of Non-Methane Volatile Organic Compounds in Exhaust Emissions from Diesel and Gasoline Euro 5 Vehicles Using Online and Offline Measurements. *Toxics*, *10*(4), 184. https://doi.org/10.3390/toxics10040184

126. Mazzucotelli, M., Farneti, B., Khomenko, I., Gonzalez-Estanol, K., Pedrotti, M., Fragasso, M., Capozzi, V., & Biasioli, F. (2022). Proton transfer reaction mass spectrometry: A green alternative for food volatilome profiling. *Green Analytical Chemistry*, *3*, 100041. https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100041

127. McDonald, B. C., de Gouw, J. A., Gilman, J. B., Jathar, S. H., Akherati, A., Cappa, C. D., Jimenez, J. L., Lee-Taylor, J., Hayes, P. L., McKeen, S. A., Cui, Y. Y., Kim, S.-W., Gentner, D. R., Isaacman-VanWertz, G., Goldstein, A. H., Harley, R. A., Frost, G. J., Roberts, J. M., Ryerson, T. B., & Trainer, M. (2018). Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. *Science*, *359*(6377), 760–764. https://doi.org/10.1126/science.aaq0524

128. McInnes, L., Healy, J., & Melville, J. (2018). *UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction*.

129. Micev, M. (2020). *Optimizacija parametara modela i upravljačkih uglova prekidačkog reluktantnog motora primjenom metaheurističkih algoritama - Magistraski rad*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica

130. Milan Tuba. (2024). *„Project crAIRsis - Characterizing crises-caused air pollution alternations using an artificial intelligence-based framework," 2024-2027.* . https://crairsis.singidunum.ac.rs/

131. Mirjalili, S. (2016). SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, *96*, 120–133. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022

132. Mishra, A. K., Rajput, P., Singh, A., Singh, C. K., & Mall, R. K. (2021). Effect of Lockdown Amid COVID-19 on Ambient Air Quality in 16 Indian Cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, *3*. https://doi.org/10.3389/frsc.2021.705051

133. Montero-Montoya, R., López-Vargas, R., & Arellano-Aguilar, O. (2018). Volatile Organic Compounds in Air: Sources, Distribution, Exposure and Associated Illnesses in Children. *Annals of Global Health*, *84*(2), 225–238. https://doi.org/10.29024/aogh.910

134. Mousazadeh, M., Paital, B., Naghdali, Z., Mortezania, Z., Hashemi, M., Karamati Niaragh, E.,

Aghababaei, M., Ghorbankhani, M., Lichtfouse, E., Sillanpää, M., Hashim, K. S., & Emamjomeh, M. M. (2021). Positive environmental effects of the coronavirus 2020 episode: a review. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(9), 12738–12760. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01240-3

135. Muhammad, S., Long, X., & Salman, M. (2020a). COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise? *Science of The Total Environment*, *728*, 138820. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820

136. Muhammad, S., Long, X., & Salman, M. (2020b). COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise? *Science of The Total Environment*, *728*, 138820. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820

137. N. Bačanin, P. G. J. R. D. S. S. V. S. M. Ž. A. S. (2024). The explainable potential of coupling hybridized metaheuristics, XGBoost, and SHAP in revealing toluene behavior in the atmosphere. *Science of The Total Environment*.

138. Nakajima, S., Asakawa, T., Sekiguchi, O., Tajima, S., & Nibbering, N. M. M. (2001). The Formation of Protonated Dimethyl Ether from the Metastable Molecular Ions of 1-Methoxy-2-Propanol, $CH_3OCH_2CH(OH)CH_3$. *European Journal of Mass Spectrometry*, *7*(1), 47–53. https://doi.org/10.1255/ejms.389

139. NASA. (2024). *Vital signs of the planet: Methane*. https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=121

140. National Center for Biotechnology Information. (2024). *PubChem Compound Summary for CID 241, Benzene*. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene

141. Nie, S., Li, L., Wang, Y., Wu, Y., Li, C., Chen, S., Zhao, Y., Wang, D., Xiang, H., & Wei, Y. (2022). Discrimination and characterization of volatile organic compound fingerprints during sea bass (Lateolabrax japonicas) fermentation by combining GC-IMS and GC-MS. *Food Bioscience*, *50*, 102048. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102048

142. NOAA-Air Resources Laboratory. (2023). *Global Data Assimilation System (GDAS1) Archive Information*. https://www.ready.noaa.gov/gdas1.php

143. NOAA. (2022). *Global Data Assimilation System (GDAS)*. https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00379

144. NOAA. (2023). *Global Data Assimilation System (GDAS1) Archive Information*. https://www.ready.noaa.gov/gdas1.php

145. Nussbaumer, C. M., Pozzer, A., Tadic, I., Röder, L., Obersteiner, F., Harder, H., Lelieveld, J., & Fischer, H. (2022). Tropospheric ozone production and chemical regime analysis during the COVID-19 lockdown over Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*(9), 6151–6165. https://doi.org/10.5194/acp-22-6151-2022

146. Oxford COVID-19 Government Response Tracker. (2022). *OxCovid19 Database*. https://covid19.oii.ox.ac.uk/database/

147. Pakkattil, A., Muhsin, M., & Varma, M. K. R. (2021). COVID-19 lockdown: Effects on selected volatile organic compound (VOC) emissions over the major Indian metro cities. *Urban Climate*, *37*, 100838. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100838

148. Pal, P., & Banat, F. (2016). Comparison of thermal degradation between fresh and industrial aqueous methyldiethanolamine with continuous injection of H2S/CO2 in high pressure reactor. *Journal of*

Natural Gas Science and Engineering, *29*, 479–487. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.01.037

149. Palmisani, J., Di Gilio, A., Cisternino, E., Tutino, M., & de Gennaro, G. (2020). Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from a Personal Care Polymer-Based Item: Simulation of the Inhalation Exposure Scenario Indoors under Actual Conditions of Use. *Sustainability*, *12*(7), 2577. https://doi.org/10.3390/su12072577

150. Papurello, D., Silvestri, S., Tomasi, L., Belcari, I., Biasioli, F., & Santarelli, M. (2016). Natural Gas Trace Compounds Analysis with Innovative Systems: PTR-ToF-MS and FASTGC. *Energy Procedia*, *101*, 536–541. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.068

151. Pelin Okutan. (2024, veljača 28). *Understanding Decision Trees: A Comprehensive Guide*. https://medium.com/@pelinokutan/understanding-decision-trees-a-comprehensive-guide-fe0b192ef9d0.

152. Perraud, V., Bruns, E. A., Ezell, M. J., Johnson, S. N., Yu, Y., Alexander, M. L., Zelenyuk, A., Imre, D., Chang, W. L., Dabdub, D., Pankow, J. F., & Finlayson-Pitts, B. J. (2012). Nonequilibrium atmospheric secondary organic aerosol formation and growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(8), 2836–2841. https://doi.org/10.1073/pnas.1119909109

153. Perraud, V., Meinardi, S., Blake, D. R., & Finlayson-Pitts, B. J. (2016). Challenges associated with the sampling and analysis of organosulfur compounds in air using real-time PTR-ToF-MS and offline GC-FID. *Atmospheric Measurement Techniques*, *9*(3), 1325–1340. https://doi.org/10.5194/amt-9-1325-2016

154. Praveena, M. . & J. (2017). A literature review on supervised machine learning algorithms and boosting process. *International Journal of Computer Applications*, *169*(8), 32–35.

155. Priestley, M., Bannan, T. J., Le Breton, M., Worrall, S. D., Kang, S., Pullinen, I., Schmitt, S., Tillmann, R., Kleist, E., Zhao, D., Wildt, J., Garmash, O., Mehra, A., Bacak, A., Shallcross, D. E., Kiendler-Scharr, A., Hallquist, Å. M., Ehn, M., Coe, H., … McFiggans, G. (2021). Chemical characterisation of benzene oxidation products under high- and low-NO_x conditions using chemical ionisation mass spectrometry. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *21*(5), 3473–3490. https://doi.org/10.5194/acp-21-3473-2021

156. Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). *CatBoost: unbiased boosting with categorical features*. https://github.com/catboost/catboost

157. Pugliese, G., Trefz, P., Brock, B., Schubert, J. K., & Miekisch, W. (2019). Extending PTR based breath analysis to real-time monitoring of reactive volatile organic compounds. *The Analyst*, *144*(24), 7359–7367. https://doi.org/10.1039/C9AN01478K

158. Querol, X., Massagué, J., Alastuey, A., Moreno, T., Gangoiti, G., Mantilla, E., Duéguez, J. J., Escudero, M., Monfort, E., Pérez García-Pando, C., Petetin, H., Jorba, O., Vázquez, V., de la Rosa, J., Campos, A., Muñóz, M., Monge, S., Hervás, M., Javato, R., & Cornide, M. J. (2021). Lessons from the COVID-19 air pollution decrease in Spain: Now what? *Science of The Total Environment*, *779*, 146380. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146380

159. R M Harrison, & R E Hester. (1995). *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*. The Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/9781847552310

160. Radić, N., Perišić, M., Jovanović, G., Bezdan, T., Stanišić, S., Stanić, N., & Stojić, A. (2025). An AI-Based Framework for Characterizing the Atmospheric Fate of Air Pollutants Within Diverse Environmental Settings. *Atmosphere*, *16*(2), 231. https://doi.org/10.3390/atmos16020231

161. Radonić, J. (2009). *Atmosferski transport i modelovanje raspodele između čvrste i gasovite faze policikličnih aromatičnih ugljovodonika*. Univerzitet u Novom Sadu.

162. Ragothaman, A., & Anderson, W. (2017). Air Quality Impacts of Petroleum Refining and Petrochemical Industries. *Environments*, *4*(3), 66. https://doi.org/10.3390/environments4030066

163. Ralf Koppmann. (2007). *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470988657

164. Ravindiran, G., Hayder, G., Kanagarathinam, K., Alagumalai, A., & Sonne, C. (2023). Air quality prediction by machine learning models: A predictive study on the indian coastal city of Visakhapatnam. *Chemosphere*, *338*, 139518. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139518

165. Rebecca Patro. (2021, siječanj 25). *Cross-Validation: K Fold vs Monte Carlo*. https://towardsdatascience.com/cross-validation-k-fold-vs-monte-carlo-e54df2fc179b

166. Robinson, A. L., Donahue, N. M., Shrivastava, M. K., Weitkamp, E. A., Sage, A. M., Grieshop, A. P., Lane, T. E., Pierce, J. R., & Pandis, S. N. (2007). Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging. *Science (New York, N.Y.)*, *315*(5816), 1259–1262. https://doi.org/10.1126/science.1133061

167. Roshmita Dey. (2023). *Bagging vs Boosting*. https://medium.com/@roshmitadey/bagging-v-s-boosting-be765c970fd1

168. Rumchev, K., Brown, H., & Spickett, J. (2007). Volatile Organic Compounds: Do they present a risk to our health? *Reviews on Environmental Health*, *22*(1). https://doi.org/10.1515/REVEH.2007.22.1.39

169. Rume, T., & Islam, S. M. D.-U. (2020). Environmental effects of COVID-19 pandemic and potential strategies of sustainability. *Heliyon*, *6*(9), e04965. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04965

170. Sadeghmoghadam, L., Daneshfar, M., Sharifi, F., & Alizad, V. (2023). How the first cases of COVID-19 in 10 countries become infected? A case series. *Respiratory Medicine Case Reports*, *46*, 101219. https://doi.org/10.1016/j.rmcr.2020.101219

171. Saha, L., Kumar, A., Kumar, S., Korstad, J., Srivastava, S., & Bauddh, K. (2022a). The impact of the COVID-19 lockdown on global air quality: A review. *Environmental Sustainability*, *5*(1), 5–23. https://doi.org/10.1007/s42398-021-00213-6

172. Saha, L., Kumar, A., Kumar, S., Korstad, J., Srivastava, S., & Bauddh, K. (2022b). The impact of the COVID-19 lockdown on global air quality: A review. *Environmental Sustainability*, *5*(1), 5–23. https://doi.org/10.1007/s42398-021-00213-6

173. Scikit-learn developers. (2024). *Histogram-based Gradient Boosting. In Scikit-learn Documentation (Version 1.4)*. . https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html#histogram-based-gradient-boosting

174. Sekar, A., Varghese, G. K., & Ravi Varma, M. K. (2019). Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. *Heliyon*, *5*(11), e02918. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02918

175. SEPA. (2022). *http://amskv.sepa.gov.rs/mob/index.php?lng=en*.

176. Shallis, R. M., Weiss, J. J., Deziel, N. C., & Gore, S. D. (2021). A clandestine culprit with critical consequences: Benzene and acute myeloid leukemia. *Blood Reviews*, *47*, 100736. https://doi.org/10.1016/j.blre.2020.100736

177. Siciliano, B., Dantas, G., Silva, C. M. da, & Arbilla, G. (2020). Increased ozone levels during the COVID-19 lockdown: Analysis for the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment*, *737*, 139765. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139765

178. Silva, A. C. T., Branco, P. T. B. S., & Sousa, S. I. V. (2022). Impact of COVID-19 Pandemic on Air Quality: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(4), 1950. https://doi.org/10.3390/ijerph19041950

179. Šimon Đarmati. (2009). *Zagađenje i zaštita vazduha*. VŠSS Beogradska politehnika.

180. Singh, B., Sohrab, S., Athar, M., Alandijany, T., Kumari, S., Nair, A., Kumari, S., Mehra, K., Chowdhary, K., Rahman, S., & Azhar, E. (2023). Substantial Changes in Selected Volatile Organic Compounds (VOCs) and Associations with Health Risk Assessments in Industrial Areas during the COVID-19 Pandemic. *Toxics*, *11*(2), 165. https://doi.org/10.3390/toxics11020165

181. „Službeni glasnik RS“, br. 23/2020. (2020a). *Odluku o proglašenju bolesti COVID-19 izazvane virusom SARS-CoV-2* . http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2020_06/SG_084_2020_007.htm

182. „Službeni glasnik RS“, br. 29/2020. (2020b). *Odluka o proglašenju vanrednog stanja.* http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2020_03/SG_29_2020_001.htm

183. „Službeni glasnik RS“ br. 39/2020. (2020). *Naredba o ograničenju i zabrani kretanja lica na teritoriji Republike Srbije* . https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/ministarstva/naredba/2020/34/1/reg

184. Smith, M. T. (1996). Overview of benzene-induced aplastic anaemia. *European Journal of Haematology*, *57*(S60), 107–110. https://doi.org/10.1111/j.1600-0609.1996.tb01655.x

185. Snyder, R. (2012). Leukemia and Benzene. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *9*(8), 2875–2893. https://doi.org/10.3390/ijerph9082875

186. Šoštarić, A. (2017). *Mehanizmi uklanjanja lako isparljivih monoaromatičnih ugljovodonika (BTEX) iz ambijentalnog vazduha mokrom depozicijom, doktorska disertacija* . Univerzitet u Beogradu.

187. Srđan Kukolj, Toplica Marjanović, Hristina Vojvodić, Elizabet Paunović, Danijela Božanić, Darjana Macanović, Miloš Veljović, Ognjan Pantić, Lazar Jovčić, Marko Pajović, & Damir Dizdarević. (2024). *Analiza godišnjeg izveštaja o stanju kvaliteta vazduha u Republici Srbiji za 2022. godinu*. Regulatorni institut za obnovljivu energiju i životnu sredinu. www.stamparijapublish.com

188. 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?* (str. 207–225). https://doi.org/10.1007/978-3-030-72711-6_12

189. Stanković, S., Đorić, V., & Kajalić, J. (2021). Estimation of pollutant emissions from traffic using microsimulation models. *Tehnika*, *76*(6), 801–808. https://doi.org/10.5937/tehnika2106801s

190. Stojić, A. (2015). *Analiza raspodela i dinamike isparljivih organskih jedinjenja i aerosola u troposferi: Lidar i masena spektrometrija*.

191. 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.

192. Stojić, A., Jovanović, G., Stanišić, S., Romanić, S. H., Šoštarić, A., Udovičić, V., Perišić, M., & Milićević, T. (2022). The PM2.5-bound polycyclic aromatic hydrocarbon behavior in indoor and outdoor

environments, part II: Explainable prediction of benzo[a]pyrene levels. *Chemosphere*, *289*, 133154. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133154

193. Stojić, A., Stojić, S. 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. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4540-5
194. Suroshe, S. S. V. D. (2023). Analysis of Air Quality in Urban Area using Machine Learning Approach . *Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Soft Computing* , *7*(1).
195. Taipale, R., Ruuskanen, T. M., Rinne, J., Kajos, M. K., Hakola, H., Pohja, T., & Kulmala, M. (2008a). Atmospheric Chemistry and Physics Technical Note: Quantitative long-term measurements of VOC concentrations by PTR-MS-measurement, calibration, and volume mixing ratio calculation methods. U *Atmos. Chem. Phys* (Sv. 8). www.atmos-chem-phys.net/8/6681/2008/
196. Taipale, R., Ruuskanen, T. M., Rinne, J., Kajos, M. K., Hakola, H., Pohja, T., & Kulmala, M. (2008b). Technical Note: Quantitative long-term measurements of VOC concentrations by PTR-MS – measurement, calibration, and volume mixing ratio calculation methods. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *8*(22), 6681–6698. https://doi.org/10.5194/acp-8-6681-2008
197. Tanner, J. P., Salemi, J. L., Stuart, A. L., Yu, H., Jordan, M. M., DuClos, C., Cavicchia, P., Correia, J. A., Watkins, S. M., & Kirby, R. S. (2015). Associations between exposure to ambient benzene and PM2.5 during pregnancy and the risk of selected birth defects in offspring. *Environmental Research*, *142*, 345–353. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.006
198. Taraborrelli, D., Lawrence, M. G., Crowley, J. N., Dillon, T. J., Gromov, S., Groß, C. B. M., Vereecken, L., & Lelieveld, J. (2012). Hydroxyl radical buffered by isoprene oxidation over tropical forests. *Nature Geoscience*, *5*(3), 190–193. https://doi.org/10.1038/ngeo1405
199. Tasin, M., Cappellin, L., & Biasioli, F. (2012). Fast Direct Injection Mass-Spectrometric Characterization of Stimuli for Insect Electrophysiology by Proton Transfer Reaction-Time of Flight Mass-Spectrometry (PTR-ToF-MS). *Sensors*, *12*(4), 4091–4104. https://doi.org/10.3390/s120404091
200. Ummyatul Hajrah, Agustin Kusumayati, & Ema Hermawati. (2020). Effects of Benzene Exposure on Respiratory Symptoms to Workers in the Informal Footwear Industry. *Indian Journal of Public Health Research & Development Vol. 11, No. 03*, *11*(03), 1201–1206.
201. United States, E. P. A. (US E. (bez dat.). *Guidelines for carcinogen risk assessment*. 2024. Preuzeto 21. ožujak 2024., od https://www.epa.gov/risk/guidelines-carcinogen-risk-assessment.
202. Van Huffel, K., Hansen, M. J., Feilberg, A., Liu, D., & Van Langenhove, H. (2014). The power of online proton transfer reaction - Mass spectrometry (PTR-MS) measurement of odorous emissions from a pig house. *Chemical Engineering Transactions*, *40*(Special Issue), 241–245. https://doi.org/10.3303/CET1440041
203. Venter, Z. S., Aunan, K., Chowdhury, S., & Lelieveld, J. (2020). COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(32), 18984–18990. https://doi.org/10.1073/pnas.2006853117
204. Verma, R. L., & Kamyotra, J. S. (2021). Impacts of COVID-19 on Air Quality in India. *Aerosol and Air Quality Research*, *21*(4), 200482. https://doi.org/10.4209/aaqr.200482
205. Vlada Republike Srbije. (2020a). *Strategija razvoja veštačke inteligencije u Republici Srbiji za period*

2020–2025. godine. . https://www.srbija.gov.rs/tekst/437277

206. Vlada Republike Srbije. (2020b). *Uredba o merama za sprečavanje i suzbijanje širenja epidemije COVID-19. Pravno-informacioni sistem*.
https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/uredba/2020/31/1/reg

207. Vukotić-Cotić, G. ., Simonović, V. ., Kovačević, M. ., Nikolić, I. ., Stančić, K. ., Stamenković, S. ., Jovandić, I. ., Korović, P. ., & Bumbić, D. (2020). *Makroekonomske analize i trendovi*. https://api.pks.rs/storage/assets/MAT 306,307 2020-07,08.pdf

208. Wang, R., Zhang, Y., Jiao, L., Zhao, X., Gao, Z., & Dong, D. (2024). Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry for Rapid Dynamic Measurement of Ethylene Oxide Volatilization from Medical Masks. *Atmosphere*, *15*(1), 114. https://doi.org/10.3390/atmos15010114

209. Wang, W., Yan, Y., Fang, H., Li, J., Zha, S., & Wu, T. (2023). Volatile organic compound emissions from typical industries: Implications for the importance of oxygenated volatile organic compounds. *Atmospheric Pollution Research*, *14*(1), 101640. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101640

210. Wei, C.-C., & Kao, W.-J. (2023). Establishing a Real-Time Prediction System for Fine Particulate Matter Concentration Using Machine-Learning Models. *Atmosphere*, *14*(12), 1817. https://doi.org/10.3390/atmos14121817

211. Westphal, F., & Junge, T. (2012). Ring positional differentiation of isomeric N-alkylated fluorocathinones by gas chromatography/tandem mass spectrometry. *Forensic Science International*, *223*(1–3), 97–105. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.08.011

212. Wiedinmyer, C., Guenther, A., Harley, P., Hewitt, N., Geron, C., Artaxo, P., Steinbrecher, R., & Rasmussen, R. (2004). *Global Organic Emissions from Vegetation* (str. 115–170). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2167-1_4

213. Wijnands, J. S., Nice, K. A., Seneviratne, S., Thompson, J., & Stevenson, M. (2022). The impact of the COVID-19 pandemic on air pollution: A global assessment using machine learning techniques. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(6), 101438. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101438

214. Williams, J. E., van Velthoven, P. F. J., & Brenninkmeijer, C. A. M. (2013). Quantifying the uncertainty in simulating global tropospheric composition due to the variability in global emission estimates of Biogenic Volatile Organic Compounds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*(5), 2857–2891. https://doi.org/10.5194/acp-13-2857-2013

215. World Health Organizatio. (1989). Indoor air quality: Organic pollutants. Report on a WHO meeting, Berlin, 23-27 August 1987. *EURO Reports and Studies*, *111*.

216. World Health Organization. (2024, lipanj 25). *What are health consequences of air pollution on populations?* https://www.who.int/news/item/25-06-2024-what-are-health-consequences-of-air-pollution-on-populations

217. Worldometer. (2022). *COVID-19 coronavirus pandemic data [Data set]*. .
https://www.worldometers.info/coronavirus/

218. Xiang, W., Wang, W., Du, L., Zhao, B., Liu, X., Zhang, X., Yao, L., & Ge, M. (2023). Toxicological Effects of Secondary Air Pollutants. *Chemical Research in Chinese Universities*, *39*(3), 326–341. https://doi.org/10.1007/s40242-023-3050-0

219. Yang, H., Qin, G., Liu, Z., Hu, Y., & Dai, Q. (2024). *LightGBM robust optimization algorithm based on*

topological data analysis.

220. Yang, X.-S. (2009). *Firefly Algorithms for Multimodal Optimization* (str. 169–178). https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14

221. Yeoman, A. M., & Lewis, A. C. (2021). Global emissions of VOCs from compressed aerosol products. *Elementa: Science of the Anthropocene*, *9*(1). https://doi.org/10.1525/elementa.2020.20.00177

222. Yuan, B., Koss, A. R., Warneke, C., Coggon, M., Sekimoto, K., & de Gouw, J. A. (2017). Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry: Applications in Atmospheric Sciences. *Chemical Reviews*, *117*(21), 13187–13229. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00325

223. Zahed, M. A., Salehi, S., Khoei, M. A., Esmaeili, P., & Mohajeri, L. (2024). Risk assessment of Benzene, Toluene, Ethyl benzene, and Xylene (BTEX) in the atmospheric air around the world: A review. *Toxicology in Vitro*, *98*, 105825. https://doi.org/10.1016/j.tiv.2024.105825

224. Zahran, S., Weiler, S., Mielke, H. W., & Pena, A. A. (2012). Maternal benzene exposure and low birth weight risk in the United States: A natural experiment in gasoline reformulation. *Environmental Research*, *112*, 139–146. https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.11.008

225. Zannoni, N., Gros, V., Lanza, M., Sarda, R., Bonsang, B., Kalogridis, C., Preunkert, S., Legrand, M., Jambert, C., Boissard, C., & Lathiere, J. (2016). OH reactivity and concentrations of biogenic volatile organic compounds in a Mediterranean forest of downy oak trees. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *16*(3), 1619–1636. https://doi.org/10.5194/acp-16-1619-2016

226. Zhang, J., Xiao, M., Gao, L., & Pan, Q. (2018). Queuing search algorithm: A novel metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Applied Mathematical Modelling*, *63*, 464–490. https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.036

227. Zhang, K., Liu, Z., Zhang, X., Li, Q., Jensen, A., Tan, W., Huang, L., Wang, Y., de Gouw, J., & Li, L. (2022). Insights into the significant increase in ozone during COVID-19 in a typical urban city of China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*(7), 4853–4866. https://doi.org/10.5194/acp-22-4853-2022

228. Zhang, L., Xu, T., Wu, G., Zhang, C., Li, Y., Wang, H., Gong, D., Li, Q., & Wang, B. (2024). Photochemical loss with consequential underestimation in active VOCs and corresponding secondary pollutions in a petrochemical refinery, China. *Science of The Total Environment*, *918*, 170613. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170613

229. Zhang, Y., Zhang, C., Liu, Z., & Yang, X. (2023). Air pollution reduction during COVID-19 lockdown in China: a sustainable impact assessment for future cities development. *City and Built Environment*, *1*(1), 13. https://doi.org/10.1007/s44213-023-00013-0

230. Zheng, B., Zhang, Q., Geng, G., Chen, C., Shi, Q., Cui, M., Lei, Y., & He, K. (2021). Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020. *Earth System Science Data*, *13*(6), 2895–2907. https://doi.org/10.5194/essd-13-2895-2021

231. Zhu, H., Wei, L., & Niu, P. (2020). The novel coronavirus outbreak in Wuhan, China. *Global Health Research and Policy*, *5*(1), 6. https://doi.org/10.1186/s41256-020-00135-6

Procena uticaja izmenjenih aktivnosti ljudi tokom pandemije COVID-19 na raspodele isparljivih organskih jedinjenja u Beogradu

ORIGINALITY REPORT

2%
SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	www.yucom.org.rs Internet	244 words — 1%
2	nardus.mpn.gov.rs Internet	153 words — < 1%
3	sr.m.wikipedia.org Internet	112 words — < 1%
4	www.mdpi.com Internet	74 words — < 1%
5	(6-23-15) http://147.91.68.190/DoktorskeStudije/Disertacije/Andreja_Stojic_disertajez=cir Internet	35 words — < 1%
6	www.propisi.net Internet	35 words — < 1%
7	Timea Bezdan, Mirjana Perišić, Gordana Jovanović, Nebojša Bačanin Džakula, Andreja Stojić. "Artificial Intelligence-Based Framework for Analyzing	25 words — < 1%

Crises-Caused Air Pollution", Proceedings of the International Scientific Conference - Sinteza 2024, 2024
Crossref

8 reff.f.bg.ac.rs
Internet
24 words — < 1%

9 Albertus S. Louw, Jinjin Fu, Aniket Raut, Azim Zulhilmi et al. "The role of remote sensing during a global disaster: COVID-19 pandemic as case study", Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022
Crossref
20 words — < 1%

10 Nataša Radić, Mirjana Perišić, Gordana Jovanović, Timea Bezdan, Svetlana Stanišić, Nenad Stanić, Andreja Stojić. "An AI-Based Framework for Characterizing the Atmospheric Fate of Air Pollutants Within Diverse Environmental Settings", Atmosphere, 2025
Crossref
18 words — < 1%

11 www.uibk.ac.at
Internet
18 words — < 1%

12 Anastas Vangeli, Dragan Pavlićević. "Yugoslavia and China - Histories, Legacies, Afterlives", Routledge, 2025
Publications
15 words — < 1%

13 "Applied Artificial Intelligence in Business", Springer Science and Business Media LLC, 2025
Crossref
12 words — < 1%

14 K. A. McKinney. "Emissions of isoprenoids and oxygenated biogenic volatile organic compounds from a New England mixed forest", Atmospheric Chemistry and Physics, 05/24/2011
Crossref
11 words — < 1%

15 Ardini Saptaningsih Raksanagara, Lukman Hilfi, Fedri Ruluwedrata Rinawan, Tisa Layalia Hanifah Ma'ruf, Desie Khoerotunnisya. "Comparison of air pollution before, during, and after restrictions on the activities of residents to prevent the transmission of COVID-19 in Jakarta, Indonesia", Springer Science and Business Media LLC, 2024
Crossref Posted Content
10 words — < 1%

16 Irena Fiket, Čedomir Markov, Vujo Ilić, Gazela Pudar Draško. "Participatory Democratic Innovations in Southeast Europe - How to Engage in Flawed Democracies", Routledge, 2024
Publications
9 words — < 1%

17 Marta Doval-Miñarro, María Carmen Bueso. "A Comparative Study of Air Pollutant Concentrations before the COVID-19 Pandemic and in the New Normal in the Región de Murcia (Spain)", Atmosphere, 2023
Crossref
9 words — < 1%

18 Marya L. Doerfel, Jennifer A. Theiss, Maria K. Venetis, Kristina M. Scharp. "The Routledge Handbook of Communication and Resilience", Routledge, 2025
Publications
9 words — < 1%

19 Buddhi Pushpawela, Sherly Shelton, Gayathri Liyanage, Sanduni Jayasekara et al. "Changes of Air Pollutants in Urban Cities during the COVID-19 Lockdown-Sri Lanka", Aerosol and Air Quality Research, 2023
Crossref
8 words — < 1%

20 Elham Kalantari, Hamid Gholami, Hossein Malakooti, Ali Reza Nafarzadegan, Vahid Moosavi. "Machine learning for air quality index (AQI) forecasting: shallow learning or deep learning?", Environmental Science and Pollution Research, 2024
Crossref
8 words — < 1%

21	Maria A. Zoran, Roxana S. Savastru, Dan M. Savastru, Marina N. Tautan. "Peculiar weather patterns effects on air pollution and COVID-19 spread in Tokyo metropolis", Environmental Research, 2023 Crossref	8 words — < 1%
22	Tailine Corrêa dos Santos. "Estudos da interação da poluição do ar e concentrações de hidrocarbonetos por floresta urbana - Isopreno (C5H8)", Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2021 Crossref Posted Content	8 words — < 1%
23	Tree Physiology, 2013. Crossref	8 words — < 1%
24	Viktória Milivojevic-Beszédes. "A felnőttnevelés professzionalizációja Szerbiában", University of Szeged, 2023 Crossref Posted Content	8 words — < 1%
25	Yunliang Zhao, Ngoc T. Nguyen, Albert A. Presto, Christopher J. Hennigan, Andrew A. May, Allen L. Robinson. "Intermediate Volatility Organic Compound Emissions from On-Road Gasoline Vehicles and Small Off-Road Gasoline Engines", Environmental Science & Technology, 2016 Crossref	8 words — < 1%
26	livrepository.liverpool.ac.uk Internet	8 words — < 1%
27	shodhpatrika.co.in Internet	8 words — < 1%
28	"Finance, Economics, and Industry for Sustainable Development", Springer Science and Business Media LLC, 2025	7 words — < 1%

Crossref

29 Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology, 2010. 7 words — < 1%
Crossref

30 Andrew M. Ellis, Christopher A. Mayhew. "Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry", Wiley, 2014 6 words — < 1%
Crossref

31 Bin Yuan, Abigail R. Koss, Carsten Warneke, Matthew Coggon, Kanako Sekimoto, Joost A. de Gouw. "Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry: Applications in Atmospheric Sciences", Chemical Reviews, 2017 6 words — < 1%
Crossref

EXCLUDE QUOTES	ON	EXCLUDE SOURCES	OFF
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY	ON	EXCLUDE MATCHES	OFF