

Cirkularni model proizvodnje biogasa iz silaže sirka (*Sorghum bicolor*) proizvedenog na degradiranom zemljištu uz primenu digestata kao organskog đubriva

By Nikola Rakašćan

5

UNIVERZITET SINGIDUNUM

DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKE STUDIJE

Studijski program: ŽIVOTNA SREDINA I ODRŽIVI RAZVOJ

**Cirkularni model proizvodnje biogasa iz silaže sirka (*Sorghum bicolor*)
proizvedenog na degradiranom
zemljištu uz primenu digestata kao organskog đubriva
- Doktorska disertacija-**

Mentor: prof. dr Gordana Dražić

Doktorand: Nikola Rakašćan

Broj indeksa 485024/2019

Beograd, 2022. godine

Mentor:

Dr Gordana Dražić, ²¹ redovni profesor Univerziteta Singidunum, Beograd

Članovi komisije:

Dr Jelena Milovanović, redovni profesor Univerziteta Singidunum, Beograd

Dr Ljubiša Živanović, vanredni profesor Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Datum odbrane: _____, Beograd.

Prilikom realizacije istraživanja i izvođenja oglada za moju doktorsku disertaciju utrošeno je dosta vremena i truda

Ovaj doktorat posvećujem svojoj porodici za pruženu podršku tokom proteklog školovanja

Veliko hvala mom mentor, prof. dr. Gordani Dražić kao i članovima komisije prof. dr. Jeleni Milovanović i prof. dr. LJubiši Živanoviću na korisnim sugestijama i pomoći prilikom pisanja ove doktorske disertacije

Takođe, veliku zahvalnost dugujem i dr. Jeli Ikanović, višem naučnom saradniku i dr. Veri Popović, naučnom savetniku na korisnim sugestijama i savetima

Ogled je sproveden u kompaniji BIOGAS ENERGY u Ilandži. Ovim putem iskazujem i veliku zahvalnost ovoj kompaniji i osoblju na saradnji i ukazanom poverenju, kao i svima onima koji su direktno ili indirektno učestvovali u realizaciji praktičnog i teorijskog dela ovog istraživanja

IZVOD

Osnovni pokretač interesovanja za obnovljive izvore energije su klimatske promene koje su prepoznate kao glavna pretnja daljem razvoju ljudske civilizacije. Energija biomase agroenergetskih useva se može konvertovati termohemijskim i biohemijskim procesima, pri čemu biohemijski pokazuju veću održivost u dužim vremenskim periodima. Prilikom korišćenja biomase u procesu anaerobne digestije prednost treba dati biorazgradivom otpadu kao što je stajnjak ili žetveni ostaci. Da bi se postigla zadovoljavajuća energetska efikasnost neophodna je kodigestija sa silažom agroenergetskih useva koje treba gajiti u blizini biogasnog postrojenja, po mogućnosti na zemljištu koje nije pogodno za proizvodnju hrane. Istraživanja su vršena sa ciljem da se na sistematski način utvrdi uticaj digestata, kao nusprodukta u proizvodnji biogasa, na produktivnost biomase krmnog sirka (*Sorghum bicolor* L.), kao agroenergetskog useva koji se koristi u produkciji biogasa, na primeru Biogas Energy doo Alibunar. Metodom poljskog oglada koji je trajao tri godine, na dve lokacije: Ilandža, na ritskoj crnici i Dolovo, na černozeru, u dve varijante: bez digestata i sa primenom 50t/ha digestata, ispitivane su promene morfometrijskih karakteristika i prinosa biomase sirka kao i prinosi biogasa. Prinosi biomase sirka i biogasa su bili viši na lokaciji Dolovo, i statistički značajno viši u varijanti sa digestatom u odnosu na kontrolu na obe lokacije. Izmereni prinosi su upoređeni sa prinosima koji se odnose na kukuruz i pokazano je da sirak, pod istim uslovima, daje veću biomasu, ali manji prinos biogasa. Za obe kulture su postignuti prinosi koji se za njih očekuju uz prihranu mineralnim đubrivima. Prinosi biogasa izraženi po jedinici površine zemljišta su u rangi očekivanih na osnovu literaturnih podataka. Eksperimentalni rezultati su diskutovani sa aspekta a) uticaja proizvodnje biogasa na životnu sredinu, prvenstveno emisiju gasova sa efektom staklene bašte, b) prednosti i ograničenja primene digestata kao oplemenjivača zemljišta, c) mogućnosti produkcije agroenergetskih useva na delimično degradiranom zemljištu sa fokusom na sirak. Predložen je model tokova materijala u biogas elektrani, koji doprinosi racionalnom korišćenju degradiranog zemljišta produkcijom sirka kao agroenergetskog useva uz primenu digestata kao oplemenjivača zemljišta čime se postiže ekološka održivost kroz smanjenje emisije gasova staklene bašte i pravilno upravljanje otpadom sa farmi, ekonomska održivost kroz smanjenje operativnih troškova biogas elektrane i opštedruštvena održivost kroz ublažavanje klimatskih promena.

Ključne reči: agroenergetski usevi, bioekonomija, biomasa, resursna efikasnost, ritska crnica

SUMMARY

The main driver of interest in renewable energy sources is climate change, which is recognized as the main threat to the further development of human civilization. Biomass energy of agro-energy crops can be converted by thermochemical and biochemical processes, whereby biochemicals show greater sustainability over longer periods of time. When using biomass in the process of anaerobic digestion, priority should be given to biodegradable waste such as manure or harvest residues. In order to achieve satisfactory energy efficiency, it is necessary to co-digestion with silage of agro-energy crops that should be grown near the biogas plant, preferably on land that is not suitable for food production. The research was carried out with the aim of determining in a systematic and valid way the influence of digestate, as a by-product in the production of biogas, on the productivity of the biomass of fodder sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as an agro-energy crop used in the production of biogas, on the example of Biogas Energy doo Alibunar. Using the method of the field experiment, which was set up over three years, at two locations: Ilandža, Ritska crnica, and Dolovo, on chernozem, in two variants: without digestate and with the application of 50t/ha digestate, the changes in morphometric characteristics and biomass yield of sorghum were investigated as and biogas yields. The yields of sorghum biomass and biogas were higher at the Dolovo location, and statistically significantly higher in the variant with digestate compared to the control at both locations. The measured yields were compared with the yields related to corn and it was shown that sorghum, under the same conditions, gives a higher biomass but a lower biogas yield. For both crops, the expected yields were achieved with mineral fertilizers. Biogas yields expressed per unit of land area are in the expected range based on literature data. The experimental results were discussed from the aspect of a) the impact of biogas production on the environment, primarily the emission of gases with a greenhouse effect, b) the advantages and limitations of using digestate as a soil conditioner, c) the possibility of producing agro-energy crops on partially degraded land with a focus on sorghum. A model of material flows in a biogas power plant is proposed that contributes to the rational use of degraded land by producing sorghum as an agro-energy crop with the use of digestate as a soil conditioner, which achieves ecological sustainability through the reduction of greenhouse gas emissions and proper management of farm waste, economic sustainability through the reduction of biogas operating costs power plants and general social sustainability through climate change mitigation.

Keywords: agro-energy crops, bioeconomy, biomass, resource efficiency, humogley

Sadržaj

UVOD	11
1. PREDMET ISTRAŽIVANJA	15
1.1. Biogas – stanje i perspektive	15
1.1.1. Biogas u svetu	15
1.1.2. Biogas u Evroskoj Uniji	17
1.1.3. Biogas u Republici Srbiji.....	18
1.1.4. Biogoriva, biomasa, bioekonomija.....	20
1.2. Konverzija energije i kruženje elemenata biomase u proizvodnji biogasa	22
1.2.1. Biogas	22
1.2.2. Digestat.....	26
1.2.3. Kruženje elemenata.....	28
1.2.4. Cirkularna ekonomija digestata.....	31
1.3. Agroenergetski usevi	31
1.3.1. Opšte karakteristike agroenergetskih useva	32
1.3.2. Žetveni ostaci ratarske proizvodnje	34
1.3.3. Kukuruz (<i>Zea mays</i>).....	36
1.3.4. Sirak (<i>Sorghum bicolor</i> L.).....	39
1.4. Resurs zemljišta	44
1.4.1. Černozem	44
1.4.2. Ritska crnica.....	45
1.4.3. Degaradirano (marginalno) zemljište	45
1.5. Uticaji na životnu sredinu tokova materijala u biogas- elektrani	48
1.6. Ekonomski aspekti tokova materijala u biogas elektrani	50
1.7. Biogas elektrana	52
2. POLAZNE HIPOTEZE I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	59
3. MATERIJAL I METODE ISTRAŽIVANJA	61
3.1. Opis lokacije.....	61
3.2. Metoda poljskog ogleda	62
3.2.1. Ispitivanje produkcije biomase sirka	62
3.2.2. Komparativna analiza produkcije biogasa iz silaže sirka i kukuruza	62
3.3. Prinos biogasa.....	62

3.4. Statističke analize	63
3.5. Agrohemijske analize.....	63
3.6. Analize sekundarnih izvora.....	64
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	65
4.1. Klimatske karakteristike Banata	65
4.2. Agrohemijske osobine zemljišta i digestata	68
4.2.1. Karakteristike zemljišta	68
4.2.2. Karakteristike digestata.....	68
4.3. Rezultati poljskog oglada.....	69
4.3.1. Broj listova po stablu	69
4.3.2. Visina stabla.....	71
4.3.3. Prinos biomase	72
4.3.4. Prinos biogasa	75
4.3.5. Analiza varijanse	77
4.3.6. Korelacija ispitivanih obeležja	78
4.4. Komparativna analiza prinosa biomase i biogasa sirka i kukuruza	80
4.4.1. Visina biljaka	80
4.4.2. Broj listova po stablu	81
4.4.3. Produkcija biomase	82
4.4.4. Prinos biogasa is silaže kukuruza.....	84
4.4.5. Prinos biogasa i po ha.....	85
5. DISKUSIJA.....	87
5.1. Uticaji konverzije energije u AD procesu na klimatske promene.....	88
5.1.1. Procena životnog ciklusa (LCA).....	88
5.1.2. Ograničenja primene RED direktive	90
5.1.3. Uticaji proizvodnje biogasa na životnu sredinu.....	90
5.2. Uloga korišćenja digestata u zaštiti životne sredine	94
5.2.1. Klimatski uticaji čitavog lanca proizvodnje u biogás elektrani	94
5.2.2. Legislativa	96
5.3. Mogućnosti produkcije agroenergetskih useva na delimično degradiranim zemljištima	99
5.3.1. Agroenergetski usevi	99
5.3.2. Umereno degradirana zemljišta.....	101

5.4. Potencijali sirka u održivoj proizvodnji biogasa.....	105
6. ZAKLJUČCI	112
7. REFERENCE	115

Tabela 1.	Ušesće biogasa u energetsom bilansu Republike Srbije, prema Odluci utvrđivanju energetskog bilansa republike srbije za 2021	30
Tabela 2.	Sastav biogasa	
Tabela 3.	Poređenje prinosa biogasa i električne energije proizvedenih od različitih supstrata	
Tabela 4.	Hemijski sastav digestata i odgovarajuće sirovine	
Tabela 5.	Globalni prinosi žetvenih ostatak	
Tabela 6.	Potencijal jednogodišnjih useva za produkciju metana	
Tabela 7.	Srednje mesečne temperature (°C) u toku vegetativnog perioda na ispitivanim lokacijama.	
Tabela 8.	Srednje mesečne padavine (mm) u vegetacionim periodima na ispitivanim lokacijama	
Tabela 9.	Agrohemijske osobine zemljišta	
Tabela 10.	Sastav korišćenog digestata	
Tabela 11.	Uticaj primene digestata na broj listova po stablu sirka	
Tabela 12.	. Uticaj primene digestata na visinu (m) biljaka sirka	
Tabela 13.	Uticaj primene digestata na prinos suve biomase (t/ ha god) biljaka sirka	
Tabela 14.	Uticaj primene digestata na prinos sveže biomase (t/ ha god) biljaka sirka	
Tabela 15.	Uticaj primene digestata na prinos biogasa (Nm ³ /t) iz silaže sirka	
Tabela 16.	Rezultati analize varijanse trofaktorijskog ogleda	
Tabela 17.	Korelaciona analiza u ogledu sa sirkom	
Tabela 18.	Korelacije ispitivanih faktora u ogledu sa kukuruzom	
Tabela 19.	Uporedni prikaz prinosa biogasa po ha za kukuruz i sirak	

Lista slika

- Slika 1. Potencijal generacije energije u svetu
- Slika 2. Produkcija biometana u GIE (67 članova u 27 država Evrope)
- Slika 3. Osnovni procesi anaerobne digewstije sa dva produkta: biogas I ukupni anaerobni digestat
- Slika 4. Upotreba sirovine za proizvodnju biogasa u evropskim zemljama (isključujući deponije), izraženo kao maseni procenat.
- Slika 5. Kruženje ugljenika
- Slika 6. Činioci koji utiču na produkciju biogasa iz kukuruza
- Slika 7. Usev sirka
- Slika 8. Razvoj i primena tehnologija u održivom razvoju produkcije biogasa
- Slika 9. Lokacija Biogas Energy doo Alibunar i svinjarskih farmi u okolini
- Slika 10: Resurs zemljišta Biogas Energy doo Alibunar
- Slika 11. Komponente biogas elektrane: skladište silaže, transport sirovine, fermentor (gore), generatori električne energije, skladište digestata, sagorevanje viška biogasa (dole)
- Slika 12. Lokacija poljskog ogleda
- Slika 13. Srednje mesečne temperature (°C) na lokacijama poljskih ogleda u odnosu na višegodišnji prosek
- Slika 14. Ukupne godišnje padavine (mm) u vegetacionom periodu na ispitivanim lokacijama
- Slika 15: Interakcija lokaliteta i prihrane na broj listova po stablu sirka.
- Slika 16. Interakcija lokaliteta i prihrane na visinu stabla sirka
- Slika 17. Interakcija lokaliteta i prihrane na prinos sveže biomase sirka
- Slika 18: Silaža sirka
- Slika 19. Interakcija lokaliteta i prihrane na prinos biogasa iz silaže sirka
- Slika 20. Komparacija visine (m) biljaka kukuruza i sirka.
- Slika 21. Komparacija broja listova na stablu kukuruza i sirka
- Slika 22. Komparacija prinos biomase (t/ha) kukuruza i sirka
- Slika 23. Komparacija prinos biogasa (Nm³/t) silaže kukuruza i sirka
- Slika 24. Šematski prikaz tokova materijala u biogas elektrani i njihovog uticaja na životnu sredinu

UVOD

Razvoj ljudske populacije kroz povećanje brojnosti sa jedne strane i promene u načinu života, zahvaljujući razvoju tehnologije, sa druge strane su dovele do pritiska na životnu sredinu i prirodne resurse u meri koja može ugroziti njen opstanak. Jedan od uzroka ovakvog stanja je ubrzani razvoj linearne ekonomije koji ima jednosmeran tok: iz životne sredine se crpe resursi koji se prerađuju i koriste (u toku čega dolazi do emisija štetnih materija u životnu sredinu) da bi na kraju životnog ciklusa postale otpad (koji se takođe vraća u životnu sredinu preko delovanja na zemljište). Na ovaj način dolazi do iscrpljivanja resursa (naročito neobnovljivih) i do akumulacije otpada i štetnih emisija. Kapaciteti planete da apsorbuju navedene pritiske su ograničeni tako da ovakav način privređivanja postaje neodrživ u digim vremenskim intervalima. Kao odgovor se javlja koncept cirkularne ekonomije koji podrazumeva da se ljudske aktivnosti odvijaju na način koji uspešno funkcioniše u prirodnim ekosistemima. U osnovi ovog pristupa je kruženje materija na način da produkt nekog procesa postaje sirovina za sledeći korak. To znači da svi međuprodukti industrijskih aktivnosti (uključujući i štetne emisije u životnu sredinu) mogu biti na neki način iskorišćeni a na kraju životnog ciklusa proizvoda se ne nalazi otpad (jer je proces cikličan) – ove materije se koriste za neki drugi proizvod što je poznato i kao „zero waste“ princip.

Linearna ekonomija je veliki potrošač energije a kako se ona konvertuje najviše iz fosilnih goriva, dolazi do emisija gasova sa efektom staklene bašte (GSB), najviše CO₂ i metana što dalje vodi intenziviranju klimatskih promena. Kao odgovor se razvijaju tehnologije OIE – obnovljivih izvora energije koje treba da smanje uticaj energetike na klimatske promene i obezbede lokalne izvore energije.

Osnovni pokretač interesovanja za obnovljive izvore energije su klimatske promene koje su prepoznate kao glavna pretnja daljem razvoju ljudske civilizacije i njenom opstanku. Zbog toga se veliki broj istraživača bavi razvojem i unapređenjem tehnologija korišćenja obnovljivih izvora energije u svim sektorima. Rezultati ovih istraživanja treba da doprinesu realizaciji COP 56 (ciljeva održivog razvoja), posebno cilja 7 – dostupna obnovljiva energija, ali i ciljeva 9 – industrija, inovacije i infrastruktura, 10 – smanjenje nejednakosti, 13- akcije za klimu i cilja 15 - život na kopnu. Biomasa, kao obnovljivi izvor enerije je specifična jer, za razliku od drugih za koje tehnologije podrazumevaju smanjenje uticaja na životnu sredinu, prvenstveno, preko

smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte u toku čitavog životnog ciklusa postrojenja, za svoj razvoj koristi CO₂ iz atmosfere u procesu fotosinteze tako da je njenom upotrebom lakše postići ugljeničnu neutralnost. Pored toga, agroenergetski usevi doprinose povećanju plodnosti zemljišta preko povećanja sadržaja ugljenika u njemu, a mogu se gajiti i na marginalnim i kontaminiranim zemljištima čime se postižu dvostruke prednosti: izbegavanje kompeticije sa proizvodnjom hrane na plodnim poljoprivrednim zemljištima i remedijacija degradiranih lokacija.

Energija biomase agroenergetskih useva se može konvertovati termohemijskim i biohemijskim procesima, pri čemu biohemijski pokazuju veću održivost u dužim vremenskim periodima. Anaerobna digestija (AD) je jedna od najperspektivnijih tehnologija za konverziju energije biomase. Kao sirovina u proizvodnji biogasa se koriste različiti tipovi biomase koja sadrži visok udeo vlage i organske materije- celulozu, hemicelulozu, proteine i masti. Tu spadaju, pored bioenergetskih useva, čvrsti i tečni stajnjak kao posebni tokovi stočarske proizvodnje, otpad od hrane i prerade hrane, klanični i otpad sa farme, otpad iz industrije prerade mleka, voća i povrća, kanalizacioni mulj i mulj iz bioloških prečišćava otpadnih voda, kao i biorazgradiva frakcija komunalnog otpada. Potencijal proizvodnje energije iz različitih sirovina varira u zavisnosti od vrste, nivoa prerade/predobrade i koncentracije biorazgradivog materijala. Kako navedene vrste otpada nemaju dovoljno visok potencijal za održivu proizvodnju biogasa, bilo zbog niskih sadržaja energije ili ograničene dostupnosti materijala, neophodno je korišćenje agroenergetskih useva. Samo u slučaju da se ovi usevi gaje u blizini biogasnog postrojenja, imaju visoke prinose biomase i energije po jedinici površine zemljišta, a niske troškove proizvodnje, koji se mogu smanjiti korišćenjem digestata, nusprodukta AD procesa, kao izvora nutrijenata, može se očekivati ekološka održivost kao i ekonomska isplativost.

Biomasa je obnovljivi izvor energije koji se koristi za proizvodnju čvrstih, tečnih i gasovitih goriva na realan, efikasan a čist način. Termin „energija biomase” podrazumeva energetske proizvode dobijene od organske materije (biljnog, životinjskog ili mikrobijalnog porekla). Interesovanje za biomasu kao obnovljivi izvor energije se zasniva na nekoliko benefita:

- potencijal za smanjenje emisije GSB
- sigurnost snabdevanja energijom
- substitucija neobnovljivih fosilnih goriva,

- mogućnost upotrebe otpada- doprinos održivom upravljanju otpadom
- kapacitet prevođenja mnogih vrsta otpada u čistu energiju
- tehnološki napredak sistema termalne i biohemijske konverzije energije

Konverzija energije biomase donosi mnoge pogodnosti za životnu sredinu, prvenstveno na globalno zagrevanje preko redukcije emisije gasova sa efektom staklene bašte (GSB), što je naročito značajno za zemlje u razvoju u kojima je biomasa dostupna u ruralnim sredinama. Industrija na bazi biomase, takođe, otvara mogućnosti zapošljavanja, promoviše dobre poljoprivredne prakse kroz održivo upravljanje zemljištem. Međutim, u zemljama u razvoju se najčešće koriste zastarele tehnologije konverzije energije biomase, što često dovodi do negativnih uticaja na životnu sredinu. Ovo se može izbeći ako se promoviše upotreba savremenih tehnologija konverzije energije. Najjednostavnije je direktno sagorevanje biomase (bilo da se radi o nekoj vrsti otpada ili o biomasi bioenergetskih useva), kada se visoka termička efikasnost postiže naprednim tehnikama gasifikacije sa redukovanim emisijama u atmosferu, pri čemu su postrojenja kogeneracije toplotne i električne energije znatno energetski efikasnija od produkcije samo električne energije.

Upoređivanjem osnovnih načina konverzije energije biomase može se zaključiti da je biohemijska konverzija pogodnija za životnu sredinu, jer termalna konverzija (sagorevanje) u potpunosti razara strukturu organske materije, pa nakon procesa ostaje neorganski pepeo. Biološka konverzija omogućava zadržavanje vrednih organskih struktura i omogućava njihovu reciklažu kada se primene kao biološko đubrivo ili dodatak zemljištu . U toku biološke konverzije biomase u procesu anaerobne digestije proizvodi se biogas (čija količina i sastav zavise od upotrebljene sirovine, tipa mikrobiološkog procesa i dizajna reaktora) koji se može plasirati direktno u distributivnu mrežu za prirodni gas (posle kondicioniranja) ili se koristiti za proizvodnju električne energije, najbolje u kogeneracionom postrojenju. Nakon izdvajanja gasovite faze, u reaktoru ostaje tečna faza koja se naziva digestat.

Aktuelnost izbarane teme istraživanja je značajno porasla posle događaja koji su posledica sukoba u Ukrajini iz proleća 2022. god. Poljoprivrednici u Evropi se sučeljavaju sa posledicama energetske zavisnosti EU od ruskog gasa i rastućim cenama energije, kao i rekordne cene đubriva

jer oko 30% industrijskih đubriva dolazi iz Rusije. Ovo dovodi u pitanje i obezbeđenje dovoljnih količina hrane. Pored toga, današnja proizvodnja i transport industrijskih đubriva je energetski intenzivan proces koji veoma doprinosi emisiji gasiva sa efektom staklene bašte. Zbog toga su potrebna alternativna rešenja za proizvodnju i korišćenje drugih vrsta đubriva među kojima je i digestat koji sa jedne strane supstituiše industrijska đubriva a sa druge, istovremeno, obezbeđuje približavanje ciljevima klimatskih politika.

1. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja je produkcija krmnog sirka (*Sorghum bicolor* L.) na zemljištu smanjenih produkcionih sposobnosti, usmerena ka korišćenju u biogas elektrani i zatvaranje ciklusa materijala kroz upotrebu nusprodukta anaerobne digestije – digestata kao organskog đubriva.

U prvom poglavlju je dat pregled literature pretražen prema ključnim rečima: agroenergetski usevi; agro-energy crops; sorghum; digestate utilization; sustainability of biogas production; environmental impact of biogas production; sa fokusom na podatke objavljene u poslednjih 5 godina. Literaturni izvori ranijeg datuma su uvršteni kada treba naglasiti da su neka saznanja poznata u dužem vremenskom periodu. Takođe, dat je opis biogas elektrane Bioenergy u Ilandži (opština Alibunar, Južnobanatski okrug, AP Vojvodina, Republika Srbija), koja je izabrana kao industrijsko postrojenje pogodno za realizaciju istraživanja i u kome se primenjuju rezultati ove doktorske disertacije. Rezultati ove disertacije treba da omoguće bolje sagledavanje mogućnosti održivog snabdevanja sirovinama biogas elektrana u Srbiji, što je i dato u poglavlju Diskusija. U proizvodnji električne energije iz biogasa dobijenog AD procesom identifikovani su mnogobrojni uticaji na ekološku, ekonomsku i socijalnu održivost sa aspekta energetike, poljoprivrede, očuvanja životne sredine, ekonomije i politike kao i njihovi, često, vrlo isprepleteni međusobni odnosi.

38

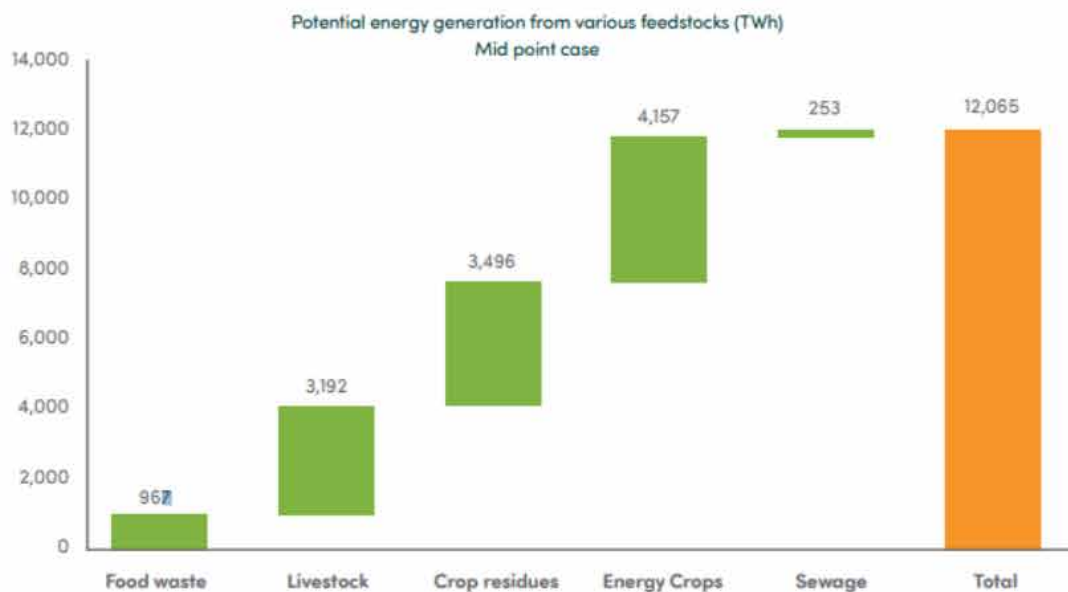
Analiza životnog ciklusa (*Life Cycle Analysis - LCA*), koja se uobičajeno koristi pri proceni uticaja na životnu sredinu nije predmet ove doktorske disertacije.

1.1. Biogas – stanje i perspektive

1.1.1. Biogas u svetu

Svetska asocijacija za biogas (*World Biogas Association - WBA*) objavila je izveštaj o biogasu i anaerobnoj digestiji (AD) za 2019. god. sa ciljem da istakne potencijal AD kao tehnologije za generisanje obnovljive energije, smanjenje emisije gasova staklene bašte i

obnavljanje organskih hranljivih materija i ugljenika u zemljištu. Kako se navodi u izveštaju: „uprkos nizu stavova o klimatskoj krizi, globalna zajednica je zaista prepoznala izazove sa kojima se čovečanstvo suočava, kroz obavezu potpisanu u Parizu 2015. Ovo potvrđuje potrebu za akcijom za suzbijanje i ublažavanje efekata porasta temperature, gubitka biodiverziteta, smanjene dostupnosti vode za piće, povećanog pritiska usled vanrednih vremenskih prilika, gubitka površinskog sloja tla i dezertifikacije. Razvoj alternativnih metoda tretmana otpada (umesto odlaganja na otvorenim prostorima) i potreba za izvorima energije na bazi nefosilnih goriva (zamena uglja, nafte i gasa), doveli su do rasta anaerobne digestije (AD), industrije koja proizvodi biogas.



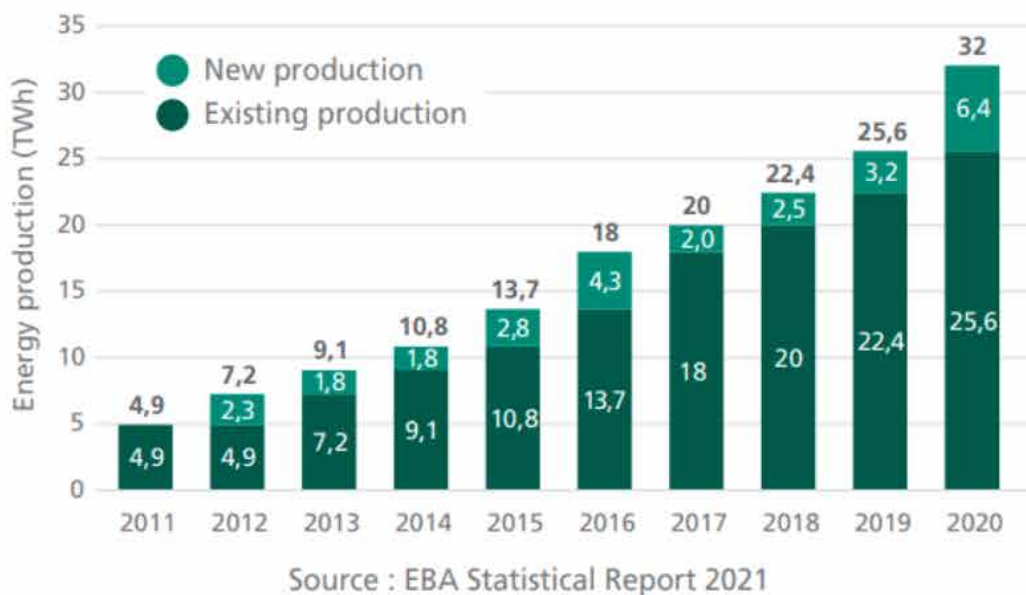
Slika 1. Potencijal generacije energije u svetu (Izvor: WGA report 2019.)

Emisije se mogu smanjiti sa 4.360 na 3.290 Mt CO_{2ek}, što je ekvivalentno 10% - 13% trenutnih svetskih emisija gasova staklene bašte, kroz akcije: AD otpada i deponijskih gasova, izbegavanje proizvodnje fosilnih đubriva, spaljivanja useva i krčenja šuma. Prema izveštaju, „gore navedeno znači da, uprkos 50 miliona mikro-digesteru, 132.000 malih, srednjih i velikih digestora i 700 postrojenja za nadogradnju koja rade širom sveta, koristimo samo 1,6 - 2,2% globalnog potencijala AD. Potencijal za rast industrije biogasa je zbog toga izvanredan i uključuje svaku zemlju”. Kada se posmatraju potencijali prema vrsti sirovina, može se zapaziti

da, od ukupno 12065 TWh, 4157 TWh pripada energetske usevima, a tome treba dodati i još 3496 TWh od žetvenih ostataka. Potencijali biomase različitih vrsta otpada, kao što je otpad od stočarstva, otpad od hrane i kanalizacioni mulj, zajedno se procenjuju na oko 4300 TWh (Slika 1).

1.1.2. Biogas u Evroskoj Uniji

U Evropi je registrovano ukupno 1.023 postrojenja za proizvodnju biometana do oktobra 2021. Od toga, 994 postrojenja je locirala EBA (*European Biogas Asociacion*) i prikazala na mapi (EBA Statistical report 2021) (Slika 2). U poređenju sa prethodnim izdanjima evropske mape biometana, broj postrojenja u Evropi se naglo povećao (483 postrojenja u izdanju 2018. i 729 u izdanju 2020.).



Slika 2, Produkcija biometana u GIE (67 članova u 27 država Evrope) (Izvor: GIE_EBA_BIO_2021_A0_FULL_3D_253_online.pdf)

Proizvodnja biometana je zabeležila značajan rast u poslednjoj deceniji. Dok brojke za 2021. još nisu u potpunosti konsolidovane, u 2020. godini zabeležen je najveći godišnji porast proizvodnje biometana do sada, ukupno 32 TWh biometana u Evropi. Rast proizvodnje u 2020. godini bio je zapravo duplo veći u odnosu na prethodnu godinu, a za 2021. godinu je za očekivati još veći rast.

Rekordan broj novih biometanskih postrojenja počeo je proizvodnju 2020. godine i očekuje se da će biti u potpunosti operativne tokom 2021. Poznato je da je 47% biometanskih postrojenja trenutno aktivnih u Evropi povezano na distributivnu mrežu, a 20% je povezano na transportnu mrežu, 10% evropskih biometanskih postrojenja nema priključak na mrežu, a za preostalih 23% evropskih postrojenja nema informacija.

1.1.3. Biogas u Republici Srbiji

Prema Odluci o utvrđivanju energetskog bilansa Republike Srbije za 2021. god. "Planirani kapaciteti za proizvodnju električne energije u Republici Srbiji za 2021. godinu iznose ukupno 8222,48 MW (snaga na pragu elektrane) od čega Elektrane na biogas, snage 27,506 MW od kojih će 23,29 MW koristiti podsticajne mere za proizvodnju električne energije".

Tabela 1: Učešće biogasa u energetsom bilansu Republike Srbije, prema Odluci o utvrđivanju
energetskog bilansa Republike Srbije za 2021

ZBIRNI ENERGETSKI BILANS REPUBLIKE SRBIJE									
REPUBLIKA SRBIJA (bez podataka za KiM)	fizičke jedinice	REALIZACIJA 2019		PROCENA 2020		PLAN 2021		2020/2019	2021/2020
		fizičke jedinice	Mil ten	fizičke jedinice	Mil ten	fizičke jedinice	Mil ten	%	%
PROIZVODNJA PRIMARNE ENERGIJE		-	10.205	-	10.237	-	10.122	100	99
Ugalj	1000 t	38881	6.826	39607	6.937	39069	6.936	102	100
Nafta (sa poluproizvodima)	1000 t	881	0.931	861	0.910	799	0.809	98	89
Gas	Mil m ³	439	0.349	403	0.321	395	0.314	92	98
Hidropotencijal (bez RHE)	GWh	9457	0.813	8667	0.745	8528	0.733	92	98
Geotermalna energija	TJ	220	0.005	220	0.005	220	0.005	100	100
Biomasa	TJ	49151	1.174	49745	1.188	49970	1.194	101	100
Biogas	TJ	1190	0.028	1721	0.041	1556	0.037	145	90
Solarna energija	GWh	14	0.001	14	0.001	13	0.001	103	93
Energija vetra	GWh	898	0.077	1.030	0.089	1.077	0.093	115	105
PROIZVODNJA ENERGIJE TRANSFORMACIJOM	Mtoe	-	8.680	-	8.652	-	9.454	100	109
NA BIOGAS	GWh	127	0.011	169	0.014	125	0.011	133	74

Bruto proizvodnja električne energije u 2021. godini planira se u iznosu od 38417 GWh. Elektrane na biogas koje koriste podsticajne mere 125 GWh; Planirano korišćenje biogasa u 2021. godini za proizvodnju električne i toplotne energije je 0,0181 Mtoe, što je za 34% manje u odnosu na procenjenu vrednost u 2020. godini u iznosu od 0,0272 Mtoe. Učešće biogasa u energetsom bilansu Srbije je prikazano u tabeli 1.

Prema “Balansu biogasa za 2020. godinu” Zavoda za statistiku, ukupno raspoloživa energija iznosi 79.527.000 m³, odnosno 1.624 TJ energije. U Srbiji su registrovane 24 biogas elektrane koje su počele sa radom od 2011. do 2021. god, najviše posle 2016. god., sa ukupnom instalisanom snagom od 9.415 kW. Neke od biogas elektrana imaju prijavljenu instalisanu snagu 999 kW, što je verovatno u vezi zakonske obaveze procene uticaja na životnu sredinu biogas postrojenja sa instalisanom snagom 1 MW ili više (Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu). Ministarstvo energetike najavljuje izgradnju još 73 biogasne elektrane, kao i pripremu novog zakona o obnovljivim izvorima energije. Za Srbiju ne postoje zvanični podaci o strukturi sirovina koje se koriste u biogas elektranama.

1.1.4. Biogoriva, biomasa, bioekonomija

U aprilu 2020. je održana 28. po redu Evropska Konferencija o biomasi EUBCE, pod sloganom: Biogoriva, biomasa, bioekonomija. U poruci generalnog predsedavajućeg Pjer-Frank Ševe se ističe da je konferencija strukturisana oko šest glavnih tema koje pokrivaju održivu upotrebu biomase, uključujući pretvaranje u proizvode na bazi biomase, proizvodnju bioenergije, konverziju u hemijske intermedijere i biogoriva. Sve ove teme ilustruju kako je biomasa ključni element ekološke tranzicije. Međutim, ostaje da se prevaziđu mnogi izazovi kako bi se razvili sektori koji eksploatišu ovaj obnovljivi resurs, bilo da je poljoprivrednog ili šumskog porekla, ili potiče od zelenog otpada ili industrijskih nusproizvoda. Transverzalna refleksija je tada neophodna da bi se optimizovala proizvodnja, prikupljanje i oporavak za sve dotične ekonomske sektore. Ova refleksija nas navodi da ponovo razmislimo o našim poljoprivrednim sistemima (agrošumarstvo, razvoj biljnog pokrivača, diverzifikacija plodoreda, itd.), korišćenje žetvenih ostataka ili namenskih useva.

Biogoriva su dobar primer sektora koji uz korišćenje lokalnih sirovina predstavlja izvor zapošljavanja. Sasvim očigledno, čini se da je neophodno razvijati ovaj sektor dopunom trenutne ponude biogoriva prve generacije proizvedenih iz resursa koji se takmiče sa upotrebom hrane (biljno ulje, repa, kukuruz, pšenica, šećerna trska, itd.) sa ponudom naprednih biogoriva proizvedenih od otpada (drvo, slama, industrijski, urbani ili organski nusproizvodi domaćinstva, energetski usevi na marginalnom i zagađenom zemljištu, itd.). Rad konferencije se odvijao u 6 sekcija: Konverzija biomase u *biobased* proizvode; Dostupnost i snabdevanje održivom

bioenergijom u EU i šire; bioenergetska rešenja za privredu; Tehnološke inovacije za konverziju biomase u bioenergiju; Konverzija biomase u intermedijerne nosače bioenergije; Različiti aspekti tranzicije ka budućoj dekarbonizovanoj ekonomiji.

Još jedan važan pokretač dolazi iz javnih politika koje moraju podsticati, na svim nivoima, razvoj upotrebe biomase pružanjem okvira prilagođenog razvoju tehnologija i industrijskih sektora, doprinoseći izgradnji snažne bioekonomije. U tom kontekstu, bioekonomija takođe nudi realnu priliku za generisanje inovacija, jačanje konkurentnosti industrije uz obezbeđivanje održivih rešenja za ekološke i društvene izazove sa kojima se društvo danas suočava. To će, takođe, doprineti povećanju energetske nezavisnosti Evrope, čija je snažna zavisnost od uvoznih fosilnih energetskih resursa naglašena rusko-ukrajinskim sukobom. EUBCE zajednica stoga mora da se mobiliše da promeni propise kako bi doprinos biomase bio bolje uzet u obzir u mapi puta Evropske unije „Fit for 55“. Međusektorski paket “Fit for 55” predstavlja regulatorni kontekst za ubrzavanje obaveze EU za postizanje smanjenja neto emisija od najmanje 55% do 2030. godine, po kome će svi sektori industrije morati da daju svoj doprinos, a među njima šumarstvo i poljoprivreda. Cilj je da između 2021. i 2030. godine države članice EU osiguraju da emisije gasova sa efektom staklene bašte iz korišćenja zemljišta, promene namene zemljišta i/ili šumarstva, budu u ravnoteži sa uklanjanjem CO₂ iz atmosfere. Ovo znači uključivanje i intenziviranje ‘carbon farming initiatives’ s namerom da se poveća skladištenje ugljenika u sektoru poljoprivrede. U decembru 2021. godine, Evropska komisija je ozvaničila prednosti prirodnog skladišćenja i korišćenja CO₂ koji se primjenjuje u proizvodnji biogasa. Ovo je, svakako, pozitivan korak prema potpunom prepoznavanju ekoloških prednosti održive proizvodnje biogasa i biometana (<http://www.etaflorence.it/proceedings/>).

1.2. Konverzija energije i kruženje elemenata biomase u proizvodnji biogasa

1.2.1. Biogas

Proizvodnja biogasa putem procesa anaerobne digestije je oblik obnovljivih izvora energije (OIE) koji ima najveći potencijal u cirkularnoj ekonomiji. Proces se odnosi na razgradnju organske materije aktivnošću mikroorganizama. Tom prilikom se proizvodi biogas koji sadrži 50 - 75% metana (Tabela 2).

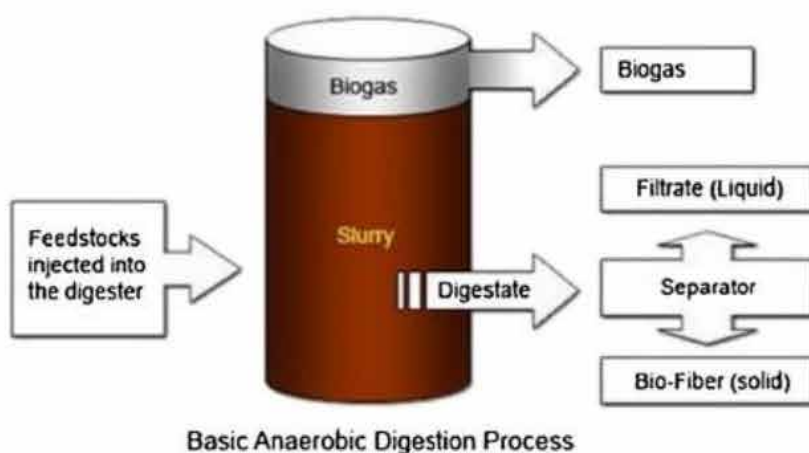
Tabela 2. Sastav biogasa (Izvor: Kaltschmitt and Hartmann, 2001)

Sastojak	Hemijski simbol	Zapreminski udeo (%)
Metan	CH ₄	50-75
Ugljen dioksid	CO ₂	25-45
Vodena para	H ₂ O	2-7
Kiseonik	O ₂	< 2
Azot	N ₂	< 2
Amonijak	NH ₃	< 1
Vodonik	H ₂	< 1
Vodonik sulfid	H ₂ S	20-20000ppm

Glavni ciljni proizvod proizvodnje biogasa je metan, a svi drugi gasovi sadržani u biogasu su nepoželjni i smatraju se zagađivačima biogasa. Takve komponente smanjuju gustinu, kalorijsku vrednost i Vobeov indeks biogasa. H₂S i NH₃ komponente u biogasu su toksične i izuzetno korozivne, oštećujući metalne delove proizvodnih jedinica i kombinovanu toplotu i snagu putem emisije SO₂ prilikom sagorevanja. Relativni sadržaj CH₄ i CO₂ u biogasu uglavnom zavisi od prirode supstrata i pH vrednosti u reaktoru; N₂ se pojavljuje iz rastvorenog vazduha u podlozi; vodena para dolazi iz supstrata na termofilnim temperaturama; vodonik sulfid nastaje iz sulfata supstrata, a amonijak nastaje razgradnjom od jedinjenja koja sadrže azot kao što su proteini, urea i mokraćna kiselina. Komercijalizovane su razne metode kondicioniranja biogasa za uklanjanje neželjenih jedinjenja, a najčešće se koriste prečišćavanje vodom, hemijska

adsorpcija, apsorpcija pri promeni pritiska, membransko i kriogeno odvajanje (Kulichkova et al. 2020).

Biogas koji sadrži 55% CH_4 ima kalorijsku vrednost 21.5 MJ/Nm^3 , dok čisti CH_4 ima kalorijsku vrednost 35.8 MJ/Nm^3 . Posle kondicioniranja biogas se može direktno koristiti u stacionarnim ili mobilnim sistemima na isti način i istom tehnologijom kao prirodni gas. Takođe, može se (što je najčešći slučaj) odvesti na turbinu koja pokreće generator električne energije. U kogenerativnom procesu se proizvodi električna energija i toplota. Posle izdvajanja biogasa u reaktoru ostaje tečna materija – digestat koji sadrži značajne količine biljnih nutrijenata (Slika 3).



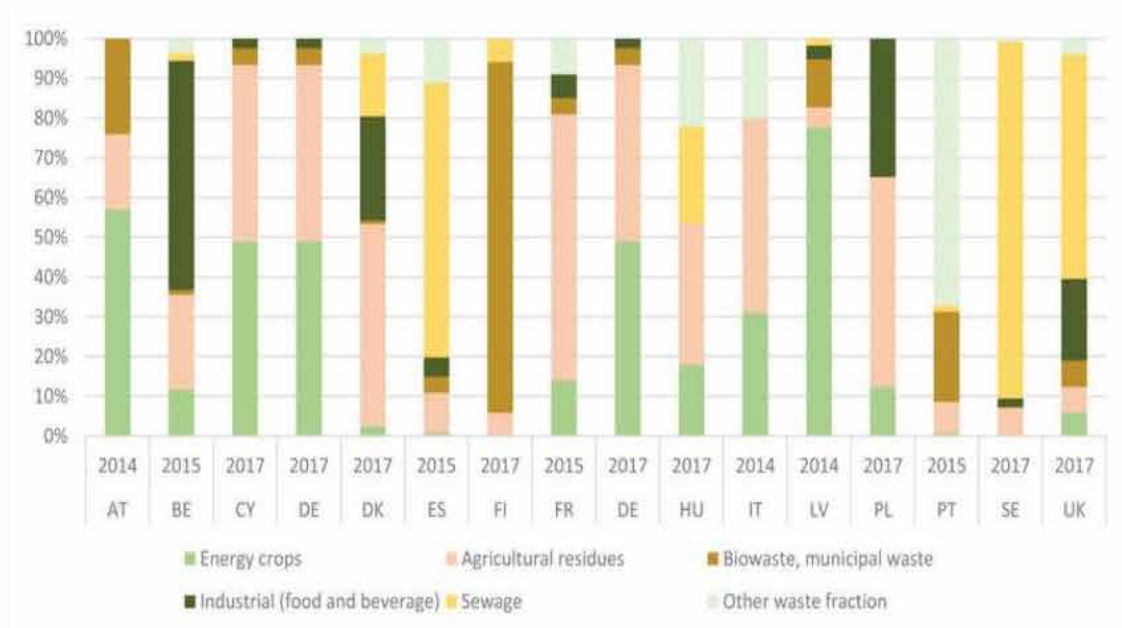
Slika 3. Osnovni procesi anaerobne digestije sa dva produkta: biogas i ukupni anaerobni digestat
(Izvor: Nkoa 2014)

U AD kao sirovina ulazi biomasa koja može biti veoma različitog kvaliteta u odnosu na poreklo: žetveni ostaci, otpad iz prerade hrane, biorazgradivi deo komunalnog otpada, tečni i čvrsti stajnjak, životinjski otpad sa farmi, mulj iz postrojenja za biološko prečišćavanje vode, energetske usevi. Svi nabrojani, osim poslednjeg, imaju nizak sadržaj energije, pa su energetske usevi neophodni radi ostvarivanja opravdanosti proizvodnje biogasa (Tabela 3).

Tabela 3. Poređenje prinosa biogasa i električne energije proizvedenih od različitih supstrata (uz uslove: 35% efikasnosti konverzije energije u biogasnoj elektrani, Toplotna moć 21 MJ/m³, 55% sadržaj metana, 3.6 MJ/kWh (Izvor: Bharathirajaa et al. 2018)

Sirovina	Produkcija biogasa (m ³ /t _{SuM})	Produkcija energije (kW h/ t _{SuM})
Govedi čvrsti stajnjak	55–68	122.5
Pileći stajnjak sa prostirkom	126.0	257.3
Mast	826–1200	1687.4
Otpad od hrane (dezinfikovan)	110	224.6
Otpad od voća	74	151.6
Konjski stajnjak	56.0	114.3
Silaža kukuruza	200/220	409.6
Komunalni čvrsti otpad (biorazgradivi deo)	101.5	207.2
Svinjski stajnjak	11–25	23.5
Kanalizacioni mulj	47.0	96.0

U evropskim zemljama, do 70% sirovina koje se koriste za proizvodnju biogasa dolazi iz poljoprivrednog sektora kao što su agroenergetski usevi, stajnjak i poljoprivredni ostaci. Prema Evropskom udruženju za biogas (Slika 4), agroenergetski usevi čine 50 ili više procenata kao supstrat za proizvodnju biogasa u Austriji, na Kipru, u Nemačkoj i Letoniji; za poređenje, poljoprivredni ostaci čine 40% - 60% u proizvodnji biogasa na Kipru, u Nemačkoj, Danskoj, Francuskoj, Italiji i Poljskoj među 16 analiziranih zemalja (Kulichova et al. 2020).



Slika 4. Upotreba sirovine za proizvodnju biogasa u evropskim zemljama (isključujući deponije), izraženo kao maseni procenat. (Izvor: Kulichova et al. 2020 prema Calderon C, Colla M, Jossart J-M, Hemeleers N, Martin A, Aveni N et al. Statistical report: Biogas 2019)

Čvrsti i tečni stočni stajnjak

Farme širom sveta često rasipaju sirovi (neobrađeni) stajnjak direktno na zemljište. Ova praksa emituje ogromne količine metana (CH_4) i azot oksida (N_2O) koji su gasovi sa potencijalom globalnog zagrevanja od 36 do 298 puta većim od CO_2 u 100-godišnjem periodu. AD smanjuje ove direktne emisije dok vraća hranljive materije i vredne organske materije koje se nalaze u stajnjaku nazad u zemljište (WBA 2021).

Stajnjak je pogodnije koristiti kao supstrat za AD nego direktno kao đubrivo, jer sadrži značajne koncentracije nutrijenata, ali i patogena (Neshatsar 2017), pa direktna aplikacija na njivu može prouzrokovati zagađenje podzemnih voda i tla. Korišćenjem stajnjaka kao sirovine za AD, smanjuju se negativni uticaji na životnu sredinu: emisije ugljen-dioksida, metana, azot-oksida; smanjenje otpada, neprijatnih mirisa; uništavanje patogena (naročito kada AD radi u termofilnim uslovima). S druge strane, upotreba samo životinjskog đubriva, stajnjaka, u AD pokazuje neke nedostatke i ograničenja, a najznačajniji je nizak odnos ugljenik/azot (C / N)

(Neshat et al. 2017). Iako je stajnjak određen kao osnovni supstrat za biogazna postrojenja, naročito u zemljama sa intenzivnom stočarskom proizvodnjom (Francosar 2019), to uslovljava nizak prinos biogasa ($10 \div 20 \text{ m}^3 / \text{t}$ svežeg stajnjaka). Da bi se ovaj nedostatak prevazišao treba primeniti metode prethodne obrade, ko-digestiju sa drugim biorazgradivim organskim supstratima ili kombinaciju oba pomenuta metoda. Za ko-digestiju je najbolje koristiti biomasu energetskih useva, jer ona sadrži više energije od drugih potencijalnih sirovina (Tabela 3). Energetski usevi koji se uglavnom koriste kao sirovina u proizvodnji biogasa putem AD, najčešće kukuruz, predstavljaju pretnju njihovom korišćenju za ishranu ljudi ili životinja za razliku od obilnih količina lignocelulozne biomase ostataka iz ratarske proizvodnje, koji poseduju odgovarajući biohemijski potencijal metana (BMP) (da Cruz Ferraz Dutra et al. 2022).

1.2.2. Digestat

Potražnja za naprednim poljoprivrednim sistemima je u poslednje vreme izuzetno porasla izazvana sve većom potražnjom stalno rastuće ljudske populacije, a kao posledica ograničenog zemljišnog resursa. Ovi zahtevi su fokusirani, ali nisu ograničeni na ova tri izazova: a) sigurnost hrane, b) prihod za farmere, c) zaštita životne sredine. Da bi se ispunili nabrojani zahtevi, primenjuju se inovativne prakse upravljanja poljoprivredom kao što su organska poljoprivreda, agroekološke metode i ekološki prihvatljive metode kako bi se zadovoljili i nadmašili ovi ciljevi na dugoročno održiv način. Jedan od obećavajućih metoda upravljanja poljoprivredom je podsticanje primene digestata na poljoprivrednom zemljištu (Odlare et al. 2011; Nkoa 2014; Abubaker et al. 2015). Procenjuje se da se u EU godišnje proizvede 180 miliona tona anaerobnih digestata, od čega se većina koristi kao organsko đubrivo. Nastaje iz različitih izvora organskih sirovina, koji uključuju tretman otpadnih voda (primarni i sekundarni mulj), otpad poljoprivredno-prehrambene industrije (prerada mesa i mleka), deo čvrstog komunalnog otpada uključujući nusproizvode od voća i povrća, otpad iz restorana, kuhinjski otpad, zeleni otpad (otpad od održavanja zelenih površina), životinjski otpad (čvrsti i tečni stajnjak) i otpad iz ratarstva (Doyeni et al. 2021).

Digestat je konkurentan sa neorganskim đubrivima sa aspekta poboljšanja produktivnosti useva, kroz prinos i poboljšanje kondicije zemljišta. Jedna od prednosti upotrebe digestata je veći sadržaj hranljivih materija od njihove odgovarajuće sirovine. Iz nastalog digestata, značajna količina azota (N) u obliku amonijaka se emituje tokom procesa anaerobne

digestije, dok se ugljenik (C) takođe uklanja kao ugljen-dioksid. Međutim, dobar udeo hranljivih materija kao azot (N), fosfor (P) i kalijum (K) se zadržavaju. Mineralni sadržaj i karakteristike digestata zavise, uglavnom, od karakteristika supstrata i modaliteta fermentacije (Häfner et al. 2021). Digestat ima višestruke benefite za zemljište kao i za sistem zemljište/biljka (usev). U prvom slučaju, poznato je da digestat ima svojstva koja pomažu produktivnosti biljaka zbog dostupnosti važnih hranljivih materija neophodnih za njihov rast. Drugo, uticaj na kondiciju zemljišta ne može se preneglasiti, jer digestat ima važnu ulogu kroz kruženje hranljivih materija u zemljištu, transformaciju ugljenika i održavanje strukture zemljišta (Przygocka-Cyna et al. 2018). Primena digestata u polju bi mogla imati manje kratkoročnih rezultata zbog spore stope mineralizacije ili dejstva mikroorganizama. Ovo se naročito odnosi na azot koji je esencijalni element za rast biljaka i mikrobnu aktivnost zemljišta, a ujedno predstavlja nutrijent koji biljke uzimaju u najvećoj količini, pa je tako najčešće zajednički ograničavajući faktor rasta biljaka.

Digestat nastao u AD procesu se može svrstati u tri tipa: ukupni (whole) – osnovni na izlazu iz fermentora i sadrži manje od 15% suve materije, tečni i čvrsti (solid fraction) koji nastaju razdvajanjem ukupnog uz primenu različitih tehnologija i metoda purifikacije. Tečni digestat sadrži do 90% vode, oko 2% - 6% suve materije, čestice veličine manje od 1.2 mm i najveći deo rastvorenog azota i kalijuma. Čvrsti digestat sadrži najveći deo fosfora u suvoj materiji koje ima više od 15 (Tampio et al. 2016). Sastav digestata, a time i njegova potencijalna vrednost, odnosno mogućnost upotrebe, kao i ukupni ekološki rizici zavise od kvaliteta sirovina AD procesa (pH, sadržaj raznih hemijskih jedinjenja i elemenata, odnos C/N, veličine čestica, biološki agensi), procesa u fermentoru (temperatura, inokulum, mikrobijalna zajednica, hidrauličko vreme zadržavanja) kao i od pretretmana (Tabela 4).

Za produkciju upotrebljivog, kvalitetnog digestata sirovina mora da sadrži izbalansirane nutrijente – najznačajniji je C/N odnos, da bi omogućila optimalni tok biorazgradnje organske materije. U slučaju suviše visokog C/N odnosa se smanjuje puferski kapacitet, a u slučaju suviše niskog odnosa dolazi do stvaranja amonijuma koji inhibira biološki proces. U oba slučaja se umanjuje produkcija biogasa. Kao optimalan C/N odnos se uzima 20-30 (za otpad od hrane može do 15). Digestat sa C/N u odnosu 15-20 se smatra pogodnim za primenu u ratarstvu bez dodatnog tretmana (Jurgutis et al. 2021).

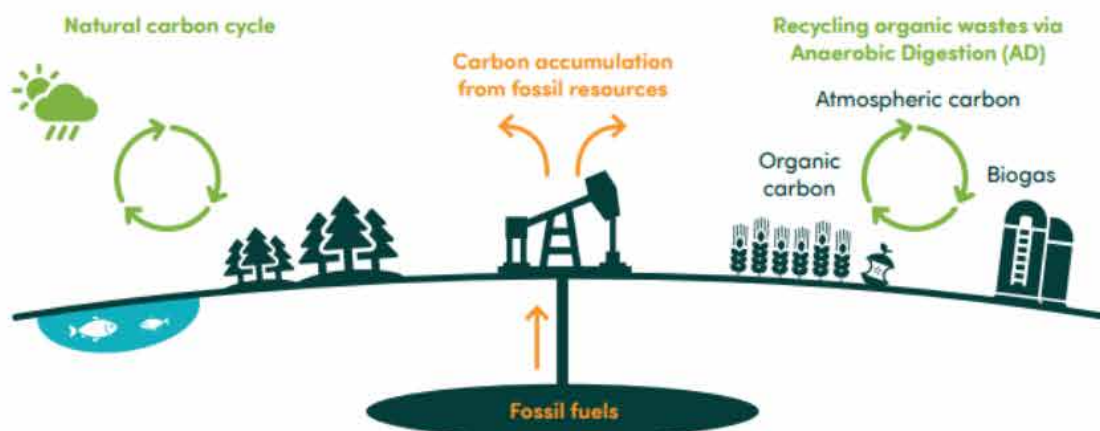
Tabela 4. Hemijski sastav digestata i odgovarajuće sirovine (Izvor: Sorensen et al. 2011). SuM suva masa; OM organska materija

Sirovina	N _{tot} kgN/t	N _{NH4} kgN/t	N _{NH4} / N _{tot} %	SuM	OM	pH
Detelina+trava	4.53	2.75	61	5.18	3.65	7.81
lupina	2.78	1.90	68	3.50	2.34	7.71
Triticale+grahorica	2.69	1.58	59	5.25	4.06	7.48
Goveđi stajnjak (organska farma)	2.92	1.44	49	6.95	5.09	8.17
Digestat goveđeg stajnjaka (organska farma)	2.94	1.81	61	4.65	3.08	8.09
Goveđi stajnjak	3.00	1.63	54	6.43	5.28	6.72
Digestat goveđeg stajnjaka	3.05	2.03	67	4.82	3.60	7.52
Svinjski stajnjak	2.81	2.18	78	3.45	2.50	7.71
Digestat svinjskog stajnjaka	2.57	2.45	95	1.46	0.73	8.40

1.2.3. Kruženje elemenata

Proizvodnja biogasa je okvir u kome se odvijaju različiti ciklusi: ugljenika, azota, energije, a u ovom radu će biti prikazani sa aspekta značaja korišćenja digestata u cilju postizanja ekološke i ekonomske održivosti prema konceptu cirkularne ekonomije.

Pojam dekarbonizacija obuhvata smanjenje emisije CO₂ (ugljen-dioksid) i CH₄ (metana). Pošto je ugljen-dioksid manje štetan od metana, dekarbonizacija se, takođe, može odnositi na konverziju metana do manje štetnih gasova. Metan je snažan GSB sa potencijalom globalnog zagrevanja 28 - 36 puta većim od ugljen-dioksida (CO₂) u periodu od 100 godina. U stvari, kada se fokusiramo na prvih 20 godina od emitovanja, atmosferski metan je 85 - 87 puta štetniji od ugljen-dioksida. Stoga je od ključne važnosti da se odmah pozabavimo emisijom metana (WGA 2021).



29

Slika 5. Kruženje ugljenika (izvor: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-global-greenhouse-gas-emissions>)

Produkcija biogasa putem AD procesa je teoretski karbon neutralna: sav ugljenik koji se na kraju procesa ispušta u životnu sredinu će ponovo biti vezan u organsku materiju u procesu fotosinteze. Fotosinteza obezbeđuje rast i razviće biomase energetskih useva, odnosno produkciju materije koja se koristi kao sirovina u AD procesu. U praksi bilans ugljenika nije 0. Koliko će ugljenika, u formi $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$, ipak biti emitovano u atmosferu zavisi od mnoštva bioloških i tehnoloških činilaca od kojih neki imaju direktni, a neki indirektni uticaj. Od direktnih bioloških uticaja je najznačajniji: vrsta energetskih useva. Vrste koje fotosintezu vrše C4 putem su efikasnije u produkciji organske materije (šećerna trska, miskantus, kukuruz, sirak) od vrsta koje koriste C3 put fotosinteze (pšenica). Među njima neke produkuju lignoceluloznu biomasu (u koju spadaju žetveni ostaci) koja je manje pogodna za AD, pa je neophodan odgovarajući pretretman.

Da bi se odredilo koji delovi procesa proizvodnje biomase energetskih useva najviše utiču na bilans ugljenika neophodno je uraditi analizu životnog ciklusa (Slika 5). Ova kompleksna analiza obuhvata sve ili što je moguće veći broj koraka, kao i emisije ugljenika pri svakom od njih. Razvijeni su matematički prognostički modeli (Helming & Nendel 2017) koji se zasnivaju na izračunavanju ekološkog otiska za ugljenik. Glab & Sovinski (2019) su istraživali uticaj digestata na produktivnost sirka i emisiju CO_2 : prinosi su bili na nivou kao kada se primenjuju industrijska đubriva od kojih azotna najviše doprinose emisiji gasova sa efektom staklene bašte (GSB) oko 54%; $\text{CO}_{2\text{eq}}$ se smanjuje za 11% uz digestat.

Za produkciju biomase energetske useve koja je dovoljna da zadovolji kriterijume održivosti neophodna je primena agrotehničkih mera, prvenstveno đubrenja koje obezbeđuje dovoljne količine makro i mikro-nutrijenata. Ukoliko se koristi industrijski proizvedeno đubrivo, pored visokih pritisaka na životnu sredinu tokom njihove proizvodnje, mora se uzeti u obzir i njihov uticaj na kvalitet zemljišta, odnosno njegove produkcijske sposobnosti. Aplikacija digestata omogućava redukciju ili potpunu supstituciju mineralnih đubriva uz istovremeno očuvanje biološke produktivnosti zemljišta. Najveći udeo nutrijenata koji se nalaze u sirovinama u AD procesu se zadržava u digestatu. Stajnjak sadrži oko 49 g N/kg SM i 6 g P/kg SM, energetski usevi, 17 g N/kg SM i 2.5 g P/kg SM, žetveni ostaci oko 27 g N/kg SM i 3 g P/kg SM (Guliano et al, 2013).

Azot, fosfor i kalijum u digestatu se nalaze u formama koje su pristupačnije mikroorganizmima zemljišta i biljkama tako da ih oni efikasnije koriste u odnosu na mineralna đubriva. Ovime se postiže nekoliko prednosti: u odnosu na azot – u digestatu se nalazi optimalan odnos C/N (što znači da nema viška azota koji bi se ispirao u podzemne vode odnosno površinske vodotokove gde izaziva eutrofikaciju, a C omogućava nesmetano formiranje humusa, iako se zemljište koristi za intenzivnu poljoprivredu; u odnosu na fosfor – supstituiše se mineralni fosfor čije svetske rezerve su pri iscrpljivanju i izbegava se zagađenje teškim metalima, koji često prate industrijska fosforna đubriva.

Digestat ima dvostruku ulogu u savremenoj poljoprivredi: čini mineralne elemente dostupnim zemljišnim mikroorganizmima i biljkama dok istovremeno doprinosi skladištenju ugljenika u zemljištu. Nedavno objavljeni rezultati koji se odnose na analizu stope mineralizacije azota i ugljenika iz pet najreprezentativnijih tokova sirovine u Evropi (svinjski stajnjak, pileći stajnjak, energetski usevi, otpadni mulj i otpad od hrane) ukazuju na potencijal upotrebe digestata za sekvestraciju ugljenika. Mineralizacija azota u digestatu kreće se u intervalu od 21% do 39%, u zavisnosti od primenjene sirovine: najmanje za kanalizacioni mulj, a najviše za svinjski stajnjak. U slučaju ugljenika, moguće je akumulirati u zemljištu 50 - 80% ukupnog organskog ugljenika iz digestata, koji se koristi kao organsko đubrivo, odnosno 205 do 553 kg ugljenika po hektaru uz upotrebu 170 kg/ha digestata (Reuland et al. 2022). Odnosi sadržaja ukupnog ugljenika prema ukupnom azotu (TC:TN) ($r = -0.83$, $p < 0.05$) i amonijum azota prema ukupnom

² azotu ($\text{NH}_4 + \text{-N:TN}$) ($r = 0.83$, $p < 0.05$) su u visokoj korelaciji sa $\text{N}_{\text{min,net}}$, što adekvatno oslikava potencijal đubrenja ovog proizvoda.

1.2.4. Cirkularna ekonomija digestata

Digestat (kao efluent biogas postrojenja) postao je glavno usko grlo za širenje industrije biogasa, jer proizvedena količina često premašuje kapacitet okolnih poljoprivrednih površina na koje se aplicira kao đubrivo. Povratak hranljivih materija iz digestata je obećavajuće rešenje za zatvaranje ciklusa nutrijenata i stvaranje nusproizvoda visoke dodate vrednosti. Zbog toga se i koriste brojne tehnologije daljeg kondicioniranja digestata sa ciljem efikasnijeg efekta digestata kao đubriva. Međutim, svaka tehnologija ima optimalne uslove rada, dok digestati imaju različite karakteristike zbog različitih supstrata, uslova digestije i metoda rukovanja. S druge strane, još uvek nije prijavljen generalni protokol za izbor optimalne tehnologije povratka hranljivih materija ili sekvenciranih tehnologija za različite digestate u funkciji njihovih karakteristika i uslova životne sredine. Ipak, predložen je interaktivni dijagram toka (Sobhi et al. 2022) i način za odabir najprikladnije tehnologije ili sekvencijalnih tehnika među različitim alternativama. Uključene su različite tehnologije korišćenja digestata, tehnologije odvajanja čvrstog i tečnog digestata, kao i tehnologije obrade tečne i čvrste faze.

1.3. Agroenergetski usevi

Savremeni klimatski izazovi značajno utiču na režim proizvodnje svih useva u poljoprivredi što uključuje i agroenergetske useve. Karakteristike agroenergetskih useva kao i način prikupljanja, obrade i korišćenja istih za dobijanje energije mogu dovesti do mitigacije klimatskih promena na lokalnom nivou (Baumber 2018).

Energetski usevi se posebno uzgajaju za gorivo i stoga su dizajnirani da maksimiziraju prinose energije po jedinici površine zemljišta (hektaru) uz najniže moguće troškove. Trenutno, proizvodnja biogasa postaje sve kontroverznija tamo gde se obradivo zemljište velikih razmera zauzima uz kultivaciju energetskih useva ili gde se sirovina mora transportovati na velike udaljenosti da bi stigla do proizvodnog objekta. Istovremeno, dobijanje biogasa iz agroenergetskih useva može biti korisno, posebno kada se ograničeni deo energetskih useva može dopuniti organskim otpadom i na taj način poboljšati proizvodni proces. Osim toga, kultivacija

industrijskih energetskeg useva na marginalnom, degradiranom ili napuštenom zemljištu može se smatrati kompromisnim načinom da se minimizira konkurencija u korišćenju zemljišta sa prehrambenim kulturama (Nabel 2016; Bosko, et al. 2016).

1.3.1. Opšte karakteristike agroenergetskih useva

Biomasa bioenergetskih useva je, zapravo, jedini obnovljivi izvor energije koji je karbon neutralan, jer ovi usevi apsorbuju CO₂ iz atmosfere i povećavaju njegovu koncentraciju u zemljištu. Proizvodnja biogoriva na bazi energetskeg useva pokazuje pozitivne uticaje na životnu sredinu, kako preko intenzivne fotosinteze, tako i preko smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte. Gajenje energetskeg useva dovodi do smanjenja erozije zemljišta, naročito ako se radi o višegodišnjim kulturama. Ovi usevi se mogu efikasno gajiti na marginalnim ili zagađenim zemljištima gde vrše funkciju fitoremedijacije zemljišta zagađenog teškim metalima, ugljovodonicima ili kompleksnim organskim polutantima (Xiang et al. 2020).

Zeljaste energetske kulture imaju nekoliko osnovnih karakteristika koje ih čine pogodnim za AD: efikasna konverzija sunčeve energije koja rezultira visokim prinosima, niskim agrohemijskim unosima, niskim potrebama za hranljivim materijama i vodom zbog njihovog ekstenzivnog sistema korenja, koji drži đubriva i vodu, i niskog nivoa vlage u terminu žetve. Višegodišnje biljke, takođe, imaju prednosti zbog niskih troškova osnivanja i manjeg broja godišnjih operacija. Korišćenje useva koji proizvode velike prinose biomase i/ili brzorastuće useve koji mogu da obezbede visoku proizvodnju biogasa kao izvora sirovine čini proizvodnju biogasa isplativom i profitabilnom (D'Imporzano 2018).

Bioenergetski usevi se klasifikuju u četiri generacije: I - sadrže skrob ili šećer pa ih treba prvenstveno koristiti za ishranu ljudi (kukuruz, sirak, uljana repica, šećerna trska); II – lignocelulozni usevi (muhar, miskantus, lucerka, kanarska trava, slez)) kao i drvenaste brzorastuće vrste (najčeće vrbe ili topole). U III generaciju su svrstane borealne vrste, vrste koje karakteriše posebno efikasni način fotosinteze - crassulacean acid metabolism (CAM), mikroalge, halofite iz rodova *Acacia*, *Eucalyptus*, *Casuarina*, *Melaleuca*, *Prosopis*, *Rhizophora* i *Tamarix*. Četvrtoj generaciji pripadaju energetske usevi sa posebnim svojstvima – uglavnom genetski modifikovani organizmi (Yadav et al. 2019).

Ovakve useve odlikuje više značajnih karakteristika koje se direktno odražavaju na ekološke i ekonomske faktore proizvodnje energije: niska cena proizvodnje i žetve, pristupačna tehnologija prerade, visoki prinosi, čista proizvodnja i mali otisak na životnu sredinu (Hodsmansar 2005). Tehnologija prerade i korišćenja agroenergetskih useva koja se zasniva na upotrebi post-žetvene biomase iz koje se proizvodi tečni, gasoviti ili čvrsti tip biogoriva (Jessup 2009) se kasnije razvijaju. U zavisnosti od vrste biogoriva zavisi način njene upotrebe, ali u svim slučajevima upotreba biomase u proizvodnji električne ili toplotne energije zahteva izvesne tipove modifikacije pogona za sagorevanje u odnosu na konvencijalni način dobijanja ovih vrsta energija.

O značaju agroenergetskih useva govori konferencija EUBCE 2019: 27th ⁴¹ **European Biomass Conference and Exhibition** koja se održala 27-30. maja 2019. god. u Lisabonu u Portugaliji. Sa ciljem umrežavanja eksperata iz oblasti nauke i tehnologije sa industrijom najviših standarda na globalnom nivou uz prezentaciju 650 izlaganja rezultata paralelno sa izložbom opreme za produkciju i preradu agroenergetskih useva. Razmatrani su sledeći aspekti: Biomasa kao resurs; Tehnologije konverzije biomase za grejanje, hlađenje i električnu energiju; Tehnologije konverzije biomase za nosače energije, hemikalije i materijale; Održivost biomase, uticaji politike; integracija bioenergije u energetske sistem i sekcija koja obuhvata industriju (EUBCE 2019). Jedno od pitanja koja su razmatrana je bilo: razvoj i primena inovativnih tehnologija u produkciji lignoceluloznih energetskih useva (prvenstveno miskantus i brzorastuće drveće u kratkoj ophodnji) na osnovu rezultata istraživanja na 7 tekućih projekata širom EU. Identifikovana su sledeća polja inovacija: upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom sa aspekta povećanja gustine zasada agroenergetskih useva; oplemenjivanje sa ciljem povećanja otpornosti na biotički i abiotički stres; razvoj fertilnih genotipova miskantusa; selekcija genotipova useva koji se već koriste u energetske svrhe, ⁵⁴ koji se koriste za nešto drugo a mogu se koristiti za energetske svrhe; endemične biljne vrste koje bi se u budućnosti mogle koristiti kao biomasa kao i neke egzotične vrste; plodored – koji smanjuje eroziju zemljišta, poboljšava njegov kvalitet kroz kruženje nutrijenata dobro je poznat za najčešće gajene useve, ali je malo podataka za agroenergetske useve, kao što su sirak, konoplja, kenaf; višenamenska proizvodnja, kada se isti usev koristi za dve ili više namena (sirak kao stočna hrana i sirovina za energetske konverziju); proizvodnja na marginalnim zemljištima gotovo uvek je ograničena nižim prinosima koji često mogu biti ispod granice ekonomske opravdanosti ali poseduju pogodnosti za životnu sredinu kao

što su sadržaj organskog ugljenika, erozija, biodiverzitet ili hidrološke osobine zemljišta; tehnologija žetve koja podrazumeva da će bolji rezultati biti ako se koriste specijalizovane mašine koje će operaciju obavljati u jednom prolazu, što će imati ³⁵ pozitivnan uticaj na smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte kroz smanjenu potrošnju fosilnih goriva (Gremer et al. 2019).

1.3.2. Žetveni ostaci ratarske proizvodnje

Različiti ratarski usevi se takođe mogu koristiti za produkciju biogasa sa fokusom na žetvene ostatke pri čemu su neophodna tehnološka unapređenja, a u procesu se najčešće koristi kodigestija biomase sa drugim oblicima biomase (kanalizacioni mulj, ostaci iz industrije mesa i mleka, stajnjak različitog porekla) čime se postiže zadovoljavajuća energetska i ekološka efikasnost (Sukhesh and Rao 2018).

Tabela 5. Globalni prinosi žetvenih ostataka. Izvor: (Raja 2021)

Žetveni ostatci (milioni tona)	Pirinač	Pšenica	Kukuruz	Raž	Ječam	Ovas	Uljana repica	Šećerna repa	Šećerna trska	Sirak
Procena globalnog prinosu useva	770	772	1,135	14	147	26	76	301	1,842	58
Koef. žetvenog ostatka	1,33	1,33	1,5	1,86	1,5	1,5	3	0	0,28	2,33
Koef. procesnog ostatka	0,23	0,21	0,18	0,2	0,27	0,2	0,3	0,25	0,2	0,1
Faktor oporavka	90	90	90	90	90	90	90	90	0	90
Ukupne čvrste materije	96	90,15	89,6	86	86	86	80	11,6	76,7	94,5
Organska materija	79,4	93,55	93,2	94,4	93,7	93,5	94,3	85	86,3	94,2
Prinos metana	335,6	213,43	360	179	320	240	252	360	195	340

Energetski usevi pogodni za AD su na bazi šećera, skroba i celuloze, a u poslednje vreme se razvijaju protokoli pretretmana koji će omogućiti upotrebu lignocelulozne biomase koji zavise prvenstveno od sadržaja celuloze, hemiceluloze i lignina kao i C/N odnosa (Karthikeyan and Visvanathan 2013). Ovo otvara mogućnost valorizacije značajnih količina žetvenih ostataka koji imaju povoljne karakteristike za produkciju biogasa (Tabela 5) (Raja 2021).

Nedavno je objavljen detaljan pregled koji se odnosi na uticaj vrste energetskih useva i načina prerade sirovina na proizvodnju biogasa (Kulichkova et al. 2020). Kako drvenaste vrste energetskih useva nisu pogodne za AD zbog visokog sadržaja lignina, ovde će biti razmotrene prvenstveno zeljaste travnate vrste *herbaceous*. Energetski usevi treba da zadovolje osnovne uslove: efikasnu konverziju sunčeve energije u procesu fotosinteze koja omogućava visoke prinose, niske zahteve za nutrijentima i vodom zbog dobro razvijenog korenovog sistema, niske zahteve za agrotehničkim merama, nisku cenu zasnivanja i održavanja plantaže. Osnovni činioci koji određuju prinos biogasa su vrsta i sorta (genotip) useva, vreme žetve, način čuvanja, pretretman pre AD konverzije i sadržaj fermentabilnih materija – ugljenih hidrata, belančevina i masti. Zbog toga energetski usevi koji su pogodni u nekoj zemlji ne moraju biti u svakoj drugoj. Istraživanja u severnoj Bugarskoj (Zlateva and Dimitrov 2021) ukazuju da ostaci ratarske proizvodnje čine oko 44% potencijalnih sirovina za produkciju biogasa, uz to imaju najvišu donju toplotnu moć (oko 27.11 MJ/kg) u odnosu na otpad iz stočarstva, otpad od prerade otpadnih voda ili morske alge.

Pšenična slama, kao žetveni ostatak, se može iskoristiti kao sirovina u biogas elektranama. Preporuka je da se u plodoredu sa kukuruzom gaji pšenica, zrno koristi za ishranu a slama (koja je zapravo lignocelulozna bimasa) u AD procesu. U Banatu (Republika Srbija) su ispitivane performanse pšenične slame pri čemu je ustanovljeno da prinos biogasa zavisi od genotipa (sorte) i klimatskih uslova. Potvrđeni su prinosi biomase do 3.85 t/ha i biogasa do 388.93 m³/ha (Rakašćan et al. 2020). Da bi se održivo koristila za proizvodnju biogasa, pšenična slama mora proći kroz odgovarajući postupak predobrade (mehanički, obrada parom ili alkalni tretman) pri čemu je mehanička obrada ekonomski isplativija ali je prinos biogasa manji. Razlog tome je da hemijska i termička obrada zahtevaju visoka ulaganja radi obezbeđivanja visokog pritiska ili dugog vremena zadržavanja (Andersen et al. 2020).

Gajenje leguminoznih useva doprinosi kvalitetu zemljišta (Vasileva and Vasilev 2020), pa se često koristi u plodoredu sa drugim agroenergetskim usevima, prvenstveno kukuruzom. Upoređivanjem prinosa biogasa na osnovu sadržaja organske materije u svežoj biomasi, može se videti da leguminoze i njihove mešavine imaju niži stepen biodegradabilnosti u odnosu na cerealije, time niži prinos biogasa u odnosu na svežu biomasu ali sličan prinos biometana izračunat na organsku materiju (Straus et al. 2019).

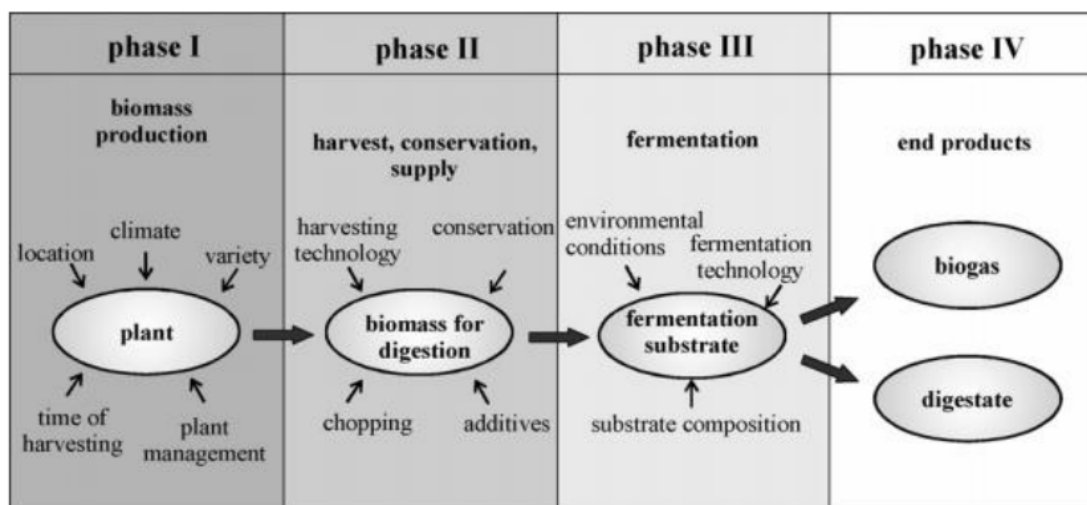
Ikanović i saradnici (2020) su ispitivali uticaj genotipa soje i ekoloških uslova na attribute biomase: visinu biljaka, broj mahuna, apsolutnu i zapreminsku masu, prinos zrna i prinos biogasa. Pokazano je da posle žetve semena ostaje oko 5 t/ha vegetativne biomase koja se sastoji od stabla i lišća što omogućava proizvodnju oko 574.33 m³/ha biogasa, što je saglasno rezultatima Milanović et al 2020 koji prijavljuju srednji petogodišnji prinos biogasa proizvedenog od soje sorte Favorit 368 m³/ha. Produktivnost soje značajno zavisi od genetskih kao i od ekoloških faktora, pri čemu ekološki uslovljavaju ekspresiju genetskih potencijala pa je neophodno vršiti ispitivanja njihove interakcije u svakom konkretnom slučaju a za državu je od velike važnosti razvoj sopstvenih genotipova (Popović et al. 2015). Zbog toga je istraživani razvoj useva i prinos biogasa tri genotipa soje razvijena u republici Srbiji – Favorit, Dukat i Laura, na černozeru u Banatu. Srednji trogodišnji prinos biogasa je bio 529.44 m³/t, u pozitivnoj veoma značajnoj korelaciji sa prinosom zrna, pozitivnoj značajnoj korelaciji sa masom 1000 zrna, visinom biljke, padavinama (Popović et al. 2020).

1.3.3. Kukuruz (*Zea mays*)

Korišćenje kukuruzne silaže je najzastupljenije zbog nekoliko razloga: biogasni potencijal i prinosi su u redu najviših (Tabela 3), ovaj usev je široko rasprostranjen, a razvijena je agrotehnika za njegovu proizvodnju koja je dobro poznata farmerima i koristi već postojeće poljoprivredne mašine, a sa druge strane tehnologija prerade u AD procesu je zrela (Chulz et al. 2018; Amon et al. 2007; Andreas Meyer-Aurich et al. 2016). Čak i postrojenja koja se grade sa ciljem prerade otpada (čvrstog ili tečnog) koriste kukuruz u kodigestiji iz energetskih potreba (Amon et al. 2007, Ormeceida et al. 2018). Međutim, proizvodnja kukuruza u industrijskom ratarstvu zahteva primenu agrotehničkih mera koje su veoma energetski zahtevne (Herrman

2013) što dovodi u pitanje energetska efikasnost celokupnog procesa proizvodnje biogasa (Oleszek & Matyka 2020). Za postizanje zadovoljavajućih prinosa je neophodno korišćenje značajnih doza industrijskih đubriva što dalje ugrožava održivost procesa sa aspekta upravljanja azotom i fosforom (Ning et al. 2012).

Kvalitet i kvantitet proizvedenog biogasa zavisi od kvaliteta kukuruza u svim fazama proizvodnje, iako je najveći uticaj u početnoj fazi kada kukuruz raste na polju gde se mogu razlikovati lokacija, klima i sorta (Slika 6). Agrotehničke mere koje se primenjuju u toku rasta kao i odabir optimalnog vremena žetve omogućavaju optimalne prinose biogasa. U narednim fazama pozitivan uticaj na prinos metana ima tehnologija konzervacije biomase dodavanjem aditiva. U sledećoj fazi se energija bioloških supstrata transformiše u biogas gde uslovi u digestoru kao što su pH, temperatura ili prisustvo inhibitora i nutritivni sastav biomase određuju prinos metana. U poslednjoj fazi se dobija biogas i digestat (Amon et al. 2007).



Slika 6. Činioci koji utiču na produkciju biogasa iz kukuruza (izvor: Amon et al. 2007)

Kukuruzna silaža je pogodna biomasa za proizvodnju biogasa jer njena produktivnost dostiže 10-30t/ha. Više od 17 000 biogasnih postrojenja u Evropi koristi kukuruznu silažu kao osnovnu sirovinu. Na primer, 2015 godine samo u Nemačkoj je radilo 8000 biogas elektrana koje su koristile više od 52% biljne biomase i 43% stajnjaka. Efikasnost procesa se ogleda u činjenici

da je 52% biljne biomase silaže proizvelo 79% energije pri čemu je 73% predstavljala silaža kukuruza, a proizvedena energija 72% (Hutnan 2016).

Potencijal za produkciju biogasa (i metana) jednogodišnjih useva (Tabela 6) ukazuju da neki drugi usevi imaju potencijal koji je blizak kukuruzu pa se na osnovu toga preporučuju za gajenje. ¹⁰ Pri tome treba imati u vidu da se kao sirovina za AD koriste različiti delovi biljke, koji imaju različit hemijski sastav od koga zavisi potencijal biogasa, pa je otežano tumačenje literaturnih podataka. Neki od ovih delova zapravo se svrstavaju u ostatke ratske proizvodnje ili sekundarne proizvode ratarstva (stabljike kukuruza, soje, suncokreta...), ali se mogu koristiti u ishrani životinja. Sa druge strane, višegodišnji usevi pokazuju nekoliko prednosti u odnosu na jednogodišnje: zaštita zemljišta od erozije, ispiranja nutrijenata, iscrpljivanja organske materije (Barbanti, et al. 2014), ali je njihova biomasa u manjem stepenu biodegradabilna, što se može prevazići optimizacijom vremena žetve i pretretmanima.

Tabela 6. Potencijal jednogodišnjih useva za produkciju metana (Izvor: Weiland, P. (2010))

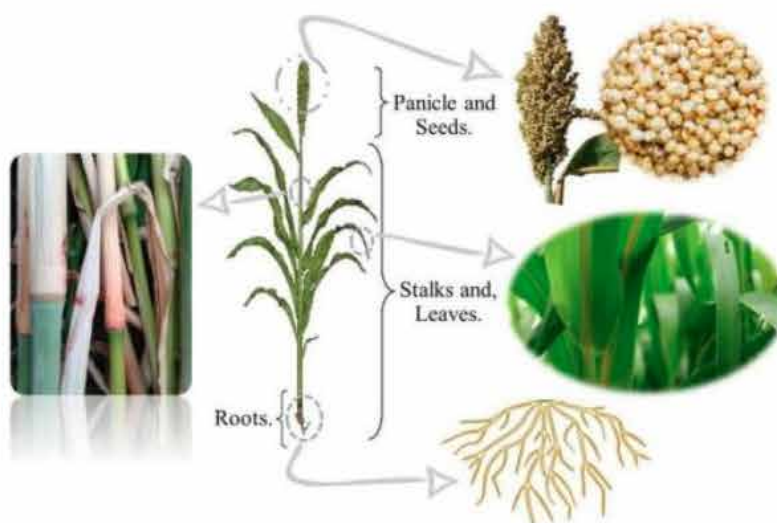
Usev	Prinos (tFM/ha)	Prinos biogasa Nm ³ /(tVS)	Sadržaj metana
Šećerna repa	40-70	730-770	53
Krmna repa	80-120	750-800	53
Kukuruz	40-60	560-650	52
Kukurizni oklasak	10-15	660-680	53
Pšenica	30-50	650-700	54
Tritikale	28-33	590-620	54
Sirak	40-80	520-580	55
Trava	22-31	530-600	54
Crvena detelina	17-25	530-620	56
Suncokret	31-42	420-540	55
Pšenica zrno	6-10	700-750	53
Raž zrno	4-7	560-780	53

U Nemačkoj je ispitivana pogodnost različitih energetske useva kao sirovine za proizvodnju biogasa u toku 8 godina na 8 lokaliteta sa akcentom na produktivnost biomase i

profitabilnost njene proizvodnje. Zabeležen je prinos kukuruza od 14.22 - 25.12 t/ha, u zavisnosti od lokaliteta, a pokazao se kao najefikasniji bioenergetski usev u centralno Evropi. Drugi usevi kao što je ozimi tritikale (cela biljka) imao je prinos 6.71 do 15.17 t/ha, a mešavina višegodišnjih krmnih trava 7.51 do 19.44 t/ha, što ih čini, takođe, povoljnim sirovinama za proizvodnju biogasa (Straus et al. 2019).

1.3.4. Sirak (*Sorghum bicolor*)

Sirak (*Sorghum bicolor*) se, trenutno, smatra petom najvažnijom žitaricom u svetu, odmah posle pšenice, kukuruza, pirinča i ječma. Sirak se može prilagoditi različitim uslovima sredine, posebno uslovima nedostatka vode. Zbog toga je ovaj usev „izvanredna energetska fabrika“ od velike koristi u poljoprivrednim regionima sa nepravilnom raspodelom padavina i visokim temperaturama vazduha. Prema Vanamala et al. (2018), sirak je naznačen kao kultura visokog potencijala za upotrebu u zaslanjenim polusušnim područjima, između ostalog, zbog svoje tolerancije na vodni stres održavajući visoku energetska vrednost u svom zrnju i, posledično, u silaži, čime je prilagođeniji semiaridnim uslovima životne sredine od drugih useva, kao što je kukuruz, na primer.



Slika 7. Usev sirka, prema: Jafari et al. (2017).

S. bicolor je kultura koja ima C4 metabolizam, prema fotoperiodičnom odgovoru je biljka kratkog dana, koju odlikuje visoka stopa fotosinteze. Tokom ciklusa rasta, stopa rasta biljke sirka zavisi i od brzine razvoja površine lista i od brzine fotosinteze po jedinici površine lista. U zavisnosti od genotipa, fiziološki aktivnog spektra svetlosti i starosti lista, stopa fotosinteze sirkase kreće od 30 do 100 mg CO₂/ dm²/ h. Ukupan broj listova u biljci kreće se od 7 do 14 i teoretski može i do 30 listova. Stome sirka su manje u poređenju sa drugim biljkama sa C4 metabolizmom (npr. kukuruz), ali se procenjuje da listovi sirka imaju 50% više stoma po jedinici površine nego biljka kukuruza. Visina biljke i prečnik stabljike su karakteristike u direktnoj vezi sa proizvodnjom zelene mase, a ove karakteristike su pod velikim uticajem uslova životne sredine i poljoprivredne prakse (Slika 7).

Sirak se seje u proleće kada temperatura zemljišta dostigne 12°C. Vegetacioni period 90–110 dana odlikuje rane sorte, 111–130 dana srednjerane a kasne sorte duže od 130 dana. Može se sejati kao glavni usev ili u smeši sa drugim usevima, uglavnom leguminozama, u zavisnosti od svrhe gajenja. Srednjerane sorte i hibridi pokazuju karakterističnu dinamiku rasta: (10–15 dana) + (10–12 dana) + (10–15 dana) + (15–20 dana) + (8–10 dana) + (5–6 dana) + (6–8 dana) + (15–20 dana) koje odgovaraju fenofazama: klijanje i nicanje, ukorenjavanje, bokorenje, vlatanje, metličenje, cvetanje, oplodnja i zretanje ploda i faza zrelosti, sve u optimalnim uslovima toplote i vlažnosti. Agroekološki uslovi koji pogoduju razvoju sirka su posledica njegovih ekofizioloških adaptacija u odnosu prema vodi, toploti i zemljištu.

Bez obzira na tip useva u odnosu na osnovni proizvod prema kome se vrši selekcija, sirak za zno, krmni sirak ili sirak šećerac, svi tipovi su tokom prirodne selekcije i u programima oplemenjivanja razvili prilagođenost na raznovrsne uslove uspevanja. Ova prilagođenost je postignuta optimalnom koordinacijom na genetičkom, morfoanatomskom i fiziološkom nivou. Od morfoloških osobina treba istaći moćno razvijen korenov sistem, dok voštana prevlaka na listovima i uvijanje liski tokom šušnog perioda smanjuje evapotranspiraciju, što dovodi do privremenog prekidanja procesa rasta u ekološki nepovoljnim uslovima i nastavak rasta kada se oni uklone. Stoga u odnosu na ostala prosolika žita sirak ima najmanje potrebe za vodom. Dinamika potrošnje vode od strane biljaka se menja u toku stadijuma razvika: umerena je u fazama nicanje do vlatanje, a najveća u fazama metličenja i cvetanja jer se tada razvija bujna vegetativna masa. Sirak izvanredno dobro ekonomično raspoloživom vodom što pokazuju i vrednosti transpiracionog koeficijenta. Ove vrednosti su, zavisno od fenofaze, spoljnih i

zemljišnih uslova u granicama 114 do 235 mm. Godišnje sume padavina između 400 i 600 mm su optimalne vrednosti za nesmetan razvoj biljaka sirka. Otpornost prema suši je izraženija kod sorti poreklom iz aridnih subtropskih oblasti. Optimalna snabdevenost zemljišta vodom za sirak je 60–80% maksimalnog vodnog kapaciteta, pa ovaj usev snažno reaguje na navodnjavanje odlično iskorišćavajući dopunsko vlaženje orničnog sloja.

Optimalni toplotni uslovi za usev sirka su posledica njegovog porekla iz tropskih i subtropskih područja. Bezmrazni period oko 130 dana je neohodan kao i 21°C minimalno kao prosek u julu. Već u početku razvoja sirku je potrebno obezbediti minimalne temperature 10 – 12°C, a optimalne 15 – 18°C. Optimalne temperature za razvoj vegetativnih organa su 20 – 25°C, a za razvoj generativnih 27 – 30°C. Suma aktivnih temperatura za vegetacioni period je 3.000 do 3.300°C, a kod nekih kasnostasnijih sorti i do 3.500°C. Vrlo visoke temperature biljke dobro podnose, tako da na temperaturi od 45°C sirak nastavlja svoj razvoj.

Dobro razvijen korenov sistem, takođe, omogućava uzgoj sirka na različitim zemljištima koja zbog nekih svojih fizičkih i hemijskih osobina nisu pogodna za kukuruz. Na ovakvim zemljištima smanjenih produktivnih sposobnosti uz adekvatnu primenu remedijacionih mera mogu se ostvariti održivi prinosi sirka ali svakako da će najbolje rezultate ostvariti gajenje ove biljke na černozemima, livadskim i ritskim crnicama ili plodnim gajnjačama (Ikanović et al. 2011).

U proizvodnji sirka prihrana ima izuzetan značaj budući da se tokom vegetacionog perioda usvajaju iz zemljišta velike količine hraniva. Količine glavnih elemenata ishrane (NPK) se određuju na osnovu prirodne plodnosti zemljišta, koeficijenta iskorišćenja ovih hraniva iz zemljišta i planiranog prinosa. Poznavajući ove vrednosti mogu se izračunati potrebne količine NPK hraniva za dopunsku ishranu sirka. Prema dosadašnjim saznanjima za sirak za proizvodnju zelene biomase treba tokom jeseni zaorati 25 – 40 t/ha stajnjaka i 70-180 kg/ha N +120 –120 kg/ha P + 1420 kg/ha K. Sistem dopunske ishrane biljaka sličan je kao i u proizvodnji kukuruza, stajnjak sa polovinom P i K i trećinom N zaoravamo u jesen, ostatak P i K i 1/3 N unosimo neposredno pred setvu sirka i 1/3 N u prihrani (KAN). Sirak se često gaji i na delimično degradiranim zemljištima tako da u dopunskoj ishrani biljaka treba koristiti i druge, sekundarne elemente prihrane i mikroelemente. Podaci o dopunskoj ishrani sirka na zemljištima male

prirodne plodnosti iz inostranih izvora pokazuju da je potrebno obezbediti i mikroelemente, posebno na B, Mo i Co.

Sirak (*Sorghum bicolor*) je agroenergetski usev veoma prilagodljiv stresu životne sredine. Kao C4 vrsta, odlikuje se visokom produktivnošću i visokom efikasnošću korišćenja vode i azota (Garofalo i Rinaldi 2013; Ikanović et al. 2011), što omogućava uzgoj u aridnim područjima i na degradiranim, zasoljenim i marginalnim zemljištima, pri čemu se isključuje konkurencija sa proizvodnju hrane na plodnim poljoprivrednim zemljištima (Lakić et al. 2018). Slatki sirak se može koristiti za proizvodnju etanola i biodizela, dok je krmni sirak pogodan za proizvodnju biogasa u AD procesu (Ameen et al. 2017; Vanaasek et al. 2017).

Pri izboru useva i sorti sirovine za biomasu treba uzeti u obzir uticaj faktora životne sredine, uključujući tip zemljišta. Rocateli i dr. (2012) procenili za sva tri tipa sirka (za zrno, krmni i slatki) koji se uzgajaju u južnim SAD da okruženje i genotip imaju značajan uticaj na prinos biomase i hemijski sastav. Performanse prinosa biomase i njegovih komponenti energetskog sirka dobro su dokumentovane u prethodnim izveštajima na osnovu njegove proizvodnje na plodnom, obradivom zemljištu. Međutim, sirak je posebno dobro prilagođen marginalnim uslovima zemljišta i ograničenim uslovima, kao što su deficit vode, salinitet i alkalnost. Slatki sirak je obezbedio dovoljne ukupne prinose šećera i etanola na poljima sa zaslanjenim zemljištem, čak i ako je primao samo 50–75% vode za navodnjavanje koja se obično primenjuje na sirak u severnoj Grčkoj. Utvrđeno je da je jedna sorta slatkog sirka na suvom zemljištu u Nebraski konkurentna usevima žitarica po nekim kriterijumima za biogorivo, ali nije bila konkurentna žitaricama za ukupno ili neto tečno transportno gorivo proizvedeno po hektaru i ekonomski povrat u smislu ulaganja za pamuk ili suncokret na zaslanjenim alkalnim zemljištima u severnoj Kini. Proizvodnja useva na marginalnim zemljištima često se suočava sa nedostatkom infrastrukturnih uslova i nižom plodnošću zemljišta, što dovodi do većih troškova sirovina od istih useva koji se uzgajaju na obradivim plodnim površinama. Podaci koji se odnose na komparaciju prinosa biomase i hemijskog sastava energetskog sirka koji se uzgaja na marginalnim i obradivim površinama su oskudni.

Prethodne studije su se fokusirale na slatki sirak kao sirovinu za proizvodnju bioetanola, i vrlo malo je dostupnih podataka o krmnom sirku, koji je prepoznat kao obećavajuća vrsta sirovine za konverziju bioenergije (Chaochen Tang et al. 2018). Analizirani su rezultati poljskog

ogleda postavljenog na tri tipa zemljišta: subhumidna klima i slano zemljište, semi-aridna klima i ledina, i subhumidna klima i obradive površine; i četiri genotipa sirka – dva šećerca + dva krmna. Dramatične razlike u prinosu biomase na različitim lokacijama u ovoj studiji mogu se pripisati značajnoj raznolikosti faktora životne sredine, kao što su klima (padavine, temperatura i evapotranspiracija), tip zemljišta i plodnost kao i genotip useva sirka.

Sirak se u Evropi uglavnom gaji na zemljištu na kome se može gajiti i kukuruz. Areal rasprostranjenja je vrlo širok, zahvaljujući širokim ekološkim valencama a na severnoj hemisferi se prostire do oko 45⁰ geografske širine, ali se proširuje zahvaljujući razvoju novih genotipova (kraćeg vegetativnog perioda), a donekle i klimatskim promenama, koje uzrokuju sve toplije i sušnije uslove. Zelena biomasa krmnog sirka je pogodna za siliranje. Uporedna ispitivanja produktivnosti krmnog sirka i kukuruza, vršena u Holandiji 2016. godine, koja su uključila sedam sorti sirka i jednu kukuruza, su pokazala da u se prinosi sirka kretali od 15 do 20 tona suve materije po ha naspram 16 tona po ha kod silažnog kukuruza. Koeficijenti digestije organske materije sorti sirka bili su za 2 do 5% niži nego kod silažnog kukuruza. Jedna sorta je dala 10% veći sadržaj proteina i približno 20% više skroba po hektaru nego silažna sorta kukuruza. Dve hibridne sorte (iz Holandije) dale su čak 55% i 60% više skroba po ha nego silažni kukuruz. Aktuelna praktična istraživanja treba da pokažu da li sirak može da zameni silažni kukuruz ili je interesantan kao srednja kultivacija u kontinuiranom gajenju silažnog kukuruza ili u kombinovanom gajenju sa ozimom žitom, na primer ozimom raži praćenom sirkom. Sekvestracija ugljenika u zemljištu je 4 do 13 puta veća kod sirka nego kod silažnog kukuruza. Pored toga, sirak daje doprinos skaldištenju ugljenika brže i u dubljim slojevima zemljišta (do 210 cm dubine) nego silažni kukuruz (posebno u sloju od 0-30 cm). Kao rezultat toga, sirak, za razliku od kukuruza, više doprinosi prevenciji erozije zemljišta i vode. Pored toga, uzgoj sirka emituje manje gasova sa efektom staklene bašte. Ovo se odlično uklapa sa politikama koje prepoznaju zemljište kao skladište ugljenika

(<https://www.thecattlesite.com/articles/4458/sorghum-seems-promising-as-a-fodder-crop-in-the-netherlands/>).

U AD procesu se koriste dva varijeteta sirka: krmni i šećerni. Produktivnost biogasa proizvedenog iz silaže sirka značajno zavisi od genotipa, klimatskih uslova, tipa zemljišta (Thomas et al. 2017). Uporedna istraživanja energetske efikasnosti silaže kukuruza, sirka i

kanarske trave na zemljištima različite plodnosti u Poljskoj, uz primenu tri doze azotnog đubriva, pokazuju da samo mali efekat povećanja doze azota na prinos a u funkciji kvaliteta zemljišta, 50t/ha za kukuruz, 70t/ha za sirak i 40t/ha za kanarsku travu, sve na plodnom zemljištu. Najviši prinos biogasa po ha je za kukuruz 15,595 m³ /ha/year na plodnom zemljištu, za sirak 115 m³/t g.m., za kanarsku travu 125 m³/t g.m, pri čemu je sadržaj metana u biogasu proizvedenom iz kukuruza i sirka bio značajno veći u odnosu na kanarsku travu. Iz energetske preračuna, autori zaključuju da je primena nižih doza azotnog đubriva ključna za povećanje energetske efikasnosti (Krzystek et al. 2020). Problem održivosti uzrokovan primenom visokih doza azotnog mineralnog đubriva može biti prevaziđen upotrebom digestata kao nusprodukta AD procesa u ulozi dodatka zemljištu koji delimično ili u potpunosti zamenjuje mineralno đubrivo.

1.4. Resurs zemljišta

Kao što je ranije napomenuto, u celokupnom proizvodnom lancu u biogasnim elektranama resurs zemljišta zauzima centralno mesto, a, takođe, i tačku u kojoj se susreću poljoprivreda, energetika, ekologija i zaštita životne sredine. Ovde su razmatrane karakteristike dva, u osnovi, plodna poljoprivredna zemljišta: černoze i ritska crnica, na kojima je i postavljen poljski ogled. Kako ispitivano zemljište pokazuje produkcijske karakteristike koje su značajno lošije nego što bi se pretpostavilo po tipu zemljišta, razmatrana je i upotreba marginalnih (degradiranih) zemljišta za produkciju agroenergetskih useva.

1.4.1. Černoze

Černoze (ili Molisoli u američkoj taksonomiji zemljišta), spadaju među najplodnija zemljišta koja se koriste u trenutnoj poljoprivrednoj proizvodnji. Obično su se razvile na eolskim i ugljeničnim sedimentima, uglavnom na lesu. Kao rezultat toga, njihovom mineralogijom gline dominiraju visokoaktivni, troslojni glineni minerali, što doprinosi visokom CEC-u (*cations exchange capacity*)

. Tekstura je ilovasta, osnovna zasićenost se kreće između 70% i 100%. Kapacitet zadržavanja vode je visok zbog teksture, često prelazi 150 mm. Osim toga, zemljišta obično sadrže visoke inherentne količine kalijuma i fosfata, čija dostupnost zavisi od stepena dekalifikacije. Za razliku od takozvanih feozema, dekalifikacija černoze je nepotpuna, a neki od rastvorenih

karbonata se prethodno prebacuju unutar niže površine tla ili podzemlja, pri čemu se formiraju sekundarni karbonatni precipitati na mineralnim površinama („meki praškasti kreč“) ili unutar pora tla ('loess kindl'). Odlikuje se neutralnom do slabo alkalnom hemijskom reakcijom, dobro je obezbeđen humusom i biljnim hranivima. Pogodan je za navodnjavanje, čijom se primenom na ovom tipu zemljišta postižu visoki i stabilni prinosi gajenih biljaka. Najveće površine pod černoziemom zastupljene su u Vojvodini, gde je zastupljen na površini od oko 1.000.000 ha (Holland & Turekian 2014).

1.4.2. Ritska crnica

Ritska crnica ili humoglej, formira se u reljefskim depresijama, pod uticajem visokog nivoa podzemnih voda ili usled pojačanog vlaženja površinskim poplavnim vodama. Veliki uticaj na formiranje ovog tipa zemljišta ima i zemljišna flora koja ostavlja znatne količine organskih ostataka. Snabdevanje vodom nije samo rezultat visokog vodnog kapaciteta već i kapilarnog penjanja. Kolebanje nivoa podzemne vode je veliko i može ići do metar i po dubine. Jedan deo vode pristupačan je i od površinskog vlaženja. Ovo su po pravilu plodna zemljišta sa povoljnim hemijskim osobinama. Reakcija je neutralna do slabo alkalna. Ponekad se kao ograničavajući faktor javlja pojava zaslanjivanja. Ritske crnice pripadaju trećoj bonitetnoj klasi, i uglavnom su plodna i vrlo plodna zemljišta kod kojih se teškoće javljaju kod obrade, obzirom da je neophodna duboka obrada zbog male filtracione sposobnosti. Takođe, potrebno ih je zaštititi od visokog nivoa podzemnih i poplavnih voda, kod glinovitih obezbediti dreniranost u cilju zaštite zemljišta od zabarivanja, po potrebi primenjivati meliorativno đubrenje i druge mere. Po pravilu ova zemljišta se u većini slučajeva u sušnim periodima navodnjavaju, a u vlažnim odvodnjavaju. Poboljšanjem vodnog, vazdušnog i toplotnog režima, uz obezbeđenje pristupačnih hraniva, na ritskim crnicama mogu se postići visoki i stabilni prinosi gajenih biljaka.

Zastupljena je u dolinama Velike Morave, Mlave, Dunava, Save, Kolubare, Nišave i u depresijama i rečnim dolinama u Banatu, Bačkoj i Sremu. Ovo zemljište je najviše zastupljeno u Vojvodini sa oko 341 000ha, najviše u Banatu, zatim Bačkoj i Sremu (Belić et al. 2011).

1.4.3. Degradirano (marginalno) zemljište

Marginalno zemljište je zemljište koje ima minimalnu ili nultu industrijsku ili poljoprivrednu vrednost. Dakle, marginalno zemljište ima vrlo značajno manji potencijal da

obezbedi profit vlasnicima, jer ga karakterišu zemljište niske plodnosti i druge nepogodne karakteristike kako za poljoprivrednu tako i za industrijsku upotrebu. Vrednost marginalnog zemljišta je veoma niska. Marginalno zemljište se, takođe, naziva „prazno“, „degradirano“ ili „višak“ zemljište. Često ga karakteriše nesposobnost da proizvede bilo koji usev ili da može da proizvede profit bilo koje vrste. Odnosno, usevi koji bi se proizvodili na marginalnom zemljištu generisali bi prihode koji su niži od troškova zakupa zemljišta. Tipično, marginalno zemljište je pod uticajem ljudskih aktivnosti, kao što je zagađenje izazvano industrijom. Postoje primeri da se zemljište pretvara u marginalno zbog nedovoljnog snabdevanja vodom i strmih nagiba. Uobičajena vrsta zemlje koja je postala marginalna je zemljište koje se nekada koristilo za poljoprivredu ili druge slične namene koje su sada napuštene. Ova zemljišta, generalno, karakteriše erozija, zaslanjivanje ili veoma mali sadržaj organskog ugljenika. Neiskorišćeno poljoprivredno zemljište, pašnjaci i napušteni rudnici su najčešći primeri zemljišta koje se sada pretvorilo u marginalno zemljište.

Definicije marginalnih zemljišta često nisu eksplicitne. Termin „marginalni“ nije podržan ni preciznom definicijom ni istraživanjem da bi se utvrdilo koja zemljišta spadaju u ovu kategoriju. Za identifikaciju marginalnog zemljišta koristi se terminologija/metodologija koja varira između fizičkih karakteristika i trenutnog korišćenja zemljišta kao osnovne perspektive. Izraz „marginalno“ najčešće prati „degradirana“ zemljišta i drugi široko korišćeni termini kao što su „napušteno“, „neaktivno“, „pašnjak“, „višak poljoprivrednog zemljišta“, „Program rezervi očuvanja“ (CRP)“, 'neplodna zemlja siromašna ugljenikom' itd. Neki termini se koriste kao sinonimi. U kategoriju „marginalnih“ zemljišta pretežno se ubrajaju zemljišta koja su isključena iz obrade zbog ekonomske neizvodljivosti ili fizičkog ograničenja za uzgoj konvencionalnih useva. Takve lokacije mogu i dalje imati potencijal da se koriste za alternativnu poljoprivrednu praksu, npr. proizvodnja bioenergetskih sirovina. Postojeća kategorizacija marginalnih zemljišta ne dozvoljava procenu potencijala plodnosti zemljišta ili definisanje vrste i nivoa ograničenja za uzgoj useva kao razloga niske praktične vrednosti u pogledu planiranja korišćenja zemljišta. Zbog toga se mora uspostaviti i razviti nova klasifikacija marginalnih zemljišta. Ova klasifikacija treba da se gradi na osnovu kriterijuma biofizičkih svojstava zemljišta, agroekoloških, ekoloških i klimatskih nedostataka za uzgoj useva, da bude laka za upotrebu i od velike praktične vrednosti. SEEMLA konzorcijum je preduzeo korake da izgradi takvu klasifikaciju marginalnih zemljišta koja se zasniva na direktnim kriterijumima koji opisuju svojstva i ograničenja zemljišta i definišu

njihov potencijal produktivnosti. Ovom klasifikacijom marginalna zemljišta su podeljena u 11 kategorija: plitko ukorenjena, niska plodnost, kamena tekstura, peskovita tekstura, glinasta tekstura, slana, sodična, kisela, prevlažna, erodirana i kontaminirana. Za osnovu ove klasifikacije uzeti su modifikovani kriterijumi prilagođeni Uredbi EU (1305) (2013). Da bi se definisala oblast marginalnog zemljišta sa klimatskim i ekonomskim ograničenjima, SEEMLA je uspostavila i primenila termin "oblast marginalnosti zemljišta" sa širim okvirom za marginalna zemljišta. Ovaj termin uključuje sama marginalna zemljišta, procenu klimatskih ograničenja i ekonomsku efikasnost za uzgoj useva. Ovaj pristup omogućava definisanje, kategorizaciju i klasifikaciju marginalnog zemljišta prema direktnim indikatorima biofizičkih svojstava zemljišta, ekoloških i ekonomskih ograničenja i pruža dodatnu procenu marginalnosti zemljišta u pogledu pogodnosti za uzgoj useva na osnovu klimatskih kriterijuma

(<https://halophyteskh.biosaline.org/content/marginal-lands>).

Marginalna zemljišta obuhvataju područja sa ograničenim padavinama, ekstremnim temperaturama, zemljištem lošeg kvaliteta, strmim terenom, plitkim (dubina < 50 cm) zemljištem, loše dreniranim, lošom plodnošću, grubom teksturom, kamenitom, glinom koja puca kada se osuši, zasoljenom, preplavljena, neplodna kamenita tla. To znači da ista zemljišta nemaju dovoljan kapacitet na primer za proizvodnju hrane, osim ako se ne ulože značajni naponi upravljanja da se poboljša kvalitet zemljišta. Dakle, zemljište bi moglo biti marginalno za jednu upotrebu (poljoprivreda), a možda vitalno za drugu upotrebu (industrijsko bilje) (Smith et al. 2013).

Marginalna zemljišta privukla su veliku pažnju zbog svog potencijala da poboljšaju sigurnost obezbeđenja hrane i podrže proizvodnju bioenergije. Međutim, pitanja životne sredine, usluge ekosistema i održivost su naširoko postavljana u vezi sa korišćenjem marginalnog zemljišta.

Kada se razmatraju zasoljena zemljišta, generalno, povezujemo termine slani rastvor, so i salinitet sa natrijum hloridom (NaCl). Međutim, salinitet vode za navodnjavanje, generalno, je kombinacija brojnih soli. Katjoni i anjoni koji se najčešće nalaze u vodi za navodnjavanje su: natrijum (Na^+), kalcijum (Ca^{2+}), magnezijum (Mg^{2+}), hlorid (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}) i bikarbonat (HCO_3^-). Soli se akumuliraju i koncentrišu u zemljištu kada voda isparava sa njegove površine, kada biljke koriste vodu, kada ispiranje nije adekvatno da izluži soli izvan zone korena, i/ili kada

padavine ne ispiru soli sa površine zemljišta. Kako voda isparava sa površine tla, ili je koriste biljke, voda koju koriste ili uzimaju biljke se u suštini destiluje ili prečišćava, ostavljajući soli za sobom. U suštini, voda koja se smatra slanom sadrži prekomerne količine rastvorljivih soli koje mogu negativno uticati na rast biljaka.

Korišćenje raznovrsnih useva, nekonvencionalnih vodnih resursa i rehabilitacija marginalnog zemljišta su alternativne opcije za proizvodnju više hrane za suočavanje sa projekcijama klimatskih promena. Prilagođavanje klimatskim promenama kroz klimatske pametne poljoprivredne prakse, agroekološke aktivnosti i pakete upravljanja zasnovanog na usevu može pomoći da se marginalna zemljišta od ekoloških opterećenja transformišu u produktivne i ekonomske blokove. Dostupan je pregled koji razmatra nedavna dostignuća u grupi specijalnih alternativnih useva (uljana repica, mahunarke, žitarice, lekovite, lignocelulozne i voćne kulture) koje se mogu prilagoditi u marginalnim sredinama. Dostupnost alternativnih vodnih resursa (slana voda, prečišćene otpadne vode) za navodnjavanje se ne može izostaviti. Sistemi diverzifikacije useva, koji uključuju useve otporne na sušu i useve otporne na so, verovatno će biti ključ budućeg poljoprivrednog i ekonomskog rasta u regionima gde postoje tla zahvaćena solju i/ili se slani vodonosnici pumpaju za navodnjavanje. Ovi sistemi mogu da reše tri glavna zadatka: održivo upravljanje zemljišnim resursima i povećanje produktivnosti po jedinici površine; intenziviranje agroekoloških praksi za povećanje plodnosti zemljišta i poboljšanje produktivnosti raznovrsnih useva koji su prilagođeni promenljivim klimatskim uslovima i marginalnim zemljištima. (Hussain et al. 2020).

1.5. Uticaji tokova materijala u biogas- elektrani na životnu sredinu

Stajnjak je mnogo održivije koristiti u AD procesu nego direktno kao đubrivo jer sadrži ipatogene i može izazvati ²³ zagađenje površinskih i/ili podzemnih voda kao i zemljišta. Skladištenje stajnjaka na otvorenom omogućava emisiju metana i ugljen dioksida iz procesa degradacije organske materije koji izazivaju efekat staklene bašte (Burg et al. 2018). Korišćenje stajnjaka kao sirovine u AD procesu značajno smanjuje negativne uticaje na životnu sredinu: emisija CO₂, metana i azotnih oksida, neprijatnih mirisa, razaranje patogena (u slučaju termofilnog AD procesa) i ostvaruje bolje efekte đubrenja (Bochmann and Montgomery 2013).

Sa druge strane korišćenje samo stajnjaka u AD procesu ima značajna ograničenja od kojih je najznačajniji nizak odnos ugljenika prema azotu C/N (Neshat et al. 2017).

Govedi stajnjak je najčešće u upotrebi naročito u uslovima intenzivnih farmi, ali on pokazuje relativno nisku produkciju biogasa u monodigestiji ($10\div 20 \text{ m}^3 / \text{t}$ svežeg stajnjaka). Da bi se povećala efikasnost konverzije biomase u biogas mogu se primeniti različiti pretretmani ili kodigestija sa drugim biodegradabilnim materijama.

Istraživan je uticaj proizvodnje električne energije iz biogasa proizvedenog anaerobnom digestijom na životnu sredinu sa ciljem da se procene uticaji na životnu sredinu povezani sa proizvodnjom električne energije iz biogasa proizvedenog anaerobnom digestijom (AD) poljoprivrednih proizvoda i otpada putem analize životnog ciklusa. Funkcionalna jedinica je definisana kao proizvodnja 1 MWh električne energije koja se isporučuje u mrežu“. Razmotreno je pet elektrana u Italiji, koje su koristile kukuruznu silažu, kašu i otpad od paradajza kao sirovine, ali bez kogeneracije električne i toplotne energije. Rezultati sugerišu da silaža kukuruza i rad anaerobnih digestora, uključujući otvoreno skladištenje digestata, najviše utiču na životnu sredinu. (Fusi et al. 2016).

Neadekvatna upotreba digestata u nedostatku sveobuhvatnih strategija upravljanja može doprineti zagađenju životne sredine na neposredne i posredne načine. Neki uticaji zagađenja površinskih voda nutrijentima uključuju cvetanje algi, hipoksiju i eutrofikaciju. Da bi se ovi uticaji sveli na minimum neophodna su istraživanja koja se odnose na upravljanje kvalitetom proizvoda, ekonomiju, politike podsticaja i važeće propise, pored već ranije spomenutih fizičkih, hemijskih i bioloških osobina digestata, tehnologije prerade i sadržaja patogena i nečistoća. Analizirane studije su pokazale da sirovina, tehnologija prerade i radni uslovi procesa u velikoj meri utiču na karakteristike digestata. Takođe, podsticajne politike i propisi za upravljanje organskim otpadom iz AD i proizvodnju digestata kao vrednog proizvoda promovišu ekonomske koristi. Međutim, ne postoji dovoljno vladinih i industrijskih sistema sertifikacije kvaliteta za podršku komercijalizaciji digestata. Održiva i bezbedna upotreba digestata u različitim primenama zahteva dalji razvoj tehnologija i procesa. Takođe, podsticaji za upotrebu digestata, regulacija kvaliteta i društvena svest su od suštinskog značaja za promovisanje komercijalizacije digestata kao dela paradigme cirkularne ekonomije organskog otpada. Stoga su potrebne buduće

studije o kružnim poslovnim modelima i standardizovanim međunarodnim propisima za digestatne proizvode (Lamonirana et al. 2022).

1.6. Ekonomski aspekti tokova materijala u biogas elektrani

Bioekonomija je koncept koji je usko povezan sa pristupom cirkularne ekonomije i podrazumeva održivo korišćenje bioresursa kao i konverziju resursa i otpada koji se stvara prilikom njihove prerade u proizvode sa dodatnom vrednošću, odnosno hranu za ljude i životinje, bioproizvode, bioenergiju. Cirkularna bioekonomija je kamen temeljac, a i preduslov za dalju evoluciju pristupa cirkularne ekonomije. Bioenergija (tj. biomasa koja se koristi za proizvodnju korisne toplote, električne energije, u saobraćaju, itd.) je ključni aspekt kružne bioekonomije, pošto odgovarajuća primena i korišćenje bioenergije može doneti koristi kao što su smanjenje emisije gasova staklene bašte, obezbeđenje pristupačnih i lokalnih energetske izvora, uklanjanje patogena i korišćenje ostataka – npr. kao organsko đubrivo (IRENA 2020).

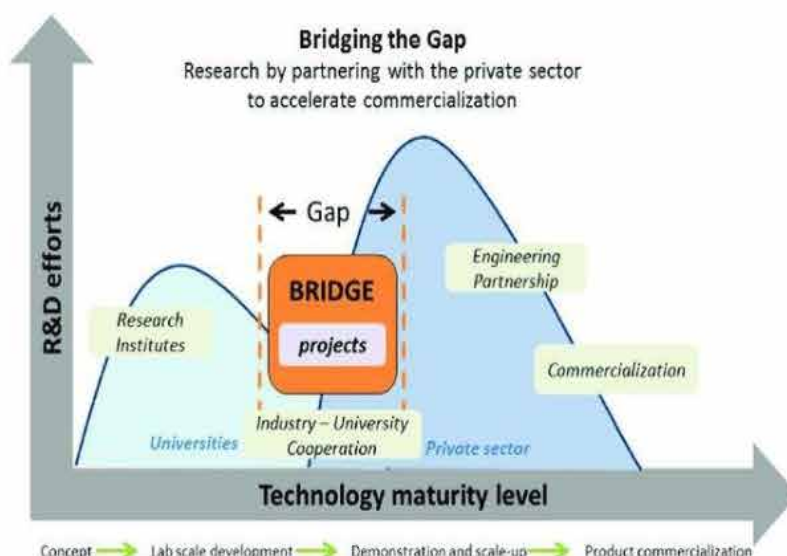
Obračun ekonomskih rezultata u proizvodnji električne i toplotne energije iz biomase izvršen je na bazi podataka o ulaganjima i operativnim troškovima biogas postrojenja za proizvodnju električne i toplotne energije u Autonomnoj Pokrajini Vojvodini sa ciljem da analizira i proceni prinosnu vrednost ulaganja u biogas postrojenje za proizvodnju toplotne i električne energije iz biomase, za ukupni projektovani kapacitet od 740 kW električne energije i 888 kW toplotne energije. Procenjena vrednost investicija iznosio je 3.767.310 €, što je uporedivo sa uobičajenom vrednošću ulaganja za ovu vrstu postrojenja. Ukupno 3.150.000 € je potrebno za investicije u biogas postrojenje i opremu, dok je ukupno 617,310 € izdvojeno za investicije u imovine i objekate postrojenja. Kapitalizovana je i predviđena kamatna stopa od 6% dodatne vrednosti investicije. Planirana proizvodnja električne i toplotne energije je predviđena da ne premašuje tehnički kapacitet postrojenja, omogućavajući projektovano povećanje ekonomskih rezultata od 2% godišnje. Da bi se postiglo takvo povećanje, materijalni troškovi i ostali operativni rashodi su se morali korigovati, dok su ostale kategorije rashoda ostale nepromenjene. Dobijeni ekonomski rezultati ukazuju da proizvodnja toplotne i električne energije iz otpadne biomase može biti isplativa. Obračun ukupnih prihoda i troškova sugerise da biogas postrojenje kapaciteta 740 kW može ostvariti profit pre oporezivanja od 217.063 € godišnje, uz

podršku feed in tarifa otkupnih cena električne energije iz obnovljivih izvora, koje garantuje država. Planirani prihodi od isporučene električne energije su činili 82%, dok je obračunati planirani prihod od proizvedene toplotne energije 18% ukupnih prihoda. Ukupna sadašnja vrednost diskontovanog novčanog toka je bila 662.572 € u razmatranom petogodišnjem periodu, dok je sadašnja rezidualna vrednost 1.057.607 €. Vrednost prinosa biogasa za postrojenje se očekuje da će iznositi 1.720.179 €, sa procenjenom diskontnom stopom od 13,95%. Zahvaljujući većim početnim investicijama, profitabilnost od 5,76% je neprihvatljivo niska, što ukazuje na to da se investicija ne može finansirati kreditima po tekućim kamatnim stopama koje nude poslovne banke u Srbiji (Milić et al. 2020).

Činjenica da se digestat primenjuje lokalno, čime se izbegava transport na velike udaljenosti i svi troškovi vezani za njega, uključujući upotrebu fosilnih goriva, je značajna kako u proceni uticaja na životnu sredinu tako i u ekonomskim procenama.

Ako se razmatra održivost upotrebe digestata kao dodatka zemljištu ili biođubriva (što zavisi od legislative određene države) mora se uzeti u obzir ekonomija (Iso 2019). Nedavno je objavljeno da upotreba digestata može doneti 941 – 2.095 € dodatnog prihoda biogas elektrani, bazirano na aktuelnim cenama đubriva elektranama u Litvaniji zbog visokog sadržaja azota i organske materije (Jurgutis et al. 2021). Autori predviđaju da bi prodaja digestata mogla da postane jedan od pririteta biogas elektrana.

Neke od tehnologija produkcije biogasa u AD procesu su zrele (na primer na bazi silaže kukuruza) i kao takve su najzastupljenije. Međutim, ova produkcija se suočava sa mnogobrojnim ograničenjima koja moraju biti prevaziđena razvojem nauke i tehnologije da bi se ispunili sve zahtevniji uslovi ekološke, ekonomske, energetske i socijalne održivosti kroz sveobuhvatnu analizu prednosti i nedostataka AD tehnologije. Cena proizvodnje biogasa je još uvek visoka sa tendencijom daljeg rasta. Jedan pravac je unapređenje mikrobiološkog procesa koji treba da omogući korišćenje šireg spektra otpadnih materija, a drugi je povećanje efikasnosti produkcije energetskih useva (kroz korišćenje novih bioloških vrsta, marginalnog i /ili kontaminiranog zemljišta, primenu specifičnih agrotehničkih mera koje vode računa o očuvanju i unapređenju produktivnih karakteristika zemljišta).



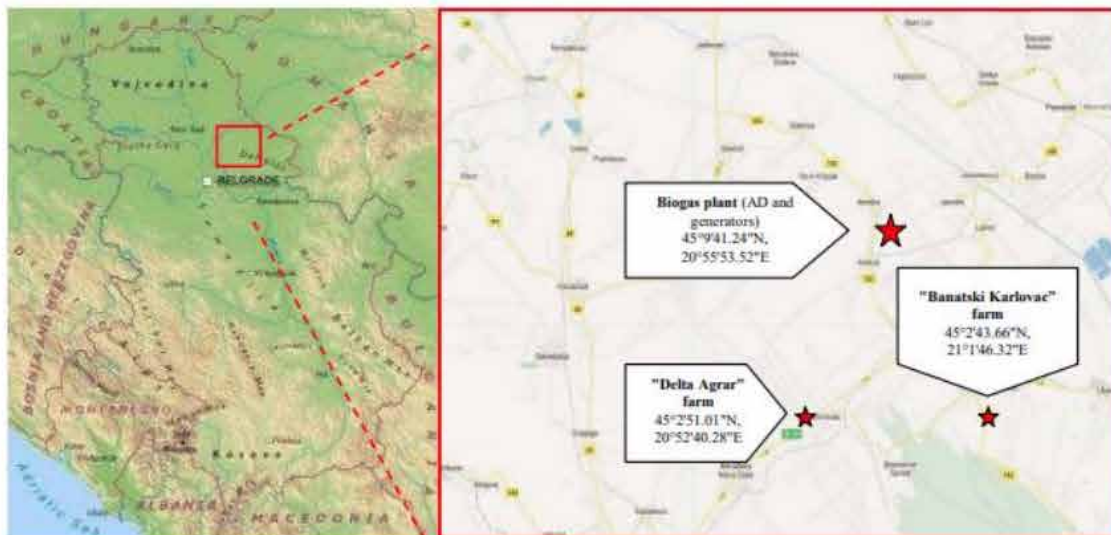
Slika 8. Razvoj i primena tehnologija u održivom razvoju produkcije biogasa. (Izvor: Bharathiraja et al. 2018)

Pored ovih, u suštini bioloških unapređenja, neophodna su istraživanja na strani korišćenja biogasa i digestata sa povećanjem efikasnosti ovih procesa (Bharathiraja et al. 2018). Da bi proizvodnja biogasa postala (ostala) održiva neophodno je da se udruže znanja osnovnih istraživanja iz oblasti biologije i ekologije sa aplikativnim istraživanjima poboljšanja tehnologija svih ključnih faza proizvodnje biogasa i njegovog korišćenja uz intenzivne veze sa inženjerima i tehnologima iz biogas elektrana, koji su svakodnevno u kontroli procesa. Šema povezanosti bioindustrije sa R&D – istraživanje i razvoj je prikazana na Slici 8.

1.7. Biogas elektrana

Biogas Energy doo Alibunar biogas elektranu se nalazi u Ilandži, opština Alibunar, Južnobanatski upravni okrug (Slika 9) projektovana je sa ciljem unapređenja upravljanja životinjskim otpadom na način da se u procesu anaerobne digestije izvrši povratak metana iz odlagališta stajnjaka, prvobitno otvorena laguna, i na mrežu isporuči električna energija, proizvedena iz obnovljivih izvora, čime bi se značajno uticalo na smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte. Dugotrajno odlaganje stajnjaka u otvorenim lagunama, je pored emisije

gasova sa efektom staklene bašte, dovodilo i do zagađenja zemljišta i podzemnih voda u okolini farme.



Slika 9: Lokacija Biogas Energy doo Alibunar i svinjarskih farmi u okolini

Rekonstrukcijom infrastrukture koja uključuje postavljanje betonskih rezervoara za stajnjak iz kojih se stajnjak 34 puta nedeljno transportuje do dva rezervoara za skladištenje stajnjaka na lokaciji biogas postrojenja u kojima boravi manje od 24h, jer se redovno pumpa u digestore. Postrojenje za biogas koristi ovaj svinjski stajnjak i silažu kukuruza (preuzete iz žetve kukuruza na lokaciji projekta) kao sirovine za anaerobnu digestiju i proizvodnju biogasa.



Slika 10: Resurs zemljišta Biogas Energy doo Alibunar. Žuto područje prikazuje 1200 hektara potpuno navodnjavanog zemljišta na kojem se sakupljaju ostaci kukuruza. Zelena strelica označava lokaciju postrojenja i silosa za skladištenje.

Električna energija se proizvodi iz tri agregata od 1MW unutar elektrane. Očekuje se da će postrojenje generisati 22.650 MWh/godišnje obnovljive električne energije, koja će biti isporučena u srpsku nacionalnu mrežu. Shodno tome, projekat će rezultirati smanjenjem GSB za približno 31.597 t CO₂ godišnje. Električna energija se proizvodi u tri posebna GE Jenbacher postrojenja, svako ukupne snage 999kW, i isporučuje se na mrežu po feed in tarifi. U kogeneracionom postrojenju se proizvodi i 29.000.000 kWh toplotne energije godišnje, koja se, za sada, ne koristi.

Proces anaerobne digestije iza sebe ostavlja smešu (digestat) koja potom prolazi kroz separator koji odvaja čvrste materije od tečnih. Tečna faza ove smeše predstavlja visoko kvalitetno hranljivo organsko đubrivo koje je odmah spremno za upotrebu. Čvrsta materija je sirovi kompost (16.000 tona sirovog komposta godišnje, odnosno 8.000 tona procesiranog organskog komposta spremnog za upotrebu).

Biogas Energy poseduje 480 ha obradivog zemljišta, kao i sistem za navodnjavanje koji pokriva 400 ha obradivog zemljišta (Slika 10). Ukupna površina na kojoj se proizvode supstrati (kukuruz, sirak, pšenica, raž, soja) iznosi 820 ha. Poljoprivredno zemljište se nalazi neposredno uz elektranu. Proizvodi se oko 80.000 t/god sirovine za AD proces (silaža). Godišnje preradi 50.000 t silaže (većinom kukuruza) i oko 34.000 t svinjskog stajnjaka.

Pre nego je postrojenje za proizvodnju biogasa stavljeno u funkciju, stajnjak sa farmi se skladištio u otvorenim lagunama, gde je dozvoljeno da se anaerobno raspada, stvarajući emisije gasova sa efektom staklene baste, neugodne mirise i druge negativne uticaje na okruženje farme kroz zagađenje zemljišta. U to vreme su ostaci biomase (ljuska i stabljika) iz proizvodnje kukuruza ostavljani na lokaciji, takođe, stvarajući emisije gasova staklene bašte. Sada se svinjsko đubrivo i ostaci kukuruza koriste kao sirovina za proces anaerobne digestije.

U biogas elektranu je implementiran sistem anaerobne digestije koji je dizajnirao i konstruisao OAG. OAG je nemačka kompanija koja je lider u industriji anaerobne digestije. U prvom koraku, sirovina se dodaje u sudove digestora – fermentatora, gde ostaje u anaerobnim uslovima tokom adekvatnog vremena boravka za proizvodnju biogasa. Ostatak zatim prolazi kroz prirodni preliv u sekundarne zatvorene posude anaerobnog digestora.

Treba napomenuti da su samo smanjenja emisije metana (CH_4) izračunata za komponentu svinjskog đubriva u sirovini za anaerobni digestor, a za anaerobnu digestiju kukuruznog ostatka nisu izračunata smanjenja emisije. U ovoj fazi je uključena sledeća oprema: dostavni kamion, kamionska vaga, silos za silažu, rezervoari za skladištenje stajnjaka (Ks2), rezervoari za fermentaciju (Ks4).

Drugi korak se odnosi na sakupljanje biogasa. Biogas se sakuplja u rezervoaru gasa u primarnim i sekundarnim posudama „fermentora“, koje se nalaze unutar krovova sa vazdušnom podrškom. Nakon prikupljanja gasa, biogas se dovodi do energetske objekta u blizini digestora. U ovoj fazi se koristi sledeća oprema: rezervoari za gas u rezervoaru za fermentaciju (Ks4), odsumporavanje biogasa, hlađenje, filtriranje ugljenika, analizator gasa, merač protoka, merač temperature i merač pritiska gasa.

Treća faza je proizvodnja električne energije, pri čemu se tri klipna motora GE „Jenbacher” od 999 kW modifikovana za sagorevanje biogasa koriste za sagorevanje biogasa i proizvodnju električne energije. Električna energija proizvedena ovim agregatima se prodaje po povlašćenoj ceni direktno u državnu distributivnu mrežu, kao izvor obnovljive energije. Generatori su opremljeni da recikliraju otpadnu toplotu iz procesa sagorevanja i deo otpadne toplote će se reciklirati unutar zatvorene petlje digestora i agregata. Otpadnu toplotu u budućnosti može koristiti i vlasnik projekta, npr. da obezbeđuju toplotu za staklenike, ali se za ovaj element projekta ne zahteva smanjenje emisije. Pored pomenutih generatora, ključnu opremu čini i brojilo za izvoz električne energije. Biogas i generatori su dizajnirani da rade tokom cele godine, ali će takođe biti instalirana baklja kao mera predostrožnosti za uklanjanje viška metana.

U poslednjoj fazi vrši se uklanjanje ostatka iz digestora. Efluent digestora se pumpa iz posuda sekundarnog fermentora u separator čvrstih materija. Ovaj mehanički proces razdvaja rezidualni tok materijala na čvrstu i tečnu frakciju. Odvojene čvrste materije će predlagatelj projekta koristiti za proizvodnju i prodaju komposta na otvorenom tržištu. Proces kompostiranja uključuje proces aeracije čvrstog zaostalog otpada (tj. ne primenjuju se anaerobni uslovi na čvrsti ostatak otpada).

Tečnost iz separatora toka zaostalog materijala se odlaže u rezervoar. Ovo će se koristiti za navodnjavanje zemljišta pod kukuruzom na licu mesta. Za ovo je predviđena ključna oprema koja se sastoji od separatora zaostalog mulja (Ks2), pumpne stanice za tečnu frakciju i skladišta komposta (Slika 11).

Procenjeni iznos smanjenja emisije tokom izabranog perioda kreditiranja 10 godina je 315.970 tCO_{2e}. Godišnja prosečna smanjenja emisije iz komponente povrata metana i komponenta proizvodnje električne energije se procenjuje na 8.852 tCO_{2e} i 22.745 tCO_{2e}. Pri proračunu podrazumevana je vrednost od 60% sadržaja CH₄, koja se primenjuje na biogas i očekivana proizvodnja od 12.566.520 m³ biogas/god (7.539.912 m³ CH₄). Izračunate vrednosti se odnose na korišćenje svinjskog stajnjaka i produkciju električne energije, a treba napomenuti da nisu uračunate emisije u toku proizvodnje i skladištenja biomase (kukuruza).



Slika 11. Komponente biogas elektrane: skladište silaže, transport sirovine, fermentor (gore), generatori električne energije, skladište digestata, sagorevanje viška biogasa (dole) (Foto Rakašćan, maj 2022)

Pre početka konstruisanja biogas elektrane, bila je organizovana javna rasprava za zainteresovane strane, a ovde su data karakiretsitična pitanja i odgovori.

P1: Koliki bi bio ukupan prihod od prodaje električne energije?

O1: Biogas postrojenje Alibunar ima planirani godišnji kapacitet od 8.040 radnih sati tokom kojih će proizvoditi oko 24 miliona KWh, što će po trenutnoj stopi od 14.224 evrocenti generisati oko 3,4 miliona evra prihoda.

P2: Da li planirate da zaposlite sve radnike odjednom ili u fazama?

O1: Prema našem poslovnom planu, pokretaćemo različite segmente našeg poslovanja u različito vreme i shodno tome ćemo zaposliti određeni broj ljudi potreban za svako mesto, do otprilike 57

zaposlenih koji su planirani za ceo projekat.

P3: Da li ćete i od malih farmera kupovati ostatke kukuruza?

O3: Da. Pored sopstvene proizvodnje i saradnje sa velikim poljoprivrednicima, možemo imati i program otkupa kukuruznih ostataka od malih proizvođača koji će biti objavljeni do kraja tekuće godine za narednu sezonu (PROJECT DESIGN DOCUMENT FORM (CDM-SSC-PDD) - Version 03)

2. POLAZNE HIPOTEZE I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Očekuje se da rezultati predloženih istraživanja doprinesu ostvarenju prednosti sa sva tri aspekta održivog razvoja:

- *ekonomske prednosti* - za upravo biogas elektrane preko smanjenja operativnih troškova: mineralno đubrivo neophodno za proizvodnju biomase je supstituisano nusproizvodom iz sopstvene proizvodnje, mogućnost plasiranja digestata kooperantima uz izbegavanje dugotrajnog skladištenja i uspostavljen je proizvodni lanac na najbližem zemljištu (koje uz primenu digestata daje održive prinose);
- *ekološke prednosti* - značaj za očuvanje životne sredine: smanjena ⁵⁹ emisija gasova sa efektom staklene bašte u atmosferu, jer se metan iz procesa anaerobne digestije kao biogas koristi u elektrani; poboljšanje produkcionih sposobnosti degradiranih zemljišta;
- *socijalne prednosti* – opšte-društvene: mitigacija klimatskih promena korišćenje obnovljivih izvora energije.

Da bi se ovaj doprinos ostvario postavljene su hipoteze i ciljevi istraživanja:

OH: Osnovna hipoteza: konverzija energije iz biomase kao obnovljivog izvora u procesu anaerobne digestije je energetski, ekološki i ekonomski održiva ukoliko se nusproizvodi iz procesa anaerobne digestije koriste za remedijaciju marginalnog zemljišta na kome se proizvodi biomasa

Pomoćne hipoteze:

H1: Obezbeđivanje sopstvene sirovine (biomase) je ključno za proizvodnju biogasa u procesu anaerobne digestije

H2: Zemljište degradirano intenzivnom ratarskom proizvodnjom u dugom periodu može poboljšati produkcione karakteristike upotrebom digestata iz proizvodnje biogasa u AD procesu

H3: Produkcija biomase kao OIE je održiva ukoliko se zasniva na marginalnim zemljištima

H4: Krmni sirak u agroekološkim uslovima Južnog Banata može da obezbedi održiv prinos biogasa po ha

Opšti cilj: Povezivanje tokova materijala radi povećanja resursne efikasnosti i zaštite životne sredine u biogas elektranama

Osnovni cilj: Na sistematski način utvrditi uticaj digestata, kao nusprodukta u proizvodnji biogasa, na produktivnost biomase krmnog sirka (*Sorghum bicolor* L.) kao agroenergetskog useva koji se koristi u produkciji biogasa, na primeru Biogas Energy doo Alibunar

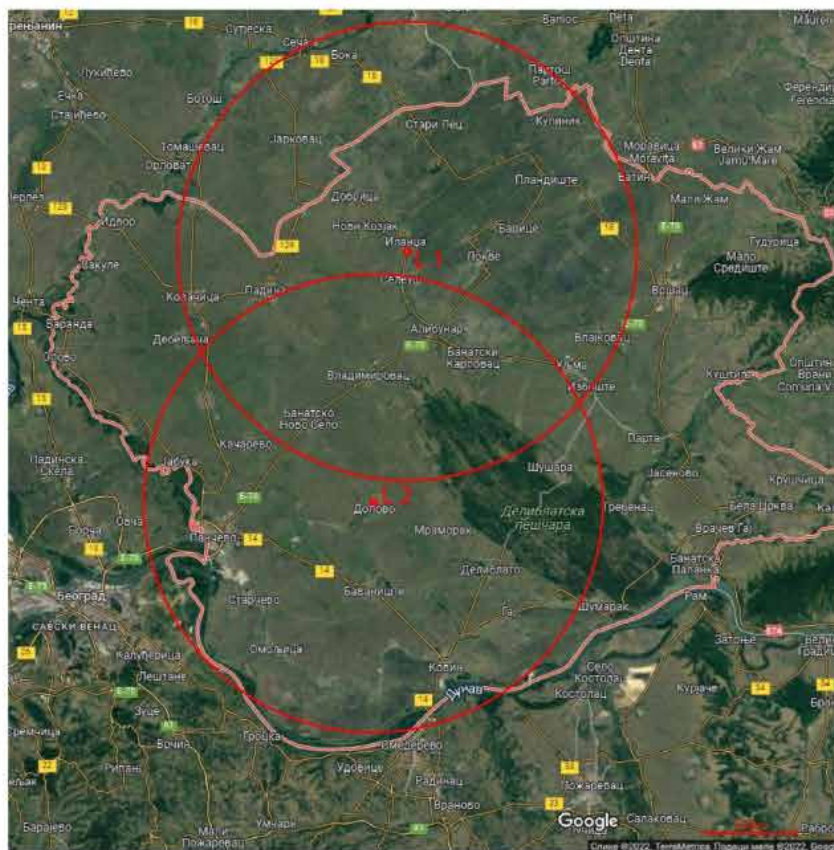
Specifični ciljevi:

- Analizirati agrohemijske osobine plodnog poljoprivrednog i degradiranog zemljišta na izabranim lokacijama u blizini biogas elektrane
- Analizirati agrohemijske karakteristike digestata
- Prikupiti podatke o vremenskim uslovima sa meteoroloških stanica najbližih odabranim lokacijama
- Metodom poljskog ogleda utvrditi uticaj digestata na parametre razvoja biomase i prinosa krmnog sirka
- Utvrditi uticaj digestata na produkciju biogasa
- Uporedna analiza prinosa biomase i biogasa krmnog sirka u odnosu na kukuruz
- Diskutovati eksperimentalne rezultate sa aspekta ekonomske, ekološke i socijalne održivosti

3. MATERIJAL I METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Opis lokacije

Eksperimenti su sprovedeni na dve lokacije u Južnobanatskom upravnom okrugu, Republika Srbija. **L1- Ilandža** ($45^{\circ}16'77''$ N; $20^{\circ}92'13''$ E, 59 alt), na zemljištu hidrogena ritska crnica (calcic gleysol, izabran je zato što je najbliže biogas postrojenju koje u AD procesu koristi 80.000 t godišnje sirovine - biomase silaže i stajnjaka i proizvodi, kao nusproizvod, 16000t /god digestata. **L2 – Dolovo** ($44^{\circ}90'80''$ N; $20^{\circ}83'81''$ E, 71 alt), na zemljištu tipa černozem (chernozem), nalazi se na udaljenosti od oko 69 km, što je blizu granice rentabilnosti, sa aspekta transporta biljne sirovine za AD postrojenje (Slika 12).



Slika 12. Lokacija poljskog ogleda crveno: granica rentabilnosti transporta sirovina

3.2. Metoda poljskog ogleda

3.2.1. Ispitivanje produkcije biomase sirka

Poljski ogled je postavljen u tri vegetaciona perioda (2016-2018. god.) na 2 lokacije: Ilindža i Dolovo, u dve varijante: bez digestata - kontrolna varijanta i u varijanti sa digestatom. Krmni sirak, hibrid Bulldozer (KWS), sejan je poslednje deкаде aprila, gustine 30 kg semena / ha (približno 250.000 biljaka po ha), posle standardne predsetvene pripreme zemljišta bez dodavanja mineralnih đubriva. Postavljeni su poljski ogledi po slučajnom blok sistemu u 10 ponavljanja na svakoj od lokacija, sa veličinom osnovnih parcela 10 m² (5 m x 2 m) u dve varijante: bez digestata (C) i sa digestatom iz proizvodnje biogasa (50 t/ha), uneseno u zemljište neposredno pred setvu sirka (ADD). U obe varijante u zemljište je ubačeno 115 kgN/ha (250 kg/ha uree sa 46% N). Žetva sirka je vršena u početku faze metličenja (druga dekada jula) sa sadržajem vode 28-33%. Metodom slučajnog uzorka izdvojeno je po 10 biljaka iz svake parcelice i izvršeno je merenje visine biljaka PH (m) i broja listova po stablu (NL). Biomasa je osušena do konstantne težine i izmereni su prinosi suve biomase sa svake elementarne parcele i preračunati su u t/ha.

3.2.2. Komparativna analiza produkcije biogasa iz silaže sirka i kukuruza

U svojstvu eksterne kontrole poljskog ogleda sa sirkom, paralelno je postavljen i ogled sa kukuruzom, po identičnoj šemi sa 83.000 izniklih biljaka kukuruza, a setvena norma je 90.000. Sve analize su rađene istim metodama koje su prikazane za sirak.

3.3. Prinos biogasa

Kompozitni uzorci silaže od sirka dobijeni sa svih osnovnih parcela po varijanta su prikupljani svake godine i sa svih lokaliteta. Uzorkovanje je izvršeno primenom metoda SRPS CEN/TR 15310-1:2009 deo I - IV. Prinos biogasa i metana je određen u laboratoriji Tehničkog fakulteta u Novom Sadu, metodom VDI 4630 (Pham et al. 2013) i preračunat na Nm³/t. Sadržaj suve materije je određen metodom SRPS EN 15934: 2013; udeo organske suve materije metodom SRPS EN 15935: 2013. Kao pozitivna kontrola korišćen je uzorak mikrokristalne celuloze. Inokulum za potrebe analiza obezbeđen iz biogas postrojenja Global Seed, Čurug.

3.4. Statističke analize

¹¹ Analiza dobijenih eksperimentalnih podataka izvršena je putem deskriptivne i analitičke statistike uz pomoć statističkog paketa Statistica ¹² for Windows. Testiranje značajnosti razlika između izračunatih srednjih vrednosti ispitivanih faktora (godina, digestat i lokacija) izvršeno je primenom trofaktorskog modela analize varijanse

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{il} + (\beta\gamma)_{jl} + \varepsilon_{ijk}, \quad \begin{matrix} i=1,2 & j=1,2 & l=1,2,3,4 & k=3 \end{matrix}$$

Sve ocene značajnosti su izvedene na osnovu F-testa i LSD-testa za nivo značajnosti 5% i 1%. Definisana je relativna zavisnost metodom korelacione analize (Pearson-ovi koeficijenti korelacije), i ¹¹ dobijeni koeficijenti testirani t-testom za nivo značajnosti 5% i 1%. ¹⁶ Varijansa i standardna devijacija su u direktnoj funkciji veličine rezultata u uzorku, a koeficijent varijacije se ispoljava u odnosu na veličinu aritmetičke sredine uzorka. Koeficijent varijacije, ili Cv, predstavlja relativnu meru varijabilnosti, poređenjem standardne devijacije i aritmetičke sredine. Iskazan je u procentima: $Cv = \frac{SD}{\bar{x}} 100 \%$

⁹ Od pokazatelja centralne tendencije izračunata je aritmetička sredina ($\bar{x}$). Variranje osobina izraženo je preko koeficijenta varijacije (Cv). Rezultati su prikazani tabelarno i grafički.

3.5. Agrohemijske analize

Uzorci zemljišta su prikupljeni pre uspostavljanja terenskog eksperimenta sondom za uzorkovanje kao neporemećeno zemljište, uzorci sa deset nasumično odabranih tačaka po elementarnoj parceli (u prečniku od 3 m, dubine 0 - 30 cm), zatim su transportovani u plastičnim vrećama kao mešani uzorci od oko 1 kg, a zatim su uzorci zemljišta sušeni na sobnoj temperaturi i u peći na 40°C do konstantne težine pre nego što su mleveni u mlinu.

U uzorcima zemljišta pre postavljanja poljskog oglada i uzorcima digestata analiziran je: sadržaj vlage (¹SPRS ISO 11465-2002), suve materije (SPRS EN 15934), organske materije po Tyurin-u (JDPZ, 1966), C_{org} je izračunat korišćenjem faktora 1.724 (Nelson and Sommers 1982). Sadržaj N_{tot}, je određen po Kjeldalu (SPRS ISO 13878-2005), a ³³ sadržaj P₂O₅ i K₂O (AL metodom po Egner-Riehm-u).

57
Analiza vode iz kanala kojom je ranije vršeno zalivanje je urađena u Gradskom zavodu za javno zdravlje. Elektroprovodljivost je analizirana metodom SPRS EN 27888:09; sadržaj hlorida metodom SPRS ISO 9297 : 2007.

3.6. Analize sekundarnih izvora

Pretraga i pregled literature su izvedeni u bazi „Google Scholar“ prema ključnim rečima: sustainable agriculture, marginal soil, anaerobic digestion, bioeconomy, biomass, Sorghum.

Podaci o vremenskim uslovima; temperature vazduha i količine padavina su preuzeti od najbližih meteoroloških stanica - za Dolovo meteroloska stanica Pančevo, podaci za Ilandžu meterološka stanica Vršac.

49
Potrebni podaci su preuzeti iz javno dostupnih datoteka Republičkog hidrometeorološkog zavoda, Republičkog zavoda za statistiku i drugih baza podataka.

U diskusiji dobijenih eksperimentalnih rezultata korišćene su uobičajene naučne metode (komparativna analiza, indukcija i dedukcija).

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

4.1. Klimatske karakteristike Banata

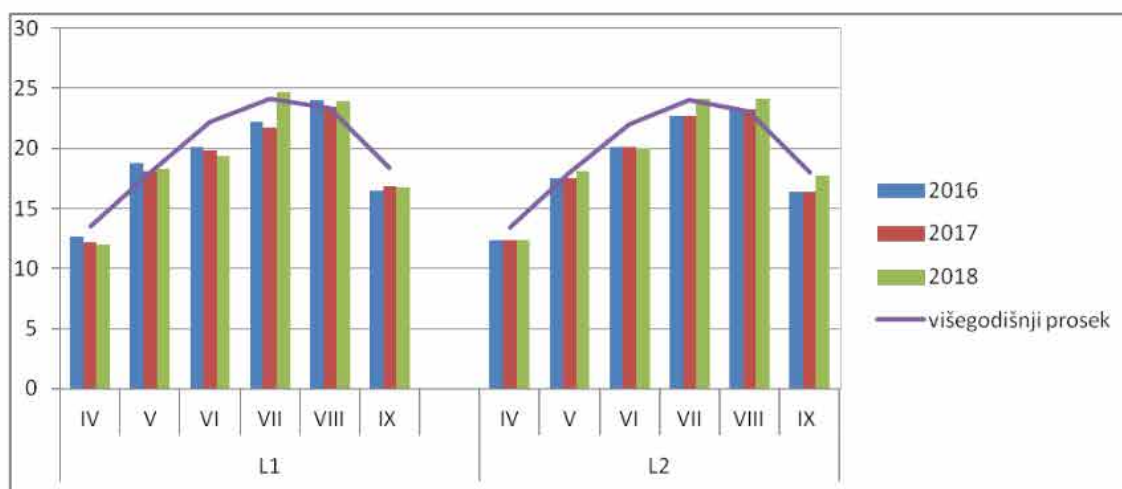
Klima u Banatu je umereno kontinentalna, sa nekim osobinama kontinentalne klime, što je uslovljeno kako geografskim položajem tako i reljefom.

Prema podacima najbližih meteoroloških stanica: Pančevo (za lokalitet Dolovo) i Vršac (za lokalitet Ilandža) može se videti da vremenske karakteristike za period (2016-2018) nisu pokazale ekstremne vrednosti, ali su se ipak u nekim parametrima razlikovale u odnosu na lokaciju i godinu.

Srednja temperatura vazduha tokom vegetacije bila je 19,05°C u 2016. godini, 18,7°C u 2017. i 19,2°C u 2018. godini u Ilandži i 18,73°C u 2016. godini, 18,7°C u 2017. i 19,4°C u Dolovu 2018. godine. Prosečna temperatura vazduha bila je niža od višegodišnjeg proseka za 0,8°C u 2016. godini, za 1,0°C u 2017. godini i za 0,7°C u 2018. godini na lokalitetu L1 - Ilandža a za 1,1°C u 2016. i 2017. godini, za 0,4°C u 2018. na lokalitetu L2 - Dolovo (Tabela 7). i pored toga, u posmatranom period nije bilo velikih odstupanja od višegodišnjeg proseka niti značajnijih razlika između lokacija (Slika 13).

Tabela 7. Srednje mesečne temperature (°C) u toku vegetativnog perioda na ispitivanim lokacijama. VGP – višegodišnji prosek, P – prosek za vegetacioni period

	L1 - Ilandža								L2 - Dolovo						
	18 IV	V	VI	VII	VIII	IX	P	IV	V	VI	VII	VIII	IX	P	
2016	12,7	18,8	20,1	22,2	24	16,5	19,1	12,4	17,5	20,1	22,7	23,3	16,4	18,7	
2017	12,2	18,1	19,8	21,7	23,5	16,9	18,7	12,4	17,5	20,1	22,7	23,3	16,4	18,7	
2018	12	18,3	19,4	24,7	23,9	16,8	19,2	12,4	18,1	20	24,1	24,1	17,7	19,4	
VGP	13,5	18	22,2	24,1	23,4	18,4	19,9	13,4	18	22	24	23,1	18,4	19,8	



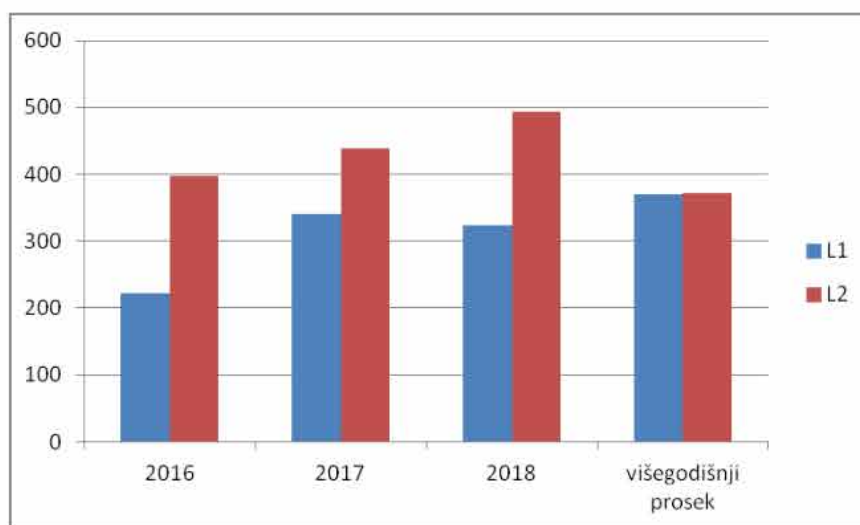
Slika 13. Srednje mesečne temperature (°C) na lokacijama poljskih ogleda u odnosu na višegodišnji prosek.

Padavine su bile neravnomerno raspoređene u prostoru i vremenu. Kada se radi o sirku, period od interesa se završava u julu, ali su date vrednosti do oktobra, jer toliko traje vegetacioni period za kukuruz koji će, takođe, biti razmatran. Ukupna količina padavina od aprila do septembra iznosila je 222,5 mm u 2016. godini, 339,9 mm u 2017. i 324,3 mm u 2018. godini u Ilandži i 397 mm u 2016. godini, 437,5 mm u 2017. i 493,9 mm u Dolovu 2018. godine.

Ako se posmatraju prva 4 meseca vegetacije, ukupne količine padavina bile su iznad višegodišnjeg proseka u ispitivanim vegetacijskim sezonama (2015, 2016. i 2017.). Promenljivo i umereno toplo vreme, sa manje padavina od proseka, obeležava jun 2016. i 2017. U 2018. godini padavine su bile veće od višegodišnjih prosečno za 41,1 mm na lokalitetu L1- Ilandža i 48,7 mm na lokalitetu L2 – Dolovo (Tabela 8). Ako se posmatraju ukupne padavine u toku cele vegetacione sezone, iako se višegodišnji proseci ne razlikuju po lokacijama, na lokaciji Ilandža (L1) je zabeleženo manje padavina u odnosu na lokaciju Dolovo (L2) i višegodišnji prosek (Slika 14).

Tabela 8. Srednje mesečne padavine (mm) u vegetacionim periodima na ispitivanim lokacijama.
VGP – višegodišnji prosek

	L1 - Ilandža							L2 - Dolovo						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Σ	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Σ
2016	23,5	91,5	22,5	7	19	59	222,5	41	133,7	57,5	18,6	62,4	83,9	397,1
2017	40,8	70,3	74,3	60,8	42,8	50,9	339,9	41,5	100,7	74,5	28,6	92,3	99,9	437,5
2018	50,8	110,3	78,3	61,8	22,8	0,3	324,3	61,5	112,7	74,9	59,6	93,3	91,9	493,9
VGP	43,8	82,6	82,8	49,9	57,8	52,8	369,7	44	83	83	50	58	53	371



Slika 14. Ukupne godišnje padavine (mm) u vegetacionom periodu na ispitivanim lokacijama

Sirkovi se mogu gajiti u predelima sa godišnjim količinama padavina 400-600 mm. Uslovno optimalne potrebe biljaka sirka su 490 mm (Glamočlija i sar. 2015). Suma aktivnih temperatura za vegetacioni period sirka je 3.000-3.500°C. Visoke i vrlo visoke temperature biljke sirka dobro podnose. Na temperaturi od 45°C sirak nesmetano raste, (Boulard i Wang 2002). Snažnim korenovim sistemom velike upijajuće moći sirak koristi biljna hraniva iz teže pristupačnog oblika u zemljištima manje plodnosti

4.2. Agrohemijske osobine zemljišta i digestata

4.2.1. Karakteristike zemljišta

Ispitivana zemljišta su bila neutralne reakcije, slabo do srednje karbonatna, sa visokim sadržajem organskog ugljenika, umerenim sadržajem azota, visoko snabdevena fosforom i kalijumom, EC je veća na L1- Ilandža nego na L2 - Dolovo, ali u prihvatljivim granicama (Tabela 9). Uočene razlike u ispitivanim parametrima ne mogu u potpunosti da objasne razlike u produktivnosti zemljišta na ispitivanim lokacijama. Zbog povećane elektroprovodljivosti na lokaciji Ilandža urađena je analiza sadržaja soli u zemljištu (Cl^{-1} 887,5 mg/kg) i vodi kojom je ranije vršeno intenzivno zalivanje (63,5 mg/l). Na osnovu rezultata analiza preporučeno je đubrenje za industrijski sirak sa 200kg NPK (15:15:15)/ha.

Tabela 9. Agrohemijske osobine zemljišta. Predstavljene su srednje vrednosti tri uzorka sa iste lokacije $\pm$ SE

Lokacija	¹ pH (KCl)	C _{org} (%)	N _{tot} (%)	P ₂ O ₅ (mg/100g)	K ₂ O (mg/100g)	CaCO ₃ (%)	EC (mS cm ⁻¹)
L1	6.95 $\pm$ 0.30	3.62 $\pm$ 1.65	0.14 $\pm$ 0.04	39.53 $\pm$ 0.20	38.01 $\pm$ 0.22	2.04 $\pm$ 0.46	0,16 $\pm$ 0,02
L2	7.00 $\pm$ 0.10	4.02 $\pm$ 0.55	0.20 $\pm$ 0.02	40.00 $\pm$ 0.6	34.13 $\pm$ 0.08	2.86 $\pm$ 0.12	0.07 $\pm$ 0.01

4.2.2. Karakteristike digestata

Sastav digestata koji je primenjen je prikazan u Tabeli 10. Sadržaj suve materije se kretao u opsegu 12.29-12.69%; sadržaj organskog ugljenika 6.98 - 7.36 %: sadržaj ukupnog azota 0.49-0.60%; sadržaj P₂O₅ 0.17-0.48 % i sadržaj K₂O 0.19 - 0.20 g/kg. Sadržaj suve materije se nije značajno menjao, jer je posledica prvenstveno AD fermentora. Sadržaj N, P i K je bio različit u zavisnosti od sirovine koja je korišćena za proizvodnju biogasa. U svim slučajevima je sirovina bila silaža (kukuruza, pšenice i sirka) zajedno sa stajnjakom (svinjskim i goveđim) u različitim

odnosima. Primenom 50 t/ha digestata (ADD) je u zemljište uneto oko 200 kg C/ha, ¹27 kg N/ha, 1,6 kg P/ha i 9,8 kg K/ha.

Tabela 10: Sastav korišćenog digestata

	2016	2017	2018	prosek
Sadržaj vlage (%)	87,31	87,71	87,62	87,55
Suva materija (%)	12,69	12,29	12,38	12,45
C _{org} (%)	7,36	6,98	7,15	7,16
N _{tot} (%)	0,60	0,49	0,53	0,54
P ₂ O ₅ (%)	0,48	0,17	0,31	0,32
K ₂ O (%)	0,20	0,19	0,19	0,20

4.3. Rezultati poljskog oglada

Poljski ogled je postavljen na dva lokaliteta L1 – Ilandža na hidrogenoj ritskoj crnici i L2 – Dolovo na černozenju, u dve varijante: kontrola (C) i digestat (ADD). U toku tri uzastopne godine su praćene morfometrijske osobine sirka: broj listova po stablu (NL) i visina stabla (PH), kao i prinosi sveže i suve biomase (BY) sirka i prinosi biogasa (BGY). Varijabilnost ispitivanih uzoraka iskazana koeficijentom varijacije za sve osobine bila je veoma mala što govori o homogenosti uzoraka ($0.64\% < C_v < 21.94\%$). U prvoj eksperimentalnoj godini, 2016-oj ostvaren je najveći broj listova na biljkama sirka, dok su u 2018. godini izmerene najveće vrednosti za visinu biljaka i prinos biomase. Digestat je ispoljio veće vrednosti svih ispitivanih osobina sirka u sve tri esperimentalne godine.

4.3.1. Broj listova po stablu

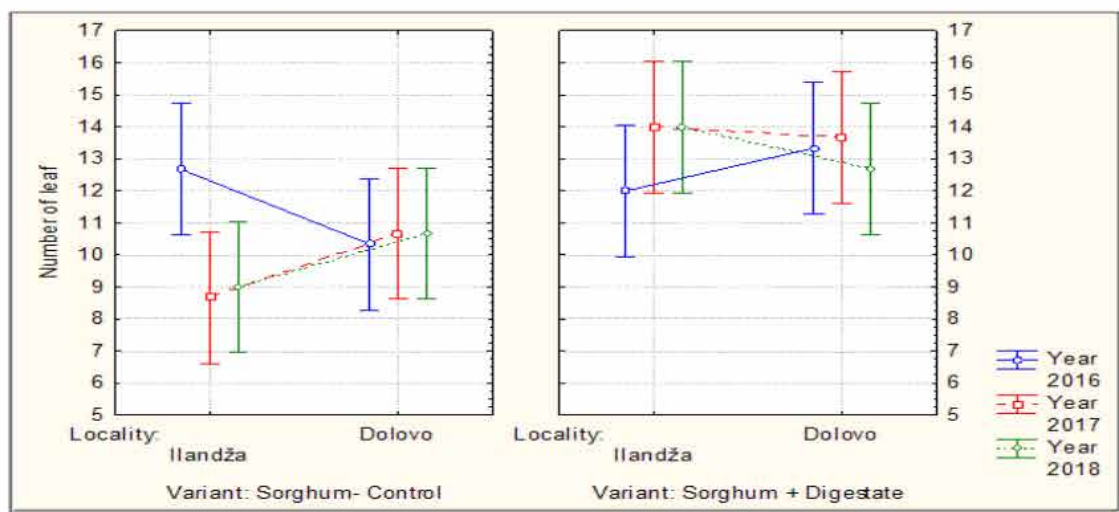
Najveći broj listova po stablu sirka (14.01) je izbrojan u Ilandži uz primenu digestata 2018. godine, a najmanji (8.66) na istoj lokaciji 2017. god. u kontrolnoj varijanti bez digestata. U 2018. godini, prosečan broj listova sirka (za obe lokacije i varijante oglada) iznosio je 11.58 i bio je manji u odnosu na broj listova na biljkama iz 2017. i 2016. godine (11.75 i 18) (Tabela 11), ali razlike nisu bile značajne. Vrednosti za broj listova na biljkama između kontrolnog materijala i

varijante prihrane ¹⁰ bila je statistički značajno različita ($p<0.05$). U kontrolnoj varijanti broj listova iznosio je 10.33, a u varijanti prihrane 13.28. Ostvarena je razlika od 2,95 odnosno od 28.56%. Lokalitet, kao faktor ispoljio je statistički značajno dejstvo na promenu broja listova po biljci. Statistički značajno veći broj listova ¹⁰ po biljci izmeren je na L2, u Dolovu, 11.89, u odnosu na prvi lokalitet L1- Ilindža, 11,72 ($p<0.01$).

Interakcija faktora $L \times Y \times V$ statistički je značajno uticala na promenu broja listova na biljkama sirka (Slika 15).

Tabela 11. Uticaj primene digestata na broj listova po stablu sirka

Lokacija	Varijanta	2016	2017	2018	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	CV
L1	Kontrola	12.66±5.51	8.66±0.57	9.00±0.07	10.11±3.37	21.94
	Digestat	12.00±1.00	14.00±1.00	14.01±1.01	13.33±1.32	8.68
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	11.83±1.72	12.17±1.72	11.67±1.21	11.89±1.49	2.15
L2	Kontrola	10.33±0.57	10.66±0.57	10.67±0.57	10.55±0.53	1.83
	Digestat	13.33±0.57	13.66±0.58	12.66±0.57	13.22±0.66	3.85
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	11.83±1.72	12.17±1.72	11.67±1.21	11.89±1.49	2.15
Kontrola prosek		11.50±3.73	9.67±1.21	9.83±0.99	10.33±2.33	9.81
Digestat prosek		12.67±1.03	13.83±0.75	13.33±1.03	13.28±1.02	4.38
PROSEK		12.08±2.68	11.75±2.38	11.58±2.07	11.80±2.33	2.15



Slika 15. Interakcija lokaliteta i prihrane na broj listova po stablu sirka.

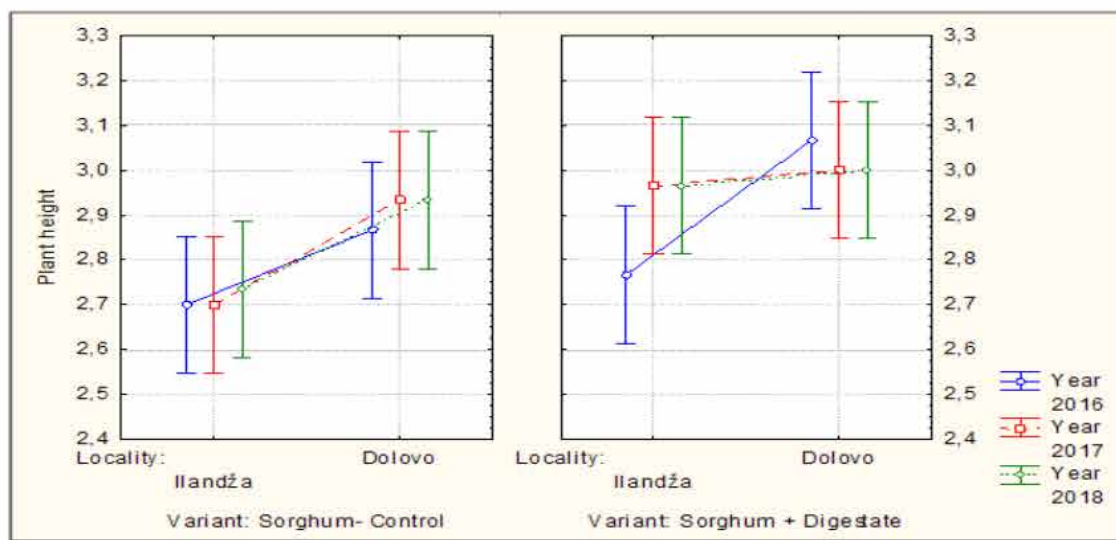
4.3.2. Visina stabla

U 2016. godini, prosečna visina biljaka sirka, u obe varijante ogleda i na obe ispitivane lokacije, iznosila je 2.85 m i bila je statistički značajno manja u odnosu na visinu biljaka iz 2017. i 2018. godine (2.90 m) (Tabela 12).

Tabela 12. Uticaj primene digestata na visinu (m) biljaka sirka

Lokacija	Varijanta	2016	2017	2018	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	CV
L1	Kontrola	2.70±0.17	2.70±0.10	2.73±0.12	2.71±0.12	0.64
	Digestat	2.76±0.12	2.97±0.12	2.96±0.21	2.90±1.17	4.09
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	2.78±0.17	2.82±0.15	2.83±0.15	2.81±0.14	0.94
L2	Kontrola	2.87±0.15	2.93±0.06	2.93±0.12	2.96±0.11	1.28
	Digestat	3.07±0.12	3.00±0.10	3.00±0.10	3.02±0.10	1.25
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	2.91±0.19	2.98±0.09	2.98±0.15	2.96±0.15	1.48
Kontrola prosek		2.78±0.17	2.82±0.15	2.83±0.15	2.81±0.15	0.94
Digestat prosek		2.92±0.19	2.98±0.09	2.98±0.15	2.96±0.15	1.17
PROSEK		2.85±0.19	2.90±0.15	2.90±0.16	2.89±0.16	1.27

Najmanja visina biljaka je izmerena 2016. i 2017. godine u Ilandži, (2.70m) bez primene digestata, a najveća 2016. godine u Dolovu, uz primenu digestata (3.07). U varijanti sa digestatom na lokaciji L1- Ilandža visina biljaka je veća (2.90 m) u odnosu na varijantu bez prihrane (2.71 m). Vrednosti za visinu biljaka između kontrolnog materijala i varijante prihrane ¹⁰ bila je statistički značajno različita ($p < 0.05$). Na drugoj lokaciji, L2 – Dolovo, visina biljaka se neznatno razlikovala u odnosu na varijantu oglada. Lokalitet, kao faktor, ispoljio je statistički značajno dejstvo na promenu visine biljaka. Statistički značajno veća visina biljaka izmerena je na lokalitetu 2 - L2, u Dolovu, L2=2.96 m, u odnosu na prvi lokalitet L1, na Ilandži, L1 = 2,81 m, ¹⁰ ($p < 0.01$). Interakcija faktora LxYxV statistički je značajno uticala na promenu visine biljaka sirka (Slika 16).



Slika 16. Interakcija lokaliteta i prihrane na visinu stabla sirka

4.3.3. Prinos biomase

Prinos biomase je meren nakon prvog košenja u fazi metličanja, sredinom jula, kada je sadržaj suve materije bio oko 30%. Rezultati su prikazani u odnosu na suhu i svežu biomasu.

Prinos biomase (DM, prvo košenje) bio je najveći u 2018. godini (41,74 t/ha) na černozemu (L2 - Dolovo) uz primenu digestata. Najmanji prinos biomase je izmeren 2016. godine na ritskoj crnici L1 – Ilandža (36.19 t/ha). Prosečni prinos biomase (sve godine i obe lokacije) je manji u varijanti bez digestata ($C=38,60$ t/ha) u odnosu na varijantu sa primenom digestata ($ADD = 39,96$ t/ha), pri čemu je razlika $1,36$ t/ha (3,40%) ($p<0,01$). U Ilandži, $L1 = 37,90$ t/ha, prinos suve biomase je manji nego u Dolovu, $L2 = 39,96$ t/ha ($p>0,01$) (Tabela 13).

Tabela 13. Uticaj primene digestata na prinos suve biomase (t/ha god) biljaka sirka

Lokacija	Varijanta	2016	2017	2018	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	CV
L1	Kontrola	36.19±0.67	36.12±0.43	37.10±0.42	36.47±0.66	1.49
	Digestat	39.18±0.64	37.38±2.24	36.36±0.67	38.64±1.55	2.83
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	37.84±1.88	37.31±1.34	38.54±1.60	37.90±1.60	1.62
L2	Kontrola	39.50±0.34	38.50±0.18	39.97±0.14	39.33±0.55	1.91
	Digestat	40.04±0.42	41.05±0.58	41.74±0.45	41.28±0.55	1.01
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	40.11±1.13	39.21±2.49	40.56±1.39	39.96±1.78	1.71
Kontrola prosek		37.85±1.88	37.31±1.34	38.54±1.60	38.60±1.63	1.62
Digestat prosek		40.11±1.13	39.21±2.49	40.55±1.40	39.96±1.78	1.71
PROSEK		39.96±1.78	38.26±2.78	39.54±1.78	38.93±1.96	1.65

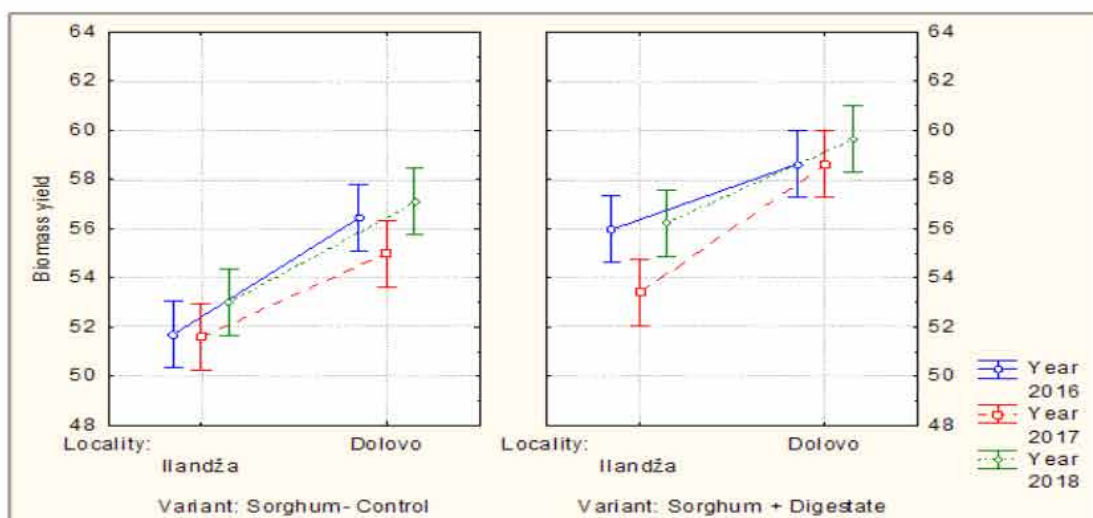
Prinos sveže biomase (t/ha)

Prinos biomase (sadržaj suve materije 28%, odnosi se na prvi otkos u godini) bilo je statistički značajno veći u 2018. godini (56.49 t/ha) u odnosu na 2016. i 2017. godinu (55.68 t/ha i 54.66 t/ha), $p<0.01$. Najveći prinos sveže biomase bio 2018. godine u Dolovu, na černozemu sa primenom digestata 59.63 t/ha, a najmanji 2017. god. U Ilandži na ritskoj crnici 51.60t/ha. Kada se posmatraju obe lokacije i sve godine ispitivanja, u kontrolnoj varijanti (bez primene digestata) ostvaren je statistički značajno manji prinos biomase (54.14 t/ha) u odnosu na varijantu sa digestatom, 57,08 t/ha. Razlika u prinosu biomase sirka između kontrole i varijante sa digestatom iznosila je 2.95 t/ha i bila je statistički značajna, $p<0.01$.

Tabela 14. Uticaj primene digestata na prinos sveže biomase (t/ ha god) biljaka sirka

Lokacija	Varijanta	2016	2017	2018	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	CV
L1	Kontrola	51.70±0.95	51.60±0.62	53.00±0.60	52.10±0.94	1.49
	Digestat	55.97±0.91	53.40±3.20	56.23±0.95	55.20±2.20	2.83
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	54.06±2.68	53.30±1.91	55.05±2.28	54.14±2.29	1.62
L2	Kontrola	56.43±0.49	55.00±0.26	57.10±0.20	56.18±0.97	1.91
	Digestat	58.63±0.60	58.64±0.83	59.63±0.64	58.97±0.78	1.01
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	57.30±1.61	56.02±3.55	57.93±1.99	57.08±2.51	1.71
Kontrola prosek		54.07±2.68	53.30±1.91	55.05±2.28	55.14±2.29	1.62
Digestat prosek		57.30±1.61	56.02±3.55	57.93±1.99	57.08±2.51	1.71
PROSEK		55.68±2.07	54.66±3.06	56.49±2.54	55.61±2.80	1.65

U Ilandži, L1=54.14 t/ha, prinos sveže biomase je bio značajno manji u odnosu na drugi lokalitet, L2=57,08 (p>0.01) (Slika 17).



Slika 17. Interakcija lokaliteta i prihrane na prinos sveže biomase sirka

4.3.4. Prinos biogasa

Prinos biogasa je meren standardnom metodom i odnosi se na potencijal određenog biorazgradljivog materijala da produkuje biogas u laboratorijskim (optimalnim) uslovima i izražen u Nm^3/t (sveže mase). Rezultati se odnose na svežu materiju, suhu materiju ili organsku suhu materiju, a prinos biogasa (i metana) na normalne uslove. Silaža sirka spremna za analizu potencijala biogasa prikazana je na Slici 18.

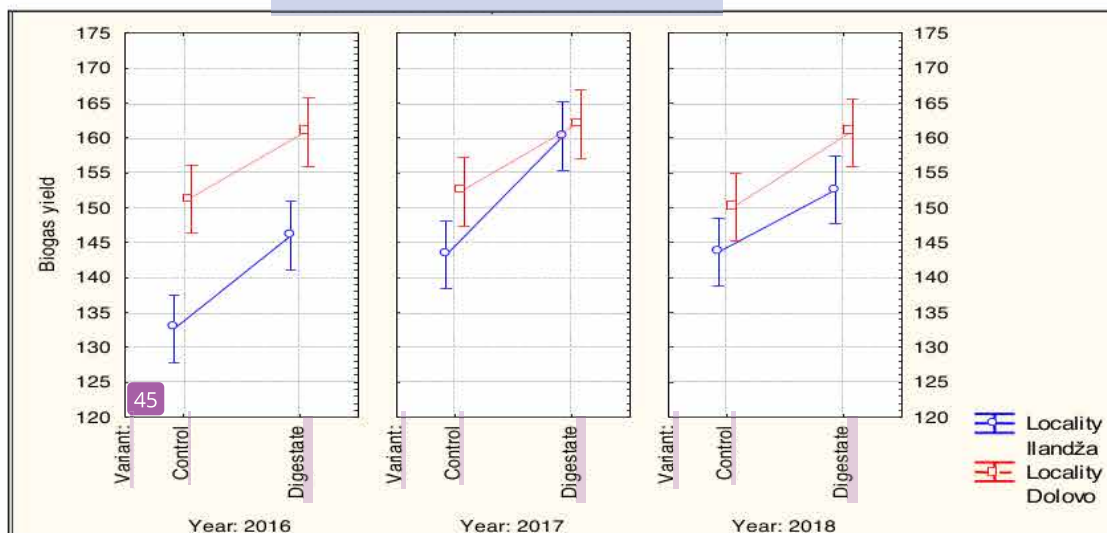


Slika 18: Silaža sirka

Najniži prinos biogasa (PBG Nm³/t) je 132,67 Nm³/t bio je 2016. godine na lokaciji Ilandža bez primene digestata, a najveći 162 Nm³/t u Dolovu, uz primenu digestata 2017. godine. Prosečan prinos biogasa (PBG) bio je 147,68 Nm³/t, 154,45 Nm³/t i 151,74 Nm³/t tokom 2016., 2017. i 2018. godine, respektivno. U prvoj godini istraživanja prinos biogasa je bio znatno manji nego u narednim godinama na obe lokacije i obe varijante ogleda. Značajno veći prinos biogasa je izmeren na L2 – Dolovo (černozem) 156,18 Nm³/t u poređenju sa L1 – Ilandža (ritska crnica) 146,40 Nm³/t, (p<0,01). Prihrana digestatom, prosečno za sve tri ispitivane godine i obe lokacije doprinela je većem prinosu biogasa (157,05 Nm³/t) u poređenju sa kontrolom (145,53 Nm³/t), <0,05) (Tabela 15). Efekat digestata je bio 11,52 Nm³/t (7,92%). Uticaj primene digestata je izraženiji na lokaciji L1- Ilandža – ritska crnica (8.54%), nego na lokaciji L2 – Dolovo – černozem (6,19%).

Tabela 15. Uticaj primene digestata na prinos biogasa (Nm³/t) iz silaže sirka

Lokacija	Varijanta	2016	2017	2018	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	CV
L1	Kontrola	132.67±10.88	143.27±1.22	143.67±4.09	139.87±7.8	4.46
	Digestat	146.00±6.63	160.27±0.70	152.53±4.23	152.93±7.3	4.67
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	139.33±10.87	151.77±9.35	148.10±5.88	146.4±9.97	4.37
L2	Kontrola	151.23±0.86	152.30±1.74	150.06±1.15	151.2±1.48	0.74
	Digestat	160.80±1.37	162.00±1.74	160.70±0.62	161.17±1.3	0.45
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	156.17±5.34	157.15±5.54	155.38±5.88	156.18±5.3	0.57
Kontrola prosek		141.95±9.88	147.78±1.14	146.87±2.60	145.53±4.1	3.62
Digestat prosek		153.40±5.83	161.14±1.49	156.61±2.40	157.1±3.78	2.71
PROSEK		147.68±11.94	154.45±7.84	151.74±6.77	151.29±9.3	2.25



Slika 19. Interakcija lokaliteta i prihrane na prinos biogasa iz silaže sirka

4.3.5. Analiza varijanse

Analiza varijanse trofaktorijskog ogleda je prikazana u Tabeli 16, a odnosi se na uticaj godine u kojoj je sproveden poljski ogled, primene digestata i lokacije kao i na interakciju pomenutih faktora koji utiču na morfometrijske karakteristike sirka (broj listova po stablu i visina stabla) i prinos biomase i biogasa. Analizom varijanse je utvrđeno da na visinu biljaka sirka statistički vrlo značajno utiče lokalitet ($F_{exp} = 14.25^{**}$) i prihrana digestatom ($F_{exp} = 12.36^{**}$), a statistički značajno godina ($F_{exp} = 0.73^{*}$) i interakcija prihrane i lokacije $V \times L$ ($F_{exp} = 0.83^{*}$), godine i lokacije ($F_{exp} = 0.73^{*}$), kao i interakcija sva tri faktora $L \times G \times V$ ($F_{exp} = 1.54^{*}$). Na broj listova po stablu statistički vrlo značajno utiče lokacija ($F_{exp} = 14.26^{**}$), varijanta (primena digestata) ($F_{exp} = 12.38^{**}$), a statistički značajno utiče godina ($F_{exp} = 0.74^{*}$), dok interakcija faktora nije statistički značajna. Na prinos biomase sirka vrlo značajno utiče lokacija ($F_{exp} = 107.12^{**}$) i varijanta (primena digestata) ($F_{exp} = 60.34^{**}$), a statistički značajno utiče godina ($F_{exp} = 7.84^{*}$) i interakcija faktora G (godina) $\times L$ (lokacija) $\times V$ (varijanta) ($F_{exp} = 2.27^{*}$). Na prinos biogasa (Nm^3/t) vrlo značajno utiče lokalitet ($F_{exp} = 51.10^{**}$) i varijanta ($F_{exp} = 70.82^{**}$), a značajno utiče godina ($F_{exp} = 70.82^{*}$) i interakcija L (lokacija) $\times G$ (godina) $\times V$ (varijanta) ($F_{exp} = 6.52^{*}$).

Tabela 16. Rezultati analize varijanse trofaktorijalnog ogleda: V = varijanta: +/- digestat; G = godina; L = lokacija; PB = prinos biomase, t DM/ha; PBG = prinos biogasa; BL = broj listova po stablu; VB = visina biljaka; ns Stat. non-significant; * i ** significant at $p < 0.05$ i $p < 0.01$

Parametar		Varijanta	Godina	Lokacija	G & V	V & L	G & L	Y & V & L
Visina biljaka (VB)								
Test	F	12.36*	0.73*	14.25*	0.05 ^{ns}	0.83*	0.73*	1.54*
LSD	0.5	0.088	0.108	0.088	0.153	0.125	0.153	0.216
	0.1	0.119	1.146	0.119	0.207	0.169	0.207	0.293
Broj listova (BL)								
Test	F	12.36*	0.73 ^{ns}	14.25*	0.95 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.49 ^{ns}	0.23 ^{ns}
LSD	0.5	1.180	1.454	1.180	2.056	1.678	2.056	2.907
	0.1	1.608	1.969	1.608	2.773	2.274	2.773	3.939
Prinos biomase (PB)								
Test	F	60.37**	7.84*	107.12**	0.16 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.27 ^{ns}	2.27*
LSD	0.5	0.783	0.959	0.783	1.356	1.107	1.356	1.917
	0.1	1.061	1.299	1.061	1.837	1.499	1.837	2.598
Prinos biogasa (PBG)								
Test	F	70.82**	8.30*	51.10**	0.58 ^{ns}	1.28 ^{ns}	6.52*	0.93 ^{ns}
LSD	0.5	2.814	3.440	2.814	4.873	3.979	4.874	6.888
	0.1	3.803	4.641	3.803	6.586	2.779	6.587	9.309

4.3.6. Korelacija ispitivanih obeležja

Rezultati relativne zavisnosti ispitivanih indikatora sirka iskazani Pearson-ovim koeficijentom korelacije pokazani su u Tabeli 17.

Prinos biomase bio je u pozitivnoj i statistički veoma značajnoj zavisnosti sa lokalitetom gajenja (0.71**), prinosom biogasa (0.68**) i padavinama (0.61**) i u pozitivnoj statistički značajnoj zavisnosti sa digestatom (0.53*) i visinom biljaka (0.59*), Tabela 4.

Broj listova bio je u pozitivnoj, statistički veoma značajnoj zavisnosti sa varijantom prihrane (0.64**) i u pozitivnoj statistički značajnoj zavisnosti sa visinom biljaka (0.37*).

Visina biljaka bila je u pozitivnoj statistički značajnoj zavisnosti sa prinosom biomase (0.59*), lokalitetom gajenja (0.50*), padavinama (0.51*), prihranom (0.46*) i brojem listova (0.37*). Dok su visina biljaka i broj listova bili u negativnoj korelaciji sa temperaturama, ali ne beleže statistički značajnu zavisnost.

Prinos biogasa bio je u pozitivnoj, statistički veoma značajnoj zavisnosti sa digestatom (0.63**), prinosom biomase (0.68**) i temperaturama (0.61**) i u pozitivnoj statistički značajnoj zavisnosti sa lokalitetom gajenja (0.53*), visinom biljaka (0.59*) i brojem listova (0.43*).

Može se uočiti da prinosi biomase i biogasa imaju veoma značajnu statističku zavisnost sa lokalitetom gajenja, digestatom i visinom biljaka. Prinos biogasa nije pokazao zavisnost sa padavinama, što nam govori da je sirak ima visok stepen tolerancije na nedostatak padavina i poželjan je za gajenje u promenljivim uslovima izazvanim klimatskim promenama.

Tabela 17. Korelaciona analiza u ogledu sa sirkom. V = varijanta: +/- digestat; G = godina; L = lokacija; PB = prinos biomase, t DM/ha; PBG = prinos biogasa; BL = broj listova po stablu; VB = visina biljaka; T = temperatura; P = padavine. ns non-significant; * i ** significant at $p < 0.05$ i $p < 0.01$

Parametar	V	G	L	PB	BL	VB	PBG	T	P
Prinos biomase	0.53*	0.12 ^{ns}	0.71**	1.00	0.32 ^{ns}	0.59*	0.68**	0.14 ^{ns}	0.61**
Broj listova	0.64**	-0.09 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.32 ^{ns}	1.00	0.37*	0.43*	-0.03 ^{ns}	-0.03 ^{ns}
Visina biljke	0.46*	0.15 ^{ns}	0.50*	0.59*	0.37*	1.00	0.59*	-0.08 ^{ns}	0.51*
Prinos biogasa	0.63**	0.18 ^{ns}	0.53*	0.68**	0.43*	0.59*	1.00	0.61**	-0.22 ^{ns}

Istraživanja su nastavljena i posle navedenog poljskog ogleda. Tako je u toku 2021. godine postavljen poljski ogled u Ilandži (ista lokacija kao za prethodni) sa dva genotipa sirka:

KWS Buldozer (kao i u prethodnom ogledu) i Siloking (razvijen u Institutu za ratarstvo i povrtarstvo u Novom Sadu), u kontrolnoj varijanti i varijanti sa primenom digestata pod istim uslovima. Od morfometrijskih karakteristika je praćen broj listova po stablu. Broj listova po stablu je bio najveći za sortu Buldozer uz primenu digestata (15.33), a najmanji za Siloking bez primene digestata (12.00). Za oba ispitivana genotipa digestat je ispoljio statistički značajan pozitivan uticaj na broj listova (Trkulja et al. 2022).

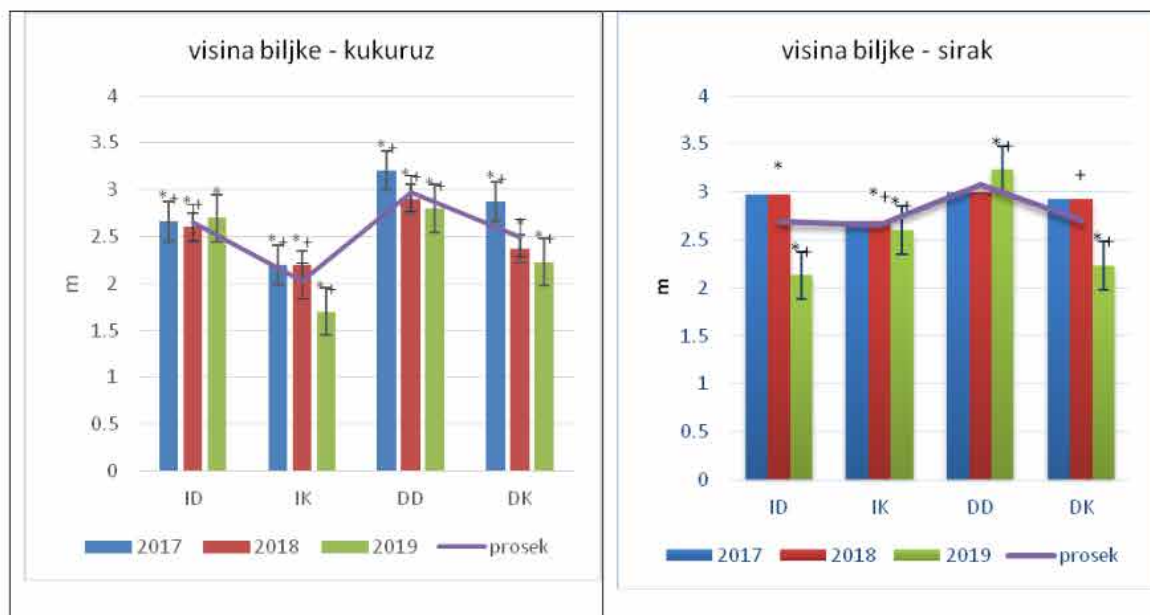
4.4. Komparativna analiza prinosa biomase i biogasa sirka i kukuruza

U Evropi se u biogas postrojenjima najviše koristi silaža kukuruza zbog najvišeg sadržaja energije, ali ovo dovodi u pitanje održivost celog proizvodnog ciklusa, jer se radi o usevu koji se inače koristi za ishranu ljudi ili stoke (biomasa I generacije).

Kao eksterna kontrola za ogled sa sirkom, postavljen je i poljski ogled sa kukuruzom, sa istim varijantama.

4.4.1. Visina biljaka

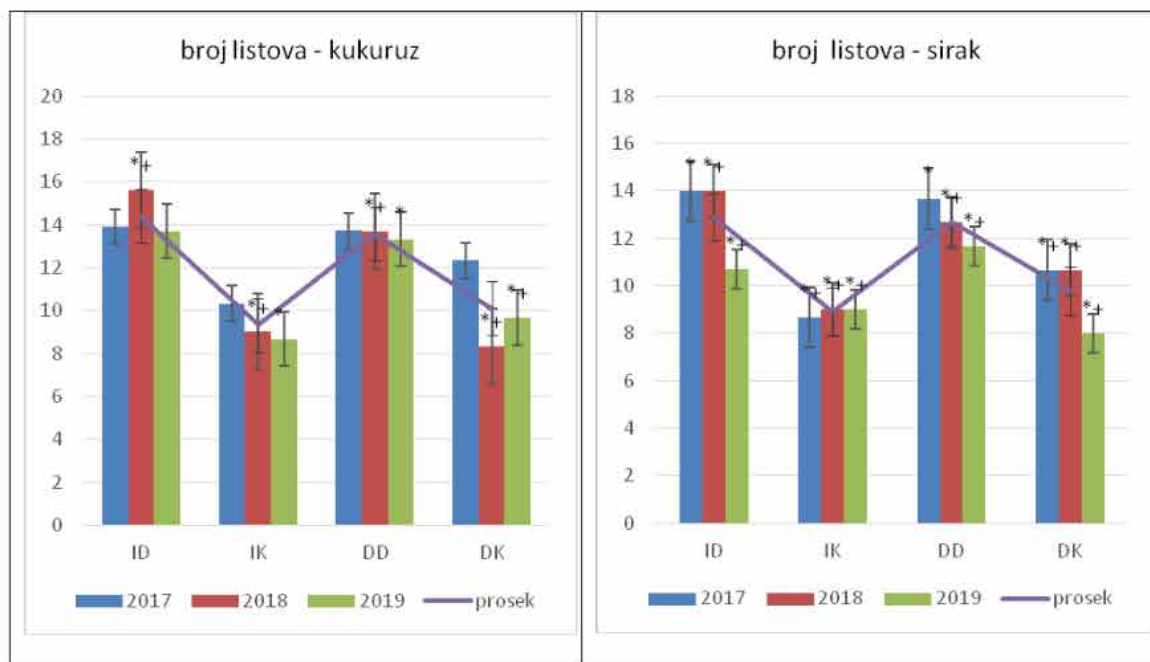
Produkcija biomase za silažu je praćena preko visine biljaka, broja listova po stablu i prinosa biomase, koja je u trenutku žetve sadržala oko 35% vlage. Za obe ispitivane vrste agroenergetskih useva, visina biljaka je bila najveća na lokaciji Dolovo sa primenom AD digestata. Za kukuruz, primena AD digestata uzrokuje statistički značajno povećanje visine biljaka u sva tri ispitivana vegetaciona perioda i na obe lokacije, dok su kod sirka ove razlike manje izražene (Slika 20).



Slika 20: Komparacija visine (m) biljaka kukuruza i sirka. ⁵ * značajno različito u odnosu kontrola/digestat; + značajno različito u odnosu na lokaciju

4.4.2. Broj listova po stablu

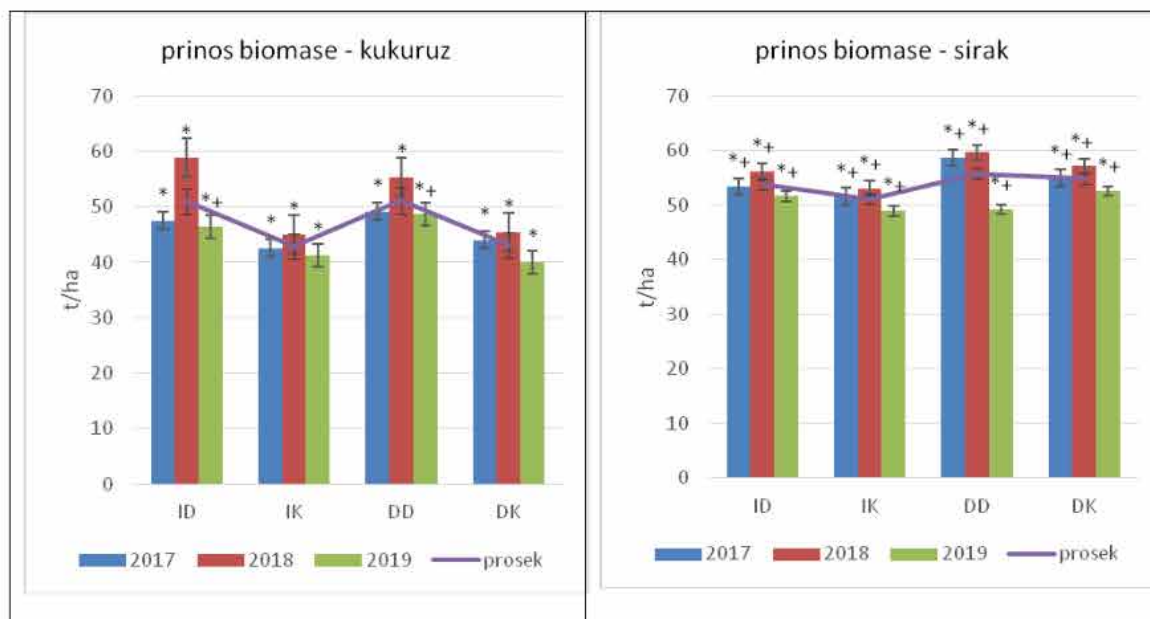
Broj listova na stablu je takođe statistički značajno veći kod obe ispitivane vrste, na oba lokaliteta i u svim ispitivanim godinama. U ovom slučaju su razlike i kod sirka na nivou značajnosti $p < 1\%$ (Slika 21).



Slika21. Komparacija broja listova na stablu kukuruza i sirka. ⁵*značajno različito u odnosu kontrola/ digestat; + značajno različito u odnosu na lokaciju

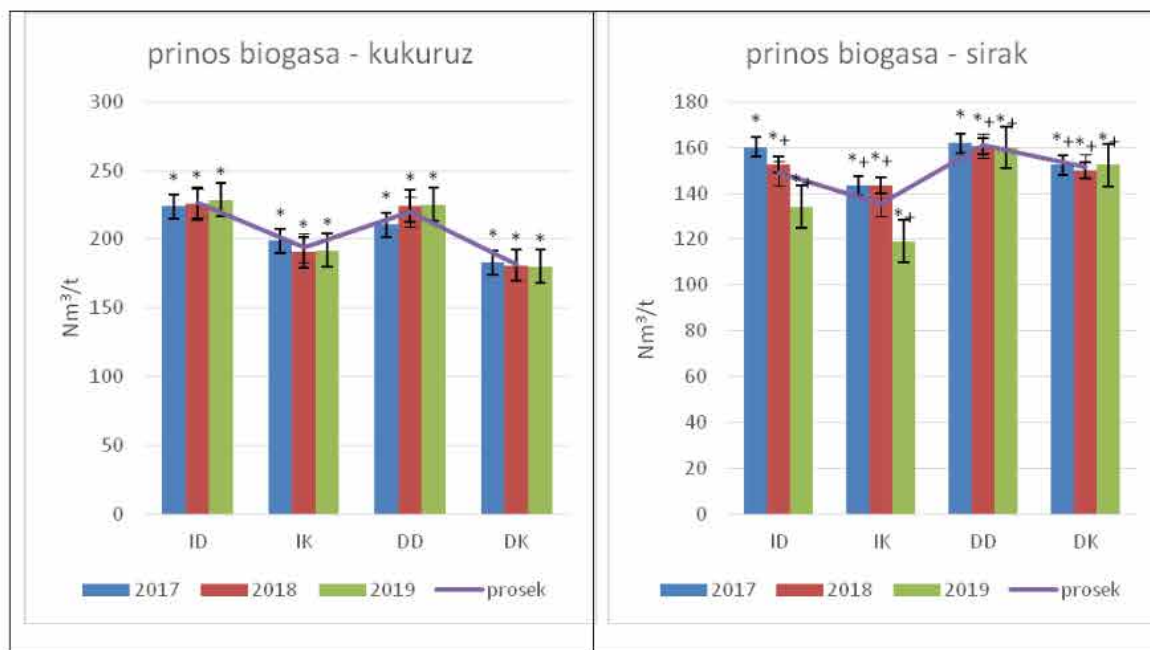
4.4.3. Produkcija biomase

Morfometrijske karakteristike useva su uticale i na produkciju biomase. Prinosi pokazuju istu tendenciju kao i broj listova, pri čemu su razlike između kontrolnih i tretiranih parcela veće za kukuruz nego za sirak (Slika 22). Dobijeni prinosi su u rangi očekivanih za primenjene hibride kukuruza i sirka.



Slika 22. Komparacija prinosa biomase (t/ha) kukuruza i sirka. * značajno različito u odnosu kontrola/ digestat; + značajno različito u odnosu na lokaciju

Kako se požnjevena biomasa posle siliranja koristi kao sirovina u AD procesu, najvažniji parametar je prinos biogasa. Prinos biogasa je varirao tokom ispitivanih godina, ali u svim je bio značajno viši za silažu proizvedenu od biomase koja je požnjevena sa parcela na kojima je primenjen digestat u odnosu na kontrolne parcele i to za oba useva (Slika 23). Za kukuruz su postignuti isti rezultati na degradiranom (Ilandža) i plodnom (Dolovo) zemljištu uz primenu digestata. Za sirak su postignute manje količine biogasa u odnosu na kukuruz, što je i očekivano



Slika 23. Komparacija prinosa biogasa (Nm^3/t) silaže kukuruza i sirka * značajno različito u odnosu kontrola/ digestat; + značajno različito u odnosu na lokaciju

4.4.4. Prinos biogasa is silaže kukuruza

Prosečan prinos biogasa, za sve ispitivane faktore: godine, varijante i lokalitete gajenja, iznosio je $205,83 \text{ m}^3/\text{t}$, standardna devijacija je iznosila 17,74 a standardna greška 2,95. Digestat je imao statistički značajan uticaj na prinos biogasa. Prinos biogasa varirao je od $189,67 \text{ m}^3/\text{t}$ (C) do $221,99 \text{ m}^3/\text{t}$ (AD). U varijanti sa digestatom ostvareno je biogasa više za $32,32 \text{ m}^3/\text{t}$ odnosno za 17,04%.

Lokalitet gajenja imao je statistički značajan uticaj na prinos biogasa. Prinos biogasa varirao je od $201,22 \text{ m}^3/\text{t}$ (L2-Dolovo) do $210,44 \text{ m}^3/\text{t}$ (L1-Ilandža). Lokalitet L1 imao je veću produkciju biogasa za $9,22 \text{ m}^3/\text{t}$ odnosno za 4,58% u odnosu na L2 (Slika 23).

Korelacije ispitivanih faktora u ogledu sa kukuruzom.

Prinos biogasa bio je u pozitivnoj vrlo značajnoj korelaciji sa prihranom u sve tri ispitivane godine ($r=0,96^{**}$; $r=0,86^{**}$; $r=0,97^{**}$) i u pozitivnoj značajnoj korelaciji sa visinom

biljaka u 2018. ($r=0,74^*$) i u pozitivnoj korelaciji u 2016. i 2017. godini ($r=0,44$; $r=0,09$) koja nije statistički značajna (Tabela 18).

Tabela 18. Korelacije ispitivanih faktora u ogledu sa kukuruzom

Parametar	Visina biljke	Prinos biogasa	prihrana	Padavine	Temperatura
2016					
Visina biljke	47 ⁻	0.44 ^{ns}	0.62 ^{**}	0.66 [*]	-0.66 [*]
Prinos biogasa	0.44 ^{ns}	-	0.96 ^{**}	-0.23 ^{ns}	0.22 ^{ns}
2017					
Visina biljke	46 ⁻	0.09 ^{ns}	0.54 ^{**}	0.80 [*]	-0.80 [*]
Prinos biogasa	0.09 ^{ns}	-	0.86 ^{**}	-0.48 ^{ns}	0.49 ^{ns}
2018					
Visina biljke	-	0.74 [*]	0.75 [*]	0.32 ^{ns}	0.31 ^{ns} 42
Prinos biogasa	0.74 [*]	-	0.97 ^{**}	-0.14 ^{ns}	-0.13 ^{ns}
ns – non significant; *, ** - significant at 0.5 and at 0.1					

4.4.5. Prinos biogasa po ha

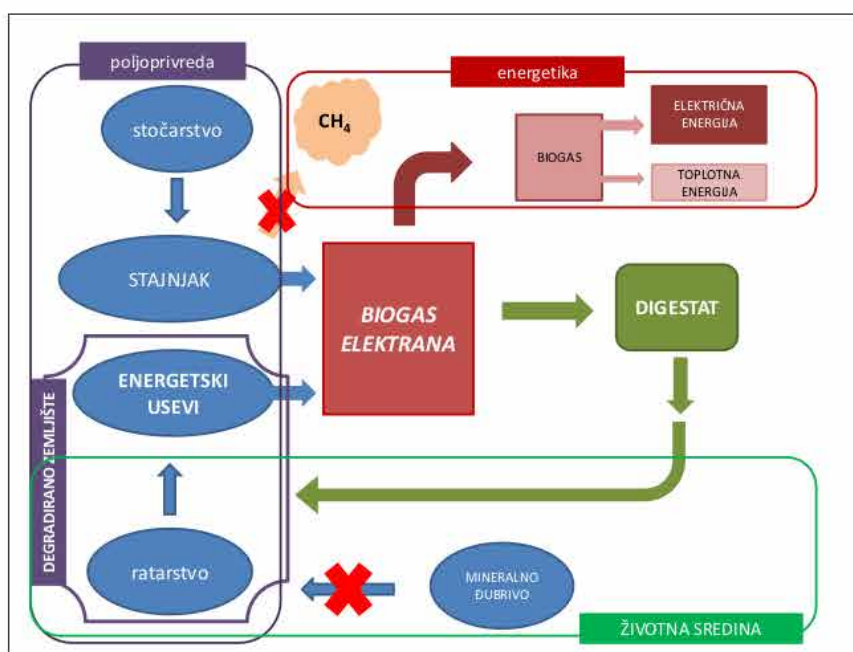
U praksi je prinos biogasa po jedinici površine zemljišta na kome se gaje agroenergetski usevi korisniji parametar. Rezultati poljskih ogleda su prikazani u Tabeli 19. Za kukuruz su značajno veći prinosi biogasa po ha, na obe ispitivane lokacije, bili uz upotrebu digestata, dok razlike između lokacija nisu statistički značajne. Za sirak su dobijeni niži prinosi biogasa po ha u svim varijantama ogleda u odnosu na kukuruz, osim u varijanti sa primenom digestata na lokaciji Ilandža (degradirano zemljište). I za sirak su viši prinosi zabeleženi uz primenu digestata u odnosu na kontrolu (bez dodatnog đubrenja), ali su razlike manje nego za kukuruz. Najviši prinos biogasa po ha je nađen za kukuruz na lokaciji L1 (degradirano zemljište) uz primenu digestata, a razlika u odnosu na lokaciju nije statistički značajna. Najniži prinos biogasa po ha je na L2 bez dodatnog đubrenja digestatom.

Tabela 19. Uporedni prikaz prinosa biogasa po ha za kukuruz i sirak

Varijanta		Prinos silaže t_{svm}/ha	Prinos biogasa Nm^3/t_{svm}	Prinos biogasa Nm^3/ha
kukuruz	L1 K	38,65	193,68	7485
	L1D	45,82	226,27	10367
	L2K	38,87	181,41	7051
	L2 D	45,96	219,94	10108
sirak	L1 K	46,89	139,87	6559
	L1D	49,68	152,93	7598
	L2K	50,56	151,2	7645
	L2 D	53,07	161,17	8554

5. DISKUSIJA

Proces proizvodnje biogasa u postrojenju anaerobne digestije koristi biomasu: stajnjak (poreklom od goveda, svinja ili živine) i silažu, a kao produkti procesa se javljaju biogas i digestat. Stajnjak, kao nusproizvod iz stočarske proizvodnje, u procesu anaerobne digestije oslobađa metan, koji je osnovni energetski sastojak biogasa, čime se sprečava emisija gasova sa efektom staklene bašte (CO_2 , CH_4), do koje bi došlo kada bi se neprerađeni stajnjak aplicirao na parcelu.



Slika 24. Šematski prikaz tokova materijala u biogas elektrani i njihovog uticaja na životnu sredinu.

U procesu anearobne digestije je neophodno koristiti i biomasu u obliku silaže agroenergetskih useva radi povećanja energetske vrednosti sirovine i postizanja energetske i ekonomske održivosti. Zemljišta lošijih produktivnih karakteristika ne mogu obezbediti održive prinose biomase osim ako se primene specifične mere. Aplikacija digestata na ovakvom zemljištu pri proizvodnji agroenergetskih useva treba da omogući povećanje njihovog prinosa uz istovremeno izbegavanje upotrebe mineralnih đubriva (Slika 24). Da bi predloženi koncept

mogao biti primenjen u praksi kao ekonomski, ekološki i društveno održivo rešenje, neophodna su, sa jedne strane empirijska istraživanja, a sa druge sinergistički pristup upravljanju u zaštiti životne sredine, poljoprivredi i energetici.

Imajući u vidu mnogostruke međusobne veze komponenata tokova materijala u biogas postrojenju, u ovom poglavlju su diskutovani empirijski podaci dobijeni za izabranu biogas elektranu sa više aspekata: ekoloških uticaja izbora sirovina, prvenstveno na emisiju gasova sa efektom staklene bašte; ekoloških uticaja upotrebe digestata, mogućnosti produkcije agroenergetskih useva na delimično degradiranim zemljištima i potencijalima sirka u održivoj proizvodnji biogasa. U svakom od njih je dat i osvrt na cirkularnu ekonomiju. Razmatrane su prednosti i ograničenja predloženog cirkularnog modela tokova materijala u biogas elektrani u odnosu na aktuelne literaturne podatke i rezultate sopstvenih istraživanja. Iako analiza životnog ciklusa (LCA) nije predmet istraživanja ove disertacije, diskutovaće se i rezultati dobijeni ovom metodom, jer se ona smatra najsveobuhvatnijom kada se radi o proceni uticaja na životnu sredinu i bioekonomiju.

5.1. Uticaji konverzije energije u AD procesu na klimatske promene

5.1.1. Procena životnog ciklusa (LCA)

Naučna zajednica je uveliko prihvatila LCA kao jednu od najboljih metoda za procenu ekoloških opterećenja pri proizvodnji električne energije i/ili biogoriva iz obnovljivih izvora, kao i za identifikaciju mogućnosti za smanjenje ovih pritisaka. Procena životnog ciklusa (LCA) je razvijena kao sistematska metoda za karakterizaciju ekoloških efekata proizvoda, procesa, organizacije ili događaja, i sve više se koristi za informisanje pri kreiranju i u implementaciji politika. LCA je razvijena da istovremeno proceni širok spektar uticaja na životnu sredinu, od kvaliteta vode do toksičnosti za ljude, uticaja na klimatske promene i kvalitet vazduha, ali se takođe može primeniti na samo jednu kategoriju uticaja. Kada se primenjuje na klimatske promene poznata je kao ugljenični otisak (Usitalo et al. 2014). Razvijeni su standardi i raznovrsne smernice kako bi se podstakla doslednost u primeni LCA (na primer ISO 14040, ISO14044, ILCD priručnik). Standardne metode karakterizacije treba da omoguće dosledno

izražavanje rezultata, olakšavajući njihovo međusobno poređenje. Primer zajedničkih metrika i jedinica je korišćenje potencijala globalnog zagrevanja (GVP) u CO₂ ekvivalent za izražavanje efekata na klimatske promene. Dostupni su specijalizovani softveri i baze podataka inventara za olakšavanje proračuna u okviru LCA. LCA studije se često fokusirane samo na emisije GSB, a ponekad uključuju i energetske bilanse (Fusi et al. 2016). Dostupni podaci su vrlo raznoliki i time teško uporedivi iz više razloga: prvo, rezultati zavise od karakteristika lanca snabdevanja (sistem proizvodnje biomase, svojstva sirovine, tehnologije konverzije); drugo, rezultati za naizgled slične sisteme mogu biti različiti zbog izbora koje je napravio istraživač: granica sistema analize koja određuje procese koji su uključeni, metod alokacije uticaja između glavnog i pratećih proizvoda, razlike u osnovnim podacima, pretpostavke, modeli i faktori emisije, isključivanje ili uključivanje indirektnih efekata (za primer indirektna promene korišćenja zemljišta (ILUC), ne-CO₂ emisije GSB). Da bi se izbegle nedoslenosti u primeni LCA za proizvodnju biogasa (i električne energije iz njega) i da bi rezultate nesmetano mogli da koriste istraživači, vlade i industrija, u mnogim zemljama su javno dostupne nacionalne baze podataka o životnom ciklusu koje sadrže prosečne podatke. Ovaj pristup modeluje uticaj prosečne jedinice proizvodnje, a obično se primenjuje na postojeće lance snabdevanja. Uobičajeno se pretpostavlja da će 1MJ energije biogoriva zameniti 1MJ fosilnog goriva. Međutim, ova pretpostavka ne obuhvata uticaje tržišta koji indirektno mogu uticati kroz uticaj na potražnju za fosilnim gorivima jer se njihove cene menjaju usled povećanja ponude biogoriva. Procenjeno je da zbog ovog „efekta povratka“ faktor pomeranja varira od 0,25 do 1,6 i obično je manji od 1,23. Sugerisano je da atribucijski pristup ne daje tačne procene punog uticaja na klimu. Konsekventni pristup modeliranju (Rehl et al. 2012), uzima u obzir uticaje u sektoru poljoprivrede koji snabdeva biomasom energetski sektor i indirektna uticaje promene korišćenja zemljišta, što zahteva i ekonomske pristupe kao što je izračunljiva opšta ravnoteža ili parcijalno modelovanje ravnoteže. Biogeofizičko modeliranje se fokusira na upravljanje zemljištem uzimajući u obzir i očekivane efekte klimatskih promena, koje će verovatno promeniti stope rasta useva i potrebe za navodnjavanjem i povećati varijabilnost prinosa i troškova proizvodnje. U idealnom slučaju, modeliranje bi trebalo da uzme u obzir prostorne varijacije širom predela uključujući hidrološke uticaje. Integrirani modeli procene (IAM), koji uključuju i bio-geofizičke i ekonomske procese, koriste se za procenu opcija za dugoročnu stabilizaciju klime (Cowie et al. 2016).

5.1.2. Ograničenja primene RED direktive

Istraživanje ekonomičnosti koncepata za snabdevanje biogasom orijentisano na fleksibilnu proizvodnju električne energije ukazuje da na troškove snabdevanja biogasom u najvećoj meri utiču troškovi supstrata (Hahn et al. 2014), iako nisu računati troškovi koji prate proizvodnju kukuruza koji je bio ulazna sirovina. Slična situacija je u na primeru biogasne elektrane, čiji slučaj se ovde razmatra, kada pri LCA nisu uzeti u obzir tokovi materijala od produkcije biomase. Ovo je posledica primene RED direktive (Direktiva (EU) 2018/2001 o promociji i korišćenju energije iz obnovljivih izvora energije (European Commission, 2018)). Evropska komisija je 2021. predložila reviziju RED II u okviru paketa zakonskih predloga „Fit for 55“, u cilju postizanja klimatske neutralnosti u EU do 2050. godine, uključujući srednji cilj od najmanje 55% neto smanjenja emisije gasova staklene bašte do 2030. 2019- godine je urađena LCA za proizvodnju biogasa iz kukuruzne silaže i primenu digestata u proizvodnji kukuruza u Srbiji (Višković, 2019) čiji rezultati ukazuju da su uštede emisija CO_{2ek} u odnosu na miks električne energije na mreži značajno veće kada se koristi digestat, ali su i dalje manje od granične vrednosti od 70%. Zbog toga se predlaže da se revidira procedura tako da se alokacije primene i na digestat, a takođe i da se analiza vrši i za produkciju sirovine – kukuruza za silažu.

Za biogasnu elektranu koja je ovde uzeta za primer, urađena je LCA pre puštanja u pogon, a u okviru projektne dokumentacije, pri tome je izračunato da će uštede biti 31.597 t CO₂ godišnje u odnosu na proizvodnju projektovane električne energije iz fosilnih goriva. I u ovom slučaju nisu uzeti u obzir efekti na emisije GSB, koji su posledica uzgoja agroenergetskih useva ili upotrebe digestata kao supstituenta industrijskih mineralnih đubriva. Čim se steknu uslovi trebalo bi ponoviti LCA uključujući i realne podatke iz poslovanja ove elektrane uzimajući u obzir i ograničenja koja se navode u daljem tekstu.

5.1.3. Uticaji proizvodnje biogasa na životnu sredinu

Smatra se da biogas koji proizvodi AD ima visok potencijal uštede u pogledu emisija GSB. Međutim, osim toga, drugi uticaji proizvodnje biogasa na životnu sredinu su još uvek nedovoljno jasno istraženi, uprkos tome što je sprovedeno dosta studija o proceni životnog ciklusa (LCA). Razlog tome su granice sistema na koji se odnosi LCA. Tako je većina studija isključila uticaje izgradnje i stavljanja van pogona AD i elektrana. Kukuruz je najčešće

razmatrana sirovina za AD, a sledi ga životinjski stajnjak. Funkcionalna jedinica procene uticaja se uglavnom zasniva ili na jedinici sirovine koja se koristi za proizvodnju biogasa ili jedinici energije (biogas, toplota ili električna energija). Većina studija se oslanjala na sekundarne podatke da bi procenila uticaje ili je koristila samo ograničene primarne podatke. Međutim, najveća varijacija među studijama nalazi se u broju razmatranih uticaja i metodologijama koje se koriste za njihovu procenu. Zbog toga su Fusi et al. (2016) sprovedi studiju sa ciljem da dodatno doprinese diskusiji o ekološkoj održivosti proizvodnje biogasa i električne energije na njegovoj osnovi. U radu se razmatraju ¹³ uticaji proizvodnje električne energije na životnu sredinu u pet stvarnih AD-CHP sistema, koji koriste biogas proizveden iz različitih mešavina četiri vrste sirovina, a nalaze se u Italiji. Novi aspekti rada u poređenju sa prethodnim studijama uključuju: a) procenu uticaja u vezi sa električnom energijom proizvedenom iz biogasa korišćenjem različitih sirovina, uključujući agroenergetske useve (među njima kukuruz), njihovu mešavinu sa životinjskom stajnjakom, i poljoprivredni otpad – žetvene ostatke, kao i mešavinu stajnjaka i otpada; b) korišćenje primarnih podataka za proizvodnju sirovina i za rad AD-CHP sistema; c) razmatranje uticaja različitih veličina AD-CHP sistema na implikacije po životnu sredinu; d) uključivanje izgradnje i stavljanja van pogona AD i CHP postrojenja; e) procena izbegnutih emisija usled korišćenja digestata umesto đubriva i f) poređenje uticaja sa uticajima električne energije iz mreže, prirodnim gasom i drugim obnovljivim izvorima električne energije. Funkcionalna jedinica je definisana kao „proizvodnja 1 MWh električne energije koja se isporučuje u mrežu“. Rezultati sugerišu da su glavni doprinosi uticaju električne energije iz proizvodnje biogasa silaža kukuruza, rad anaerobnog digestora i otvoreno skladištenje digestata. Stoga je energana koja koristi životinjski stajnjak najbolja opcija među pet razmatranih, osim za potencijal ekotoksičnosti u moru i kopnu za koje je najbolji sistem koji koristi stajnjak, poljoprivredni otpad i malu količinu silaže od kukuruza. Elektrana koja koristi silažu od klipa kukuruza je najgora opcija zbog velikog uticaja sirovine, koji je skoro dvostruko veći od silaže kukuruza. U odnosu na veličinu AD-CHP postrojenja, čini se da veći kapacitet nema pozitivan efekat na uticaje na životnu sredinu uprkos višoj efikasnosti koja je tipično povezana sa ekonomijom. Ovo je zbog toga što veće elektrane zahtevaju veliko organsko opterećenje da bi bile održive, što se može postići samo sa sirovinama od energetske useva jer one imaju mnogo veći prinos biogasa od stajnjaka ili žetvenih ostataka. Na primer, 1 MW CHP postrojenje zahteva oko 50 tona kukuruzne silaže dnevno, ali 400–800 tona stajnjaka. Kako ova količina stajnjaka ne

može da se isporuči sa jedne farme, ona bi se morala sakupljati sa različitih farmi i transportovati do postrojenja koje ne bi bilo ekonomski i ekološki održivo. Štaviše, digestor bi bio nepraktično velik (20.000–40.000 m³ pod pretpostavkom hidrauličkog vremena zadržavanja od 50 dana) i samim tim skup. Stoga, kao što rezultati ovog rada sugerišu, bolje je imati manje pogone koji koriste stajnjak i otpad nego veće instalacije: ove poslednje mogu biti efikasnije, ali zahtevaju silažu žitarica, što zauzvrat dovodi do većih uticaja na životnu sredinu. S druge strane, manja postrojenja zahtevaju više sredstava za izgradnju po jedinici proizvedene električne energije, tako da postoje određeni kompromisi.

Korišćenje toplote proizvedene u CHP postrojenju smanjilo bi sve uticaje na životnu sredinu, neke od njih značajno (posebno iscrpljivanje fosilnih goriva i oštećenje ozonskog omotača, globalno zagrevanje i letnji smog), čineći električnu energiju iz biogasa boljom opcijom za ove kategorije uticaja od bilo koje druge obnovljive alternative. Reciklaža AD i CHP građevinskih materijala bi smanjila iscrpljivanje elemenata, zakišeljavanje zemljišta, toksičnost za slatke vode i mora, kao i letnji smog. Ovo poslednje bi se, takođe, poboljšalo pored globalnog zagrevanja ako se digestat skladišti u pokrivenim rezervoarima. U slučaju biogasne elektrane koja se posmatra, rezervoari digestata su nepokriveni a toplotna energija se ne koristi. U toku je razvoj projekta koji bi otklonio ove nedostatke, a radi se i ekonomska analiza koja treba da pokaže koji način korišćenja toplotne energije je najsvrsishodniji (grejanje plastenika za uspostavljanje proizvodnje ranog povrća, bazen za proizvodnju riblje mlađi, sušara za digestat).

Električna energija iz biogasa je ekološki održivija od električne energije iz mreže za sedam od 11 razmatranih uticaja. Ovo je zbog visokog doprinosa fosilnih goriva u italijanskom miksu električne energije. Preostala četiri uticaja, za koje je električna energija iz mreže bolja opcija, su iscrpljivanje elemenata, acidifikacija, eutrofikacija i kopnena ekotoksičnost. Dakle, električna energija iz biogasa smanjuje emisije gasova staklene bašte u poređenju sa mrežom, kako su nameravale vlada i Evropska komisija, ali pogoršava neke druge uticaje. Naša elektrana je u saglasnosti sa ovim, iako se miks izvora električne energije u Srbiji razlikuje od Italije.

Međutim, u poređenju sa prirodnim gasom, sedam od 11 uticaja su veće za električnu energiju iz biogasa. Takođe, ima uglavnom veće uticaje od obnovljivih izvora, osim solarne fotonaponske energije za koju je šest od 11 uticaja veće od biogasa. Štaviše, biogas je bolja opcija od geotermalne energije za acidifikaciju svih razmatranih sirovina. Ako se koristi samo

stajnjak, on takođe ima niži potencijal globalnog zagrevanja i letnjeg smoga od geotermalnog. Dalje, ekotoksičnost za morske ekosisteme je veća za električnu energiju iz čvrstog komunalnog otpada nego iz biogasa. Neki od indikatora nisu primenjivi na nas (recimo ekotoksičnost za morske ekosisteme).

Fokusiranje na potencijal globalnog zagrevanja koji pokreće proizvodnju biogasa, korišćenje stajnjaka kao sirovine je najbolja opcija za sve opcije električne energije koje se ovde razmatraju, izdvajajući 395 kg CO_{2ek}/MWh. Svi drugi sistemi za biogas generišu veće emisije gasova sa efektom staklene bašte nego bilo koja od obnovljivih opcija koja je ovde razmatrana (Fusi 2016). Jedini drugi uticaj za koji je električna energija iz biogasa bolja opcija od bilo kog drugog je letnji smog, ali samo za stajnjak kao ulazni materijal. Međutim, on takođe ima veću ekotoksičnost na kopnu od bilo koje druge električne energije. Ukratko, električna energija iz biogasa može pomoći u smanjenju emisija GSB u odnosu na fosilno intenzivnu električnu energiju, kao što je ona u Srbiji. S druge strane, ako je ublažavanje klimatskih promena glavni cilj, onda drugi obnovljivi izvori energije imaju veći potencijal da smanje emisije GSB. Međutim, ako su subvencije za korišćenje toplotne energije uspešne, ekološka održivost električne energije iz biogasa bi se značajno poboljšala, posebno za globalno zagrevanje, letnji smog i oštećenje ozonskog omotača i abiotičkih resursa. Dalje promene politike treba da obuhvate zabranu otvorenog skladištenja digestata, kako bi se sprečile emisije metana i regulaciju o širenju digestata po zemlji kako bi se smanjile emisije amonijaka i povezani uticaji na životnu sredinu.

U studiji Saraevic et al. (2019), procenjeni su ekonomski efekti obezbeđivanja sekundarnih kontrolnih energetske rezerve sa biogas postrojenje koje se fokusira na proizvodnju biometana, pri čemu je analizirano dvanaest konfiguracija biogas postrojenja sa električnim kapacitetom u rasponu od 150–750 kW i sa različitim sastavom ulaznog materijala. Rezultati ekonomske procene otkrivaju da je potrebna doplata (premija) do 158,1–217,3 € MWh⁻¹ da bi proizvodnja električne energije bila ekonomski održiva. GVP različitih sistema biogas postrojenja je analiziran LCA metodom. Rezultati se kreću od -0,42 do 0,06 t CO_{2ekv.} MWh⁻¹ i pokazuju da konfiguracije postrojenja od 150 kW daju najbolji rezultat u vezi GVP. Električna energija iz biogasa u svim scenarijima u okviru GVP je prihvatljivija u poređenju sa konvencionalnim izvorima električne energije. Troškovi efekta gasova staklene bašte (GSB) (potrebna premija na CO_{2 ekv.}) imaju potencijal uštede 149,5–674,1 €/ t CO_{2ekv.}. Procene ekonomske održivosti za

nekoliko biogasnih elektrana se mogu vršiti upotrebom tržišno zasnovanih modela optimizacije koji omogućuju poređenje različitih formi biogas postrojenja i različitih marketinških pristupa, a takođe i optimizaciju proizvodnje električne energije iz biogasa poređenjem različitih režima hranjenja i kapaciteta skladišta biogasa.

5.2. Uloga korišćenja digestata u zaštiti životne sredine

Stočni stajnjak je glavni izvor gasova staklene bašte (GSB), metana (CH_4) i azot oksida (N_2O). Emisije se mogu ublažiti proizvodnjom biogasa putem anaerobne digestije (AD) stajnjaka, uglavnom zajedno sa drugim biootpadom, koji može da zameni fosilnu energiju i na taj način smanji emisije CO_2 i emisije GSB nakon digestije.

5.2.1. Klimatski uticaji čitavog lanca proizvodnje u biogas elektrani

Anaerobna digestija je proces koji proizvodi obnovljivu energiju i reciklirana đubriva (digestat), i na taj način može poboljšati samodovoljnost energijom i hranljivim materijama i smanjiti emisije (GSB) iz proizvodnje energije, poljoprivrede i upravljanja otpadom. Cilj politika, u većini država EU, je da se poveća proizvodnja bioenergije i reciklaža hranljivih materija iz poljoprivredne biomase, putem digestije neprehrambenih useva i sporednih tokova iz proizvodnje hrane. Da bi se odredila održivost prema klimatskim strategijama potrebno je upoznati životni ciklus proizvoda – energije, prvenstveno, u odnosu na ugljenik. Međutim, sve emisije i potencijali za smanjenje su često namenjene samo za energiju, a ne za proizvodnju i upotrebu digestata, odnosno naglašavaju se klimatski uticaji za konverziju energije, a ne uzimaju se u obzir emisije i karbon-krediti vezani za digestat (Hijazi et al. 2016). Studija Timonen et al. (2019) je koristila metode drugačije alokacije za procenu klimatskih emisija čitavog lanca anaerobne digestije, od nabavke sirovina do upotrebe energije i digestata u poređenju sa fosilnom energijom i mineralnim đubrivom. Upoređivana su tri scenarija sa različitim ko-sirovinama (svinjski stajnjak, 16 000 t, je bio u osnovi sva tri, a razlikovali su se sa drugom sirovinom 3500 t/a: osušenog svinjskog stajnjaka, trave sa neobrađenih polja i otpada iz prehrambene industrije). Praćene su alokacije u odnosu na energiju, na ekonomiju i na masu. Međutim, najčešće se emisije alociraju na biogas prema kalorijskim vrednostima, prema preporukama EU Direktive o

obnovljivoj energiji (EU 2009). Metoda alokacije mase, koja dodeljuje emisije po težini, omogućava laku kvantifikaciju, a veći uticaj pripisuje digestatu kao nusproizvodu nego energiji kao primarnom proizvodu (Hijazi et al. 2016). Ova metoda se ne smatra odgovarajućim načinom raspodele emisija između proizvoda u slučaju proizvodnje biogasa i digestata, jer su namene proizvoda različite. Korišćenje metode ekonomske alokacije dodaje složenost fluktuacija cena tokom vremena i političkih uticaja kroz subvencije na procenu emisija. Najveće klimatske emisije AD je bilo za kombinaciju proizvodnje električne i toplotne energije i skladištenja stajnjaka, za skladištenje digestata, transport i korišćenje kao đubrivo emisije su bile veće u poređenju na korišćenje mineralnog đubriva. Međutim, kada se kombinuju emisije anaerobne digestije izdvojene za digestat i emisije pri iskorišćavanju digestata na polju bile su niže u odnosu na proizvodnju mineralnih đubriva i upotrebu na njivi. Kada su uzeti u obzir sva tri metoda alokacije, vidi se da svi scenariji dovode do sličnih emisija koje su značajno manje u odnosu na fosilna goriva (prirodni gas) (Timonen et al. 2019).

Nedavno objavljeni rezultati druge dvogodišnje studije, u kojoj su upoređivane pojedinačne i kumulativne emisije GSB su pokazali da na njih nisu značajno uticale razlike digestata koji su primenjeni i način đubrenja (neđubreno - kontrolno), đubreno sintetičkim azotnim đubrivom, digestatom svinjskog đubriva, digestatom pilećeg stajnjaka i digestatom kravlje stajnjaka. Digestat je korišćen u tečnom obliku u dozi od 170 kg N/ha podeljenoj u dva dela, 90 i 80 kgN/ha, uz ogradu da su tokom eksperimentalnog perioda klimatski uslovi bili neobično suvi sa toplim vremenskim uslovima. Zaključeno je da niska emisija GSB čini digestate pogodnim za upotrebu kao đubrivo za niskoemisiono upravljanje poljoprivrednim otpadom u uslovima umerene klime. Nije bilo negativnih uticaja na životnu sredinu koji proističu iz emisija GSB sa primenom digestata na bazi životinjskog otpada tokom 2 godine studija, a dugoročne implikacije upotrebe ovog digestata su budući rad koji treba istražiti. Na pšenici u Litvaniji svi digestati su imali smanjenu kumulativnu emisiju CO₂ za preko 30% u odnosu na prethodnu godinu, osim digestata kravlje stajnjaka od samo oko 18% povećanja oslobađanja ugljenika. Stopa emisije N₂O 70. i 98. dana bila je značajno veća kod sintetičkog azotnog đubriva iz drugih tretmana ($P < 0,05$). Tretmani nisu imali značajan uticaj na kumulativne emisije N₂O tokom 120 dana ($P < 0,05$) između tretmana (Doyeni et al. 2021).

Istraživani su uticaji na životnu sredinu đubriva koja su proizvedena na osnovu digestata iz AD procesa u odnosu na sintetička mineralna đubriva u proizvodnji kukuruza, a na osnovu realnih podataka biogas elektrane u Severnoj Italiji (1 MW), metodom LCA. Izabrana funkcionalna jedinica je bila količina koja se koristi za đubrenje 1 ha kukuruza, u dva scenarija: RF – đubrivo povraćeno iz digestata i SF – industrijsko mineralno đubrivo (Scenario SF: 402 kg uree (185 kg N), 476 kg hemijskog amonijum sulfata (100 kg N), 195 kg trifosfata (89 kg P₂O₅), and 165 kg K sulfata (82.5 kg K₂O); Scenario RF: 48 t digestata, (370 kg total N, odnosno, 185 kg efektivnog N, 317 kg P₂O₅, i 43 kg K₂O, 1.38 t recikliranog amonijum sulfata (100 kg N), i 80 kg K sulfata (40 kg K₂O)). Prvi scenario je pokazao bolje ekološke performace u odnosu na drugi u 11 od 18 ispitivanih kategorija uticaja, a tri kategorije, jonizujuće zračenje, nedostatak fosilnih resursa i potrošnja vode su pokazale neto negativne uticaje zahvaljujuću benefitima kredita za produkciju električne energije iz AD procesa. Autori zaključuju da anaerobna digestija predstavlja ključ za predlaganje održivog pristupa u proizvodnji obnovljivih đubriva, zahvaljujući i proizvodnji energije i modifikaciji koja se javlja u otpadu tokom biološkog procesa, ostavljajući supstrat (digestat) sa visokim pozitivnim svojstvima đubrenja. Ipak, ispravan pristup u korišćenju RF je obavezan da se izbegne gubitak svih prednosti proizvodnje RF zbog uticaja koji proizilaze iz nepravilne upotrebe RF. Na ovaj način, dobro izveden AD proces obezbeđujući visoku biološku stabilnost digestata, ograničavajući RF-N₂O emisija i RF-NO₃ – ispiranje i ograničavanje RF ubrizgavanja Emisije NH₃, kao i korišćenje RF u pravo vreme i prema zahtevima useva treba obezbediti (Herrera et al. 2022).

Ako pretpostavimo da smo u našem slučaju supstituisali primenu industrijskog NPK đubriva digestatom, uz podatak da svaka tona supstituisanog đubriva štedi 1t nafte, 108 t vode i 7 t emisija CO₂ (WGA 2019) i preporučenu dozu đubriva za ispitivane parcele 200 kg NPK/ha za sirak ili 250 kg NPK/ha za kukuruz, možemo reći da se za 3 godine, koliko su trajala istraživanja, uštedelo 0,6 t nafte, 65 t vode i 4,2 t CO₂ za sirak, odnosno 0,75 t nafte, 81 t vode i 7,75 t CO₂.

5.2.2. Legislativa

Za planiranu produkciju biogasa je potrebno obezbediti maksimalno 40% sirovine od silaže (na bazi suve materije), u skladu sa Uredbom o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije, privremenog povlašćenog proizvođača i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije (Službeni glasnik RS, br. 54/19).

Za regulisanje uslova i korišćenje đubriva na način koji pogoduje očuvanju životne sredine, neophodni su odgovarajući zakonski propisi, koji mogu biti utvrđeni na regionalnom, nacionalnom ili kontinentalnom nivou. U Evropi se, na primer, primenjuje **Evropska Uredba o đubrivima**, koja će u narednom periodu obuhvatiti kako digestat iz postrojenja za biogas, tako i komposte. Uredba EU o đubrivima sadrži ukupno 11 kategorija materijala od kojih đubriva mogu da se sastoje, kao što su, na primer, digestat i kompost. Postoje posebni uslovi koji moraju biti ispunjeni za svaku od tih kategorija materijala. Kao primer predloženih vrednosti ovde su dati uslovi za kategoriju – digestat. Trenutno se još uvek vode razgovori o konkretnim vrednostima, koje u konačnoj verziji uredbe mogu biti drugačije. U Saveznoj Republici Nemačkoj je Pravilnik o ishrani biljaka, koji se primenjuje na nacionalnom nivou, usklađen sa Uredbom EU o đubrivima. Verovatno najveća intervencija koja je izvršena izmenama i dopunama Pravilnika o ishrani biljaka je povećanje prosečne gornje granice od 170 kg N/ha za sva organska i organsko-mineralna đubriva, što znači da je sada obuhvaćen i digestat bez obzira na ulazne materijale od kojih je proizveden. Ovaj limit se primenjuje bez obzira na stvarne potrebe useva i regionalne karakteristike, kao što su kvalitet zemljišta, očekivani prinos i udeo livada i pašnjaka. Ovaj propis na taj način ugrožava održivost ciklusa hranljivih materija i podstiče korišćenje mineralnih đubriva, pošto ona ne podležu paušalnim ograničenjima. Nasuprot tome, organska đubriva moraju da se prevoze do drugih regija ili do drugih distributivnih kanala (Wilken et al. 2018).

U Republici Srbiji je na snazi Zakon o sredstvima za ishranu bilja i oplemenjivačima zemljišta ("Sl. glasnik RS", br. 41/2009 i 17/2019) koji je usaglašen sa Uredbom (EZ) br. 2003/2003. U Članu 2. definiše "đubrivo jeste hemijsko jedinjenje mineralnog i organskog porekla i mešavine tih jedinjenja bez obzira na agregatno stanje, kao i mikroorganizmi čija je osnovna namena da obezbede hranljive elemente za ishranu bilja"; "oplemenjivač zemljišta jeste sredstvo za poboljšanje fizičkih, hemijskih i bioloških osobina zemljišta, koje ima nizak sadržaj primarnih i/ili mikrohranljivih elemenata ili ih ne sadrži i koje se radi toga ne smatra đubrivom"; "organsko đubrivo jeste proizvod organskog porekla, biljnog i životinjskog, u kojem se deklarise sadržaj organske materije hranljivih elemenata, a izuzetno i sadržaj mikroorganizama, i koje se dodaje zemljištu u cilju ishrane biljaka i popravke plodnosti zemljišta, a dobija se fermentacijom biljnih i životinjskih ostataka". Kriterijumi za razvrstavanje u kategorije "organsko đubrivo" i "oplemenjivač" sredstava za ishranu biljaka dati su u Pravilniku o uslovima za razvrstavanje i utvrđivanje kvaliteta sredstava za ishranu bilja, odstupanjima sadržaja hranljivih materija i

minimalnim i maksimalnim vrednostima dozvoljenog odstupanja sadržaja hranljivih materija i o sadržini deklaracije i načinu obeležavanja sredstava za ishranu bilja ("Službeni glasnik RS", br. 30 od 31. marta 2017, 31 od 27. aprila 2018). Detaljni uslovi za svrstavanje u neku od kategorija su dati u Prilogu I. U ovom aktu digestat se ne pominje, ali prema prilogu II Pravilnika o uslovima za razvrstavanje i utvrđivanje kvaliteta sredstava za ishranu bilja, kriterijumi za NPK organsko đubrivo životinjskog i biljnog porekla su: $-N + P_2O_5 + K_2O = 4\%$, $-C/N$ odnos ne više od 15, $-$ svaki hranljivi element najmanje 1%. Organski oplemenjivač: Ukupna organska materija 35%, $C/N < 20$, Ukupni azot (ako je više od 1%), Organski azot (ako je više od 1%), Amonijakni azot (ako je više od 1%), Fosfor-pentoksid ukupni (ako je više od 1%), Kalijum-oksidi ukupni (ako je više od 1%).

U ispitivanom slučaju (Tabela 10) primenjeni digestat ne ispunjava uslove za organsko đubrivo ni za oplemenjivača zemljišta, ali u oba slučaja ispunjava glavni uslov, a to je odnos C/N . Ostali uslovi se mogu postići sušenjem, odnosno uklanjanjem viška vode, pa bi takav proizvod, sa 35% organske materije, dostigao sve uslove. Za ovo je moguće upotrebiti toplotnu energiju koja se javlja u procesu kogeneracije električne energije, a sada se ne koristi.

Nusprodukt AD procesa, digestat, poseduje korisna svojstva i njegova pravilna upotreba može doneti napredak za poljoprivrednike (povećanje prinosa useva), životnu sredinu (bolja efikasnost korišćenja N) kao i vlasnika biogas postrojenja (supstituiše odlaganje velikih količina nusproizvoda) (Przigočka-Cina i Grzebisz 2020). Čvrsta frakcija digestata se može direktno primeniti u polju ili kompostirati i koristiti kao oplemenjivač zemljišta, koji može biti 2 do 3 puta jeftiniji za farmera od industrijski proizvedenog đubriva. Nedostatak obradivih površina u okruženju biogas postrojenja je najveći problem (Prask et al. 2018). U slučaju Republike Srbije, postoje samo nekoliko postrojenja za proizvodnju biogasa koja su počela sa radom u poslednjih pet godina, smeštena su u blizini značajnih površina obradivog zemljišta. Ove elektrane mogu proizvesti biomasu za silažu koristeći digestat iz AD procesa kao dodatak zemljištu. U slučaju Islande, u neposrednoj blizini elektrane se nalazi 480 ha delimično degradiranih oranica u vlasništvu i 300 ha u zakupu (Slika 10), na kojima se gaje agroenergetski usevi, među njima i sirak. U neposrednoj blizini su farme sa kojih se elektrana snabdeva stajnjakom. Ovaj stajnjak je primenjivan direktno na zemljištu pre nego što je biogas elektrana počela sa radom, što je izazivalo emisije velikih količina CH_4 . Proizvodnja sirka i kukuruza je upoređena sa

visokoproduktivnim černozeom u Dolovu, sa umerenim rastojanjem (Slika 12). Prema Scarlat et al. (2018), ekonomski je opravdan transport digestata na razdaljinu od 50 km za sirovine sa visokim sadržajem (~ 70% suve materije) i na 10 km za sirovine sa niskim sadržajem suve materije (< 10% DM), a slično važi i za transport biomase. Sa Slike 12 se jasno vidi da se ispitivane lokacije nalaze na takvoj udaljenosti da je moguć transport i digestata i biomase, ali je svakako ekonomičnije da se svi delovi ciklusa materijala odvijaju na lokaciji Ilandža, uprkos manje plodnom zemljištu.

5.3. Mogućnosti produkcije agroenergetskih useva na delimično degradiranim zemljištima

5.3.1. Agroenergetski usevi

Postavlja se ključno pitanje koje vrste sirovina treba koristiti za proizvodnju biogasa tako da se principi cirkularne ekonomije i održivosti najbolje postignu? Principijelni odgovor se može dati analizom životnog ciklusa (LCA), ali podjednako važan je i odgovor „u praksi“, odnosno u kojoj meri postojeći operatori biogasa prelaze na korišćenje održivije prakse u pogledu sirovina. Iako postoji dobro razumevanje održivosti sirovina iz postojećih LCA studija, uočljiv je nedostatak akademskih studija o empirijskim pitanjima sa kojima se biogas postrojenja susreću u praksi (Chodkowska-Miszczuk et al. 2021). Upravo tu se ogleda značaj istraživanja sprovedenih u toku izrade ove disertacije, jer kombinuju teoretska znanja sa realnom industrijskom praksom, koja se u vremenu istraživanja suočava sa mnogim izazovima. Opšte-društveni trenutak je opterećen ratnim dejstvima na teritoriji Evrope, što potencira i specifične izazove u vezi plasmana električne energije proizvedene u biogas elektrani i otežan pristup sirovinama za AD proces, s obzirom na nagli rast cena hrane.

Drugo često pitanje je: koji je najpovoljniji agroenergetski usev? Da li je to onaj koji u konkretnim agrometeorološkim uslovima obezbeđuje biomasu koja ima najveći metanski potencijal (BMP)? Sledi treće pitanje: koji biljni materijal ima najveći metanski potencijal u AD? Dostupni objavljeni podaci iz testova potencijala metana ne daju nužno jednostavan odgovor. Razlike u objavljenim vrednostima proizilaze kako iz korišćenih protokola ispitivanja tako i iz prirode materijala koji je testiran (što, takođe, zavisi od faze rasta u kojoj je sakupljen i načina

njegovog skladištenja) i kada se radi o istoj biljnoj vrsti i sorti. Na primer, rezultati BMP testa za specifičnu biomasu mogu dati maksimalni potencijal metana, ali je malo verovatno da se isti rezultati mogu postići u pilot postrojenju ili punom radu biogas elektrane. Pored specifičnog energetskog sadržaja požnjevene biomase, mora se uzeti u obzir prinos po hektaru. Dakle, stvarni prinos metana u $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{ha}$ će biti pod uticajem klime, tipa zemljišta, režima plodoreda i mnogih drugih agronomskih uslova, koji takođe dovode do promena u prinosu biomase u tonama organske materije po ha (Amon et al. 2007a, Amon et al. 2007b).

Prema literaturnom pregledu metoda i rezultata potencijala biometana raznih agro sirovina može se zaključiti da je predviđanje specifičnih prinosa metana za biomasu na bazi useva težak proces. Izbor između objavljenih vrednosti može dovesti do značajnih razlika u predviđenom ishodu. Stoga je potreban veliki oprez kada se oslanja na literaturne podatke za procene potencijalnog prinosa metana određene vrste useva kako bi se odlučilo o njenoj ekonomskoj isplativosti kao AD sirovine. Rezultati iz literature pokazuju da je varijacija između različitih useva manja od one unutar prijavljenih vrednosti za jedan usev. Tamo gde je biomasa dostupna za analize, teorijski proračuni zasnovani na biohemijском sastavu mogu da pruže prilično precizna predviđanja prinosa metana, a vrednosti dobijene na ovaj način izgleda da su kompatibilne sa onima dobijenim iz eksperimentalnih testova anaerobne digestije. Biohemijski pristup zahteva manje praktičnog testiranja u poređenju sa AD eksperimentima; međutim, još uvek uključuje značajnu laboratorijsku analitičku proceduru i ne izbegava pitanje prostornih i vremenskih varijacija u svojstvima biomase. Tamo gde se sirovine za AD na bazi useva razmatraju kao deo integrisanog sistema poljoprivrede, možda bi bilo bolje uzeti u obzir prosečan prinos biomase po hektaru pre nego metanski potencijal po jedinici biomase, posebno pošto su relativno čvrsti podaci o prvom često lokalno dostupni. Koja god vrednost da se usvoji za potencijalni prinos metana i bez obzira na metod koji se koristi za predviđanje ili određivanje, takođe se mora imati na umu da su ovo samo indikativne vrednosti i da će prinos metana stvarno generisan u bilo kom kontinuiranom ili polukontinualnom procesu punog opsega biti podložan mnogim drugim faktorima uključujući vreme zadržavanja, uslove rada i materijale za ko-digestiju (Zhang et al. 2021).

Prema tome, „najbolji“ usev za uzgoj ili usev koji se koristi za AD, u uslovima maksimiziranja proizvodnje metana po hektaru godišnje, verovatno će biti onaj koji daje najveći

prinos biomase pod određenim geografskim uslovima, a ne nužno onaj koji imaju visok specifični prinos metana tokom digestije. Saglasno rezultatima poljskog ogleđa (Slika 23 i 24) i navedenim pretpostavkama u uslovima Južnog Banata sirak je povoljniji usev od kukuruza, koji se do sada najviše koristio.

5.3.2. Umereno degradirana zemljišta

Uobičajeno se pretpostavlja da su plantaže agroenergetskih useva postavljene na poljoprivrednom zemljištu niskog kvaliteta. Plantaže biomase se tako isključuju iz kompeticije prema plodnom poljoprivrednom zemljištu sa prehrambenim sektorom. To neizbežno vodi nižim prinosima biomase dobijene na marginalnim zemljištima, što dalje dovodi do komplikacija, jer se visoko procenjeni tehnički potencijali energetskih plantaža oslanjaju na visokoprinosne poljoprivredne sisteme. Sa druge strane, razvoj međunarodne trgovine bioenergijom dovodi do toga da se plantaže biomase uspostavljaju na globalnom nivou u regionima gde su uslovi proizvodnje najpovoljniji sa ekonomskog aspekta. Na degradiranim zemljištima, na kojima je proizvodni kapacitet smanjen, privremeno ili trajno nije ekonomski održivo gajenje useva koji se koriste u prehrambenoj industriji ali se ona mogu koristiti za proizvodnju biomase kao supstrata za produkciju biogasa. Da bi ova produkcija bila održiva neophodna je primena useva koji su razvijeni baš za optimalan rast na ovakvim zemljištima, odnosno imaju visoku toleranciju na ovakve uslove životne sredine (Fischer et al. 2009). Na primer, poboljšana otpornost na sušu može poboljšati prosečne prinose u sušnijim područjima i sistemima bez navodnjavanja uopšteno smanjenjem efekata sporadične suše, a takođe može smanjiti potrebe za vodom u sistemima za navodnjavanje. Dakle, pored smanjenja potreba za zemljištem za zadovoljenje potražnje za hranom i materijalom povećanjem prinosa, oplemenjivanje biljaka i genetska modifikacija bi mogla učiniti zemljište, koje se u početku smatralo neprikladnim za proizvodnju, dostupnim za proizvodnju hrane. Neke studije pokazuju značajan tehnički potencijal marginalnih/degradiranih zemljišta, ali je neizvesno koliki se ovaj tehnički potencijal može realizovati. Glavni izazovi u vezi sa upotrebom marginalnih/degradiranih zemljišta za proizvodnju bioenergetskih useva uključuju: (1) velike napore (sredstva) i dugo vreme potrebno za rekultivaciju i održavanje degradiranih zemljišta; (2) nizak nivo produktivnosti ovih zemljišta i (3) moraju se pažljivo razmatrati potrebe lokalnog stanovništva koje koristi degradirano zemljište za svoje potrebe.

Učešće lokalnih zainteresovanih strana u proceni i izboru odgovarajućih mera rekultivacije degradiranih zemljišta doprinosi i razmatranju aspekata biodiverziteta i klimatskih promena, a ovo otvara put za finansiranje putem međunarodnog finansijskih mehanizama. U tom kontekstu, proizvodnja pravilno odabranih biljnih vrsta za bioenergiju može biti prilika koja uključuje dodatne koristi, kao što jesekvestracija ugljenika u zemljištu i nadzemnoj biomasi i poboljšani kvalitet zemljišta (Chum et al. 2011).

Veliki broj istraživanja se odnosi na poboljšanje kvaliteta marginalnih zemljišta u cilju omogućavanja prihvatljivih prinosa različitih useva i upravljanja ciklusima nutrijenata u AD postrojenjima i njihovoj okolini (Duan et al. 2018). Rezultati su veoma različiti, jer se radi o zemljištima različitih struktura, u različitim klimatskim uslovima i različitim usevima, među kojima treba uzeti u razmatranje agroenergetske useve. Na primer, *Sida hermaphrodita* na marginalnim zemljištima ima značajno veći prinos kada se primeni digestat (Nabel et al. 2017), a sirak uz adekvatnu prihranu azotom na marginalnom zemljištu postiže prinose koji su održivi u upotrebi silaže za proizvodnju biogasa (Amen et al. 2017). Biomasa agroenergetskih useva je neophodna sirovina za AD proces jer otpad (stajnjak) nema zadovoljavajuće energetske karakteristike (Scarlat et al. 2018). Najracionalnije je ovu biomasu proizvoditi na marginalnim zemljištima (jer se tako izbegava kompeticija sa proizvodnjom hrane na plodnom poljoprivrednom zemljištu), koja se nalaze u blizini biogas elektrana. Kako ovakva zemljišta imaju lošije produkcijske sposobnosti, neophodno je primeniti dodatne mere radi postizanja održivih prinosa.

Abiotski stres (višak ili manjak vode, ekstremne temperature i salinitet zemljišta) su uobičajena ograničenja za poljoprivredu uopšte pa tako i za proizvodnju agroenergetskih useva. Očekuje se da će se ovi uticaji u budućnosti intenzivirati kao rezultat klimatskih promena (Jones et al. 2015; Kuinn et al. 2015). Ovi stresovi obeshrabuju uzgoj agroenergetskih useva, jer ometaju njihov rast, smanjuju prinos i kvalitet biomase što dovodi do ometanja stabilnog snabdevanja i dalje do kolebanja cene sirove biomase i proizvoda na bazi biomase. Razvijanje genotipova koji pokazuju stabilnost prinosa i kvaliteta biomase u nepovoljnim abiotičkim uslovima je, stoga, ključno za uspešno alociranje useva u proizvodnju biomase. Pošto se abiotički stresovi često javljaju u kombinaciji (npr. toplota i suša) ili sukcesivno (npr. preplavlivanje

praćeno sušom), otporne sorte bi trebalo da kombinuju različite izvore otpornosti da bi izdržale više stresova odjednom.

Nekoliko osobina biljaka je usmereno na razvoj useva otpornih na sušu i poplave. Morfološki, za otpornost na sušu, duboko i robusno korenje, sposobno da dosegne do dublje vode u suvim područjima je od presudnog značaja. Na ćelijskom nivou je važno osmotsko prilagođavanje putem akumulacije osmotski aktivnih supstanci u ćelijskom soku i vakuolama, naročito u ranim fazama ontogenetskog razvika dok je korenski sistem u razvoju.

Biljke C4 tipa fotosinteze, kojima priradaju kukuruz i sirak, karakterišu se manjom potrebom za unosom biljnih hranljivih materija (azot, fosfor, kalijum) po jedinici proizvedene suve materije u poređenju sa biljkama tipa C3 (pšenica, raž i soja). Efikasnost fotosinteze za biljke C4 tipa je 2,0 % u poređenju sa 1,4 % za C3 biljke. Prednost C4 useva je i manja potreba za vodom za proizvodnju suve materije, na primer, kukuruz i sirak (*Sorghum* spp), pokazuju srednji odnos transpiracije od 300 kg vode po kg suve biomase, u poređenju sa odnosima 500-900 kg vode kg⁻¹ u C3 usevima (Mabrouk 2009).

Zaslanjivanje zemljišta se dešava kao rezultat prirodnih procesa, često ubrzanih ljudskim faktorima, na primer, prekomernim navodnjavanjem u oblastima gde je nivo podzemnih voda visok. U zemljištu se može akumulirati velika količina karbonata, hlorida i sulfata štetnih za biljke. Zaslanjivanje pogoršava fizičko-hemijske karakteristike zemljišta, smanjuje efikasnost đubriva i potiskuje rast i razvoj biljaka. Visok osmotski pritisak vode i rastvora soli u zoni korena utiče na sposobnost biljke da apsorbuje vodu. Prisustvo soli u zemljištu više od 0,25 odsto rastvorenih čvrstih materija narušava fiziološku funkciju mnogih kultivisanih biljaka, a kao rezultat toga, opada prinos i kvalitet poljoprivrednih proizvoda. Zaslanjenost zemljišta je pod uticajem prirodnih činilaca, kao što je nakupljanje soli u podzemnim vodama i njeno podizanje u površinske, obradive slojeve ili plavljenje zemljišta vodom sa povećanom koncentracijom soli. Antropogene aktivnosti mogu da intenziviraju i ubrzaju ove procese.

Hussain et al. su 2020. god. objavili detaljan pregled mogućnosti produkcije različitih useva (leguminoza, žita, lekovitog bilja, lignoceluloznih useva) na zaslanjenom zemljištu. U radu se navodi da je sirak višenamenska industrijska kultura koja je pokazala visoku toleranciju na povećanu koncentraciju soli u zemljištu, pa je veoma pogodna za marginalna

zasoljena zemljišta. Objavljeno je da soni stres izaziva smanjenje produkcije sirka i to u zavisnosti od tipa (šećerac, industrijski, krmni) i od genotipa (oko 10 - 20%, kada se gaji u uslovima EC10 dS/ m).

Kada je sirak u pitanju, procenjuje se da su prinosi biomase na marginalnim zemljištima oko 40% biomase proizvedene u optimalnim uslovima gajenja određenog hibrida. Analiza razvoja biomase slatkog sirka je pokazala malu zavisnost od posmatranog hibrida, ali su biljkaena marginalnom zemljištu bile tanje i niže i sa povećanim sadržajem lignina u odnosu na biljke proizvedene na plodnom poljoprivrednom zemljištu pod jednakim klimatskim uslovima (Lopez-Sandin et al. 2021). Nenciu et al. (2022) su objavili rezultate poljskog oglada sa sirkom šećercem koji se gaji radi proizvodnje bioetanola koji je izveden sa istom logikom kao naš poljski ogled, osim što su biomasu razdelili na više frakcija. U optimalnim uslovima (plodno zemljište, odgovarajuća prihrana industrijskim đubrivom i optimalno zalivanje) izmereno je oko 35t/ha sveže biomase, na plodnom zemljištu bez prihrane i bez zalivanja 23 t/ha, a na marginalnom zemljištu bez prihrane i zalivanja 14t/ha. Određene razlike u produkciji bioetanola su bile još značajnije (3; 0.612; 0.459 t/ha, respektivno) iz čega se može videti da su agrotehničke mere, đubrenje i zalivanje imale veći uticaj u odnosu na tip zemljišta. Ostaci biomase posle ceđenja slatkog soka su dalje procesuirani u procesu pirolize u kome se dobija bio-ulje kao energent i bio-ugalj kao oplemenjivač zemljišta.

U ispitivanom slučaju, zemljište tipa ritska crnica, lokacija Ilandža, prema svojim agrohemijskim karakteristikama ne pripada zaslanjenim zemljištima (Tabela 9), ali po produkcionim karakteristikama jeste sa smanjenom plodnošću. U periodima godine sa intenzivnim padavinama voda se dugo zadržava na površini zemljišta, a u sušnim periodima dolazi do pucanja zemljišta, što u oba slučaja dovodi useve u stanje stresa. Ovo je verovatno posledica prekomernog zalivanja zaslanjenom vodom u toku dugogodišnjeg perioda. Prinosi biomase sirka su oko 3,4% niži u odnosu na plodno zemljište tipa černoze, lokacija Dolovo; odnosno 6,6% za biomasu kukuruza (Slika 23) u kontrolnim uslovima, bez primene digestata. Kada se posmatra prinos biogasa iz silaže sirka može se videti da su na plodnom zemljištu prinosi biogasa oko 6,3% veći u odnosu na degradirano, kada se posmatraju obe varijante oglada (Tabela 15). Dobijeni rezultati su u opsegu očekivanog, prema literaturnim podacima (Mahmood et al. 2013; Hasan et al. 2018; Habiarimana et al. 2019). Za silažu kukuruza je pokazan drugačiji trend,

odnosno na delimično dedgradiranom zemljištu (Ilandža) su dobijeni 4.58% viši prinosi biogasa u odnosu na plodno zemljište (Dolovo).

5.4. Potencijali sirka u održivoj proizvodnji biogasa

Značaj sirka kao useva za hranu, stočnu hranu i biogorivo je opširno opisan u velikom broju izvora naučne literature (Ameen et al. 2017; Ggleb & Sovinski 2019; Hassan et al. 2018; Hassan et al. 2019; Borrell et al., 2021). Sirak za biomasu pokazao je veće i stabilnije prinose uz bolji energetske bilans u odnosu na glavne useve od agroindustrijskog interesa. U novije vreme, razvijaju se predikcioni modeli koji uključuju daljinsku detekciju i upotrebu mašinskog učenja u sklopu pametne poljoprivrede sa ciljem da se, pre svega smanje operativni troškovi proizvodnje (Habyarimana et al. 2019).

Nekoliko zemalja širom sveta, uključujući i one na većim geografskim širinama, sve više razvijaju namenske sirke za produkciju biomase, kao odgovor na goruće pitanje savremene energetike: kako na nacionalnom nivou obezbediti nezavisnost od stranih izvora energije i smanjiti emisije ugljenika u atmosferu. Kao za usev koji se namenski gaji kao energetske uzgoj sirak će morati da ispuni kritične zahteve visoke i isplative produktivnosti, koja se očekuje za sve proizvode na bazi bioloških resursa.

Sirak (*Sorghum bicolor*) se prvenstveno gaji u toplim i suvim regionima širom sveta u velikim komercijalnim sistemima i u malim farmama. U ovim regionima, sirak pokazuje komparativne prednosti u odnosu na druge letnje žitarice, uključujući njegovu sposobnost da napuni zrno tokom suše na kraju sezone. Takođe je široko prilagođen umerenim, suptropskim i tropskim sušnim područjima i navodnjavanim sredinama. Širom sveta, farmeri se suočavaju sa izazovom uzgoja sirka u veoma promenljivim okruženjima. Usklađivanje hibrida, agronomije i životne sredine omogućava poljoprivrednicima da dizajniraju profitabilnije i manje rizične sisteme proizvodnje sirka. Na nivou useva, predviđa se rast glavnih organa na osnovu njihove potencijalne veličine, a zatim se procenjuje kapacitet useva da koristi resurse (radijaciju, vodu i azot) da zadovolji potražnju (Pasteris et al. 2021).

Sirak je jednogodišnja C4 biljka tropskog porekla—trenutno se unosi u umerene regione Evrope. U poslednje vreme ostvarena su različita selekciona dostignuća koja se odnose na niske temperature i ranu zrelost sirka. Nove sorte sirka zajedno sa unapređenjem poljoprivrednih praksi usled klimatskih promena, kao što su zagrevanje i duže vegetacione sezone, olakšavaju uzgoj sirka kao hrane za stoku ili za bioenergetske primene (Kanbar et al. 2020; Schaffasz et al. 2019; Vindpassinger 2016). Štaviše, uključivanje drugih (verovatno novih) vrsta useva i sorti u plodorede promoviše diverzifikaciju i poboljšava održivost upravljanja usevom (Hufnagel et al. 2020; Strauß et al. 2019).

U ispitivanom regionu južnog Banata u vremenu trajanja poljskog ogleda nije bilo ekstremnih vremenskih uslova (Tabela 7, 8, Slika 13 i 14), iako je na lokaciji Ilandža zabeleženo manje padavina u odnosu na lokaciju Dolovo. Ipak, dugogodišnje praćenje količina i rasporeda padavina, temperatura i evaporacije na ovom području ukazuje da klima postaje sve suvlja i toplija uz sve nepovoljniji godišnji raspored padavina. Sa druge strane, u poljskom ogledu je nađen statistički vrlo značajana pozitivna korelacija količine padavina sa visinom biljaka i prinosom biomase, kao i statistički vrlo značajna pozitivna korelacija temperatura sa prinosom biogasa (Tabela 17). Može se pretpostaviti da će u budućnosti, ako klimatske promene nastave da se dešavaju u dosadašnjem trendu, produkcija sirka biti sve značajnija, naročito sa aspekta energetike, jer povišene temperature intenziviraju fiziološke procese koji vode većem udelu jedinjenja degradabilnih u AD procesu. Interesantno je primetiti da nije značajna korelacija prinosa biogasa sa količinom padavina, što potvrđuje njegovu fiziološku otpornost na uslove suše. Sve navedeno ukazuje da je krmni sirak pogodan agroenergetski usev za ovo područje.

Snabdevanje zeljastim sirovinama za anaerobnu digestiju ima za cilj najveći mogući prinos metana po jedinici površine (m^3/ha) SMY (*Specific methane yields*), koji je specifičan za područje, je određen prinosom biomase (t/ha) i sirovinskom-SMY (gustina energije) po jedinici suve materije (m^3/t). Na oba ova parametra utiču brojni faktori. Sirovina-SMY zavisi od kvaliteta sirovine, metode pretretmana, tehnologije digestije i kontrole procesa. Kvalitet sirovine zavisi od vrste useva, vrste sorte i izabranog sistema useva i na njega mogu uticati prirodni uslovi specifični za lokaciju, upravljanje usevom i čuvanje silaže. Datum žetve igra ključnu ulogu, jer odluka o žetvi za pripremu silaže ne utiče samo na prinos biomase, već ima značajan uticaj na

kvalitet biomase, odnosno siliranje, a samim tim i na SMY (Pasteris et al. 2021). Autori izveštavaju da su se SMY kretali između 231,25 i 321,31 m³/ t. Ove vrednosti su srednje u odnosu na ranije prijavljene SMY za sirak (281–312 m³/ kg: Hassan et al. 2019; 248–348 m³/ kg: Herrmann, et al. 2016; 310– 326 m³/ t: Nurk et al. 2016; 290–410 m³/ t: Vannasek et al. 2017). Rezultati pokazuju da je sirak imao slične ili niže SMY u poređenju sa literaturnim vrednostima kukuruza, koji je standardna sirovina za proizvodnju metana. Na primer, Herrmann et al. (2016) analizirali su 59 različitih silaža kukuruza, izveštavaju o SMY između 312 i 408 m³/ t. Štaviše, sa istom eksperimentalnom postavkom, referenca kukuruza (sorta Toninio, Agromais GmbH; srednje rani) je požnjevena na lokaciji Markuardt (2017), pokazujući SMI za svež materijal (Toninio SMI =350 m³/ t), koji se slažu sa rezultatima koje su objavili Herrmann et al. (2015), 342–354 m³/ t. Prinosi metana za kukuruz su se kretali u rasponu od 342–354 m³/ t pre siliranja, i od 344–381 m³/ t nakon siliranja. Promene tokom fermentacije silaže povećale su prinos metana do 10%. Međutim, razmatranje gubitaka u skladištenju kompenzovalo je razlike i otkrilo prinose metana silaže kukuruza slične onima u sirovini (326–356 m³/ t) (Herman et al. 2015).

U našem ogledu je pokazano da je prinos biogasa veći za kukuruz (prosečno 205.83 m³/t) u odnosu na sirak (prosečno 151.29 m³/t) (Slika 23) što se u potpunosti slaže sa literaturnim podacima, ako se uzme u obzir da su literaturni podaci dati na sadržaj organske materije, a naši u odnosu na svežu masu. Inače, različite forme izražavanja rezultata prinosa biogasa umnogome otežavaju međusobno upoređivanje, jer se u nekim slučajevima rezultati prikazuju u odnosu na svežu biomasu (kao što je slučaj kod nas), u nekim na svežu masu silaže, na suhu masu silaže ili na sadržaj organske materije u sirovini.

Najvažniji parametar pri izboru useva za proizvodnju metana je neto energetske prinos po jedinici površine, koji se uglavnom definiše prinosom biomase i konvertibilnošću biomase u metan. Ovo može rezultirati različitim strategijama žetve kada se uzgajaju agroenergetski usevi za anaerobnu digestiju. Kada se usevi koriste kao obnovljivi izvor energije potrebne su često posebne tehnologije žetve i prerade i specifični genotipovi. U idealnom slučaju, energetske usevi bi trebalo da daju visok prinos suve biomase po niskoj ceni, proizvedenu sa najmanje pritiska na resurs zemljišta i uz niske zahteve prema količini hranljivih materija i energije. Pored toga, treba

da nudi nisku osetljivost na bolesti i štetočine i da ima dobru pokrovnost zemljišta, a da pritom ne smanjuje biodiverzitet.

Poboljšanje prinosa biomase namenskih energetskeg useva na ograničenoj površini gajenja navodi se kao jedna od mogućih strategija za postizanje efektivnog i održivog korišćenja bioenergije. Za sisteme bioenergetskih useva, upotreba N đubriva je ključna praksa upravljanja poljoprivredom za poboljšanje produktivnosti i profitabilnosti. Dostupnost azota (N) je najčešće prijavljivana kao ograničavajući faktor za rast autohtonih trava, što sugerise da đubrenje N može biti važna praksa upravljanja za proizvodnju biomase energetskeg useva i kvalitet sirovine. Ipak, još uvek nedostaju informacije o uticaju đubrenja N na prinos biomase energetskeg kultura koje rastu na zemljištima različiteg kvaliteta (Krzystek et al. 2020). Zbog toga je važno proceniti podobnost potencijalnih energetskeg kultura za proizvodnju biogasa kako bi se postigao najbolji mogući učinak, jer opravdanost ekonomičnosti proizvodnje biogasa zavisi od veličine prinosa. Osim energetske efikasnosti u vezi sa troškovima, obračun troškova je važan element u proceni proizvodnje biogoriva. Prednost obračuna troškova energije je njegova nezavisnost od odnosa cena, što omogućava poređenje nalaza u različitim istraživačkim centrima.

Rezultati dobijeni u našem poljskom ogledu će ovde biti diskutovani u odnosu na dostupne literaturne podatke za ogled u Poljskoj (Krzystek et al. 2020) sa kukuruzom i sirkom. U sprovedenim istraživanjima, najveći prinos zelene mase kukuruza je dobijen na dobrom zemljištu u Grabovu (oko 50 t/ha), prinos sirka bio je preko 70 t/ha, u odnosu na naše rezultate: prinos sveže mase kukuruza je 45 t/ha na plodnom zemljištu bez đubrenja, a sirka 55 t/ha. Povećanje doze azota rezultiralo je blagim povećanjem prinosa zelene mase sa 1 ha. Najveći prinos zelene mase dobijen je za najveće đubrenje azotom od 160 kg/ha. U našem eksperimentu je doza N bila oko 140 kg/ha (115 kgN/ha kroz ureu + 27kgN/ha iz 50 t/ha digestata). Najveći prinos biogasa po hektaru kukuruzne silaže sa lokacija sa dobrim zemljištem i sa srednje plodnim zemljištem dobijen je za srednji nivo đubrenja: 120 N. U našem ogledu đubrenje digestatom je imalo veći uticaj na delimično degradiranom zemljištu na lokaciji Ilandža. Upoređujući silažu kukuruza po lokaciji, čini se da je silaža sa plodnog zemljišta najefikasnija, jer je prinos biogasa po hektaru bio 15595 m³/ha/god (120 N stopa đubrenja). Mnogo manji prinos biogasa je dobijen za silažu kukuruza sa lakog zemljišta, čiji je prinos bio u rasponu od 9751 do 11412 m³/ha/god i od 7810

do 8690 m³ /ha /god, respektivno. Treba napomenuti da je u ovom slučaju najveći prinos ostvaren za silažu kukuruza sa lokacije lakog zemljišta sa najvišim nivoom đubrenja (160 N) od 11412 m³ /ha /god. Naši rezultati, prikazani u Tabeli 19, su u rasponu 7051 – 10367 m³/ha za kukuruz, odnosno 6559 – 8554 m³/ha za sirak i niži su od navedenih, što može biti posledica razlika u ispitivanim genotipovima, klimatskim i pedoliškim karakteristikama lokacije i/ili samog AD procesa, ali trend ostaje isti.

Međutim, ako se posmatra prinos biogasa po t biomase: u Poljskoj najveći prinos biogasa od 194,5 m³/ t zelene mase dobijen je od silaže kukuruza sa najnižim nivoom đubrenja (80 kg N/ ha). S druge strane, u slučaju sirka, najveća količina biogasa (115 m³/ t) dobijena je iz silaže koja je đubrena najvećom dozom od 160 kg N/ ha. U našem ogledu je prinos biogasa za kukuruz od 189.67 m³ /t (kontrola) do 221.99 m³ /t (digestat) (Slika 23), a za sirak 145.53 m³/t z prosek kontrole, odnosno 157.1 m³/t uz primenu digestata (Tabela 15), što je saglasno rezultatima iz Poljske. Analizom uticaja đubrenja na podložnost razgradnji odabranih silaža u procesima fermentacije metana i proizvodnje biogasa, razlika u prinosu biogasa bila je manja za sirak (7,92-8,42%) nego za kukuruz (17%). Međutim, veća proizvodnja biogasa i metana od 1 tone zelene mase i veći prinos po hektaru ovih gasova dobijen je u ovom radu iz silaže kukuruza u odnosu na silažu od sirka, što potvrđuju i rezultati drugih istraživača.

Treba naglasiti da u našem slučaju, kada je u pitanju sirak, i na plodnom i na delimično degradiranom zemljištu, đubrenje digestatom dovodi do povećanja svih ispitivanih parametara: najviše za broj listova po stablu 28,6%, najmanje za visinu biljaka 2,5%, za biomasu 3,4% (suva) ili 5,4% (sveža), za prinos biogasa 11,58 m³/t što iznosi 7,9%. Veće povećanje prinosa biogasa u odnosu na povećanje biomase ukazuje da je digestat uticao i na promenu njenog hemijskog sastava. Potrebna su dalja istraživanja sastava biomase, naročito sadržaja lako degradabilnih ugljenih hidrata. Takođe, bilo bi poželjno uraditi i analizu distribucije ovih materija po organima biljke u momentu žetve.

Istraživanja su pokazala da su se tehnologije proizvodnje useva kod kojih je primenjivan nizak nivo azotnog đubrenja, generalno, pokazale najvišom energetsom efikasnošću. U zavisnosti od tipa zemljišta, vrednosti ERoEI i NEV za kukuruz su se kretale od 5,05 i 188,945 MJ /ha (lako zemljište), dobijene na nivou od 120 kg N /ha do 9,76 dobijene na nivou od 80 kg N

/ha i 433 263 MJ /ha dobijeno na nivou od 120 kg N /ha (dobro zemljište). Dobijeni nivoi indikatora su se pokazali višim za čak 60% u odnosu na nivo indikatora dobijenih na najvišem nivou đubrenja—160 kg N /ha. Za sirak (lako zemljište) odgovarajuće su dobijene vrednosti od oko 5,2 i 200 000 MJ na nivou od 160 kg N /ha. Navedeni indikatori nisu računati za naš ogled, jer se nalaze van okvira predmeta istraživanja.

5.5. Osvrt na bioekonomiju

Bioekonomija se može definisati kao „proizvodnja obnovljivih bioloških resursa i pretvaranje ovih resursa i tokova otpada u proizvode sa dodatnom vrednošću, kao što su hrana, hrana za životinje, proizvodi na bazi biologije i bioenergija“ (Evropska komisija, 2012). Iako napredan, ovaj koncept je naišao i na neke značajne kritike. Kao odgovor, ažurirana je strategija bioekonomije Evropske komisije (2018a), koja najavljuje da „evropska bioekonomija treba da ima održivost i cirkularnost u fokusu“ (Evropska komisija, 2018). Od objavljivanja akcionog plana EU za CE (Evropska komisija, 2015), „praktično sve evropske (povezane) strategije za bioekonomiju“ više se povezuju sa cirkularnom ekonomijom koja pruža mogućnosti za smanjenje emisija gasova staklene bašte iz poljoprivredne proizvodnje kroz upravljanje organskim otpadom, dok povezivanje finalnih proizvoda (struja, toplota, đubrivo) daje doprinos lokalnom održivom razvoju.

Međutim, bez obzira na to da li razmatramo kružnu bioekonomiju u užem ili širem smislu, osnova njenog razvoja leži u bioresursima koji se odlikuju stalnim proizvodnim procesom. Njihovo održivo korišćenje u energetske svrhe pozicionira biogasna postrojenja kao vodeći put ka budućnosti kružne bioekonomije (Stegmann et al. 2019).

Pregled upravljanja stajnjakom, koji uključuje strategije proizvodnje bioenergije i oporavka resursa, njihov trenutni scenario, mogućnosti, izazove i izglede za buduća istraživanja zajedno sa globalnim propisima i politikama dat je u preglednom radu Awashi et al. (2022). Iako je usvojeno nekoliko pristupa na globalnom nivou u cilju oporavka proizvoda sa dodatnom vrednošću na bazi stajnjaka, tehnološke inovacije zahtevaju dalju nadogradnju sa aspekta životne sredine, energije i ekonomije. Nekoliko tehnologija za proizvodnju bioenergije i obnavljanje hranljivih materija je detaljno razmotreno i ukazano je da su visoki troškovi uspostavljanja, operativni troškovi, asortiman stajnjaka i rukovanje digestatom najveći izazovi i ograničenja,

detektovani metodom tehno-ekonomske procene (TEA) i procene životnog ciklusa (LCA), upravljanja stajnjakom u kontekstu njihove ekonomske i ekološke održivosti. Ipak, potrebna su opsežna istraživanja da bi se izgradio efikasan okvir za upravljanje stajnjakom kako bi se unapredila integrisana proizvodnja bioenergije, reciklaža hranljivih materija i korišćenje digestata uz najmanji uticaj na životnu sredinu i maksimalnu ekonomsku dobit. Autori zaključuju da oslobađanje gasova sa efektom staklene bašte i neprijatnih mirisa zajedno sa radnom intenzivnošću, čine stajnjak neprivlačnim za upotrebu u poljoprivredi. Ove probleme je moguće rešiti uz dodatne proizvode u vidu bioenergije, hranljivih materija i zamenu 60–75% sintetičkog đubriva.

Novi globalni pravci održivog razvoja usklađuju resurse poljoprivrednog zemljišta sa proizvodnjom hrane (FAO, 2020). Dakle, agroenergetske useve ne bi trebalo gajiti na plodnom poljoprivrednom zemljištu, a marginalna zemljišta bi mogla pružiti mogućnosti za proizvodnju energije, pod pretpostavkom da se u teški uslovima razvoja biljaka, produktivnost može održati na relativno visokom nivou. Održiva proizvodnja bioenergije na marginalnim zemljištima predstavlja ambiciozan cilj, nudeći visokokvalitetna biogoriva bez konkurencije sa poljoprivredno-prehrambenom industrijom, jer obezbeđuje sirovinu, koja se proizvodi na površinama kojima se ne gazduje. Međutim, proizvodnja agroenergetskih useva na zemljištu ograničenih produkcionih karakteristika generalno pokazuje nekoliko agronomskih, tehno-ekonomskih i metodoloških izazova koji dovode do smanjenja dobijenih količina biomase i rentabilnosti (Nenciou et al. 2022).

6. ZAKLJUČCI

Na sistematski način je utvrđen uticaj digestata, kao nusprodukta u proizvodnji biogasa, na produktivnost biomase krmnog sirka (*Sorghum bicolor* L.) kao agroenergetskog useva koji se koristi u produkciji biogasa, na primeru Biogas Energy doo Alibunar.

Ovo je postignuto u nekoliko koraka:

- Analizirane su agrohemijske osobine plodnog poljoprivrednog (černozem, lokacija Dolovo) i degradiranog zemljišta (ritska crnica – glejsol, lokacija Ilandža) standardnim metodama. Zemljište na lokaciji Ilandža, u neposrednom okruženju biogasne elektrane, prema rezultatima nema izrazito povišen salinitet i njegova plodnost je smanjena u toku dugogodišnje primene neadekvatnih poljoprivrednih praksi, kao što je prekomerno navodnjavanje zaslanjenom vodom.
- Analizirane su agrohemijske karakteristike digestata koji je primenjivan kao supstitucija industrijskim đubrivima ili supstitucija primeni stajnjaka direktno na polju. Primenjen je digestat iz tekuće proizvodnje biogasa, dobijen od smeše različitih ulaznih sirovina.
- Prikupljeni su podaci o vremenskim uslovima sa meteoroloških stanica najbližih odabranim lokacijama, Pančevo (za lokalitet Dolovo) i Vršac (za lokalitet Ilandža), koji pokazuju da u ispitivanom periodu nije bilo ekstremnih vremenskih uslova, a da je na lokaciji Ilandža zabeleženo nešto manje padavina nego u Dolovu.
- Metodom poljskog oglada, u tri eksperimentalne godine, na dve lokacije i u varijantama bez primene digestata i uz primenu 50 t/ha digestata, je utvrđen uticaj digestata na parametre razvoja biomase (broj listova po stablu, visina stabla i prinos sveže i suve biomase) krmnog sirka. Radi poređenja, paralelno je postavljen i ogled sa kukuruzom po identičnoj šemi.
- Utvrđen je uticaj digestata na produkciju biogasa iz silaže sirka i silaže kukuruza po jedinici mase i po jedinici obradive površine. Sadržaj biogasa je određivan u akreditovanoj laboratoriji. Primena digestata je u svim varijantama poljskog oglada dovela do povećanja prinosa biogasa.

- Usporedna analiza prinosa biomase i biogasa krmnog sirka u odnosu na kukuruz je pokazala da u uslovima južnog Banata sirak produkuje veću biomasu, dok kukuruz pokazuje veći prinos biogasa.
- Diskutovani su eksperimentalni rezultati sa aspekta ekonomske, ekološke i socijalne održivosti.

Za ispitivane parcele je predloženo đubrenje sa 200 kg/ha mineralnog đubriva NPK za sirak, odnosno 300 kg/ha za kukuruz. Ovo đubrenje nije sprovedeno. Primenom digestata su postignuti prinosi koji su bili očekivani za primenu mineralnog đubriva. Ova supstitucija ukazuje da se može postići značajna ušteda u poslovanju biogas elektrane sa jedne strane, a sa druge se štiti zemljište i omogućava njegova postepena rehabilitacija (jer je jedan od glavnih uzroka degradacije upravo prekomerna upotreba mineralnih đubriva). Kako digestat sadrži forme biogenih elemenata koje se znatno sporije otpuštaju u zemljište u odnosu na mineralna đubriva, ovim se omogućava racionalnije korišćenje hraniva od strane agroenergetskih useva. Takođe se postižu i benefiti za životnu sredinu, jer je produkcija mineralnih đubriva, naročito azotnih, veoma energetski zahtevna i značajan producent gasova sa efektom staklene bašte.

Ovim postupkom se obezbeđuje i stabilna doprema sirovina za potrebe biogas elektrane, što je jedan od većih izazova u celokupnom procesu produkcije električne energije iz biomase u procesu anaerobne digestije. Iako je udeo biomase agroenergetskih useva ograničen regulativom, njeno korišćenje je neophodno zbog niskih energetskih vrednosti stajnjaka, ili drugih sirovina, koje se mogu koristiti u AD procesu. Agroenergetske useve treba proizvoditi na degradiranom ili marginalnom zemljištu da bi se izbegla kompeticija sa proizvodnjom hrane. U slučaju biogas elektrane u Ilandži, predloženi postupak omogućava racionalno korišćenje umereno degradiranog zemljišta, koje je jedini neobnovljivi resurs u produkciji biogasa.

Sa aspekta životne sredine, pored gore navedenog, od ključnog značaja je i upotreba stajnjaka u AD procesu, jer se time rešava problem skladištenja ovog nusproizvoda stočarske proizvodnje, koristi se njegova energija i sprečava se njegova aplikacija direktno na njivu, a time i značajna emisija gasova sa efektom staklene bašte.

Prinos biogasa proizvedenog od silaže sirka bio je veći sa parcela na černozeu nego na glejsolu, sa izuzetkom 2017. godine, kada su prinosi bili ujednačeni. U svim varijantama sa upotrebom digestata postignuti su veći prinosi biogasa u odnosu na kontrolu, što ukazuje da je njegova primena pozitivno uticala ne samo na prinos biomase sirka već i na njen kvalitet.

Kao alternativni izvor hranljivih materija, digestat doprinosi ublažavanju klimatskih promena kroz smanjenje emisije gasova staklene bašte, kako direktno tako i indirektno kroz proizvodnju azotnih i fosfornih mineralnih đubriva. Sistem koji integriše proizvodnju biogasa i električne energije iz obnovljivih izvora, agroenergetskih useva (sirak za silažu) zajedno sa stočarskim otpadom (stajnjak) uz proizvodnju ove silaže na marginalnom zemljištu korišćenjem digestata iz AD procesa, kao oplemenivača zemljišta, dovodi do približavanja ciljevima nisko-ugljenične poljoprivrede i cirkularne ekonomije recikliranjem materija.

7. REFERENCE

1. 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27-30 May 2019, Lisbon, Portugal. A Sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the Connection Between Economy, Society and the Environment, <https://www.etipbioenergy.eu/27th-european-biomass-conference-and-exhibition-27-30-may-2019-lisbon-portugal>
2. De Meester S., Demeyer J., Velghe F., Peene A., Van Langenhove H., Dewulf J. (2012): The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology. *Bioresour. Technology*, 121:396-403
3. Abubaker, J.; Risberg, K.; Jönsson, E.; Dahlin, A.S.; Cederlund, H.; Pell, M. (2015). Short-term effects of biogas digestates and pig slurry application on soil microbial activity. *Appl. Environ. Soil Sci.*, Volume 2015 | Article ID 658542, doi:10.1155/2015/658542
4. Agostini A, Battini F, Guintoli J, Zabaglio V, Padella M, Baxter D, ... Amaduci S (2015). Environmentally sustainable biogas? The key role of maize co-digestion with energy crops. *Energies* 8:5234-5265. <https://doi.org/10.3390/en8065234>
5. Al Seadi T., Rutz D., Prassl H., Köttner M., Finsterwalder T., Volk S., Janssen R. (2008). Biogas Handbook. Al Seadi Teodorita (ed). University of Southern Denmark, Esbjerg, Denmark.
6. Ameen A, Yang X, Chen F, Tang C, Du F, Fahad S, Hui Xie G (2017). Biomass yield and nutrient uptake of energy sorghum in response to nitrogen fertilizer rate on marginal land in a semi-arid region. *Bioenergy Resources* 10:363-376. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9804-5>
7. Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E. & Wagentristl, H. (2007a). Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresour. Technol.*, 98, 3204–3212. doi: 10.1016/j.biortech.2006.07.007
8. Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, V., Mayer, K. & Gruber, L. (2007b). Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 173–182.

9. Andersen, L.F., Parsin, S., Lüdtko, O. & Kaltschmitt, M. (2020). Biogas production from straw—the challenge feedstock pretreatment. *Biomass Conv. Bioref.*, <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00740-y>
10. Aso, S., Digestate: The Coproduct of Biofuel Production in a Circular Economy, and New Results for Cassava Peeling Residue Digestate, Renewable Energy - Technologies and Applications, Ed. Tolga Taner, Archana Tiwari and Taha Selim Ustun, (2019)
11. Awasthi S.A., Kumar M., Sarsaiya S. et al. (2022). Multi-criteria research lines on livestock manure biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment and business models strategies, *Journal of Cleaner Production*, Volume 341, 130862, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130862>.
12. Balans biogasa za 2020. godinu” Zavod za statistiku, <https://www.stat.gov.rs/media/346506/balance-of-biogas-in-2020.pdf>
13. Barbanti, L., Di Girolamo, G., Grigatti, M., Bertin, L. & Ciavatta, C. (2014). Anaerobic digestion of annual and multi-annual biomass crops. *Ind. Crop. Prod.*, 56, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.03.002>
14. Barbosa D, Nabel M, Jablonowski N D (2014). Biogas-digestate as nutrient source for biomass production of *Sida hermaphrodita*, *Zea mays* L. and *Medicago sativa* L. *Energy Procedia* 59:120-126. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.357>
15. Battini, F., Agostini, A., Boulamanti, A.K., Giuntoli, J. & Amaducci, S. (2014). Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: Case study of a dairy farm in the Po Valley. *Sci. Total Environ.*, 481, 196–208.
16. Belić M., Nešić LJ., Ćirić V., Vasin J., Milošev D., Šeremešić S. (2011) Characteristics and Classification of Gleyic Soils of Banat, Ratar. Povrt. / *Field Veg. Crop Res.* 48. 375-382
17. Bharathirajaa B., Sudharsanaa, T., Jayamuthunagaib, J., Praveenkumarc ,R., Chozhavendhand, S., Iyyappana, J., Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, (2018), pp. 570-582, DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.093
18. Borrell, A., Erik van Oosterom, Barbara George-Jaeggli, Daniel Rodriguez, Joe Eyre, David J. Jordan, Emma Mace, Vijaya Singh, Vincent Vadez, Mike Bell, Ian Godwin, Alan Cruickshank, Yongfu Tao, Graeme Hammer, Sorghum Crop Physiology Case Histories for

- Major Crops (2021) Chapter 5 - Sorghum, Editor(s): Victor O. Sadras, Daniel F. Calderini, Crop Physiology Case Histories for Major Crops, Academic Press, 2021, Pages 196-221,
19. Bosco S, Di Nasso N.N., Roncucci N., Mazzoncini M., Bonari E. (2016): Environmental performances of giant reed (*Arundo donax* L.) cultivated in fertile and marginal lands: a case study in the Mediterranean. *Eur J Agron*; 78: 20-31.
 20. Braun, R. (2007). Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development. In: RANALLI, P. (eds) Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5486-0_13
 21. Calderon C, Colla M, Jossart J-M, Hemeleers N, Martin A, Aveni N, *et al.* Statistical report: Biogas 2019 2019; 18
 22. Chodkowska-Miszczuk J. a,* , S. Martinat ´ b,c , D. van der Horst d(2021).Changes in feedstocks of rural anaerobic digestion plants: External drivers towards a circular bioeconomy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148 (2021) 111344, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111344>
 23. Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud, 2011: Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 24. D'Imporzano G., Pilu R., Corno L., Adani F. (2018): *Arundo donax* L. can substitute traditional energy crops for more efficient, environmentally-friendly production of biogas: A Life Cycle Assessment approach. *Bioresour Technol*; 267: 249-56.
 25. da Cruz Ferraz Dutra, J., Passos, M.F., Moretti, É.R. et al. (2022). Methane production from lignocellulosic biomass using hydrothermal pretreatment. *Biomass Conv. Bioref.* <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02604-z>.
 26. Doyeni, M.O.; Stulpinaite, U.; Baksinskaite, A.; Suproniene, S.; Tilvikiene, V. The Effectiveness of Digestate Use for Fertilization in Agricultural Cropping System. *Plants* 2021, 10, 1734. <https://doi.org/10.3390/plants10081734>

27. Duque-Acevedo M, Belmonte-Ureña LJ, Yakovleva N, Camacho-Ferre F (2020). Analysis of the circular economic production models and their approach in agriculture and agricultural waste biomass management. *Journal of Environmental Research and Public Health* 17:9549. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249549>
28. [EBA Statistical Report 2021 | European Biogas Association](#)
29. EBA Statistical report 2021, GIE_EBA_BIO_2021_A0_FULL_3D_253_online).
30. European Commission
31. European Commission
32. European Parliament (2009). Directive 2009/28/EC. Promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. O. J. European Union 140(16). <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/28/2015-10-05>
33. FAO. The Contribution of Agriculture to Greenhouse Gas Emissions; FAO: Rome, Italy, 2020, <https://www.fao.org/3/cc2672en/cc2672en.pdf>
34. Fischer, G., E. Hizsnyik, S. Prieler, M. Shah, and H. van Velthuis (2009). Biofuels and Food Security. The OPEC Fund for International Development (OFID) and International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA), Vienna, Austria, 228 pp.
35. Franco, M., Hurme, T., Winkvist, E. & Rinne, M. (2019). Grass silage for biorefinery—A meta-analysis of silage factors affecting liquid–solid separation. *Grass and Forage Science*, 74 (2), 218-230. doi10.1111/gfs.12421,
36. Fusi, A., Bacenetti, J., Fiala, M. Azapagic, A. (2016): Life Cycle Environmental Impacts of Electricity from Biogas Produced by Anaerobic Digestion, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol.4, 2296-4185
37. Gelaye KK, Zehetner F, Loiskandl W, Klik A (2019). Comparison of growth of annual crops used for salinity bioremediation in the semi-arid irrigation area. *Plant Soil Environment* 65:165-171. <https://doi.org/10.17221/499/2018-PSE>
38. Germer S., Alexopoulou E., Concha I.V., Grundmann P., van Haren R., Janssen R., Khawaja C., Kiourtsis F., Monti A., Sailer K., Tryboi O., Wagner M., Zegada-Lizarazu W. pp. 84 – 89, (EUBCE 2019).
39. Giuliano A., Bolzonella D., Pavan P. Cavinato C., Cecchi F. (2013): Co-digestion of livestock effluents, energy crops and agro-waste: Feeding and process optimization in

- mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresource Technology* 128:612-618. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.11.002
40. Glab L, Sowinski J (2019). Sustainable production of sweet sorghum as a bioenergy crop using biosolids taking into account greenhouse gas emissions. *Sustainability* 11:3033-3050. <https://doi.org/10.3390/su11113033>
 41. Glamočlija, Đ., S. Janković, Popović V., Filipović V., Kuzevski J., Ugrenović V. (2015): Alternative crops in conventional and organic production. Monograph. IPN Belgrade. 1-355.
 42. Habyarimana E, Piccard I, Catellani M, De Franceschi P, Dall'agata M (2019). Towards predictive modeling of sorghum biomass yields using fraction of absorbed photosynthetically active radiation derived from Sentinel-2 Satellite Imagery and Supervised Machine Learning Techniques. *Agronomy* 9(4):203. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040203>
 43. Häfner, F.; Ruser, R.; Claß-Mahler, I.; Möller, K. (2021). Field Application of Organic Fertilizers Triggers N₂O Emissions From the Soil N Pool as Indicated by 15N-Labeled Digestates. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 1–16, doi:10.3389/fsufs.2020.614349.
 44. Hahn, H., Ganagin, W., Hartmann, K.; Wachendorf, M. (2014). Cost analysis of concepts for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresour. Technol.*, 170, 211–220.
 45. Hao X, Thomas B, Nelson V, Li X (2016). Agronomic values of anaerobically digested cattle manure and the separated solids for barley forage production. *Soil Fertility & Plant Nutrition* 80:1572-1584. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.05.0132>
 46. Harada H, Yoshimura Y, Sunaga Y, Hatanaka T (2000) Variations in nitrogen uptake and nitrate-nitrogen concentration among sorghum groups. *Soil Sci. Plant Nutrition* 46:97-104.
 47. Hassan MU, Chattha MU, Mahmood A, Sahi ST (2018). Performance of sorghum cultivars for biomass quality and biomethane yield grown in semi-arid area of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research* 25:12800-12807. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1575-4>
 48. Hassan, M. U., Chattha, M. U., Barbanti, L., Chattha, M. B., Mahmood, A., Khan, I., & Nawaz, M. (2019). Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane

- yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan. *Industrial Crops and Products*, 132, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.019>
49. Hermann, L., Hermann, R. (2019). Report on regulations governing anaerobic digesters and nutrient recovery and reuse in EU member states. Wageningen, *Wageningen Environmental Research* 121. DOI/10.18174/476673.
 50. Herrmann, A. (2013). Biogas production from maize: Current state, challenges and prospects. 2. Agronomic and environmental aspects. *Bioenergy Res.*, 6, 372–387.
 51. Herrmann, C., Idler, C., & Heiermann, M. (2015). Improving aerobic stability and biogas production of maize silage using silage additives. *Bioresource Technology*, 197, 393–403. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.114>
 52. Herrmann, C., Idler, C., & Heiermann, M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource Technology*, 206, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.058>
 53. Hodsman, L., Smallwood, M., Williams, D. "The Promotion of Non-Food Crops", National Non-Food Crops Centre, 2005-11-30
 54. <https://halophyteskh.biosaline.org/content/marginal-lands>
 55. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbioe.2016.00026>
 56. <https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/> assessed 30. Maj 2022
 57. <https://www.stat.gov.rs/media/346516/bilans-biogasa-2020.pdf>
 58. <https://www.thecattlesite.com/articles/4458/sorghum-seems-promising-as-a-fodder-crop-in-the-netherlands/>
 59. Hufnagel, J., Reckling, M., & Ewert, F. (2020). Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(2), 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00617-4>
 60. Hussain, M.I., Farooq, M., Muscolo, A. *et al.* (2020): Crop diversification and saline water irrigation as potential strategies to save freshwater resources and reclamation of marginal soils—a review. *Environ Sci Pollut Res* **27**, 28695–28729). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09111-6>

61. Hutnan, M. (2016). Maize Silage as Substrate for Biogas Production. In Advances in Silage Production and Utilization, EDs T.De Silva and M. Santos, eBook (PDF) ISBN: 978-953-51-4151-8, DOI: 10.5772/64378
62. Ikanović J, Glamoclija DJ, Maletic R, Popović V, Sokolović D, Spasić M, Rakić S (2011). Path analysis of the productive traits in Sorghum species. *Genetika* 43(2):253-262. <https://doi.org/10.2298/GENSR1102253I>
63. Ikanović, J., Popović, V., Rakašćan, N., Janković, S., Živanović, Lj., Kolarić, Lj., Mladenović Glamoclija, M. & Dražić, G. (2020). Genotype and Environment Effect of Soybean Production and Biogas. GEA (Geo Eco-Eco Agro) International Conference, 28-31 May 2020, Montenegro - Book of Proceedings, 280-288,
64. IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis EPA WEBSITE. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom 996 pp.
65. Jafari, Y., Karimi, K., & Amiri, H. (2017). Efficient bioconversion of whole sweet sorghum plant to acetone, butanol, and ethanol improved by acetone delignification. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1428–1437.
66. Jankovic S, Glamoclija DJ, Prodanovic S (2017). Energy crops - Technology for production and processing. Belgrade, ISBN 987-86-81689-35-6, pp 1-410. (In Serbian).
67. Jardim A.M.dR.F. , da Silva G.I.N , Evandro Marcos Biesdorf E.M. , et al. (2020): Production potential of Sorghum bicolor (L.) Moench crop in the Brazilian semiarid: review, *PUBVET*.14, n.4, a550, p.1-13, Abr., 2020, Doi: 10.31533/pubvet.v14n4a550.1-13
68. Jessup, R.W. (2009). 'Development and status of dedicated energy crops in the United States', *In Vitro Cell.Dev.Biol.-Plant*, 45: 282.
69. Jurgutis, L., Šlepetien'ė, A., Šlepetys, J., Cesevic'ien'ė, J., (2021). Towards a Full Circular Economy in Biogas Plants: Sustainable Management of Digestate for Growing Biomass Feedstocks and Use as Biofertilizer. *Energies* 14, pp. 4272. DOI:10.3390/en14144272
70. Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (2001) Energie aus Biomasse. Berlin, Ltd: Springer Verlag
71. Kanbar, A., Shakeri, E., Alhajturki, D., Horn, T., Emam, Y., Tabatabaei, S. A., & Nick, P. (2020). Morphological and molecular characterization of sweet, grain and forage sorghum

- (*Sorghum bicolor* L.) genotypes grown under temperate climatic conditions. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of. Plant Biology*, 154(1), 49–58. <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.15695>
72. Kirubakarana V, Sivaramakrishnanb V, Nalinic R, Sekard T, Premalathae M, Subramaniane P (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:179-186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001>
 73. Krzystek, L., Wajszczuk, K., Pazera, A., Matyka, M, Slezak, R. & Ledakowicz, S. (2020). The Influence of Plant Cultivation Conditions on Biogas Production: Energy Efficiency, *Waste and Biomass Valorization*, 11,513–523. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00668-z>
 74. Kulichkova G.I., Ivanova T.S., Köttner M., Volodko O.I., Spivak S.I., Tsygankov S.P. Blume J.B. (2020): Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials, *The Open Agriculture Journal*, 14, 219-234, DOI: [10.2174/1874331502014010219](https://doi.org/10.2174/1874331502014010219)
 75. Kulichkova, G., Ivanova, T., Köttner, M., Volodko, O., Spivak, S., Tsygankov, S. Blume, Y., Zlateva, P.& Dimitrov, R. (2020). An analysis of the potential use of waste materials for biogas plant development. *OP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1031 012012
 76. Lamolinara B., Pérez-Martínez A., Guardado-Yordi E., Fiallos C.G., Diéguez-Santana K.,Ruiz-Mercado G.J., (2022). Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. *Waste Management* (1) 14-30, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.035>
 77. Lansche, J. & Müller, J. (2012). Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates. *Eng. Life Sci.*, 12, 313–320.
 78. Lee, M., Steiman, M., & St. Angelo, S. (2021). Biogas digestate as a renewable fertilizer: Effects of digestate application on crop growth and nutrient composition. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(2), 173-181. doi:10.1017/S1742170520000186
 79. Li M., Luo N., Lu Y. (2017): Biomass Energy Technological Paradigm (BETP): Trends in This Sector. *Sustainability*, 9(4), 567. <https://doi.org/10.3390/su9040567>
 80. Logan, M., Visvanathan, C., (2019). Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. *Waste Management & Research*, 37, Supplement pp. 27–39 DOI:10.1177/0734242X18816793

81. Mahmood A, Abrar H, Shahzad A N, Bernd H (2015). Biomass and biogas yielding potential of sorghum as affected by planting density, sowing time and cultivar. *Pakistan Journal of Botany* 47:2401-2408.
82. Mahmood A, Ullah H, Ijaz M, Javaid M, Shahzad AN, Honermeier B (2013) Evaluation of sorghum hybrids for biomass and biogas production. *Australian Journal for Crop Sciences* 7(10):1456-1462.
83. Makadi M, Tomocsik A, Orosz V (2012). Digestate: A new nutrient source - a review. In: Kumar S (Ed). Biogas. In Tech, pp 295-310. <https://doi.org/10.5772/31355>
84. Mekdad A, Rady M (2016). Productivity response to plant density in five Sorghum bicolor varieties in dry environments. *Annals of Agricultural & Crop Sciences* 1(2):531-546.
85. Meyer-Aurich, A., Lochmann, Y., Klauss, H., & Prochnow, A. (2016). Comparative Advantage of Maize- and Grass-Silage Based Feedstock for Biogas Production with Respect to Greenhouse Gas Mitigation. *Sustainability*, 8, 617. doi:10.3390/su8070617
86. Milanović T, Popović V, Vučković S, Rakašćan N, Popović S, Petković Z (2020). Analysis of soybean production and biogas yield to improve eco-marketing and circular economy. *Economics of Agriculture, Belgrade*, 67(1):141-156. <https://doi.org/10.5937/ekoPolj2001141M>
87. Milić , D, Tica , N., Zekić , V., Popov , M., Mihajlov , Z., Šepa, A. (2020): Methods for assessing the economic viability of biogas plant investments, *Journal on Processing and Energy in Agriculture* 24 (2020) 1, 13-17, DOI: 10.5937/jpea24-25510
88. Nabel M, Temperton VM, Poorter H, Lücke A, Jablonowski ND. (2016): Energizing marginal soils – the establishment of the energy crop *Sida hermaphrodita* as dependent on digestate fertilization, NPK, and legume intercropping. *Biomass Bioenergy*; 87: 9-1
89. Nabel MD, Schrey S, Poorter H, Koller R, Jablonowski N (2017). Effects of digestate fertilization on *Sida hermaphrodita*: Boosting biomass yields on marginal soils by increasing soil fertility. *Biomass and Bioenergy* 107:207-213. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.009>
90. Nelson D, Sommers L (1996). Chapter 34: Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5.3.

Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>

91. Nenciu, F.; Paraschiv, M.; Kuncser, R.; Stan, C.; Cocarta, D.; Vladut, V.N. High-Grade Chemicals and Biofuels Produced from Marginal Lands Using an Integrated Approach of Alcoholic Fermentation and Pyrolysis of Sweet Sorghum Biomass Residues. *Sustainability* 2022, 14, 402. <https://doi.org/10.3390/su14010402>
92. Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D. & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322. doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137
93. Ning, T., Zheng, Y., Han, H., Jiang, G., & Li, Z. (2012). Nitrogen uptake, biomass yield and quality of intercropped spring-and summer-sown maize at different nitrogen levels in the North China Plain. *Biomass Bioenergy*, 47,91–98. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.059>
94. Nkoa R (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 34:473-492. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z>
95. Nurk, L., Böhle, L., & Wachendorf, M. (2016). Degradation of fibre and non-fibre fractions during anaerobic digestion in silages of maize, sunflower and sorghum-Sudangrass of different maturities. *Bioenergy Research*, 9(3), 720–730. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9717-3>
96. Odlare, M., Arthurson, V., Pell, M., Svensson, K., Nehrenheim, E., Abubaker, J. (2011). Land application of organic waste—Effects on the soil ecosystem. *Appl. Energy* 88, 2210–2218, [doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.043).
97. ODLUKA O UTVRĐIVANJU ENERGETSKOG BILANSA REPUBLIKE SRBIJE ZA 2021. GODINU, ("Sl. glasnik RS", br. 156/2020)
98. Oleszek, M.& Matyka, M. (2020). Energy Use Efficiency of Biogas Production Depended on Energy Crops, Nitrogen Fertilization Level, and Cutting System. *BioEnergy Research*, 13 (4) <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10147-2>

99. Organic Geochemistry, Eds. Holland and Turekian I. Kögel-Knabner, W. Amelung, in *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), 2014 ISBN 978-0-08-098300-4).
100. Pancaldi, FLuisa M. Trindade (2020). Marginal Lands to Grow Novel Bio-Based Crops: A Plant Breeding Perspective. *Front Plant Sci.* 11: 227. Published online 2020 Mar 3. doi: 10.3389/fpls.2020.00227, **PMCID:** PMC7062921
101. Pasteris A.M., Zapka O., Plogsties V., Herrmann C., Heiermann M. (2021). Effects of sorghum biomass quality on ensilability and methane. *GCB Bioenergy*. 13:803–822. DOI: 10.1111/gcbb.12814
102. Pastorelli, R., Valboa, G., Lagomarsino, A., Fabiani, A., Simoncini, S.; Zaghi, M., Vignozzi, N. (2021). Recycling Biogas Digestate from Energy Crops: Effects on Soil Properties and Crop Productivity. *Appl. Sci.* 11, 750. <https://doi.org/10.3390/app11020750>
103. Paterson AH, Bowers JE, Bruggmann R (2009). The Sorghum bicolor genome and the diversification of grasses. *Nature* 457:551-556. <https://doi.org/10.1038/nature07723>
104. Peter, C., Helming, K., Nendel, C., (2017). Do greenhouse gas emission calculations from energy crop cultivation reflect actual agricultural management practices? —A review of carbon footprint calculators. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 67,, pp. 461–476, DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.059
105. Pham CH, Triolo JM, Cu TTT, Pedersen L, Sommer SG (2013). Validation and recommendation of methods to measure biogas production potential of animal manure. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* 26(6):864-873. <https://doi.org/10.5713/ajas.2012.12623>
106. Popović V, Vučković S, Jovović Z, Ljubičić N, Kostić M, Rakašćan N, Ikanović J (2020a). Genotype by year interaction effects on soybean morpho-productive traits and biogas production. *Genetika* 52(3):1055-1073. <https://doi.org/10.2298/GENSR1802635P>
107. Popović, V., Vidić, M., Vucković, S., Dražić, G., Ikanović, J., Djekić, V., Filipović, V. (2015). Determining genetic potential and quality components of NS soybean cultivars under different agroecological conditions. *Romanian Agriculture Research*, 32,35-45.
108. Prask H, Szlachta J, Fugol M, Kordas L, Lejman A, Tuznik F, Tuznik F (2018). Sustainability biogas production from ensiled plants consisting of the transformation of the digestate into a valuable organic-mineral granular fertilizer. *Sustainability* 10(3):585. <https://doi.org/10.3390/su10030585>

109. PROJECT DESIGN DOCUMENT FORM (CDM-SSC-PDD) - Version 03
110. Przygocka-Cyna K, Grzebisz W (2018). Biogas digestate - benefits and risks for soil fertility and crop quality - an evaluation of grain maize response. *Open Chemistry* 16:258-271. <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0027>
111. Przygocka-Cyna K, Grzebisz W (2020). The multifactorial effect of digestate on the availability of soil elements and grain yield and its mineral profile-the case of maize. *Agronomy* 10:275. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020275>
112. Raja I.A. (2021). Agriculture Residue: A Potential Source for Biogas Production. *Ann Agric Crop Sci.* 6(3): 1081.
113. Rakašćan N, Popović V, Dražić G, Ikanović J, Popović S, Popović B, Milanović T (2019). Circular economy in function of obtaining the biogas. XXIII International Eco-Conference@, XIII Environmental Protection of Urban and Suburban Settlements, 25-27.09.2019. Novi Sad, pp 320-329.
114. Rakašćan, N., Popović, V., Ikanović, J., Janković, S., Dražić, G., Lakić, Ž. & Živanović, Lj. (2020). Wheat Straw in the Function of Obtaining Animal Feed and Biofuel. *EC Veterinary Science*, 5(12), 21-29.
115. Reuland G, Sigurnjak I, Dekker H, Sleutel S, Meers E. Assessment of the Carbon and Nitrogen Mineralisation of Digestates Elaborated from Distinct Feedstock Profiles. *Agronomy*. 2022; 12(2):456. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020456>
116. Rocateli, A. C., Raper, R. L., Balkcom, K. S., Arriaga, F. J., and Bransby, D. I. (2012). Biomass sorghum production and components under different irrigation/tillage systems for the southeastern U.S. *Ind. Crop Prod.* 36, 589–598. doi: 10.1016/j.indcrop.2011.11.007
117. Saracevic E., Koch D, Stuermer B., Mihalyi B., Miltner A., Friedl A. (2019). Economic and Global Warming Potential Assessment of Flexible Power Generation with Biogas Plants. *Sustainability* 11, no. 9: 2530. <https://doi.org/10.3390/su11092530>
118. Schaffasz, A., Windpassinger, S., Friedt, W., Snowdon, R., & Wittkop, B. (2019). Sorghum as a novel crop for Central Europe: Using a broad diversity set to dissect temperate-adaptation. *Agronomy*, 9(9), 535. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090535>
119. Schulz , V., Munz, S., Stolzenburg , K.,Jens Hartung , Weisenburger , S., Mastel , K., Möller, K., Claupein V. & Graeff-Hönniger, S. (2018). Biomass and Biogas Yield of

- Maize (*Zea mays* L.) Grown under Artificial Shading. *Agriculture*, 8(11), 178. doi:10.3390/agriculture8110178
120. Simon T, Kunzová E, Friedlová M (2015). The effect of digestate, cattle slurry and mineral fertilization on the winter wheat yield and soil quality parameters. *Plant Soil Environment* 61:522-527. <https://doi.org/10.17221/530/2015-PSE>
 121. Smith LS, Thelen KD, MacDonald SJ (2013) Yield and quality analyses of bioenergy crops grown on a regulatory brownfield. *Biomass and Bioenergy* 49:123–130. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.017>
 122. Sobhi M., Guo J., Gaballah M.S., Li B., Zheng J., Cui X., Sun H., Dong R., (2022): Selecting the optimal nutrients recovery application for a biogas slurry based on its characteristics and the local environmental conditions: A critical review, *Science of The Total Environment*, Volume 814, ,152700, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152700>.
 123. Sorensen P., Mejnertsenb P., Møllerc H., (2011). Nitrogen fertilizer value of digestates from anaerobic digestion of animal manures and crops. *Nordic Association of Agricultural Scientists Report*, 7, No 8,
 124. Spalevic V, Barovic G, Vujacic D, Curovic M, Behzadfar M, Djurovic N, ... Billi P (2020). The Impact of land use changes on soil erosion in the river basin of Miocki Potok, Montenegro. *Water* 12(11):2973. <https://doi.org/10.3390/w12112973>
 125. Stefaniak, T.R.; Dahlberg, J.A.; Bean, B.W.; Dighe, N.; Wolfrum, E.J.; Rooney, W.L. (2012). Variation in biomass composition components among forage, biomass, sorghum-sudangrass, and sweet sorghum types. *Crop Sci.*, 52, 1949–1954
 126. Stegmann p., Londo M., Junginger M. (2019). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters, *Resources, Conservation & Recycling: X*, Volume 6,100029, <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>.
 127. Strauß, C., Herrmann, C., Weiser, C., Kornatz, P., Heiermann, M., Aurbacher, J., Müller, J., & Vetter, A. (2019). Can energy cropping for biogas production diversify crop rotations? Findings from a multi-site experiment in Germany. *Bioenergy Research*, 12(1), 123–136. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-9960-5>
 128. Stürmer B, Pfundtner E., Kirchmeyr F, Uschnig S (2020). Legal requirements for digestate as fertilizer in Austria and the European Union compared to actual technical parameters.

129. Sukhesh, M.J., Rao, V.P. (2018). Anaerobic digestion of crop residues: technological developments and environmental impact in the Indian context. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, Vol. 16, 513-528, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.08.007>
130. T. Rehl, J. Lansche, J. Müller, (2012). Life cycle assessment of energy generation from biogas—Attributional vs. consequential approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, (6), 3766-3775, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.072>
131. Tampio E, Marttinen S, Rintala J. (2016): Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production*. 125:22-32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.127
132. Tang C., Li S., Li M., Xie G. H. (2018): Bioethanol Potential of Energy Sorghum Grown on Marginal and Arable Lands, *Frontiers in Plant Science* 9: 440. doi: 10.3389/fpls.2018.00440
133. The International Renewable Energy Agency (IRENA). <https://www.irena.org/energytransition> [accessed 10 sep 2020]
134. Thomas, H.L., Pot, D., Latrille, E., Trouche, G., Bonnal, L., Bastianelli, D. & Carrère, H. (2017). Sorghum Biomethane Potential Varies with the Genotype and the Cultivation Site. *Waste Biomass Valor.* 10, 783–788. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0099-3>
135. Turkmen, B.A. (2020). Renewable Energy Applications for Sustainable Agricultural Systems. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, 4(4), 497-504. doi: 10.29329/ijiaar.2020.320.11
136. Uusitalo, V., Havukainen, J., Manninen, K., Hohn, J., Lehtonen, E., Rasi, S., Soukka, R., € Horttanainen, M., 2014. Carbon footprint of selected biomass to biogas production chains and reduction potential in transportation use, *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 66(C), pages 90-98.
137. Vanamala, J. K. P., Massey, A. R., Pinnamaneni, S. R., Reddivari, L., & Reardon, K. F. (2018). Grain and sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) serves as a novel source of bioactive compounds for human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(17), 2867–2881.

138. Vasileva, V. & Vasilev, E. (2020). Agronomic characterization and the possibility for potential use of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) In the forage production in Bulgaria. *Pak. J. Bot.*, 52(2), 565-568. DOI: [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2020-2\(26\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2020-2(26))
139. Verdi L, Kuikman PL, Orlandini S, Mancini M, Napoli M, Dalla Marta A (2019). Does the use of digestate to replace mineral fertilizers have less emissions of N₂O and NH₃? *Agricultural and Forest Meteorology* 269:112-118. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.004>
140. Wannasek L, Ortner M, Amon B, Amon T (2017). Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield. *Biomass and Bioenergy* 106:137-145. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.031>
141. WBA: World Bioenergy Association. WBA Global Bioenergy Statistics 2018. Stockholm, Sweden: World Bioenergy Association; 2018. Available from: https://worldbioenergy.org/uploads/181203%20WBA%20GBS%202018_hq.pdf
142. Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85, 849–860. DOI 10.1007/s00253-009-2246-7
143. WGA 2019: 019 report on biogas and Anaerobic Digestion. http://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/07/WBA-globalreport-56ppa4_digital.pdf
144. WGA 2021: Biogas: Pathways to 2030 © <https://cdn.revolutionise.com.au/cups/bioenergy/files/zpvdwm3upt5zxuec.pdf>
145. Wilken D., Rauh S., Fruhner-Weis R., Strippel F., Bontempo G., Kramer A., Furst M., Wiesheu M., Kedia G., Hernandez Chanto C., Mukherjee A., Siebert S., Herbes C., Kurz P., Halbherr V., Dahlin J., Nelles M. (2018). Digestat kao đubrivo, GIZ I Biogas Srbija, ISSN 2510-487X
146. Xiang, C., Tian, D., Wang, W., Shen, F., Zhao, G., Ni, X., Zhang, Y., Yang, G., Zeng, Y. (2020). Fates of Heavy Metals in Anaerobically Digesting the Stover of Grain Sorghum Harvested from Heavy Metal-Contaminated Farmland. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 1239–1250. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0455-y>
147. Yadav, P., Priyanka P., Kumar D., Yadav A. & Yadav K. (2019). Bioenergy Crops: Recent Advances and Future Outlook. In: Rastegari A., Yadav A., Gupta A. (eds)

Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems. *Biofuel and Biorefinery Technologies*, vol 10. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14463-0_12

148. Yves Le Bouthillier, Chapter 1. Annette Cowie, Paul Martin and Heather McLeod-Kilmurray Environmental risks and opportunities of biofuels The IUCN Academy of Environmental Law series ISBN: 978 1 78254 454 8 pp 3-27 2016
149. Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu, Službeni Glasnik RS 36/2009
150. Zhang, Y.; Kusch-Brandt, S.; Salter, A.M.; Heaven, S. (2021). Estimating the Methane Potential of Energy Crops: An Overview on Types of Data Sources and Their Limitations. *Processes*, 9, 1565. <https://doi.org/10.3390/pr9091565>

Cirkularni model proizvodnje biogasa iz silaže sirka (Sorghum bicolor) proizvedenog na degradiranom zemljištu uz primenu digestata kao organskog đubriva

ORIGINALITY REPORT

7%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	fiver.ifvcns.rs Internet	492 words — 2%
2	www.researchgate.net Internet	302 words — 1%
3	demo.paragraf.rs Internet	266 words — 1%
4	paragrafco.co.rs Internet	104 words — < 1%
5	nardus.mpn.gov.rs Internet	96 words — < 1%
6	rivec.institut-palanka.rs Internet	87 words — < 1%
7	ijjaar.penpublishing.net Internet	72 words — < 1%
8	www.afc.kg.ac.rs Internet	72 words — < 1%
9	aspace.agrif.bg.ac.rs Internet	71 words — < 1%

10	fedorabg.bg.ac.rs Internet	63 words — < 1 %
11	Popovic Vera, Vidic Milos, Tatic Mladen, Jaksic Snezana, Kostic Miladin. "The effect of cultivar and year on yield and quality components in soybean", Ratarstvo i povrtarstvo, 2012 Crossref	52 words — < 1 %
12	fr.scribd.com Internet	40 words — < 1 %
13	raumplan.iaus.ac.rs Internet	39 words — < 1 %
14	www.slideshare.net Internet	35 words — < 1 %
15	hrcak.srce.hr Internet	28 words — < 1 %
16	e-statistika.rs Internet	25 words — < 1 %
17	rik.mrizp.rs Internet	25 words — < 1 %
18	adoc.pub Internet	24 words — < 1 %
19	energetska-efikasnost.me Internet	24 words — < 1 %
20	mts.intechopen.com Internet	23 words — < 1 %

21	www.singipedia.singidunum.ac.rs Internet	22 words — < 1%
22	mafiadoc.com Internet	19 words — < 1%
23	www.vladars.net Internet	19 words — < 1%
24	dokodoc.com Internet	17 words — < 1%
25	elektroenergetika.info Internet	16 words — < 1%
26	link.springer.com Internet	16 words — < 1%
27	www.cris.uns.ac.rs Internet	16 words — < 1%
28	qdoc.tips Internet	13 words — < 1%
29	researchspace.ukzn.ac.za Internet	13 words — < 1%
30	singipedia.singidunum.ac.rs Internet	12 words — < 1%
31	www.bioenergy-serbia.rs Internet	12 words — < 1%
32	Santalla, M.. "Effect of intercropping bush bean populations with maize on agronomic traits and their implications for selection", Field Crops Research, 199403 Crossref	10 words — < 1%

33	eco.tfbor.bg.ac.rs Internet	10 words — < 1 %
34	fundacionkoinonia.com.ve Internet	10 words — < 1 %
35	konsultimet.rks-gov.net Internet	10 words — < 1 %
36	www.energy.gov.za Internet	10 words — < 1 %
37	cbcg.me Internet	9 words — < 1 %
38	ecometeo.rs.ba Internet	9 words — < 1 %
39	id.scribd.com Internet	9 words — < 1 %
40	old.ccpa.dk Internet	9 words — < 1 %
41	repository.ukim.mk Internet	9 words — < 1 %
42	www.incda-fundulea.ro Internet	9 words — < 1 %
43	www.konferencja-rolnictwo.pl Internet	9 words — < 1 %
44	www.mre.gov.rs Internet	9 words — < 1 %

-
- 45 www.notulaebotanicae.ro 9 words — < 1%
Internet
-
- 46 "Environment and Climate-smart Food Production", Springer Science and Business Media LLC, 2022 8 words — < 1%
Crossref
-
- 47 Abolfazl Satari, Maryam Dehestani-Ardakani, Mostafa Shirmardi, Mehrnaz Hatami, Heidar Meftahizadeh, Mansour Ghorbanpour. "Role of night interruption lighting and NPK application on growth and flowering of Phalaenopsis", South African Journal of Botany, 2022 8 words — < 1%
Crossref
-
- 48 B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar, S. Chozhavendhan, J. Iyyappan. "Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018 8 words — < 1%
Crossref
-
- 49 geosrbija.rs 8 words — < 1%
Internet
-
- 50 ndes.ekof.bg.ac.rs 8 words — < 1%
Internet
-
- 51 poljoprivreda.info 8 words — < 1%
Internet
-
- 52 progressive.com.hr 8 words — < 1%
Internet
-
- 53 repozitorij.fazos.hr 8 words — < 1%
Internet

54	repozitorij.pharma.unizg.hr Internet	8 words — < 1 %
55	scindeks.ceon.rs Internet	8 words — < 1 %
56	sdgs4all.rs Internet	8 words — < 1 %
57	www.balkanmagazin.net Internet	8 words — < 1 %
58	www.leader.org.rs Internet	8 words — < 1 %
59	www.merz.gov.rs Internet	8 words — < 1 %
60	eteze.bg.ac.rs Internet	7 words — < 1 %
61	"Biogas", Springer Science and Business Media LLC, 2018 Crossref	6 words — < 1 %
62	"Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems", Springer Science and Business Media LLC, 2019 Crossref	6 words — < 1 %
63	Snep, Robbert P. H., and Philippe Clergeau. "Biodiversity in Cities Biodiversity in Cities , Reconnecting Humans with Nature", Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, 2012. Crossref	6 words — < 1 %

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