



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET



Ana (Jovan) Momčilović Ristanović

**RAZVOJ MODELA ZA INTEGRALNO
UPRAVLJANJE ORGANSKIM OTPADOM
PRIMENOM PRINCIPA CIRKULARNE
EKONOMIJE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Ana (Jovan) Momčilović Ristanović

**DEVELOPMENT OF THE MODEL FOR
INTEGRATED ORGANIC WASTE
MANAGEMENT BY APPLYING THE
PRINCIPLES OF CIRCULAR ECONOMY**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: dr Gordana Stefanović, redovni profesor
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet

Naslov: Razvoj modela za integralno upravljanje organskim otpadom primenom
principa cirkularne ekonomije

Rezime:

Organski otpad predstavlja biološki razgradivu sirovinu koja se, uprkos potencijalu za povraćaj nutrijenata i hemijski vezane energije, pretežno odlaže na deponije. Da bi se ovaj resurs koristio održivo, razvijen je model integralnog upravljanja organskim otpadom zasnovan na principima cirkularne ekonomije, koji omogućava optimizovano uključivanje lokalno dostupnih sirovina u zatvorene materijalne i energetske tokove. Model je koncipiran na osnovu fizičkog modela koji povezuje izvore organskog otpada sa mestima njegove transformacije kroz procese kompostiranja i anaerobne digestije, kao i sa mestima povraćaja nutrijenata u vidu komposta i digestata i proizvodnje energije potrebne za rad postrojenja i transport. Matematička formulacija zatvorene petlje razvijena je kroz posebne celine koji opisuju materijalne i energetske tokove sistema, a model je razvijen i optimizovan u programu *Wolfram Mathematica*. Analiza modela sprovodi se kroz šest osmišljenih simulacija raspoređenih u tri istraživačke faze: eksplorativnu, evaluacionu i validacionu. U prvoj, eksplorativnoj fazi, kroz tri segmenta, proverava se sposobnost modela da višekriterijumskom optimizacijom odredi optimalne odnose mešanja sirovina za anaerobnu digestiju, kompostiranje i za analizu mogućnosti zatvaranja tokova materije i energije. U okviru ove faze optimizuju se parametri sistema: odnos C/N , sadržaj lignina i minimalan sadržaj fosfora od 1% u smeši sirovina, čime se definišu osnovni uslovi za održiv tretman. Evaluaciona faza obuhvata deset scenarija upravljanja organskim otpadom, koji se razlikuju prema broju uključenih sirovina i kombinaciji tretmana. Efikasnost svakog scenarija procenjuje se primenom razvijenog seta indikatora: stepena uključivanja organske materije u tokove cirkularne ekonomije, curenja materije i energije, kao i stepena cirkularnosti materije i energije. Rezultati pokazuju da scenario koji kombinuje dve metode tretmana i dve sirovine

ostvaruje zatvaranje petlje uz mala curenja i visok procenat cirkularnosti, dok se dodavanjem još jedne sirovine povećava stepen uključenja, ali se istovremeno javlja i povećanje curenja materije u obliku komposta. Povećanjem broja sirovina na četiri dolazi do smanjenja stepena uključenja, što ukazuje na ograničenja sistema pri većem broju sirovina. Poseban fokus stavlja se na praćenje kretanja C , N , P , i K i transformaciju njihovih formi od organskih do neorganskih, asimilabilnih formi u kompostu, sa ciljem zadovoljenja nutritivnih potreba određene biljke. Rezultati potvrđuju da model uspešno određuje optimalnu mešavinu sirovina za kompostiranje čiji nutritivni sastav odgovara zahtevima konkretnih biljnih kultura. U validacionoj fazi sprovodi se poređenje modelovanih sa eksperimentalno dobijenim mešavinama za anaerobnu digestiju za definisani odnos C/N u biogasnom postrojenju, čime se potvrđuje primenljivost modela u realnim uslovima. Buduća istraživanja biće usmerena na unapređenje matematičkog modela uključivanjem većeg broja kriterijuma, kao i na sagledavanje bolje cirkularnosti sistema u odnosu na broj i vrste uključenih sirovina.

Naučna oblast:	Tehničko-tehnološke nauke
Naučna disciplina:	Upravljanje otpadom
Ključne reči:	Integralno upravljanje organskim otpadom; Cirkularna ekonomija; Matematički model; Fizički model; Odnos C/N ; Višekriterijumska optimizacija; Indikatori cirkularne ekonomije; Povraćaj nutrijenata
UDK:	628.473.4:556.013(043.3) 338.1:502.131.1(043.3)
CERIF klasifikacija:	T 270 Tehnologija životne sredine, kontrola zagađivanja
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Gordana Stefanović, PhD, full professor University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering
----------------------	---

Title: Development of the model for integrated organic waste management by applying the principles of circular economy.

Abstract: Organic waste is a biodegradable resource with high potential for nutrient and chemically bound energy recovery yet mostly landfilled. To enable its sustainable use, a model for integrated organic waste management was developed. Based on circular economy principles, the model allows for optimized inclusion of locally available feedstocks into closed material and energy loops. The mathematical model is based on a physical model that links the sources of organic waste with the locations of its transformation through composting and anaerobic digestion, as well as with the points of nutrient recovery in the form of compost and digestate and the production of energy required for plant operation and transport. The mathematical formulation of the closed loop is developed through sections describing the material and energy flows of the system; the model itself is optimized in *Wolfram Mathematica*. Model analysis is conducted through six simulations organized into three research phases: exploratory, evaluative and validation. In the exploratory phase the model's ability to determine optimal feedstock mixing ratios for anaerobic digestion and composting, and for assessing the potential for closing material and energy flows, is examined through multicriteria optimization. Within this phase, key system parameters are optimized: C/N ratio, minimum lignin content and minimum phosphorus content of 1% in the feedstock mixture; establishing conditions for sustainable treatment. The evaluative phase includes ten scenarios of organic waste management differing in the number of feedstocks and the combination of treatments. The efficiency of scenarios is assessed using a developed set of indicators: the degree of feedstock inclusion in circular economy flows, material and energy leakage and the degree of material and energy circularity. The results show that the scenario combining two treatment methods and two feedstocks

achieve loop closure with low leakages and a high circularity rate, while adding an additional feedstock increases the inclusion rate but also leads to a higher material leakage in the form of compost. Increasing the number of feedstocks to four reduces the overall inclusion rate, indicating system limitations with introduction of larger number of feedstocks. A particular focus is placed on tracking the change of C , N , P and K and the transformation of their forms from organic to inorganic, plant-available fractions in compost, with the aim of satisfying the nutrient requirements of a specific crop. The results confirm that the model can optimize a composting mixture which composition meets the needs of barley. In the validation phase, modeled optimal feedstock mixtures are compared with experimentally obtained mixtures for defined C/N ratio in a biogas plant, confirming the applicability of the model under real operating conditions. Future research will focus on improving the mathematical model by incorporating a larger set of criteria, as well as on assessing the system's circularity in relation to the number and types of included raw materials.

Scientific
Field:

Engineering Sciences and Technology

Scientific
Discipline:

Waste management

Key Words:

Integrated organic waste management; Circular economy; Mathematical model; Physical model; C/N ratio; Multi-criteria optimization; Circular economy indicators; Nutrient recovery.

UDC:

628.473.4:556.013(043.3)
338.1:502.131.1(043.3)

CERIF
Classification:

T 270 Environmental technology, pollution control

Creative
Commons
License Type:

CC BY-NC-ND

Zahvalnost autora

Iskreno zahvaljujem mentoru, prof. dr Gordani Stefanović, na podršci, savetima, pomoći i punom razumevanju tokom svih ovih godina izrade ove disertacije. Njeno vođstvo, strpljenje i posvećenost bili su dragoceni u svakom koraku istraživanja.

Zahvaljujem se članovima komisije na korisnim sugestijama i vremenu koje su posvetili radu, čime su doprineli njegovom unapređenju.

Od srca zahvaljujem roditeljima na stalnoj podršci, razumevanju i veri u mene.

Posebnu zahvalnost dugujem teta Maci, čija me je podrška i vera motivisala da istrajem i završim ovaj rad.

Posebno zahvaljujem suprugu na strpljenju, pomoći, podršci i razumevanju tokom godina koje su prethodile završetku ovog rada.

Bez njihove podrške ovaj rad ne bi bio moguć.



SADRŽAJ

SPISAK NAJČEŠĆE KORIŠĆENIH OZNAKA	1
1. UVOD.....	4
1.1. PREDMET ISTRAŽIVANJA.....	4
1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA	7
1.3. STRUKTURA RADA	8
2. TEORIJSKI DEO ISTRAŽIVANJA	14
2.1. TEORIJSKE OSNOVE CIRKULARNE EKONOMIJE	14
2.1.1. Osnovni principi cirkularne ekonomije	14
2.1.2. Prelazak sa linearne ekonomije na cirkularni model poslovanja.....	19
2.2. UPRAVLJANJE ORGANSKIM OTPADOM U CIRKULARNOJ EKONOMIJI.....	21
2.2.1. Karakteristike organskog otpada kao resursa.....	22
2.2.2. Biohemijski procesi konverzije organske sirovine.....	26
2.2.3. Tokovi nutrijenata u prirodnim, antropogenim i cirkularnim tokovima	41
2.3. OCENA EFIKASNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE.....	50
2.3.1. Opšti pregled indikatora cirkularne ekonomije.....	52
2.3.2. Indikatori cirkularne ekonomije u Evropskoj Uniji.....	53
2.3.3. Indeksi uspešnosti cirkularne ekonomije	54
2.3.4. Indikatori cirkularne ekonomije relevantni za upravljanje organskim otpadom	55
3. MODEL INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM SA ASPEKTA CIRKULARNE EKONOMIJE	57
3.1. FIZIČKI MODEL INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM.....	59
3.2. MATEMATIČKI MODEL INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM	62
3.2.1. Karakterizacija ulaznih sirovina	63
3.2.2. Definisane optimalnih uslova tretmana organske sirovine	64
3.2.3. Tretman organskih sirovina.....	69
3.2.4. Produkti tretmana organske sirovine	72
3.2.5. Materijalni i energetski bilans sistema.....	74
4. MATERIJALI I METODE.....	86
4.1. OPIS STUDIJE SLUČAJA.....	86
4.1.1. Lokacija i opis studije slučaja	86
4.1.2. Karakterizacija organskih sirovina	86
4.1.3. Specifične pretpostavke vezane za studiju slučaja.....	87
4.2. METODOLOGIJA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA.....	89
4.2.1. Plan eksperimentalnog istraživanja.....	89
4.2.2. Primenjeni softverski alati.....	91



5.	EVALUACIJA MODELA INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM	92
5.1.	EKSPLOATIVNA FAZA	92
5.1.1.	<i>Simulacija 1: Optimizacija odnosa mešanja organskih sirovina za anaerobnu digestiju.....</i>	<i>92</i>
5.1.2.	<i>Simulacija 2: Optimizacija odnosa mešanja organskih sirovina za kompostiranje.....</i>	<i>98</i>
5.1.3.	<i>Simulacija 3: Analiza materijalnih i energetske tokova u upravljanju organskim otpadom</i>	<i>102</i>
5.2.	EVALUACIONA FAZA	105
5.2.1.	<i>Simulacija 4: Primena modela za integralno upravljanje organskim otpadom</i>	<i>106</i>
5.2.2.	<i>Simulacija 5: Analiza nutritivnog potencijala komposta.....</i>	<i>116</i>
5.3.	VALIDACIONA FAZA	118
6.	DISKUSIJA REZULTATA	124
6.1.	DISKUSIJA EKSPLOATIVNE FAZE	124
6.1.1.	<i>Diskusija rezultata Simulacije 1</i>	<i>125</i>
6.1.2.	<i>Diskusija rezultata Simulacije 2</i>	<i>127</i>
6.1.3.	<i>Diskusija rezultata Simulacije 3</i>	<i>128</i>
6.2.	DISKUSIJA EVALUACIONE FAZE	130
6.2.1.	<i>Diskusija rezultata Simulacije 4</i>	<i>130</i>
6.2.2.	<i>Diskusija rezultata Simulacije 5</i>	<i>133</i>
6.3.	DISKUSIJA VALIDACIONE FAZE	134
7.	ZAKLJUČAK	137
8.	LITERATURA.....	142
9.	PRILOZI.....	153
9.1.	KLASIFIKACIJA I KARAKTERISTIKE ORGANSKOG OTPADA.....	153
9.2.	ORGANSKI OPLEMENJIVAČI ZEMLJIŠTA	156
9.3.	INDIKATORI CIRKULARNE EKONOMIJE.....	158
9.4.	KLJUČNI INDIKATORI USPEŠNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE PREMA EU OKVIRIMA..	159
9.5.	KOD MATEMATIČKOG MODELA - SIMULACIJA 1 (<i>WOLFRAM MATHEMATICA</i>)	160
9.6.	KOD MATEMATIČKOG MODELA - SIMULACIJA 2 (<i>WOLFRAM MATHEMATICA</i>)	162
9.7.	PREGLED BILANSA I INDIKATORA CIRKULARNE EKONOMIJE U SIMULACIJI 4	166
9.8.	KOD MATEMATIČKOG MODELA - SIMULACIJA 6 (<i>WOLFRAM MATHEMATICA</i>)	168
9.9.	IZJAVE AUTORA	179
10.	POPIS SLIKA	182
11.	POPIS TABELA	183
12.	BIOGRAFIJA AUTORA	184

SPISAK NAJČEŠĆE KORIŠĆENIH OZNAKA

Latinični simboli

$l - e$	-	alokacija resursa za fosfor
a_N	[gN]	polovina maksimalne koncentracije azota u biljci
a_P	[gP]	polovina maksimalne koncentracije fosfora u biljci
c	-	stepen uključenosti organske sirovine u tokove cirkularne ekonomije
C/N	-	odnos ugljenika i azota
C_e	[%]	stepen cirkularnosti energije
C_i	[%]	udeo ugljenika u organskoj sirovini S_i izražen u procentima
C_I	[gC]	imobilisani ugljenik
C_L	[gC]	mobilni ugljenik
C_m	[%]	stepen cirkularnosti materije
C_N	[gC]	ukupna količina azota
C_P	[gC]	ukupna količina fosfora
C_S	[gC]	strukturni ugljenik
c_{trans}	[MJ/t km]	specifična energetska potrošnja po toni-kilometru
c_{voda}	[MJ/t°C]	specifični toplotni kapacitet vode
d_i	[km]	udaljenost
e	-	proporcija energetske resursa usmerenih na unos azota
E_{bg}	[MJ/t]	energetski potencijal nastalog biogasa
E_{bil}	[MJ/dan]	energetska ravnoteža sistema
E_{dig}	[MJ/dan]	energija za zagrevanje digestora
E_{pot}	[MJ/dan]	ukupna energija potrebna za rad sistema
E_{pp}	[MJ/dan]	energija za proizvodne procese
$e_{pp,j}$	[MJ/t]	specifična energetska potrošnja po jedinici proizvoda
E_{trans}	[MJ/dan]	energija za transport sirovina i produkata
H_{d,CH_4}	[MJ/t]	donja toplotna moć metana
k_{dig}	-	stepen konverzije organske sirovine u digestat
K_i	[%]	udeo kalijuma u organskoj sirovini S_i
k_{komp}	-	stepen konverzije organske sirovine u kompost
l	-	stepen curenja organske materije iz tokova cirkularne ekonomije
L_i	[%]	udeo lignina u organskoj sirovini S_i
N_a	[gN]	asimilabilni azot iz zemljišta
N_i	[%]	udeo azota u organskoj sirovini S_i
N_I	[gN]	imobilisani azot
N_L	[gN]	mobilni azot



N_S	[gN]	strukturni azot
P_a	[gP]	asimilabilni fosfor iz zemljišta
P_i	[%]	udeo fosfora u organskoj sirovini S_i
P_I	[gP]	imobilisani fosfor
P_L	[gP]	mobilni fosfor
P_S	[gP]	strukturni fosfor
$q_{ad,i}$	-	udeo organske sirovine S_i u mešavini namenjenoj anaerobnoj digestiji
Q_{bg}	[m ³ /dan]	količina nastalog biogasa
$Q_{bg,u}$	[m ³ /dan]	količina biogasa koja je upotrebljena u zatvorenoj petlji
Q_{dig}	[t/dan, m ³ /dan]	količina nastalog digestata
$Q_{dig,u}$		količina upotrebljenog digestata u zatvorenoj petlji
Q_i	[t/god]	raspoloživa količina sirovine S_i na posmatranom području
$q_{k,i}$	-	udeo organske sirovine S_i u mešavini namenjenoj kompostiranju
$Q_{kom,u}$	[t/dan, m ³ /dan]	količina komposta koja je upotrebljena u zatvorenoj petlji
Q_{komp}	[t/dan, m ³ /dan]	količina nastalog komposta
Q_I	[t/dan]	curenje materije
Q_{org}	[t/god]	količina organske materije na posmatranom području
Q_{pot}	[t/dan, m ³ /dan]	količina produkata koja je upotrebljena u zatvorenoj petlji
$Q_{pp,j}$	[t/dan]	količina proizvedenih materijala
Q_t	[t/god]	ukupna količina organske materije koja se tretira u sistemu
$Q_{t,ad}$	[t/god]	količina organske materije tretirane anaerobnom digestijom
$Q_{t,ad,i}$	[t/god]	količina organske sirovine S_i tretirane anaerobnom digestijom
$Q_{t,ad,u}$	[t/god]	količina organske materije namenjena anaerobnoj digestiji
$Q_{t,kom,u}$	[t/god]	količina organske materije namenjena kompostiranju
$Q_{t,komp}$	[t/god]	količina organske materije tretirane procesom kompostiranja
$Q_{t,komp,i}$	[t/god]	količina organske sirovine S_i tretirane procesom kompostiranja
$Q_{trans,i}$	[t/dan]	masa transportovanog materijala
S_i	-	organska sirovina označena rednim brojem i
SM_i	[%]	udeo suve materije u organskoj sirovini S_i izražen u procentima
U_{CL}	gC ⁻¹ d ⁻¹	koeficijent brzine potrošnje mobilnog ugljenika
U_{CN}	[gC(gN) ⁻¹ d ⁻¹]	koeficijent konverzije ugljenika iz azota
U_{CNL}	[gC(gN) ⁻¹ d ⁻¹]	koeficijent brzine proizvodnje mobilnog ugljenika
U_{NP}	gN(gP) ⁻¹ d ⁻¹	brzina formiranja strukturnog azota u zavisnosti od dostupnog fosfora
U_{PL}	[gP (gC) ⁻¹ d ⁻¹]	brzina formiranja P_S u zavisnosti od dostupnog azota
V_{dig}	[m ³ /dan]	količina biogasa potrebna za zagrevanje digestora
V_{trans}	[m ³ /dan]	količina biogasa potrebna za transport
W_i	[%]	udeo vlage u organskoj sirovini S_i izražen u procentima
x_{CH4}	-	udeo metana u biogasu



Y	-	gubitak energije tokom transformacije mobilnog u strukturni ugljenik
ΔT	[°C]	razlika temperatura
ΔG	[kJ/mol]	Gibsova slobodna energija

Grčki simboli

η	-	stepen pretvaranja organske materije u biogas
--------	---	---

Skraćenice

3R	reduce, reuse, recycle
AD	anaerobna digestija
ATP	adenozin-trifosfat
BO	subindeks poslovnih operacija
C2C	koncept “od klevke do klevke”
CE	cirkularna ekonomija
CEI	indeks konkurentnosti u cirkularnoj ekonomiji
CSTR	kontinuirani reaktori sa mešanjem
DEA	analiza omota podataka
DNK	dezoksiribonukleinska kiselina
EU	Evropska Unija
GHG	gasovi sa efektom staklene bašte
GE	govedi ekskrementi
IUOO	integralno upravljanje organskim otpadom
KPI	ključni indikatori performansi
ODKO	organski deo komunalnog otpada
OM	otpad iz mlekare
OS	organska sirovina
PO	parkovski otpad
PT	pivski trop
RNK	ribonukleinska kiselina
SB	subindeks društvenog ponašanja
SL	slama
SN	seno
SE	svinjski ekskrementi
SRM	subindeks upravljanja resursima
TOV	tretman otpadnih voda
TRL	nivo tehnološke spremnosti
WHI	hijerarhijski indeks otpada

1. UVOD

1.1. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Organski otpad predstavlja heterogenu smešu biorazgradive materije, koja se sastoji od kompleksnih organskih molekula i sadrži makro i mikronutrijente, kao i značajnu količinu vezane hemijske energije. Nastaje kao nusproizvod brojnih komunalnih, poljoprivrednih i industrijskih aktivnosti, čime čini jedan od najzastupljenijih tokova otpada u savremenim sistemima proizvodnje i potrošnje.

U prirodnim uslovima, organska materija podleže razgradnji pod dejstvom mikroorganizama, ali je taj proces spor, neujednačen i teško kontrolisan, što često rezultira gubitkom hranljivih materija i hemijske energije. Kada se organski otpad odlaže bez prethodnog tretmana, dolazi do prekida kruženja materije u ekosistemu i stvaranja ekoloških opterećenja, naročito kroz emisije gasova sa efektom staklene baste (GHG) i kontaminaciju zemljišta i voda.

Iz tih razloga, razvijanje kontrolisanih biohemijskih procesa postaje od ključnog značaja. Takvi procesi omogućavaju ponovno uključivanje organskog otpada u materijalne i energetske tokove, čime se ostvaruje dvostruka korist: smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu i povećanje efikasnosti korišćenja resursa u skladu sa principima održivog razvoja. U tom kontekstu, organski otpad prestaje da se posmatra isključivo kao teret i ekološki problem, već se sagledava kao sirovina koja sadrži značajan potencijal za ponovnu upotrebu i valorizaciju. Pretvaranjem otpada u resurs formira se osnova za zatvaranje materijalnih i energetskih tokova, čime se obezbeđuje prelazak sa linearnog na kružni model upravljanja.

Prirodna razgradnja organskog otpada je dugotrajan i neefikasan proces tokom koga značajan deo hranljivih materija i hemijske energije ostaje neiskorišćen. Zbog toga se javlja potreba za oponašanjem prirodnih procesa u kontrolisanim uslovima, čime se omogućava efikasniji povraćaj nutrijenata i energije i smanjuje gubitak vrednih resursa.

U kontrolisanim uslovima iz organskog otpada se mogu dobiti vezana hemijska energija u vidu biogoriva (biogasa) i nutrijenti u kompostu ili digestatu. Proces biohemijskog tretmana organske sirovine može se vršiti kompostiranjem, anaerobnom digestijom (AD) ili njihovom kombinacijom, u zavisnosti od karakteristika sirovina i uslova procesa. Kada se u tretman uključuje više vrsta organskog otpada, moguće je utičući na odnos mešanja sirovina, optimizovati kvalitet i sastav krajnjih produkata. Da bi se postigao željeni kvalitet, potrebno je

odrediti optimalan odnos mešanja dostupnih organskih sirovina, čime se obezbeđuje stabilnost procesa i maksimalno iskorišćenje resursa.

Parametri na osnovu kojih je moguće izvršiti optimizaciju odnosa mešanja obuhvataju dostupnost i količine sirovina u posmatranoj oblasti, odnos C/N , koji je od presudnog značaja za obezbeđivanje energije potrebne za odvijanje mikrobioloških procesa i sintezu novih ćelija, procentualni udeo vlage, kao i sadržaj nutrijenata u produktima tretmana, kako bi se omogućio njihov efikasan povraćaj zemljištu i očuvalo kruženje materije u prirodi.

Otpadna organska sirovina je, u okviru linearnog ekonomskog modela, često izuzeta iz prirodnog kruženja materije, čime dolazi do imobilizacije nutrijenata i hemijske energije na mestima gde postaju nedostupni, kao što su deponije i druga mesta odlaganja otpadne biomase. Treba istaći da primena linearne ekonomije, čak i uz poznate tehnologije za tretman organskog otpada, nije omogućila trajno rešenje koje bi sprečilo generisanje novih količina otpada.

Zbog toga je neophodna transformacija postojećeg načina upravljanja resursima i razvoj novog modela koji omogućava zatvaranje materijalnih i energetskih tokova. Kao sistemsko rešenje nameće se koncept cirkularne ekonomije (CE), koji ima centralnu ulogu u uspostavljanju održivog i resursno efikasnog sistema zasnovanog na kružnoj organizaciji proizvodnih, poslovnih i uslužnih procesa, tako da se otpad eliminiše ili svodi na minimum.

Iako su principi CE u praksi najčešće primenjivani parcijalno, bilo u segmentima materijalnog ili energetskog kruženja, za postizanje pune efikasnosti neophodan je integralni pristup kojim se obuhvata kretanje materije i energije kroz čitav sistem. Primena CE u upravljanju organskim otpadom podrazumeva stvaranje integralnog, zatvorenog sistema na jednoj teritoriji, u kome se različite otpadne organske sirovine sakupljaju i tretiraju, a dobijeni produkti koriste za podmirivanje materijalnih i energetskih potreba unutar sistema. Na taj način obezbeđuje se povraćaj nutrijenata zemljištu sa kog je otpad potekao, kao i zadovoljenje energetskih potreba koje se javljaju u toku njegovog funkcionisanja. Time se ostvaruje zatvaranje ciklusa materije i energije i doprinosi ostvarivanju ciljeva održivog razvoja.

Za efikasno upravljanje organskim otpadom potrebno je sagledati sve elemente sistema, uključujući sakupljanje, transport, tretman, energetska podršku i povraćaj nutrijenata. Od ključnog je značaja izvršiti detaljnu karakterizaciju sirovina i optimizaciju procesa sakupljanja i transporta, čime se obezbeđuje osnova za planiranje materijalnih i energetskih tokova. Ovo istraživanje usmereno je na analizu mogućnosti integralnog upravljanja različitim vrstama organskog otpada koje se generišu na jednoj teritoriji, u skladu sa prirodnim procesima kruženja materije i energije i principima CE.

Na osnovu teorijskog sagledavanja svih elemenata integralnog upravljanja biće formiran fizički model koji prikazuje princip zatvaranja materijalne i energetske petlje na posmatranoj teritoriji. Ovaj model poslužiće kao osnova za eksperimentalno istraživanje, čiji je cilj da se ispita na koji način se integralno upravljanje organskim otpadom (IUOO) može sprovesti u praksi, uz maksimalno iskorišćenje sirovina i minimizaciju gubitaka.

Kao neophodna faza za sprovođenje takvog istraživanja biće razvijen matematički model kojim će se opisati procesi i relacije unutar sistema, što će omogućiti kvantitativnu analizu materijalnih i energetskih tokova. Matematički model čini osnovu za izvođenje simulacija kojima će se testirati funkcionalnost i održivost sistema u skladu sa principima CE.

Eksperimentalno istraživanje organizovano je u tri međusobno povezane faze: eksplorativnu, evaluacionu i validacionu, koje zajedno obuhvataju logičan sled koraka od razvoja modela do njegove provere u realnim uslovima.

Eksplorativna faza biće usmerena na razvoj fizičkog i matematičkog modela i razumevanje unutrašnjih procesa u sistemu. U okviru ove faze sprovedene su tri simulacije:

- Prva simulacija određuje optimalnu mešavinu sirovina za AD korišćenjem višekriterijumske optimizacije sa globalnim kriterijumom. Kao ulazni kriterijumi koriste se odnos C/N , sadržaj vlage i lignina, dok se prinos biogasa uzima kao glavni pokazatelj performansi sistema. Cilj je formiranje optimalne mešavine koja obezbeđuje stabilan i efikasan proces digestije uz maksimalno iskorišćenje sirovina.
- Druga simulacija koristi istu metodologiju, ali za proces kompostiranja, gde se kao kriterijumi primenjuju odnos C/N , sadržaj vlage i fosfora, pri čemu se sadržaj azota i kalijuma prati radi procene nutritivnog potencijala komposta. Ovim poređenjem model se testira u pogledu sposobnosti da podrži izbor između AD i kompostiranja, u zavisnosti od postavljenih ciljeva sistema i željenih ishoda procesa.
- Treća simulacija prelazi ka sistemskoj proceni funkcionisanja i fokusirana je na analizu materijalnih i energetskih tokova u okviru sistema upravljanja otpadom Grada Niša. Cilj je procena mogućnosti zatvaranja petlje korišćenjem isključivo lokalno dostupnog organskog otpada kao izvora energije i nutrijenata, uz analizu bilansa, količina i stepena zadovoljenja potreba sistema.

Nakon eksplorativne sledi evaluaciona faza, čiji je cilj proširenje obuhvata i optimizacija sistema kroz različite scenarije integralnog upravljanja. U ovoj fazi sprovedene su dve simulacije:

- Četvrta simulacija obuhvata deset scenarija sa različitim kombinacijama sirovina i metoda tretmana (AD, kompostiranje i njihova kombinacija). Analiza uključuje izradu materijalnih i energetskih bilansa i procenu efikasnosti pomoću indikatora CE: stepen uključivanja otpada u tokove CE, curenje materije, curenje energije i ukupna cirkularnost materije i energije.
- Peta simulacija usmerena je na optimizaciju nutritivnih karakteristika komposta u skladu sa potrebama biljne vrste ječma. Sadržaj fosfora u kompostu upoređuje se sa rezultatima Agrenovog modela, čime se procenjuje usklađenost nutritivnog sastava sa potrebama biljne vrste i doprinos zatvaranju materijalnih tokova unutar sistema.

Na osnovu rezultata evaluacione faze sledi validaciona faza, posvećena verifikaciji razvijenog matematičkog modela u realnim uslovima. Šesta simulacija obuhvata verifikaciju procesa AD, gde se optimalne mešavine sirovina dobijene modelom upoređuju sa realnim mešavinama iz postojećeg postrojenja. Kriterijumi su odnos C/N , sadržaj vlage i lignina, dok se prinos biogasa koristi kao parametar poređenja. Na osnovu toga procenjuje se tačnost modela, njegova praktična primenljivost i stepen usklađenosti sa postojećom praksom.

Sve tri faze zajedno omogućavaju sveobuhvatno razumevanje funkcionisanja sistema IUOO i potvrdu njegove održivosti. Njihova međusobna povezanost obezbeđuje kontinuitet u razvoju i proveru modela, od teorijske postavke do praktične primene. Kombinovanjem matematičkog modelovanja, višekriterijumske optimizacije i studije slučaja omogućena je objektivna provera performansi sistema, identifikacija optimalnih rešenja i procena mogućnosti njegove praktične primene.

1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Opšti cilj ovog istraživanja jeste analiza mogućnosti uključivanja maksimalnih količina organske sirovine nastale na posmatranoj teritoriji primenom integrisanog načina upravljanja otpadom, zasnovanog na principima CE, pri čemu se jedan deo produkata tretmana organskog otpada koristi za povraćaj nutrijenata zemljištu, dok se preostali deo transformiše u energiju neophodnu za funkcionisanje sistema. Na ovaj način teži se ostvarivanju koncepta zatvorene petlje, u kojoj se materija i energija vraćaju u ciklus ponovne upotrebe.

U skladu sa navedenim, glavni cilj istraživanja jeste razvoj integrisanog modela za upravljanje različitim vrstama organskog otpada unutar zatvorenog sistema, koji obuhvata analizu količina i sastava sirovina, kao i materijalnih i energetskih potreba sistema. Model je

koncipiran tako da omogući kvantifikaciju tokova materije i energije, procenu povraćaja nutrijenata zemljištu i obezbeđivanje dovoljne količine energije za stabilan i održiv rad sistema.

Radi ostvarivanja opšteg i glavnog cilja, istraživanje je usmereno na realizaciju sledećih posebnih ciljeva, koji zajedno čine metodološku osnovu rada:

Prvi poseban cilj odnosi se na identifikaciju i pregled dostupnih organskih sirovina na teritoriji Republike Srbije, uz analizu njihovih količina i karakteristika (sadržaj C , N , P , K , lignina, vlage, odnos C/N). Na osnovu prikupljenih podataka formirana je sveobuhvatna baza organskih sirovina, koja predstavlja polaznu osnovu za sprovođenje eksperimentalnog istraživanja i dalji razvoj modela.

Drugi poseban cilj obuhvata razvoj fizičkog i matematičkog modela IUOO, kojim se omogućava detaljno razumevanje kruženja materije i energije u okviru CE. U okviru ovog cilja definisani su svi ulazni i izlazni tokovi sistema, transformacije tokom procesa biohemijskog tretmana, uključujući AD i kompostiranje, kao i konverziju hemijske energije sadržane u sirovinama u biogas, koji se koristi za podmirivanje potreba sistema. Na taj način model omogućava simulaciju i optimizaciju procesa tretmana, povećanje efikasnosti korišćenja resursa i smanjenje gubitaka unutar sistema.

Treći poseban cilj usmeren je na identifikaciju, definisanje i primenu pokazatelja CE namenjenih oceni performansi IUOO sistema. Među ključnim pokazateljima su stepen uključivanja organske sirovine u tokove CE, curenje materije i energije, cirkularnost materije, i cirkularnost energije. Razvijeni indikatori predstavljaju merljive alate za procenu efikasnosti, održivosti i napretka u primeni principa CE, sa posebnim akcentom na evaluaciju povraćaja nutrijenata kao jednog od ključnih elemenata materijalne cirkularnosti.

Četvrti poseban cilj obuhvata verifikaciju razvijenog modela IUOO i proveru njegove primenljivosti u realnim uslovima, čime se potvrđuje njegova upotrebljivost kao alata za uvođenje, planiranje i unapređenje IUOO.

1.3. STRUKTURA RADA

Rad je strukturiran tako da metodološki i logički vodi čitaoca kroz sve faze istraživanja, od teorijskih postavki do eksperimentalne validacije. Ovakav pristup omogućava da se svi postavljeni ciljevi istraživanja postupno ostvare i da se polazne hipoteze potvrde kroz jasno definisane faze istraživačkog procesa.

Prvo poglavlje obuhvata predmet istraživanja, ciljeve i strukturu rada. U njemu je istaknuta važnost održivog upravljanja organskim otpadom i naglašena potreba za razvojem integralnih modela zasnovanih na principima CE. Prikazana je i organizacija disertacije, što omogućava čitaocu da sagleda logičan tok istraživanja od postavljenih ciljeva do dobijenih rezultata. Na taj način ostvaruje se osnovna uloga ovog poglavlja, a to je povezivanje opšteg cilja istraživanja sa širim kontekstom problema.

Drugo poglavlje predstavlja teorijski okvir istraživanja i strukturisano je kroz tri međusobno povezana podpoglavlja. U prvom podpoglavlju detaljno su prikazani teorijski okviri CE i postavke tranzicije sa linearnog na cirkularni model poslovanja, čime se postavlja konceptualna osnova za razumevanje sistemskog pristupa u upravljanju resursima. Drugo podpoglavlje posvećeno je upravljanju organskim otpadom u CE, sa fokusom na njegove karakteristike, biohemijske procese konverzije (kompostiranje i AD) i tokove nutrijenata kroz prirodne, antropogene i cirkularne sisteme. Treće podpoglavlje obrađuje indikatore i indekse CE, počev od opštih i evropskih pokazatelja efikasnosti CE, pa sve do specifičnih indikatora relevantnih za sisteme upravljanja organskim otpadom. Na taj način ovo poglavlje uspostavlja teorijsku i metodološku osnovu za realizaciju drugog posebnog cilja istraživanja, koji se odnosi na pregled dostupnih organskih sirovina u Republici Srbiji, koje su biti prikazane u tabeli u 9.1 prilogu, kao i na izbor odgovarajućih indikatora za procenu performansi sistema IUOO. Analizom postojećih indikatora uočena je praznina u primeni koncepta CE na sektore organskog otpada, što je poslužilo kao osnova za razvoj specifičnih indikatora CE primenljivih na sisteme upravljanja organskim otpadom, koji će biti primenjeni i testirani u eksperimentalnom delu istraživanja.

Treće poglavlje posvećeno je razvoju i konceptualizaciji fizičkog i matematičkog modela IUOO u kontekstu CE. Fizički model definiše granice sistema IUOO, identifikuje tokove ulaznih sirovina i prikazuje njihovu transformaciju kroz procese tretmana do krajnjih produkata, uz jasno prikazivanje njihovih povratnih i izlaznih tokova u okviru zatvorene petlje. Matematički model omogućava kvantitativnu i kvalitativnu analizu sistema IUOO kroz karakterizaciju ulaznih parametara, definisanje optimalnih uslova tretmana, modelovanje procesa konverzije organske materije i formiranje materijalnih i energetske bilansa. U okviru modela razvijeni su i specifični indikatori CE koji omogućavaju procenu performansi sistema i stepena ostvarenja cirkularnosti, među kojima su: stepen uključivanja organskog otpada u tokove CE, curenje materije, curenje energije, cirkularnost materije i cirkularnost energije. Integrisani pristup IUOO zasniva se na povezanom fizičkom i matematičkom modelu, koji

omogućava analizu efikasnosti konverzije, povraćaja nutrijenata i zatvaranja materijalnih i energetske tokova. Na ovaj način ostvaruju se prvi poseban cilj istraživanja, koji se odnosi na razvoj fizičkog modela, i glavni cilj istraživanja, koji se odnosi na formiranje matematičkog modela IUOO u skladu sa principima CE.

Četvrto poglavlje sadrži opis materijala, metoda i eksperimentalnog okvira istraživanja. Predstavljena je studija slučaja Grada Niša, koja obuhvata opis konteksta, granice posmatranog sistema i karakterizaciju dostupnih organskih sirovina relevantnih za sprovođenje IUOO. U okviru poglavlja definisane su osnovne pretpostavke istraživanja, detaljno je prikazan plan izvođenja eksperimenta i opisani primenjeni softverski alati korišćeni za simulacije i analize. Ovim poglavljem obezbeđena je metodološka osnova za realizaciju eksperimentalnih aktivnosti, validaciju razvijenog modela i proveru primenljivosti predloženih indikatora CE u konkretnim uslovima studije slučaja, čime se ostvaruje treći poseban cilj istraživanja.

Peto poglavlje obuhvata evaluaciju razvijenog modela IUOO i metodološki je organizovano kroz tri međusobno povezane faze: eksplorativnu, evaluacionu i validacionu. Na ovaj način uspostavlja se kontinuitet između teorijskog i eksperimentalnog dela istraživanja, čime se obezbeđuje sistematična provera funkcionalnosti modela i ostvarenje postavljenih ciljeva.

- Eksplorativna faza koja obuhvata tri simulacije (Simulacija 1-3) usmerena je na optimizaciju odnosa mešanja organskih sirovina i analizu kapaciteta sistema da zatvori tokove materije i energije. U ovoj fazi sagledano je funkcionisanje modela u pogledu optimizacije odnosa mešanja sirovina na osnovu definisanih kriterijuma, koji su se za proces AD zasnivali na odnosu C/N i sadržaju lignina i vlage (Simulacija 1), dok su za proces kompostiranja obuhvatali odnos C/N i sadržaj azota, fosfora, kalijuma i vlage (Simulacija 2). Na kraju, ispitana je mogućnost formiranja osnovne zatvorene petlje, sa ciljem da se utvrdi da li je zatvaranje materijalnih i energetske tokova ostvarivo na teritoriji grada Niša korišćenjem isključivo organskog otpada koji se prikuplja AD u okviru komunalnih delatnosti (Simulacija 3). Rezultati dobijeni u ovoj fazi poslužili su kao osnova za dalju nadgradnju modela u evaluacionoj fazi.
- Evaluaciona faza obuhvata dve simulacije, pri čemu Simulacija 4 analizira različite scenarije IUOO, dok Simulacija 5 ispituje nutritivne karakteristike komposta u odnosu na potrebe biljnih kultura. U okviru Simulacije 4, model je testiran kroz deset različitih scenarija, u kojima su analizirani procesi AD, kompostiranja i njihove kombinacije. Scenariji su obuhvatali tretmane sa dve, tri ili četiri organske sirovine, u optimalnim odnosima mešanja

definisanim u prethodnoj fazi istraživanja. Nakon toga formirane su zatvorene materijalno-energetske petlje, a zatim je sprovedena procena njihove efikasnosti i održivosti korišćenjem razvijenih indikatora CE, kao što su stepen uključivanja organskog otpada u tokove CE, curenje materije, curenje energije i ukupna cirkularnost materije i energije. U okviru Simulacije 5 sprovedeno je upoređivanje komposta dobijenog pomoću modela u Simulaciji 2, u kojem je definisan određeni sadržaj nutrijenata, sa nutritivnim potrebama biljke ječma utvrđenim primenom Agrenovog modela. Na ovaj način pokazano je da razvijen model omogućava određivanje optimalne smeše supstrata za kompostiranje, čijom se primenom dobija kompost prilagođen zahtevima konkretne biljne kulture. Ovom fazom ostvaruje se treći poseban cilj istraživanja, koji se odnosi na formiranje i primenu indikatora CE za kvantitativnu ocenu performansi sistema, kao i na proveru mogućnosti prilagođavanja nutritivnog sastava komposta potrebama konkretnih biljnih kultura.

- Validaciona faza realizovana je kroz šestu simulaciju (Sim 6), u okviru koje je sprovedena verifikacija razvijenog matematičkog modela upoređivanjem optimalnih mešavina sirovina dobijenih modelom sa mešavinama koje se koriste u postojećem postrojenju za AD “Lazar” Blace. Rezultati ove faze pokazali su da model realno opisuje ponašanje sistema i omogućava verodostojnu procenu odnosa između ulaznih parametara i izlaznih performansi procesa, čime je potvrđena njegova primenljivost. Na ovaj način ostvaruje se četvrti poseban cilj istraživanja, koji se odnosi na verifikaciju razvijenog modela i potvrdu njegove pouzdanosti u simulacionim i realnim okvirima rada.

Peto poglavlje predstavlja centralni deo istraživanja, jer povezuje teorijski razvijen model sa njegovom praktičnom primenom u skladu sa principima CE.

Šesto poglavlje donosi diskusiju rezultata istraživanja i organizovano je prema sprovedenim simulacijama u okviru tri međusobno povezane istraživačke faze: eksplorativne, evaluacione i validacione. Diskusija je usmerena na interpretaciju ključnih nalaza i tumačenje dobijenih rezultata u kontekstu principa CE.

U okviru eksplorativne faze, diskusija je usmerena na interpretaciju rezultata tri sprovedene simulacije, kojima su analizirani ključni odnosi između ulaznih parametara, performansi procesa i mogućnosti zatvaranja materijalno-energetskih tokova sistema. Poseban akcenat stavljen je na procenu osetljivosti modela i mogućnost njegove primene u različitim uslovima. U okviru prve simulacije, diskusija je fokusirana na procenu mogućnosti postizanja optimalne mešavine sirovina primenom globalnog kriterijuma višekriterijumske optimizacije, čime se ispituje da li je moguće dobiti stabilne i pouzdane rezultate koji obezbeđuju

maksimalno iskorišćenje organske materije. Analizirano je kako se optimalne mešavine menjaju pri različitim kriterijumima i u dve iteracije optimizacije, sprovedene za širi i uži opseg odnosa C/N , čime je omogućeno sagledavanje osetljivosti sistema na promene ulaznih parametara. U drugoj simulaciji diskusija je usmerena na proces kompostiranja, pri čemu su analizirane optimalne mešavine organskog otpada određene istom metodologijom optimizacije. Posebna pažnja posvećena je nutritivnom sastavu komposta (sadržaj azota, fosfora i kalijuma) i njegovoj potencijalnoj vrednosti za povraćaj nutrijenata zemljištu, čime je omogućeno poređenje performansi dva tretmana. U okviru treće simulacije razmatrana je mogućnost zatvaranja materijalno-energetske petlje u okviru sistema Grada Niša, korišćenjem isključivo vrsta organskog otpada koje se sakupljaju kroz komunalne delatnosti. Analizirana je održivost i stabilnost funkcionisanja sistema, kao i stepen u kojem lokalno dostupne sirovine mogu zadovoljiti materijalne i energetske potrebe zatvorenog sistema, u skladu sa osnovnim modelskim pretpostavkama.

U okviru evaluacione faze, diskusija je usmerena na interpretaciju rezultata četvrte i pete simulacije, kojima je izvršeno proširenje obuhvata istraživanja kroz analizu različitih scenarija IUOO i procenu nutritivnih karakteristika komposta. Poseban akcenat stavljen je na primenu razvijenih indikatora CE radi kvantitativne ocene performansi sistema i sagledavanja mogućnosti unapređenja kružnih tokova materije i energije. U okviru četvrte simulacije, diskusija je fokusirana na analizu deset različitih scenarija integralnog upravljanja, u kojima su kombinovani procesi AD, kompostiranja i njihove kombinacije. Analizirani su tretmani sa dve, tri i četiri organske sirovine u optimalnim odnosima mešanja definisanim u prethodnoj fazi istraživanja. Na osnovu formiranih materijalno-energetskih bilansa sprovedena je procena efikasnosti i održivosti svakog scenarija, korišćenjem razvijenih pokazatelja CE: stepen uključivanja organskog otpada u tokove CE, curenje materije, curenje energije i ukupna cirkularnost materije i energije. Na taj način omogućeno je sagledavanje koji tip kombinacija tretmana i sastava sirovina doprinosi najefikasnijem zatvaranju materijalno-energetskih petlji. Peta simulacija obuhvata analizu nutritivnog sastava komposta i njegovu usklađenost sa potrebama biljne kulture ječma. U okviru diskusije razmatrano je upoređivanje komposta dobijenog pomoću modela u drugoj simulaciji, u kojem je definisan određeni sadržaj nutrijenata, sa nutritivnim potrebama biljke ječma utvrđenim primenom Agrenovog modela. Na ovaj način ispitan je potencijal modela da generiše optimalnu smešu supstrata za kompostiranje, čijom se primenom dobija kompost prilagođen zahtevima konkretne biljne kulture. Rezultati evaluacione faze pružaju kvantitativnu osnovu za procenu funkcionalnosti i

održivosti integralnog sistema, kao i dokaz sposobnosti razvijenog modela da poveže materijalne i energetske tokove sa realnim potrebama poljoprivredne proizvodnje u okviru principa CE.

U okviru validacione faze, diskusija je usmerena na upoređivanje modelskih i realnih vrednosti i na procenu tačnosti razvijenog matematičkog modela. Posebno je istaknuto sagledavanje stepena usaglašenosti između optimalnih mešavina sirovina dobijenih simulacijama i onih koje se primenjuju u realnim postrojenjima, čime se potvrđuje primenljivost modela u realnim uslovima rada.

Poglavlje se završava zaključcima koji povezuju kvantitativne rezultate svih faza sa opštim ciljem istraživanja, odnosno sa mogućnošću uključivanja maksimalnih količina organskog otpada u zatvorene tokove materije i energije, u skladu sa principima CE.

Sedmo poglavlje sadrži završne zaključke disertacije. U njemu su istaknuti doprinosi istraživanja na teorijskom, metodološkom i praktičnom nivou. Poseban akcenat stavljen je na validiranost razvijenog modela i njegov potencijal za primenu u realnim uslovima, kao i na preporuke za dalja istraživanja i unapređenja.

Na kraju rada nalaze se prilozi u kojima su objedinjeni pregled organskog otpada u Srbiji i njegovih karakteristika, klasifikacija organskih oplemenjivača zemljišta u Srbiji, indikatori CE u EU okvirima. U prilogima se takođe nalaze i kodovi modeliranja korišćeni za sprovođenje simulacija, čime je obezbeđena mogućnost replikabilnosti i transparentnost istraživačkog procesa. Disertacija je dopunjena i popisima slika i tabela, kao i biografijom autora, čime je obezbeđena celovitost, preglednost i transparentnost istraživanja.

2. TEORIJSKI DEO ISTRAŽIVANJA

CE predstavlja alat za postizanje održivog razvoja i sistemski pristup upravljanju resursima, pri čemu je akcenat stavljen na njihovo očuvanje, smanjenje količina otpada i optimizaciju tokova materijala i energije u svim fazama proizvodnje i potrošnje. Poseban značaj u okviru ovog koncepta ima upravljanje organskim otpadom, koji u Evropskoj uniji čini oko 34% komunalnog otpada (EEA, 2020). Umesto deponovanja, organski otpad se sagledava kao resurs koji, primenom principa CE, omogućava zatvaranje materijalnih i energetskih tokova kroz proizvodnju biogasa i komposta, čime se štiti životna sredina i doprinosi ciljevima održivog razvoja.

U nastavku poglavlja sagledane se teorijske osnove CE i mehanizmi biohemijske konverzije organske sirovine, kao i primena principa CE u upravljanju organskim otpadom.

2.1. TEORIJSKE OSNOVE CIRKULARNE EKONOMIJE

CE je koncept koji se razvio kao odgovor na ograničenja linearnog modela proizvodnje i potrošnje i predstavlja jedno od centralnih polazišta održivog razvoja. Suština ovog pristupa ogleda se u zatvaranju materijalnih i energetskih tokova kroz principe ponovne upotrebe, upotrebe obnovljivih materijala, reciklaže, produženja životnog veka proizvoda i efikasnog korišćenja resursa. Na taj način CE doprinosi smanjenju otpada, racionalnijem korišćenju prirodnih resursa i stvaranju dodatne ekonomske i društvene vrednosti. Poseban značaj koncept CE dobija kao deo međunarodne politike i evropskih strateških dokumenata, gde je prepoznat kao instrument za tranziciju ka održivom razvoju.

U nastavku potpoglavlja prikazani su osnovni principi na kojima se zasniva CE, mogućnosti prelaska sa linearnog na cirkularni model poslovanja, sa naglaskom na korake prelaska, kao i na prednosti i izazove koje ovaj pristup donosi.

2.1.1. Osnovni principi cirkularne ekonomije

Održivi razvoj se definiše kao razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjih generacija, bez ugrožavanja sposobnosti budućih da zadovolje svoje. Ova definicija prvi put je formulisana u izveštaju Brundtland (1987), gde se naglašava povezanost ekonomskog razvoja, socijalne pravde i zaštite životne sredine. U tom kontekstu, CE jeste alat za postizanje ciljeva održivog razvoja kroz usklađivanje ekonomskih, ekoloških i društvenih ciljeva. Njeni temelji potiču od vizije Keneta Bouldinga (*Kennet Boulding*) (1966), koji je razvio koncept ekonomije niske

entropije, u kojoj se otpad reciklira i vraća u proizvodnju po uzoru na prirodne cikluse, poput azotnog ciklusa kruženja kroz prirodu. Na osnovu ove ideje, Pirs i Turner (*Pearce i Turner*) (1990) formalno su definisali CE kao model zasnovan na zakonima termodinamike, usmeren na smanjenje generisanja otpada, efikasno korišćenje resursa i očuvanje ekološke ravnoteže.

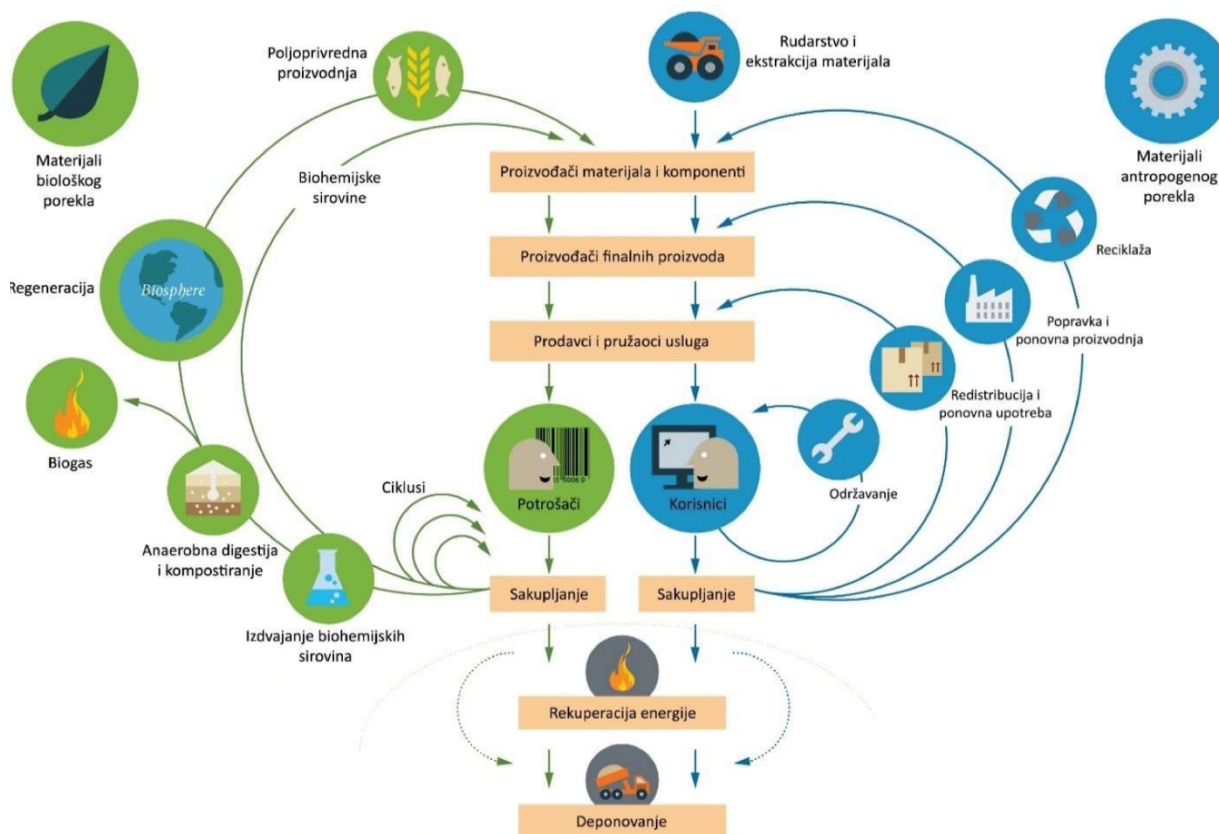
Savremeni koncepti upravljanja resursima i proizvodnim sistemima doprinose razvoju CE i proširuju njene principe kroz različite pristupe. Industrijska ekologija povezuje industrijske sisteme sa ekološkim procesima radi optimizacije tokova resursa i stvaranja održivih industrijskih ekosistema (Lowe, 1995). Biomimikrija koristi prirodu kao uzor za projektovanje regenerativnih sistema u kojima materijali i energija kruže u zatvorenim ciklusima (Dicks, 2016). Model „od klevke do klevke“ (*Crade2crade* - C2C) razlikuje biološke materijale, koji se bezbedno razgrađuju, od tehničkih materijala, koji se recikliraju u zatvorenim tokovima (Toxopeus, 2015). Plava ekonomija podstiče korišćenje otpada kao sirovine (Pauli, 2010), dok ekonomija deljenja omogućava efikasnije korišćenje resursa kroz zajednički pristup i digitalne platforme (Puschmann, 2016).

Iako se razlikuju u pristupu, zajednički cilj svih ovih koncepata jeste prelazak sa linearnog na cirkularni model poslovanja. Njihova primena doprinosi smanjenju količine otpada, boljoj upotrebi resursa, zatvaranju materijalnih i energetske tokova, što za posledicu ima smanjenje ugljeničnog otiska i unapređenje održivog razvoja (Zaman, 2015).

Razvoj koncepta CE poslednjih decenija razvijao se uz rast popularnosti, ali i uz prisutne nedoumice u tumačenju. Kirher (*Kirchherr*) i saradnici (2017), analizom 114 definicija, ukazali su da se CE u praksi često svodi isključivo na reciklažu i smanjenje otpada, iako se u literaturi definiše znatno šire, obuhvatajući spektar pristupa od principa 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) do koncepta hijerarhije otpada. Ovi autori CE definišu kao sistem zasnovan na smanjenju, ponovnoj upotrebi, reciklaži i oporavku materijala, na mikro, mezo i makro nivou, sa ciljem postizanja održivog razvoja, kroz podršku inovativnih poslovnih modela i odgovornog ponašanja potrošača. Novija analiza iste grupe autora (Kirchherr, 2023), koja obuhvata 221 definiciju, pokazuje pomak ka sistemskom pristupu i boljoj povezanosti sa ciljevima održivog razvoja, iako fragmentacija i dalje postoji.

U savremenoj literaturi izdvajaju se dva dominantna pristupa konceptu CE. Prvi pristup usmeren je na upravljanje resursima kroz zatvorene tokove materijala, reciklažu i smanjenje zavisnosti od primarnih izvora. Na taj način ekonomski rast se razdvaja od potrošnje ograničenih resursa kroz strategije ponovne upotrebe i regeneracije, što dovodi do smanjenja količine otpada i jačanja otpornosti ekonomskih sistema. Drugi pristup naglašava društvene

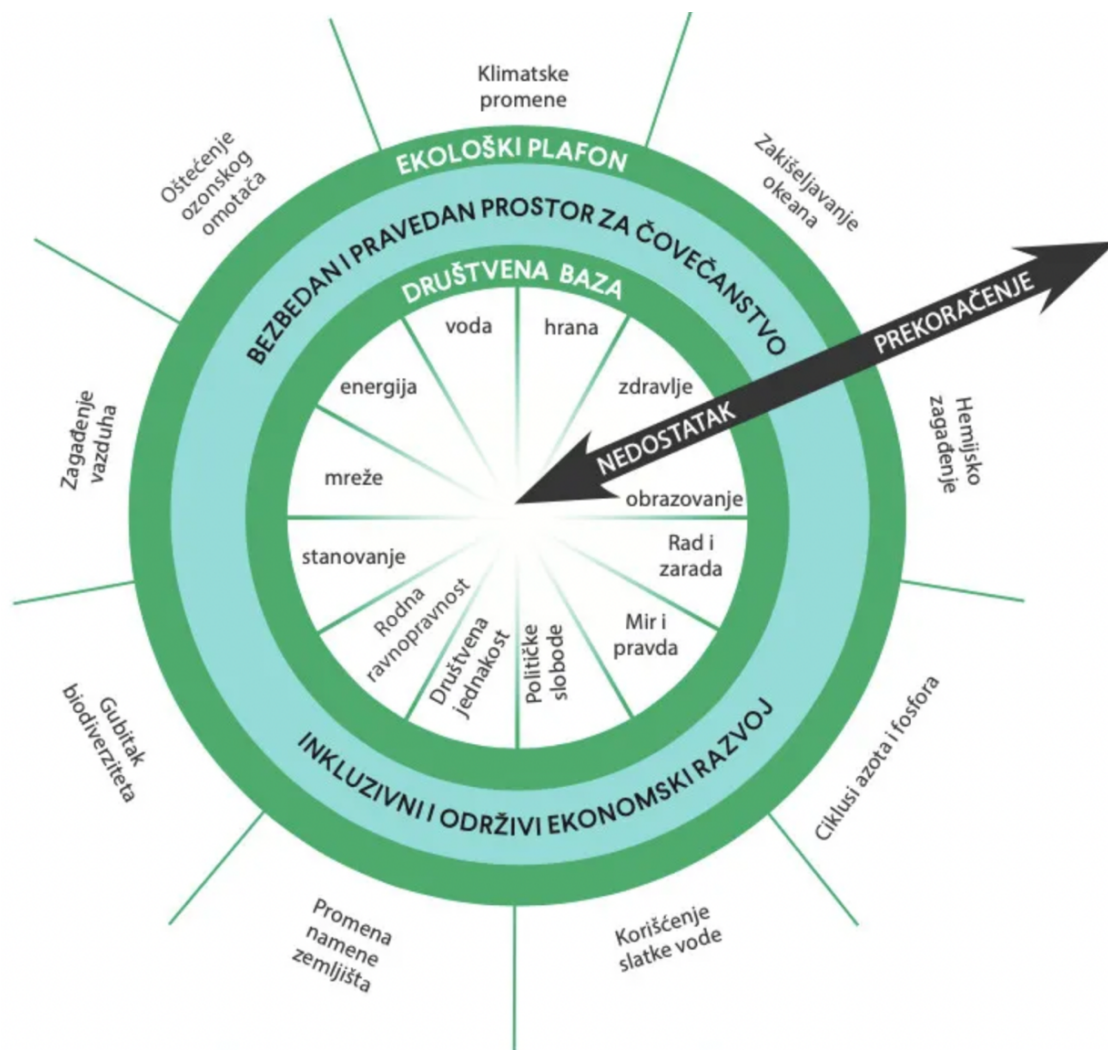
promene, od transformacije potrošačkih navika do uvođenja novih poslovnih modela i vrednosnih sistema (Rizos, 2017). Fondacija Elen Mekartur (*Ellen MacArthur Foundation*) (2015) je kroz prvi pristup, definisala CE kao regenerativni ekonomski model koji nastoji da proizvede, komponente i materijale zadrži na najvišem nivou korisnosti i vrednosti tokom njihovog životnog ciklusa.



Slika 2.1 Leptir dijagram (*Ellen MacArthur Foundation, 2015*)

Osnovni koncept ovog modela prikazan je kroz „Leptir dijagram CE” (Slika 2.1) koji se ogleda kroz dva glavna ciklusa: biološki i tehnički. Biološki ciklus obuhvata procese poput kompostiranja i AD, koji omogućavaju pretvaranje organskog otpada u biogas ili kompost i tako obnavljaju prirodne resurse u biosferi. Tehnički ciklus obuhvata održavanje, ponovnu upotrebu, reciklažu i proizvodnju, čime se produžava životni vek materijala kao što su plastika i metali. Cilj ovog modela je smanjenje otpada i regeneracija resursa, kroz dizajn proizvoda koji omogućava laku demontažu, popravku i ponovnu upotrebu. Preostali otpad se koristi za proizvodnju energije ili se minimalno odlaže. Iako Leptir dijagram jasno prikazuje tokove materijala i energije u tehničkim i biološkim ciklusima CE, njegova struktura ostaje statična i pre svega fokusirana na prikaz pojedinačnih procesa, bez detaljnog sagledavanja međusobnih veza i povratnih interakcija između ciklusa.

Nasuprot tome, drugi pristup, model ekonomije krofne, prikazan na slici 2.2, donosi drugačiji pogled na CE, jer ne prikazuje tokove, već granice u kojima društvo može da funkcioniše održivo. Ovaj model objedinjuje društvene potrebe (voda, hrana, zdravlje, energija, mreže, stanovanje, obrazovanje, rodna ravnopravnost, društvena jednakost, mir i pravda, rad i zarada, političke slobode) i ekološke limite u jednom okviru, pokazujući da pravi prostor za delovanje leži između osnovnih uslova za dostojanstven život i granica koje priroda može da izdrži. Time se pažnja usmerava ne samo na reciklažu i ponovnu upotrebu, već i na pravednost, ravnotežu i međusobnu povezanost ljudi i planete (Raworth, 2017).



Slika 2.2 Ekonomija „krofne“ (Raworth, 2017)

Model ekonomije „krofne“ prikazuje ravnotežu između društvenih potreba i ekoloških granica planete. Unutrašnji prsten, nazvan „društvena baza“ predstavlja minimalne uslove neophodne za dostojanstven život, uključujući pristup vodi, hrani, energiji, obrazovanju, zdravlju, stanovanju, političkim slobodama i jednakosti. Ukoliko su ovi uslovi ispod minimalnih vrednosti, nastaje „nedostatak“ odnosno društvena neodrživost. Spoljašnji prsten

označava „ekološki plafon“ koji obuhvata granice koje prirodni sistemi mogu da podnesu, kao što su klimatske promene, zakiseljavanje okeana, gubitak biodiverziteta, hemijsko zagađenje i prekomerna eksploatacija zemljišta i voda. Njegovo prekoračenje vodi ka narušavanju stabilnosti ekosistema. Prostor između ove dve granice predstavlja „bezbedan i pravedan prostor za čovečanstvo, u kojem je moguće ostvariti inkluzivni i ekonomski održivi razvoj.

Osnovni principi CE najčešće se izražavaju kroz strategije smanjenja otpada, ponovne upotrebe i reciklaže (3R), kojima se produžava životni vek proizvoda i zatvaraju materijalni tokovi. Pored 3R principa, savremeni okvir obuhvata i dodatne strategije: redizajn (*rethink*), popravku (*repair*), obnavljanje (*refurbish*) i ponovnu izradu proizvoda (*remanufacture*), čime se resursima omogućava duži i višekratni ciklus korišćenja (Kirchherr et al., 2017).

Bitnu ulogu ima ekodizajn, koji podrazumeva modularnost proizvoda, mogućnost popravke i reciklaže, čime se obezbeđuje efikasnije korišćenje resursa i smanjenje generisanja otpada. Ekodizajn integriše održivost već u fazi projektovanja proizvoda, čime se smanjuju negativni uticaji tokom celog životnog ciklusa i podstiče cirkularnost materijala.

Posebnu vrednost donose novi poslovni modeli, poput „proizvod kao usluga (*Product as a Service*)“, gde proizvođač zadržava vlasništvo nad proizvodom i odgovornost za njegovo održavanje. Ovakvi modeli podstiču prelazak sa linearnog koncepta prodaje na održive obrasce potrošnje. Primena prirodnih i obnovljivih materijala dodatno doprinosi smanjenju ugljeničnog otiska, dok prelazak na obnovljive izvore energije jača otpornost sistema i smanjuje emisije GHG. Na taj način, CE se ne ograničava samo na upravljanje otpadom, već postaje sveobuhvatan model održivog razvoja koji povezuje ekonomske, ekološke i društvene dimenzije. CE tako potvrđuje svoju ulogu u izgradnji održivijih ekonomskih i društvenih praksi kroz zatvaranje materijalnih i energetske tokova, povećanje efikasnosti i vrednosti resursa i smanjenje zavisnosti od primarnih sirovina (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

CE je prepoznata kao jedna od ključnih strategija Evropske unije za postizanje održivog razvoja, jer predstavlja integrisani pristup racionalnom korišćenju resursa, smanjenju pritiska na životnu sredinu i jačanju ekonomske otpornosti, zasnovan na prelasku sa linearnog na kružni model proizvodnje, potrošnje i upravljanja materijalnim tokovima. Od prvog Akcionog plana Evropske komisije (2015), revidiranog 2020. i 2023, CE je usmerena na povećanje vrednosti proizvoda i resursa, smanjenje otpada i zavisnosti od primarnih sirovina, kao i na otvaranje novih poslovnih mogućnosti u oblastima reciklaže i održavanja. U razmatranom periodu je unapređena reciklaža, smanjene su količine otpada koje se deponuju i uveden princip ekodizajna. Takođe, usklađivanje zakonodavstva olakšalo je trgovinu sekundarnim

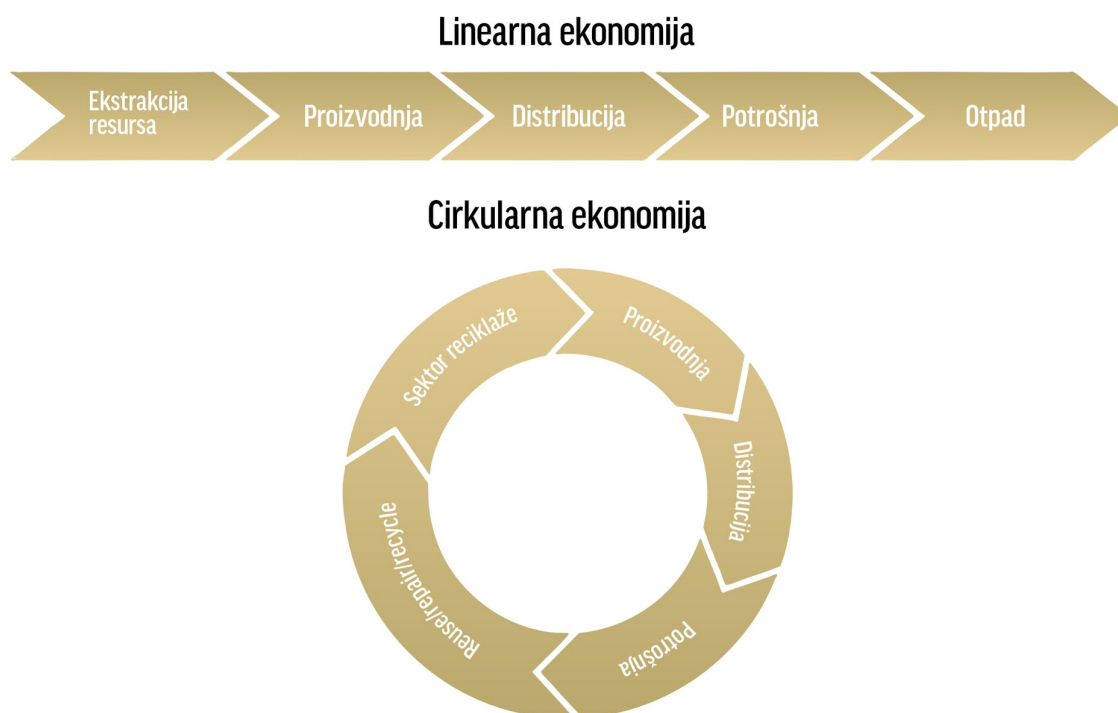
sirovinama. Prema izveštaju Evropske agencije za životnu sredinu (2023), ostvaren je izvestan napredak u smanjenju ugljeničnog otiska, ali su za postizanje ciljeva održivosti i dalje potrebni dodatni naponi.

Srbija se nalazi u procesu tranzicije ka CE, što je potvrđeno donošenjem strateških dokumenata kao što su Mapa puta za CE (2020) i Program razvoja CE za period od 2022 do 2024. godine. Ovi dokumenti definišu prioritetne oblasti kao što su unapređenje zakonodavstva, jačanje infrastrukture i podršku privredi. Ex-ante analiza (2021) ukazuje na značajan potencijal, ali i na ozbiljne izazove, među kojima se posebno ističe nedostatak infrastrukture. Usklađivanje domaćeg zakonodavstva sa Evropskim zelenim dogovorom omogućilo bi smanjenje zavisnosti od primarnih sirovina i doprinelo razvoju održivih poslovnih modela.

Zaključno, CE se sve jasnije pozicionira kao strategija u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja. Njena uspešna primena zavisi od sinergije politike, industrije i društva, ali i od kontinuiranog ulaganja u inovacije, obrazovanje i infrastrukturu. Time se potvrđuje da CE nije samo teorijski koncept, već i strateški pravac razvoja u EU i u Srbiji, što dodatno opravdava njeno razmatranje u okviru ove disertacije.

2.1.2. Prelazak sa linearne ekonomije na cirkularni model poslovanja

Linearna ekonomija, kao tradicionalni model proizvodnje i potrošnje, zasniva se na jednostavnom toku koji obuhvata eksploataciju sirovina, proizvodnju, korišćenje i deponovanje proizvoda. Oslanjanje na primarne resurse, uz nedovoljno razvijene prakse reciklaže, rezultiralo je generisanjem velikih količina otpada, povećanjem emisija GHG i ubrzanim iscrpljivanjem prirodnih resursa. Ovakav pristup ne samo da ugrožava životnu sredinu, već povećava i ekonomsku ranjivost društava usled oscilacija u dostupnosti i cenama sirovina (Sharma, 2020). Nasuprot linearnom modelu, CE nudi održivu alternativu zasnovanu na produžavanju životnog ciklusa proizvoda, boljem korišćenju resursa i smanjenju negativnih uticaja na životnu sredinu (Kirchherr, 2017). CE podrazumeva prelazak sa jednostavnih, jednokratnih tokova proizvodnje i potrošnje na kružne tokove materijala i energije, u kojima proizvodi, komponente i sirovine ostaju što duže u upotrebi. Slika 2.3 prikazuje osnovne razlike između linearne i CE (AkzoNobel, 2015). Šarma (*Sharma*) (2020) ističe da linearni model stvara ozbiljne ekološke i društvene posledice, poput velikih količina otpada, zagađenja i iscrpljivanja resursa, dok CE omogućava očuvanje resursa i smanjenje ugljeničnog otiska.



Slika 2.3 Poređenje linearne i cirkularne ekonomije (autorska šema prema AkzoNobel, 2015)

Međutim, primena CE suočava se sa brojnim izazovima, među kojima su nedostatak tehničkog znanja, ograničena finansijska sredstva, slaba podrška menadžmenta i niska svest potrošača. Posebno su pogođena mala i srednja preduzeća, koja često nemaju dovoljno kapaciteta za primenu cirkularnih praksi (Ljajić, 2021; Šormaz, 2021). Visoki početni troškovi predstavljaju jednu od glavnih prepreka u prelasku na model cirkularnog poslovanja. Mala i srednja preduzeća posebno opterećuje uvođenje novih tehnologija i prilagođavanje procesa jer nemaju pristup stabilnim izvorima finansiranja (Sariatli, 2017). Ulaganja u tehnologiju su bitna za uspostavljanje kružnih tokova materijala i energije, ali njihova cena ograničava širu primenu. Nedostatak savremenih sistema za reciklažu, preradu, sakupljanje i obradu otpada smanjuje efikasnost korišćenja otpada kao resursa i usporava zatvaranje materijalnih tokova. Mali broj postrojenja i ograničena logistička rešenja smanjuju mogućnost obrade otpada i povraćaja sirovina u proizvodne tokove (Sharma, 2020). Obuka zaposlenih predstavlja ključni uslov za primenu novih tehnologija i efikasno upravljanje procesima u skladu sa principima CE, dok nedostatak znanja usporava prilagođavanje i ograničava uspešnu primenu savremenih poslovnih modela (Sariatli, 2017). Otpor prema promenama javlja se na nivou organizacija i potrošača zbog nedovoljne informisanosti i ukorenjenih navika formiranih u linearnom modelu. Njegovo prevazilaženje zahteva kontinuiranu edukaciju, informisanje, institucionalnu podršku, kao i primenu inovacija, tehnološki razvoj i finansijske podsticaje, čime se stvaraju uslovi za uspešnu tranziciju ka CE.

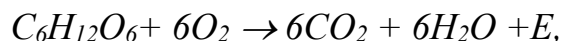
Sariatli (*Sariatli*) (2017) ističe da prelazak na CE zahteva promene u dizajnu proizvoda i procesa, sa akcentom na dugotrajne, popravljive, modularne i reciklabilne proizvode. Produženje njihovog životnog veka kroz održavanje, popravke i obnovu doprinosi smanjenju otpada i uštedi resursa. Efikasnije korišćenje resursa obezbeđuje se reciklažom, ponovnom upotrebom i primenom obnovljivih izvora energije, dok prevencija otpada počinje već u fazi dizajna. Promena poslovnih modela ka pružanju usluga umesto prodaje proizvoda podstiče održavanje i reciklažu, a razvoj infrastrukture i propisa, uključujući pravo na popravku i proširenu odgovornost proizvođača, omogućava širu primenu cirkularnih praksi.

Prelazak sa linearnog na cirkularni model poslovanja donosi brojne prednosti, među kojima su očuvanje resursa, smanjenje otpada, povećanje efikasnosti i smanjenje ugljeničnog otiska. Ipak, ostvarivanje ovih ciljeva zavisi od spremnosti društva da sprovede promene u zakonodavnom okviru, infrastrukturnim kapacitetima i poslovnim praksama. Ključnu ulogu u ovom procesu imaju inovacije, edukacija, institucionalna podrška i međunarodna saradnja, čije zajedničko delovanje omogućava uspešnu primenu CE (*Sariatli*, 2017).

2.2. UPRAVLJANJE ORGANSKIM OTPADOM U CIRKULARNOJ EKONOMIJI

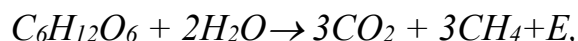
Organski otpad obuhvata biorazgradive materijale iz komunalnih delatnosti, prehrambene industrije i poljoprivrede, a njegovo neadekvatno zbrinjavanje može ozbiljno ugroziti životnu sredinu. U linearnom modelu najveći deo ovog otpada završava na deponijama, čime se onemogućava povraćaj nutrijenata i energije u prirodne tokove. Prema podacima Ekostara (*Ecostar*) (2024), u EU se godišnje generiše između 118 i 138 miliona tona organskog otpada, dok se adekvatno tretira manje od 40 miliona tona, a između 78 i 98 miliona i dalje odlaze na deponijama (European Compost Network, 2022). Takva praksa dovodi do gubitka resursa, emisije CH_4 i rizika od kontaminacije zemljišta i podzemnih voda. CE nudi održivu alternativu, jer tretira organski otpad kao resurs koji se procesima kompostiranja i AD može regenerisati i vratiti u biološke i tehničke cikluse.

Radi boljeg razumevanja njihove uloge u održivom upravljanju resursima, ovi procesi mogu se analizirati i sa energetske perspektive. U tu svrhu koristi se Gibsova (*Gibbs*) slobodna energija, čija negativna vrednost ukazuje na spontanost reakcije, dok njena apsolutna vrednost pokazuje intenzitet i potencijal oslobađanja energije tokom razgradnje. Prilikom procesa kompostiranja, razgradnja organske materije se odvija u prisustvu kiseonika i može se prikazati reakcijom oksidacije glukoze:



pri čemu Gibsova slobodna energija iznosi $\Delta G = -2880 \text{ kJ/mol}$. Visoka negativna vrednost ukazuje na to da je proces i spontan i energetski intenzivan, što omogućava brz rast mikroorganizama i efikasnu razgradnju organske materije (Rodríguez, 2008).

AD, nasuprot tome, odvija se bez prisustva kiseonika, a glukoza se razlaže uz nastanak CH_4 i CO_2 :



pri čemu Gibsova slobodna energija iznosi $\Delta G \approx -418 \text{ kJ/mol}$. Ova niža negativna vrednost pokazuje da je proces spontano moguć, ali manje intenzivan, pri čemu deo energije ostaje uskladišten u CH_4 , što AD čini pogodnom za proizvodnju biogasa. (Thauer, 1977).

Razlike u energetske ishodima kompostiranja i AD ukazuju na to da se izbor tretmana mora sagledati kroz širu perspektivu CE, gde odluka zavisi i od tehničkih parametara i od strateških prioriteta u upravljanju resursima. U praksi se CE ostvaruje kroz prevenciju nastajanja otpada, njegovu biološku obradu kompostiranjem i digestijom, kao i kroz energetske valorizacije kada je to opravdano. Važnu ulogu imaju i decentralizovani modeli, koji uključivanjem lokalnih zajednica smanjuju troškove transporta, podstiču saradnju poljoprivrede i komunalnih službi i otvaraju nova radna mesta u oblastima reciklaže i energetske transformacije. Na ovaj način postiže se održivo upravljanje resursima koje spaja ekološke i ekonomske koristi.

Prema Bertolucci Paešu (*Bertolucci Paes*) (2019), uspešna primena CE zahteva usklađeno delovanje legislative, ulaganja u infrastrukturu i obrazovnih programa koji promovišu inovacije i saradnju. Integrirani pristup zasnovan na ovim principima omogućava očuvanje resursa, smanjenje emisije GHG i unapređenje kvaliteta zemljišta, čime se stvara dugoročno i održivo rešenje za upravljanje organskim otpadom.

2.2.1. Karakteristike organskog otpada kao resursa

Organski otpad, kao posebna kategorija otpadne biomase, obuhvata materijale biološkog porekla koji se prirodno razgrađuju i nastaju tokom ljudskih aktivnosti. U širem kontekstu, predstavlja deo ukupne biomase koja obuhvata sve biorazgradive materijale organskog porekla. Ovakva biomasa ima potencijal za valorizaciju kroz proizvodnju toplotne i električne energije ili biogoriva primenom tehnologija kao što su AD, piroliza, gasifikacija i reciklaža (povraćaj) nutrijenata (European Commission, 2024). Sastav i količina organskog

otpada zavise od kulturnih navika, ekonomskih uslova i tehnološke razvijenosti regiona. U zemljama sa nižim prihodima njegov udeo u komunalnom otpadu može dostići 85%, dok je u razvijenim zemljama obično između 20% i 50% (Lardinois & van de Klundert, 1993).

Klasifikacija organskog otpada može se vršiti na više načina, u zavisnosti od kriterijuma koji se koriste. Najčešće se otpad deli prema poreklu nastanka (komunalni, poljoprivredni, industrijski), sastavu (biljni, životinjski, mešoviti) ili prema karakteristikama koje određuju tehnologiju i način tretmana, kao što su lako razgradiv, bogat vlaknima, pogodan za AD, sagorevanje ili kompostiranje (Wang & Tester, 2023; Sadh, 2018; Vučurović, 2024; Titus, 2021).

Organski deo komunalnog otpad (ODKO) obuhvata biorazgradive materijale koji nastaju tokom obavljanja komunalnih aktivnosti i može se podeliti na tri osnovne grupe: ODKO, parkovski otpad (PO) i mulj iz procesa tretmana otpadnih voda (TOV). U domaćinstvima se generiše ODKO koji obuhvata ostatke hrane, voće i povrće, papirne ubruse, talog kafe i čaja, kao i manji udeo papira i tekstila organskog porekla. Parkovski otpad obuhvata lišće, granje, pokošenu travu, korov i druge biljne ostatke. Komunalne službe, pored parkovskog otpada, generišu i mulj koji nastaje tokom TOV (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).

Poljoprivredni organski otpad obuhvata otpad koji nastaje na farmama i poljoprivrednim gazdinstvima tokom gajenja životinja, uzgoja i prerade biljnih kultura, kao i tokom berbe i skladištenja poljoprivrednih proizvoda. U ovu kategoriju spadaju životinjski ekskrementi (goveđi ekskrementi (GE), svinjski ekskrementi (SE)), žetveni ostaci (slama (SL), seno (SN), silaža kukuruza, klipovi, ljuške žitarica, korovi), biljni ostaci iz plastenika i staklenika, kao i otpad koji nastaje prilikom čišćenja, pakovanja i prerade poljoprivrednih proizvoda. Ovu vrstu otpada karakteriše visok sadržaj organske materije, vlage i hranljivih elemenata, a zbog homogenog sastava i stabilnog porekla pogodna je za biološke tretmane kao što su AD i kompostiranje.

Industrijski organski otpad potiče iz prehrambene i prerađivačke industrije, kao i iz manjih pogona za preradu drveta, tekstila i papira organskog porekla. Najzastupljeniji su ostaci prerade hrane, kao što su ljuške voća i povrća, pulpa od prerade sokova i konzervirane hrane, otpadna ulja i masti, otpad iz prerade mleka (OM) i mesa (masni ostaci, kosti), kao i nusproizvodi proizvodnje šećera (melasa) i biljnih ulja (uljne pogače). U ovu grupu spada i organski otpad iz pekarske, konditorske i pivarske proizvodnje (pivski trop (PT)), kao i iz vinarija i mlekara. Zbog visokog sadržaja biorazgradive materije, industrijski otpad ima

značajan energetska potencijal i koristi se kao sirovina za proizvodnju biogasa, biodizela i bioetanola (European Commission, 2024).

Poznavanje karakteristika organskog otpada važno je za pravilan izbor načina tretmana i procenu kvaliteta dobijenih proizvoda, jer omogućava definisanje odgovarajućih procesnih parametara i potrebnih uslova obrade. U zavisnosti od prirode i svojstava materijala, karakteristike organskog otpada dele se na fizičke, hemijske i biološke, a pregled najvažnijih karakteristika za pojedine vrste komunalnog, poljoprivrednog i industrijskog otpada prikazan je u tabeli 2.1.

Fizičke osobine organskog otpada obuhvataju parametre koji određuju njegov izgled, strukturu i pogodnost za rukovanje, skladištenje i obradu. Najvažniji među njima su sadržaj vlage, gustina, granulacija, poroznost, temperatura, boja, miris i prisustvo neorganskih primesa. Sadržaj vlage predstavlja osnovni pokazatelj pogodnosti otpada za biološke tretmane, jer utiče na aktivnost mikroorganizama, difuziju nutrijenata i kinetiku razgradnje. Gustina otpada zavisi od porekla i stepena homogenosti materijala: manja gustina pogoduje boljoj aeraciji i razmeni gasova u procesu kompostiranja, dok veća omogućava ravnomerniju raspodelu mase u anaerobnim reaktorima. Poroznost materijala određuje količinu slobodnog prostora unutar materijala i time utiče na prenos gasova i odvođenje vlage tokom tretmana. Granulacija, odnosno veličina čestica, utiče na površinu kontakta između organske materije i mikroorganizama. Sitniji materijal ima veću površinu za razgradnju, ali previše usitnjene čestice mogu ograničiti protok vazduha i izazvati pojavu anaerobnih zona. Temperatura otpada zavisi od intenziteta biološke aktivnosti i predstavlja pokazatelj stepena razgradnje organske materije. Boja i miris otpada ukazuju na hemijski sastav i stabilnost. Svetliji materijal i neutralan miris ukazuju na viši stepen stabilnosti, dok tamniji tonovi i miris NH_3 ili H_2S ukazuju na anaerobne uslove. Prisustvo neorganskih primesa, poput plastike i metala, smanjuje homogenost i kvalitet materijala i otežava tretman.

Hemijski sastav organskog otpada određuje njegovu energetska i nutritivnu vrednost, kao i pogodnost za različite tehnologije obrade. Ključni parametri su sadržaj organske materije, odnos C/N , pH vrednost, koncentracija makronutrijenata (N , P i K), sadržaj lignina, celuloze i hemiceluloze, kao i eventualno prisustvo teških metala. Odnos C/N jedan je od najvažnijih pokazatelja nutritivne ravnoteže i mikrobiološke aktivnosti. Za procese kompostiranja optimalan odnos C/N kreće se između 25 i 35 (Neugebauer et al., 2017), jer takav sastav obezbeđuje dovoljno azota za rast mikroorganizama, a istovremeno sprečava prebrzo isparavanje NH_3 i gubitak azota. Za AD optimalne vrednosti odnosa C/N su nešto niže, obično

u rasponu od 20 do 30 (Rocamora, 2020), što omogućava stabilnu mikrobiološku zajednicu i nesmetano formiranje CH_4 . Nizak odnos C/N ispod 20 dovodi do inhibicije procesa zbog viška NH_4 , dok previsok iznad 35 usporava razgradnju usled nedostatka azota.

Tabela 2.1 Karakteristike organskog otpada (Chen et al.,2022; Cogger et al.,2002; Gómez-Brandón et al.,2008; Hungria et al.,2017; Ikram et al.,2017; Karak et al.,2014; Kebede, 2020; Kumar et al.,2011; Labatut et al., 2011; Petric, Avdihodžić, & Ibrić,2015; Petric,Šestan, & Šestan,2009; PUC "Mediana,"2016; Shi et al.,2022; Toscano et al.,2013; Udourioh et al., 2025)

Vrsta otpada	C/N odnos	W [%]	C [%]	N [%]	P [%]	K [%]	L [%]
ODKO	15,45	70,00	47,90	3,10	0,28	0,78	4,59
Parkovski otpad	14,00	60,00	47,80	3,40	0,30-0,60	0,50-1,00	30,00
Mulj iz TOV	6,00-12,00	75,00-85,00	30,00-45,00	3,00-6,00	1,50-3,00	0,20-0,50	0,00
Žetveni ostaci	40,00-100,00	do 15	35,00-40,00	-	2,65	14,84	6,53
Životinjski ekskrementi	3,00-15,00	do 85	33-43	3-9	0,5-5	0,7-2	1,70-1,80
Otpadi z mlekare	15,00	66,00	53,00	3,81	0,60	0,50	12,00-28,00
Pivski trop	15,45	70,00	47,90	3,10	0,28	0,78	4,59

Sadržaj N , P i K predstavlja pokazatelj nutritivnog potencijala organskog otpada. Azot direktno utiče na rast i aktivnost mikroorganizama, dok fosfor i kalijum doprinose nutritivnoj vrednosti komposta. Važno je da otpad sadrži dovoljne količine ovih elemenata kako bi se obezbedila odgovarajuća koncentracija nutrijenata u dobijenim proizvodima, prvenstveno u kompostu, a zatim i u digestatu, što omogućava njihov povratak zemljištu. Lignin, kao složen aromatski polimer koji se teško razgrađuje, negativno utiče na procese razgradnje organske materije i smanjuje prinos biogasa, jer otežava pristup mikroorganizmima i produžava vreme tretmana. Optimalna pH vrednost za većinu bioloških tretmana nalazi se u neutralnom opsegu, što pogoduje aktivnostima mikroorganizama i stabilnosti procesa.

Biološke karakteristike odnose se na sposobnost otpada da se razgradi pod dejstvom mikroorganizama. Bitne karakteristike su biorazgradivost, mikrobiološka aktivnost, prisustvo patogena i stepen stabilnosti. Biorazgradivost pokazuje u kojoj meri mikroorganizmi mogu da razlože organsku materiju na stabilna jedinjenja i zavisi od hemijskog sastava, vlage i odnosa C/N . Veći udeo lako razgradivih jedinjenja, poput celuloze i hemiceluloze, povećava prinos biogasa, dok prisustvo lignina usporava razgradnju. Mikrobiološka aktivnost odražava intenzitet bioloških procesa i menja se u zavisnosti parametara procesa (temperatura, dužina trajanja). Prisustvo patogena važno je za ocenu sanitarne ispravnosti materijala, naročito kod

otpada i produkata koji se koriste u poljoprivredi. Njihovo uništavanje se vrši najčešće tokom termičke faze kompostiranja. Step en stabilnosti materijala pokazuje kraj biološke aktivnosti, pri čemu stabilan proizvod ima nisku mikrobiološku aktivnost i ne emituje gasove.

Karakteristike organskog otpada, pored parametara procesa, određuju tok i efikasnost biohemijskih procesa. Fizičke osobine, posebno sadržaj vlage, utiču na aktivnost mikroorganizama i razmenu gasova, dok hemijski sastav, uključujući odnos C/N , sadržaj vlage, lignina i nutrijenata, određuje brzinu i stepen razgradnje organske materije. Za AD ključni su optimalan odnos C/N , odgovarajuća vlaga i nizak sadržaj lignina, koji omogućavaju stabilnu proizvodnju biogasa. Kod kompostiranja najvažniji su optimalan odnos C/N , adekvatan sadržaj vlage i uravnotežen odnos nutrijenata N , P i K , koji obezbeđuju nesmetano odvijanje procesa i formiranje stabilnog komposta.

2.2.2. Biohemijski procesi konverzije organske sirovine

Organski otpad predstavlja resurs sa visokim potencijalom za održivo upravljanje kroz različite tehnologije obrade, koje omogućavaju njegovu konverziju u goriva i druge korisne proizvode. Proces tretmana organskog otpada mogu se klasifikovati u tri glavne kategorije: termičke, fizičko-hemijske i biohemijske tehnologije. Iako se u ovom radu primenjuju isključivo biohemijske tehnologije, za potpunije razumevanje procesa konverzije organske sirovine ukratko su prikazane i ostale metode.

Termičke tehnologije obuhvataju procese konverzije organske materije na povišenim temperaturama, pri čemu se otpad transformiše u energiju, goriva i stabilne ugljenične produkte. U zavisnosti od sadržaja vlage razlikuju se suve i vlažne metode. Suve metode obuhvataju spaljivanje, pirolizu, gasifikaciju i plazma procese. Spaljivanje se sprovodi u prisustvu kiseonika uz potpunu oksidaciju organske materije i oslobađanje energije. Piroliza se odvija bez prisustva kiseonika ($300-900^{\circ}\text{C}$) i daje pirolitički gas, ulje i biougalj, koji ima značajnu primenu u poboljšanju zemljišta i zarobljavanju ugljenika (Hu, 2020). Gasifikacijom, uz ograničen dotok kiseonika, dobija se singas pogodan za proizvodnju energije, H_2 , metanola, NH_3 i sintetičkih goriva. Vlažna metoda hidrotermičke karbonizacije koristi vlažnu biomasu i temperature od 180 do 250°C , pri čemu nastaje hidrougalj sa visokim energetske potencijalom. Iako termičke tehnologije nude visoku efikasnost u konverziji otpada u energiju, njihova primena je ograničena zbog visokih energetske zahteva, složene infrastrukture i troškova održavanja.

Fizičko-hemijske tehnologije, kao što su transesterifikacija i emulzifikacija, primenjuju se za dobijanje biogoriva iz masti i ulja. Transesterifikacijom se trigliceridi u prisustvu alkohola i katalizatora pretvaraju u biodizel i glicerin. Emulzifikacija, s druge strane, doprinosi poboljšanju svojstava biogoriva, uključujući sagorevanje i smanjenje emisija. Ove metode se uglavnom koriste kao završni koraci u integrisanim sistemima prerade.

Biohemijske tehnologije, koje su fokus ovog rada, oslanjaju se na mikroorganizme i enzime za razgradnju organske materije u kontrolisanim uslovima. Ključni procesi su AD, kompostiranje i fermentacija. AD u odsustvu kiseonika proizvodi biogas i digestat kao nusproizvod, koristan u poljoprivredi. Kompostiranjem se u aerobnim uslovima dobija kompost: humusni materijal koji poboljšava plodnost zemljišta. Fermentacija, uz prisustvo specifičnih mikroorganizama, omogućava proizvodnju različitih biohemikalija, uključujući bioetanol, biobutanol, organske kiseline i biovodonik, u zavisnosti od supstrata i uslova.

U nastavku će biti predstavljene biohemijske tehnologije tretmana organske sirovine, među kojima su AD i kompostiranje, koje doprinose sprovođenju principa CE kroz povraćaj nutrijenata i energetske iskorisćenje organske materije. Radi potpunijeg razumevanja njihovog značaja i uloge u konverziji organske materije, prvo su prikazani postupci predtretmana koji im prethode.

2.2.2.1. Predtretman organske sirovine

Predtretman organske sirovine predstavlja skup postupaka kojima se sirovina priprema za dalji tretman, čime se povećava razgradljivost biomase i poboljšava kvalitet krajnjih proizvoda, uz veći energetske prinos u procesima biohemijske konverzije. U zavisnosti od prirode materijala i ciljeva obrade, primenjuju se mehaničke, fizičke, fizičko-hemijske, hemijske i biološke metode, pojedinačno ili u kombinaciji.

Mehanički predtretmani, poput mlevenja, drobljenja i sečenja, smanjuju veličinu čestica i povećavaju ukupnu površinu dostupnu mikroorganizmima i enzimima, čime se ubrzava razgradnja i povećava prinos biogasa (Zakaria, 2014). Ove tehnike se često kombinuju sa hemijskim ili termičkim postupcima radi efikasnijeg razlaganja lignocelulozne strukture i povećanja pristupa celulozi i hemicelulozi.

Hemijski predtretmani, kao što je alkalna hidroliza primenom $NaOH$, razgrađuju lignin u strukturi biomase i povećavaju pristupačnost celuloznih komponenti. Delovanjem alkalnog rastvora dolazi do razbijanja estarskih veza i bubrenja vlakana, što smanjuje kristaliničnost celuloze i ubrzava hidrolitičku razgradnju. Ovi tretmani su naročito efikasni kod drvnih i

poljoprivrednih ostataka sa visokim sadržajem lignina, ali izazov predstavljaju troškovi neutralizacije zaostalog rastvora i rizik od degradacije materijala ukoliko proces nije precizno kontrolisan (Saravanan, 2022).

Biološki predtretmani, zasnovani na delovanju mikroorganizama poput bele truleži (*Sclerotinia sclerotiorum*), koriste enzime lakaze i peroksidaze za razgradnju lignina, čime se uklanja zaštitni sloj koji okružuje celulozu i hemicelulozu i omogućava mikroorganizmima i enzimima lakši pristup ovim polisaharidima. Ovi postupci su ekološki prihvatljivi, jer ne zahtevaju upotrebu hemikalija i ne stvaraju toksične ostatke, ali im je nedostatak dužina trajanja procesa i potreba za stabilnim uslovima okoline.

Metoda zamrzavanja i odmrzavanja pokazuje sličan efekat, jer kristalizacija vode tokom zamrzavanja mehanički oštećuje ćelijske zidove, čime se povećava dostupnost organskih jedinjenja unutar biomase. Iako zahteva dodatnu opremu i potrošnju energije, pogodna je za materijale visoke vlažnosti i ne ostavlja štetne ostatke (Messaoudi, 2023).

Parno-eksplozioni predtretman kombinuje visoku temperaturu i pritisak sa naglim rasterećenjem, što dovodi do razbijanja lignocelulozne strukture i povećanja pristupačnosti materijala mikroorganizmima (Pielhop, 2016). Termički i alkalni tretmani posebno su efikasni u narušavanju strukturnih veza biomase, dok enzimski postupci dodatno povećavaju efikasnost zahvaljujući specifičnom dejstvu biokatalizatora (Seidl & Goulart, 2020).

Zajednički cilj svih gore pomenutih metoda predtretmana jeste oslobađanje lignoceluloznih komponenti i njihova konverzija u jedinjenja pogodna za dalju fermentaciju. Optimizacija ključnih parametara, poput temperature, trajanja i koncentracije, presudna je za postizanje boljih rezultata i smanjenje troškova tretmana (Halder & Purkait, 2019). Pažljiva selekcija i kombinacija predtretmana, u skladu sa karakteristikama sirovine i krajnjim ciljevima, povećava efikasnost procesa i doprinosi većoj vrednosti otpada. Time predtretmani postaju ne samo tehnički korak, već i važan element strategije održivog razvoja u okviru CE.

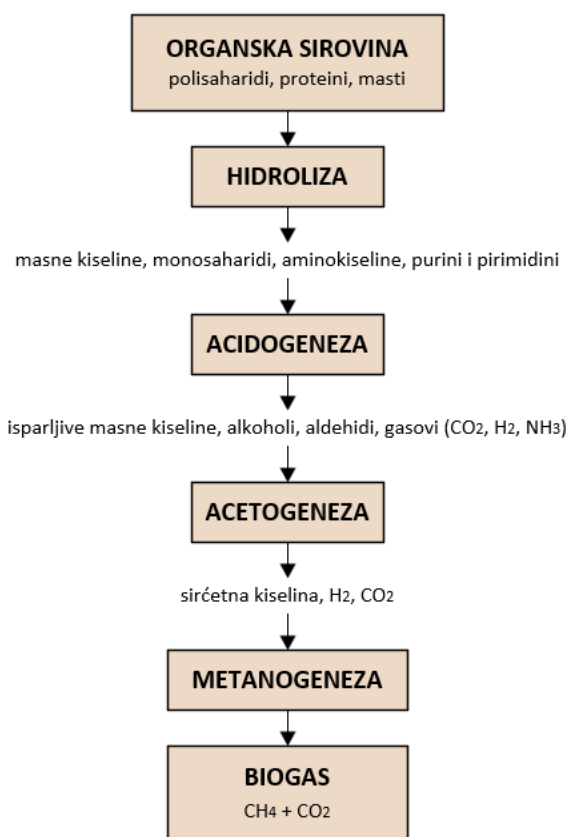
2.2.2.2. Anaerobna digestija

AD predstavlja složen biohemijski proces razgradnje organske materije u potpunom odsustvu kiseonika. Tokom ovog procesa, mikrobna zajednica anaerobnih mikroorganizama razlaže organski otpad i pretvara ga u dva osnovna proizvoda: biogas i digestat. Kvalitet biogasa i digestata direktno zavisi od efikasnosti procesa razgradnje, koja je određena razumevanjem i optimizacijom četiri ključne faze AD: hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i

metanogeneze. Na Slici 2.4 prikazana je šema procesa AD, koja ilustruje međusobnu povezanost ovih faza i njihov značaj za efikasnost procesa (Kumar & Samadder, 2020).

Faze procesa i optimalni uslovi odvijanja anaerobne digestije

AD je višestepeni biohemijski proces razgradnje organske sirovine u odsustvu kiseonika, sastoji se od četiri faze: hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze. Svaka od ovih faza ima specifičnu ulogu u konverziji složenih organskih jedinjenja u biogas i digestat. Hidroliza razlaže složena organska jedinjenja na prostija, acidogeneza transformiše proizvode hidrolize u isparljive masne kiseline i gasove, acetogeneza pretvara te kiseline u sirćetnu kiselinu, CO_2 i H_2 , dok metanogeneza dovodi do stvaranja CH_4 kao krajnjeg produkta.



Slika 2.4 Faze anaerobne digestije (autorska šema prema Kumar & Samadder, 2020)

Hidroliza predstavlja prvi korak AD, u kom dolazi do razgradnje složenih organskih materijala biljnog i životinjskog porekla, kao što su polisaharidi, proteini, lipidi i nukleinske kiseline, na manje molekule rastvorljive u vodi (masne kiseline, monosaharidi, aminokiseline, purini i pirimidini). Ona je često najsporija i ograničavajuća faza, jer zahteva značajno vreme za razlaganje kompleksnih polimera. U ovom procesu učestvuju enzimi iz grupe hidrolaza: esteraze razgrađuju lipide, glukozidaze razlažu polisaharide u jednostavne šećere, a peptidaze razgrađuju proteine na aminokiseline. Efikasnost hidrolize zavisi od hemijskog sastava i karakteristika materijala. Hemijski sastav, koji obuhvata sadržaj C , N , lignina, celuloze i hemiceluloze, utiče na

brzinu i stepen razgradnje organskih komponenti. Fizičko-hemijske karakteristike, kao što su veličina čestica, sadržaj suve materije, pH vrednost, temperatura i sadržaj lignina, određuju dostupnost sirovine i mogu usporiti ili ograničiti proces razgradnje.

Acidogeneza se nadovezuje na hidrolizu i obuhvata fermentaciju njenih produkata u isparljive masne kiseline, alkohole, aldehide i gasove (CO_2 , H_2 , NH_3), što je prikazano na sledećim hemijskim jednačinama. U ovoj fazi acidogene bakterije razlažu međuprodukte

hidrolize u jedinjenja male molekularne mase koja predstavljaju ključne supstrate za metanogene bakterije u narednim fazama digestije.

Acetogeneza uključuje oksidaciju isparljivih masnih kiselina i alkohola u sirćetnu kiselinu, H_2 i CO_2 . Ovaj proces sprovode acetogene bakterije koje stvaraju uslove pogodne za metanogenezu. Sirćetna kiselina, zajedno sa nastalim gasovima, čini osnovu za sintezu CH_4 (Deublein & Steinhauser, 2008).

Metanogeneza predstavlja završnu fazu u kojoj se sirćetna kiselina, H_2 i CO_2 konvertuju u CH_4 . Sirćetna kiselina se razgrađuje putem acetoklastične metanogeneze, dok se CO_2 redukuje uz pomoć H_2 kroz hidrogenotrofnu metanogenezu. Ove reakcije sprovode metanogeni mikroorganizmi iz rodova *Methanobacterium*, *Methanosarcina* i *Methanosaeta*. Stabilnost AD zavisi od održavanja optimalnih uslova, pre svega temperature, pH vrednosti i odsustva kiseonika (Deublein & Steinhauser, 2008). Svaka faza procesa ima specifične zahteve, pa je neophodno kontinuirano pratiti i kontrolisati ključne parametre kao što su organsko opterećenje, odnos C/N , sadržaj vlage i vreme zadržavanja materijala u sistemu.

Prema istraživanju Munira (2021), optimalni uslovi za odvijanje AD su navedeni u nastavku. Optimalno organsko opterećenje iznosi približno 10,1 g COD/l dnevno, što omogućava stabilnu mikrobiološku aktivnost. Optimalan odnos C/N iznosi između 20 i 30, jer obezbeđuje uravnoteženu aktivnost mikroorganizama tokom razgradnje organske materije. Kada je odnos C/N nizak, odnosno kada je sadržaj azota previsok, dolazi do formiranja NH_3 i gubitka azota u gasovitom obliku. Visok odnos C/N ukazuje na višak ugljenika u odnosu na azot, što može usporiti mikrobiološku aktivnost i produžiti vreme stabilizacije materijala. Optimalna pH vrednost nalazi se u rasponu od 6,8 do 7,2, što odgovara metanogenim mikroorganizmima, dok odstupanja od ovog raspona mogu destabilizovati proces. Stabilna proizvodnja CH_4 ostvaruje se u mezofilnim uslovima na temperaturi od 30 do 40°C, dok termofilni uslovi od 45 do 65°C povećavaju brzinu razgradnje, ali zahtevaju pažljiviju kontrolu zbog veće sklonosti destabilizaciji. Vlačnost od približno 85% omogućava homogenu distribuciju hranljivih materija i optimalan kontakt mikroorganizama sa supstratom, dok vreme zadržavanja od oko 15 dana obezbeđuje potpunu razgradnju organske materije i maksimalnu proizvodnju biogasa

Produkti procesa anaerobne digestije

AD proizvodi dva glavna proizvoda: biogas i digestat. Biogas, koji se uglavnom sastoji od CH_4 (50-75%) i CO_2 (30-40%). Pored osnovnih komponenti, biogas može sadržavati male količine NH_3 , H_2 , H_2S i tragove siloksana, koji se uklanjaju da bi biogas bio pogodan za

komercijalnu upotrebu (Borja, 2017). Digestat je stabilan nusproizvod bogat nutrijentima poput azota, fosfora i kalijuma, što ga čini pogodnim proizvodom za poboljšanje plodnosti zemljišta. Kvalitet digestata zavisi od sadržaja sirovina, uključujući sastav sirovina, odnos C/N , sadržaj organske materije, vlage, pH vrednosti, kao i sadržaj teških metala i mikrobiološke čistoće. Analize kvaliteta digestata bitne su za njegovu bezbednu upotrebu u poljoprivredi, uz obezbeđivanje da zadovoljava nacionalne i internacionalne regulative i standarde (Tisocco, 2025). Digestat, pored primene u poljoprivredi, može se dodatno stabilizovati aerobnim procesom kompostiranja, čime se zatvaraju tokovi materijala u okviru koncepta CE.

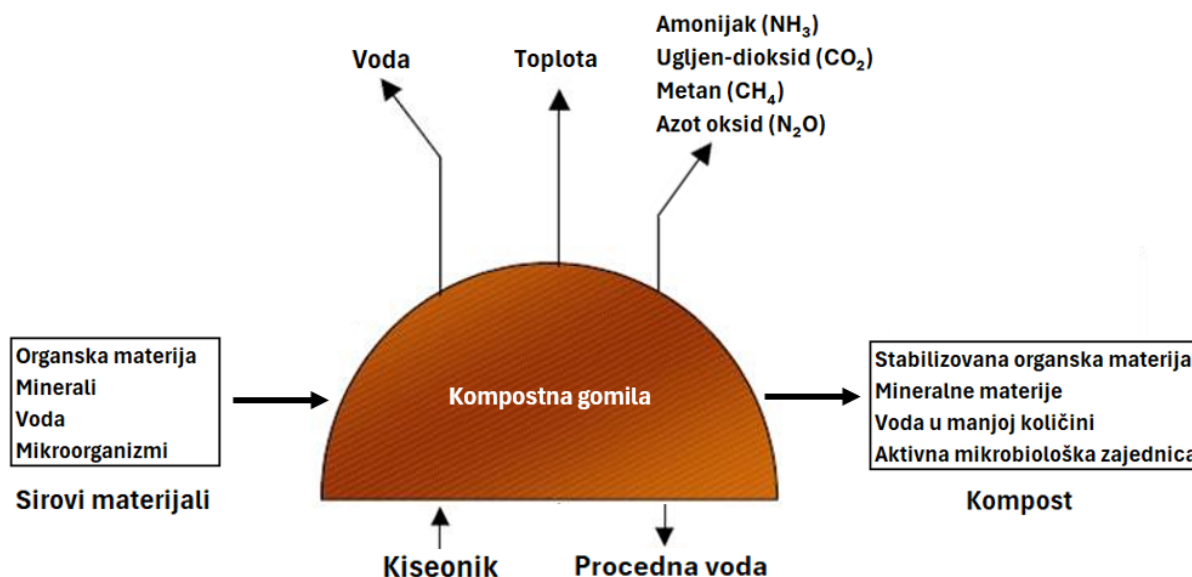
Tehnologija anaerobne digestije

Digestor je zatvoreni reaktor u kojem se AD odvija bez prisustva kiseonika, pri čemu mikroorganizmi razgrađuju organsku materiju i proizvode biogas i digestat. Njegovi osnovni elementi su hermetička komora, sistemi za regulaciju temperature, pH i mešanja, kao i mehanizmi za sakupljanje proizvoda. Efikasnost zavisi od tipa, kapaciteta i prilagođenosti određenim vrstama otpada (Aworanti, 2023). Digestori se klasifikuju prema koncentraciji suve materije, načinu rada i broju faza: mokri digestori (više od 85% vlage) koriste se za mulj i stajnjak, dok suvi digestori (15% i više suve materije) odgovaraju komunalnom i baštenskom otpadu, uz zahtevnije tehnologije mešanja (Rocamora, 2020). Prema načinu rada mogu biti šaržni, sa nižim troškovima, ali periodičnom proizvodnjom biogasa, ili kontinuirani, sa stalnom proizvodnjom i složenijom infrastrukturom. Proces može biti jednofazan, gde se sve faze odvijaju u jednom reaktoru, ili dvofazan, gde se razdvajaju radi optimizacije (Aworanti, 2023).

2.2.2.3. Kompostiranje

Kompostiranje je složen mikrobiološki proces razgradnje organske materije u prisustvu kiseonika, pri čemu se organski molekuli transformišu u kompost. Pored komposta, nastaju i sporedni produkti poput gasova CO_2 , NH_3 , CH_4 , N_2O , H_2S , procednih voda i toplote. Na slici 2.5 prikazani su osnovni tokovi materije i energije tokom procesa kompostiranja, uključujući unos sirovih materijala, delovanje kiseonika i mikroorganizama, kao i stabilizovanog komposta.

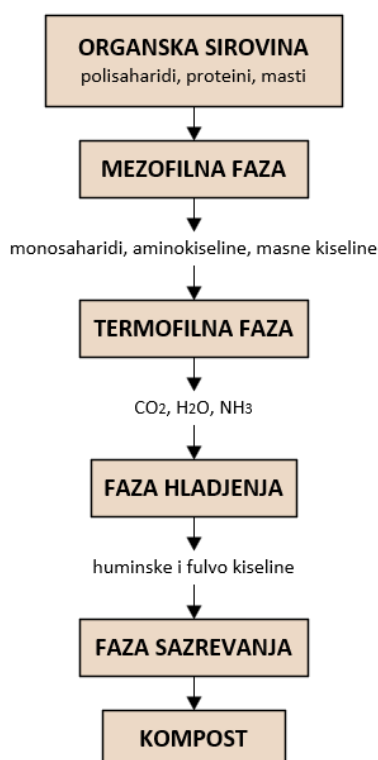
Organska materija, poput ugljenih hidrata, proteina, šećera, ulja, celuloze i lignina, razgrađuje se različitim brzinama u zavisnosti od hemijskog sastava organskog otpada. Komponente kao što su ugljeni hidrati, šećeri i proteini brzo se razlažu u početnim fazama procesa, dok složeniji materijali poput celuloze, hemiceluloze i lignina zahtevaju duži vremenski period za delimičnu ili potpunu razgradnju.



Slika 2.5 Šema tokova materije i energije tokom kompostiranja (autorska šema prema EPEM)

Faze procesa i optimalni uslovi kompostiranja

Kompostiranje se odvija kroz četiri faze: mezofilnu, termofilnu, fazu hlađenja i fazu sazrevanja (Slika 2.6). Proces počinje *mezofilnom fazom*, tokom koje temperatura kompostne mase raste do približno 40°C . Nakon toga sledi *termofilna faza*, koja započinje kada



Slika 2.6 Faze kompostiranja (autorska šema)

temperatura poraste iznad 40°C i može dostići vrednosti i do 70°C . Ova faza obuhvata razgradnju složenijih jedinjenja, kao što su celuloza, lignocelulozna jedinjenja, lignini i masti. Termofilne bakterije, poput onih iz roda *Bacillus*, postaju dominantne. Visoke temperature omogućavaju redukciju patogena i semena korova, kao i ubrzanu stabilizaciju organske materije. Trajanje faze zavisi od sadržaja vlage, provetrenosti i strukture mase (Elango, 2009). Kada se temperatura smanji, kompost ulazi u *fazu hlađenja*. Tokom ovog perioda temperatura se stabilizuje ispod 40°C , a aktivnost mezofilnih mikroorganizama se ponovo povećava. U ovoj fazi nastavlja se razgradnja jedinjenja srednje složenosti, kao što su hemiceluloze, proteini i lipidi, čime se smanjuje sadržaj lako razgradive organske materije. *Faza hlađenja*

traje nekoliko nedelja, tokom kojih masa postaje stabilnija i pogodna za prelazak u sledeću fazu. Završna faza kompostiranja je *faza sazrevanja*, tokom koje dolazi do formiranja huminskih jedinjenja, kao što su huminske kiseline, fulvo kiseline i humin. Aktivnost mikroorganizama se smanjuje, a preostala organska materija se mineralizuje. U ovoj fazi formiraju se ključne osobine komposta koje određuju njegovu zrelost i agronomsku vrednost, uključujući: organsku materiju od oko 35%, organski ugljenik 20-25%, sadržaj huminskih kiselina 5-15%, ukupni, organski i amonijski azot iznad 1%, ukupni P_2O_5 i K_2O iznad 1%, odnos C/N manji od 20, pH vrednost u opsegu 6,5-8, električnu provodljivost do 4 mS/cm, vlažnost između 30 i 40% i granulometrijski sastav pri kome 90% čestica prolazi kroz sito prečnika 25 mm (Pravilnik o uslovima za razvrstavanje i utvrđivanje kvaliteta sredstava za ishranu bilja, "Službeni glasnik RS", br. 30/2017 i 31/2018, u daljem tekstu Pravilnik). Trajanje faze sazrevanja zavisi od uslova procesa, ali obično traje od nekoliko nedelja do nekoliko meseci (Fourti, 2013). Efikasna razgradnja organske materije zahteva obezbeđivanje optimalnih uslova za aktivnost mikroorganizama, koji predstavljaju nosioce procesa. Najvažniji uslovi su sadržaj kiseonika, vlažnost, temperatura, pH vrednost i odnos C/N , kao i sastav i struktura korišćenih sirovina (Wu, 2017). Organski materijal koji ulazi u proces mora biti pravilno odabran i prethodno razvrstan kako bi se obezbedila njegova čistoća i stabilan tok razgradnje (Christensen, 2011). Materijali bogati ugljenikom, poput piljevine i suvog lišća, kombinuju se sa materijalima bogatim azotom, kao što su kuhinjski otpad i sveža trava. Optimalan C/N odnos treba da bude u opsegu od 25-35 (Haug, 1993). Neravnoteža u ovom odnosu može dovesti do usporene razgradnje ili do isparavanja NH_3 i gubitka hranljivih materija (Christensen, 2011; Engin, 2022).

Veličina čestica utiče na brzinu razgradnje jer određuje površinu dostupnu mikroorganizmima. Optimalan prečnik od 2,5 do 5 cm obezbeđuje dobar kontakt sa kiseonikom i sprečava stvaranje anaerobnih zona (Ayilara, 2020). Veličina kompostne gomile takođe je važna, jer premale gomile gube toplotu, dok prevelike otežavaju aeraciju.

Temperatura tokom procesa kreću se od mezofilnih (20-40°C) do termofilnih (40-70°C), pri čemu termofilna faza omogućava bržu razgradnju i uništavanje patogena i semena korova (Elango, 2009). Praćenje temperature u realnom vremenu omogućava uvid u stabilnost procesa. Vlažnost treba da se održava između 55% i 65%. Ako padne ispod 40%, mikrobiološka aktivnost slabi; previše vlage može izazvati anaerobne uslove i neprijatne mirise. Redovno mešanje mase poboljšava distribuciju kiseonika i ravnotežu vlage (Christensen, 2011). Ventilacija je važna za održavanje aerobnih uslova. Optimalan sadržaj

kiseonika u kompostnoj masi je između 5% i 15% (Erdener, 2010). Aeracija se obično postiže ručnim ili mehaničkim prevrtanjem gomile. pH vrednost treba da bude u rasponu između 6,5 i 8, što odgovara potrebama mikroorganizama (Öztürk, 2015; Christensen, 2011; Onwosi, 2017, Pravilnik o uslovima za razvrstavanje i utvrđivanje kvaliteta sredstava za ishranu bilja, "Službeni glasnik RS", br. 30/2017 i 31/2018). Ako pH padne, može se korigovati dodatkom CaO (Fernandes, 1988). Vreme kompostiranja varira od nekoliko nedelja do nekoliko meseci, u zavisnosti od sirovinskog materijala i uslova procesa. Zrelost komposta prepoznaje se po stabilnoj temperaturi, neutralnom pH i odsustvu vizuelno prepoznatljivih ostataka. Hemijske analize obezbeđuju podatke o sadržaju nutrijenata, dok biološki testovi ukazuju na mikrobnu aktivnost i stabilnost materijala. Kontrola emisija i mirisa dodatno se može postići primenom biofiltra i zaštitnih slojeva. Poštovanje lokalnih propisa i standarda za upravljanje otpadom predstavlja važan deo održivog kompostiranja (Öztürk, 2015).

Upravljanje parametrima procesa kompostiranja je od suštinskog značaja za postizanje stabilnog procesa i dobijanje kvalitetnog proizvoda. Uspešan proces zavisi od uravnoteženog sastava sirovina, održavanja pogodnih uslova i pažljivog praćenja ključnih pokazatelja.

2.2.2.3. Odabir organske sirovine za pojedine vrste biohemijaskog tretmana

Za uspešno odvijanje bilo kog biohemijaskog tretmana organskog otpada, pored održavanja procesnih parametara na optimalnom nivou, presudan značaj ima i pravilan izbor sirovina. On direktno utiče na stabilnost procesa, brzinu razgradnje i kvalitet krajnjih proizvoda, bilo da je reč o biogasu ili kompostu. Iako se i AD i kompostiranje oslanjaju na mikrobiološku aktivnost, razlike u uslovima njihovog odvijanja određuju i specifične zahteve u pogledu sirovinskog sastava. AD se sprovodi u odsustvu kiseonika i najbolje rezultate daje kada sadrži lako razgradive materijale, dok kompostiranje zahteva stalno prisustvo kiseonika i dovodi do formiranja stabilnog komposta uz oslobađanje toplote. Tako, dok se životinjski ekskrementi ili otpad iz prehrambene industrije često koriste u digestiji, baštenski otpad ili papir predstavljaju pogodniju osnovu za kompostiranje.

Zbog toga se pristup selekciji sirovina mora zasnivati na razumevanju njihovog hemijskog sastava, odnosa C/N , sadržaja vlage, prisustva inhibitora i ukupnog potencijala za razgradnju. Ovi parametri odlučuju o tome da li će određena sirovina doprineti stabilnosti i efikasnosti procesa ili, naprotiv, izazvati poremećaje u njegovom toku. Analizom karakteristika organskih sirovina i njihovih hemijskih sastojaka, kao što su proteini, lipidi, ugljeni hidrati, lignin i potencijalni inhibitori, definišu se smernice za izbor i kombinovanje otpada pogodnog

za procese AD i kompostiranja. Rezultati ove analize prikazani su u tabelama 2.2 i 2.3, gde su date preporučene kombinacije organskih sirovina na osnovu optimalnog odnosa C/N , sadržaja vlage i elementarnog sastava materijala. Dobijene smernice korišćene su kao polazna osnova za odabir organskih sirovina prilikom primene matematičkog modela za optimizaciju mešanja, koji je detaljno prikazan u narednom poglavlju. Na taj način postavljen je teorijski i praktični okvir za izbor sirovina, koji obezbeđuje stabilan rad sistema i kvalitet krajnjih proizvoda.

2.2.2.3.1. Izbor sirovina za anaerobnu digestiju

Efikasnost AD u velikoj meri zavisi od hemijskog sastava ulazne sirovine, jer on određuje brzinu razlaganja, stabilnost procesa i prinos biogasa. Organska materija se sastoji od ugljenih hidrata, lipida i proteina, koji se u anaerobnim uslovima razgrađuju različitim brzinama i metaboličkim putevima. Zato je neophodno pažljivo birati sirovine i pravilno ih kombinovati, kako bi se obezbedila stabilna mikrobna aktivnost u svim fazama digestije. Hemijski profil materijala direktno utiče na kinetiku razgradnje, pojavu inhibitora, ravnotežu pH vrednosti i konačni kvalitet digestata i energetskog izlaza. Posebno je važan odnos C/N , jer upravo on određuje da li će proces teći uravnoteženo i bez poremećaja. Razumevanje ovih osobina predstavlja osnovu za izbor sirovina i njihovu optimalnu kombinaciju, što je polazna tačka za analizu pojedinačnih grupa jedinjenja.

Ugljeni hidrati predstavljaju osnovu biljne biomase i obuhvataju širok spektar jedinjenja, među kojima su celuloza, hemiceluloza, lignin, skrob i jednostavni šećeri. U anaerobnim uslovima, jednostavni šećeri i skrob se najbrže razgrađuju i predstavljaju lako dostupan izvor energije za mikroorganizme, hemiceluloza i deo celuloze razgrađuju se umerenim intenzitetom, dok je lignin gotovo nereaktivan i njegova razgradnja je veoma ograničena. Ove razlike u stepenu razgradivosti različitih grupa ugljenih hidrata značajno utiču na dinamiku AD i stabilnost proizvodnje biogasa. Ovaj problem naročito se javlja kod žetvenih ostataka ili životinjskih ekskrementa sa primesama slame, gde visok sadržaj lignina smanjuje ukupnu efikasnost procesa. Da bi se povećala dostupnost ovih materijala mikroorganizmima, primenjuju se različiti oblici predtretmana, poput mehaničkog usitnjavanja, termičke obrade parnom ekspanzijom ili hemijske razgradnje putem alkalne ili enzimske hidrolize (Ferdes, 2023). Pored sastava, brzina razgradnje ovih frakcija utiče i na optimalno vreme zadržavanja u digestoru, jer prekratko vreme može dovesti do gubitka potencijala za proizvodnju biogasa. Ugljeni hidrati, posebno celuloza i hemiceluloza, obezbeđuju stabilnu proizvodnju biogasa, dok lignin ostaje najveće ograničenje zbog svoje slabe razgradivosti.

Lipidi imaju visok prinos biogasa u procesu digestije i zbog toga su poželjna sirovina. Međutim, njihova prekomerna količina može dovesti do akumulacije isparljivih masnih kiselina, koje inhibiraju aktivnost metanogenih bakterija. Ovaj efekat posebno dolazi do izražaja kada se koriste otpad iz prehrambene industrije, uljarica ili kuhinjski otpad bogat mastima. Zato se lipidi preporučuju u umerenim količinama, najčešće u kombinaciji sa lignoceluloznim supstratima, čime se obezbeđuje ravnoteža u sistemu i smanjuje rizik od inhibicije. Pored toga, razgradnja lipida može dovesti i do oslobađanja jedinjenja sumpora u obliku H_2S , koja negativno utiču na kvalitet biogasa i zahtevaju dodatno prečišćavanje.

Proteini doprinose proizvodnji biogasa zahvaljujući bogatom sadržaju azota, ali njihova razgradnja može izazvati oslobađanje značajnih količina NH_3 . Povišena koncentracija NH_3 snižava pH vrednost digestata i može ugroziti aktivnost mikroorganizama, posebno u fazi metanogeneze. Zato je neophodno pratiti nivo azota i po potrebi korigovati odnos C/N dodavanjem sirovina bogatih ugljenikom (Ferdeš, 2023). Slično kao i lipidi, proteini mogu doprineti oslobađanju drugih toksičnih jedinjenja, uključujući sulfide i dušične komponente, što dodatno utiče na kvalitet biogasa i stabilnost procesa.

Stabilnost AD u praksi zavisi upravo od međusobne interakcije organskih supstrata i mikrobne zajednice. Acidogene bakterije imaju ključnu ulogu u razgradnji ugljenih hidrata i stvaranju jednostavnih kiselina, dok metanogeni mikroorganizmi koriste produkte proteina i lipida, pa je održavanje ravnoteže između supstrata od velikog značaja za stabilno odvijanje procesa. Energetski gledano, lignocelulozne sirovine daju stabilniji digestat ali niži prinos biogasa, lipidi pružaju najveći prinos biogasa uz visok rizik od inhibicije procesa, dok proteini doprinose proizvodnji CH_4 ali mogu inhibirati proces zbog stvaranja NH_3 i H_2S . Zbog toga se preporučuje kombinovanje različitih supstrata kroz AD, kojom se postiže bolji balans odnosa C/N , veća stabilnost procesa i viši prinos biogasa. Razumevanje osnovnih grupa jedinjenja organske materije, kao što su ugljeni hidrati, lipidi i proteini, predstavlja polaznu osnovu za procenu pogodnosti različitih sirovina u AD. Hemijski sastav određuje brzinu razgradnje, stabilnost procesa i potencijalne inhibitore, ali se u praksi mora sagledati i kroz konkretne tokove otpada koji potiču iz komunalnih delatnosti, poljoprivrede i industrije. Svaka od ovih grupa sirovina ima svoje specifične prednosti i ograničenja, kao i različite zahteve u pogledu kombinovanja.

Poljoprivredni ostaci, kao što su kukuruzovina, slama, biljni otpad i žetveni ostaci, predstavljaju značajan izvor celuloze i hemiceluloze. Međutim, visok sadržaj lignina čini ih otpornijim na mikrobiološku razgradnju, što može umanjiti efikasnost procesa. Zbog toga se,

pre upotrebe, preporučuje primena predtretmana, najčešće mehaničkog, ali i termičkog (parna ekspanzija) ili hemijskog (alkalna obrada), kako bi se povećala površina dostupna mikroorganizmima i narušila kompleksna struktura lignina. Ove sirovine karakteriše visok odnos C/N , pa se u praksi često kombinuju sa supstratima bogatim azotom, poput životinjskih ekskrementa ili ODKO, čime se ostvaruje bolji prinos biogasa (Ferdeş, 2023).

Životinjski ekskrementi su jedan od najstabilnijih i najčešće korišćenih supstrata u AD. Osim što sadrže značajne količine lako razgradive organske materije, oni u sistem unose i prirodnu mikrofloru koja olakšava razgradnju isparljivih masnih kiselina i ubrzava pokretanje mikrobiološke razgradnje. Njihova visoka vlažnost (70-92%) pogoduje obradi, ali prisustvo primesa slame povećava sadržaj lignina i smanjuje razgradljivost čvrste frakcije. Takođe, nizak odnos C/N može dovesti do akumulacije NH_3 , što potencijalno inhibira metanogene mikroorganizme. Zbog toga se ovi supstrati najčešće kombinuju sa poljoprivrednim ostacima, čime se postiže optimalan odnos C/N (Aworanti, 2023).

ODKO, koji obuhvata kuhinjski i baštenski otpad, bogat je lako razgradivim komponentama poput prostih ugljenih hidrata i proteina. Ipak, ovaj supstrat odlikuje izrazita heterogenost i česta nepredvidivost sastava, uz prisustvo kontaminanata kao što su plastika, metal i staklo, zbog čega je neophodno sprovesti dodatne korake obrade. Pre upotrebe obavezna je mehanička separacija i uklanjanje neorganskih frakcija, kao i homogenizacija smeše radi ujednačavanja hemijskog sastava. Stabilnost procesa poboljšava se dodavanjem suvih materijala, poput slame ili piljevine, koji omogućavaju regulaciju sadržaja vlage i istovremeno doprinose uspostavljanju optimalnog odnosa C/N .

Mulj iz TOV predstavlja stabilan supstrat sa homogenim hemijskim sastavom i razvijenom mikroflorom, što ga čini pogodnim za kontinuiranu digestiju u komunalnim postrojenjima. Njegova niska koncentracija suve materije otežava obradu i smanjuje energetski prinos po zapremini digestora. Osim toga, prisustvo toksičnih jedinjenja kao što su teški metali, farmaceutski i industrijski ostaci zahteva redovno praćenje i eventualnu stabilizaciju digestata. Efikasnost digestije se može povećati kombinovanjem mulja sa suvim biljnim materijalima poput žetvenih ostataka, čime se poboljšava tekstura smeše i ukupna konverzija organske materije (Aworanti, 2023).

Organski otpad iz prehrambene industrije, uključujući surutku, pivski trop, celulozne ostatke i frakcije bogate šećerima, karakteriše se visokom razgradljivošću i velikim metanogenim potencijalom. Međutim, ovaj tip otpada ima nepovoljan odnos C/N i visok sadržaj vlage, što može dovesti do neravnoteže u digestoru. Zbog toga se preporučuje

kombinovanje sa sirovinama bogatim lignoceluloznom materijom (npr. slama, lišće, drvena piljevina) ili azotom (npr. životinjski ekskrementi), kako bi se stabilizovao pH, povećala gustina i sprečile inhibicije izazvane akumulacijom isparljivih masnih kiselina (Choe, 2019).

Tabela 2.2 Pregled sirovina pogodnih za anaerobnu digestiju

Vrsta sirovine	Primeri	Prednosti	Ograničenja	Preporučene kombinacije
Komunalni otpad	ODKO	Visoka razgradljivost; bogat šećerima, skrobom i proteinima; visok prinos biogasa	Heterogen i sezonski promenljiv sastav; prisustvo kontaminanata	Žetveni ostaci, životinjski ekskrementi, industrijski otpad
	Mulj iz TOV	Homogen sastav; razvijen mikrobiom; pogodan za digestiju	Visok sadržaj vlage; moguće prisustvo kontaminanata	Žetveni ostaci, suvlji biljni materijali
Poljoprivredni otpad	Žetveni ostaci, slama, silaža	Bogati celulozom i hemicelulozom; dostupni i jeftini	Visok sadržaj lignina; visok odnos C/N; niska razgradivost bez predtretmana	Životinjski ekskrementi; ODKO; industrijski otpad
	Životinjski ekskrementi	Prirodan mikrobiom; stabilan supstrat; dobra puferska sposobnost	Nizak odnos C/N; visok sadržaj vlage i lignina	Slama, biljni otpad, piljevina
Industrijski otpad	Surutka, pivski trop, otpad iz prerade voća i povrća	Visoka razgradljivost; visok prinos biogasa; bogat šećerima i proteinima	Nizak odnos C/N; visok sadržaj vlage; promenljiv sastav	Slama, životinjski ekskrementi, piljevina

Analiza supstrata predstavlja osnovu za definisanje optimalnih kombinacija mešanja neophodnih za stabilan rad procesa AD. U tabeli 2.2 prikazan je pregled sirovina pogodnih za AD i preporučene kombinacije njihovog mešanja. Pravilno odabrane i uravnoteženo kombinovane sirovine čine temelj efikasnog rada anaerobnih digestora. Hemijski sastav, pogotovu odnos C/N, određuje stabilnost mikrobioloških procesa. Primena AD, kojom se kombinuju sirovine različitih karakteristika, omogućava uspostavljanje optimalnih uslova u digestoru, povećava stabilnost sistema i doprinosi većem prinosu biogasa. Na taj način AD se potvrđuje kao fleksibilna, prilagodljiva i održiva tehnologija za tretman raznovrsnih tokova organskog otpada, u potpunosti usklađena sa principima CE.

2.2.2.3.2. Izbor sirovina za kompostiranje

Kompostiranje, kao aerobni proces razgradnje organske materije, u velikoj meri zavisi od hemijskog sastava i fizičkih karakteristika sirovina koje određuju mikrobiološku aktivnost, stabilnost procesa i kvalitet krajnjeg proizvoda. Organske sirovine koje ulaze u kompostnu masu sastoje se od makromolekula poput ugljenih hidrata, proteina i lipida, čije prisustvo utiče na kinetiku razgradnje i formiranje huminskih supstanci. Razumevanje hemijskog sastava sirovina predstavlja osnovu za pravilno oblikovanje kompostne mase i kontrolu toka procesa.

Ugljeni hidrati i proteini spadaju u lako razgradive komponente i omogućavaju brzo oslobađanje toplote i hranljivih materija u inicijalnoj fazi procesa. Međutim, ukoliko su prisutni u prekomernoj količini, bez adekvatne kombinacije sa strukturnim materijalima, mogu dovesti do stvaranja anaerobnih zona, pojave neprijatnih mirisa i destabilizacije mikrobiološke zajednice. Nasuprot tome, lignocelulozni materijali, poput piljevine, slame i drvene sečke, razgrađuju se znatno sporije, ali imaju ključnu ulogu u održavanju poroznosti mase, regulaciji sadržaja vlage i omogućavanju difuzije kiseonika, što je od suštinske važnosti za nesmetan aerobni proces (Zakaria, 2014). Kombinovanje lako razgradivih i strukturnih materijala obezbeđuje ravnotežu između brzine razgradnje i fizičke stabilnosti kompostne mase.

Regulacija odnosa C/N predstavlja jedan od najvažnijih parametara prilikom formiranja kompostne smeše. Materijali sa visokim odnosom C/N (iznad 40), kao što su piljevina i drvni ostaci, sadrže dovoljne količine energije u vidu ugljenika, ali zbog nedostatka azota usporavaju rast i razmnožavanje mikroorganizama. U takvim slučajevima dolazi do produženog trajanja procesa kompostiranja. Suprotno tome, sirovine sa niskim odnosom C/N (ispod 15), kao što su sveža trava, kuhinjski otpad i životinjski ekskrementi, omogućavaju brzu razgradnju, ali mogu izazvati gubitke azota isparavanjem NH_3 , zakiseljavanje mase i neprijatne mirise ukoliko nisu pravilno uravnotežene (Nigussie, 2017).

Optimalan odnos C/N za efikasno kompostiranje se kreće u rasponu od 25 do 30. Njegovo postizanje zahteva pažljivo balansiranje sirovina komplementarnih karakteristika. Pored hemijskog sastava, neophodno je obratiti pažnju i na sadržaj vlage (optimalno između 40 i 60%), veličinu čestica, teksturu mase, kao i moguće prisustvo inhibitora (teški metali, pesticidi) koji mogu negativno uticati na mikrobiološku aktivnost i kvalitet krajnjeg komposta.

Poljoprivredni ostaci bogati su celulozom i ligninom, što ih čini korisnim za postizanje strukturne stabilnosti i aeracije kompostne mase. Ipak, njihova složena molekularna struktura otežava razgradnju, pa se preporučuje menahnički predtretman, poput usitnjavanja, radi povećanja specifične površine i ubrzavanja mikrobiološke aktivnosti. Ovi materijali doprinose formiranju huminskih supstanci koje poboljšavaju plodnost i strukturu zemljišta (Silva, 2018).

Baštenski otpad i lišće čine raznovrsnu grupu sirovina sa promenljivim sadržajem vlage i ugljenika. Trava i sveže lišće brzo oslobađaju hranljive materije, dok grane, kora i piljevina doprinose poroznosti i boljoj aeraciji. Kombinovanjem ovih materijala može se postići stabilna smeša pogodna za kontinuiranu razgradnju, bez rizika od anaerobnih pojava.

Industrijski organski otpad, naročito iz prehrambene i poljoprivredne proizvodnje, bogat je mikro i makronutrijentima koji podstiču mikrobiološku aktivnost i obogaćuju krajnji

kompost. Ipak, njegova varijabilna vlažnost i hemijski sastav zahtevaju pažljivo mešanje sa materijalima stabilnijih karakteristika, kako bi se izbegla pH nestabilnost i omogućilo ravnomerno razlaganje (Chohan, 2020).

Tabela 2.3 Pregled pogodnih sirovina za kompostiranje

Vrsta sirovine	Primeri	Prednosti	Ograničenja	Preporučene kombinacije
Komunalni otpad	ODKO	Visoka razgradljivost; bogat šećerima, skrobom i proteinima; visok nutritivni potencijal	Heterogen sastav; prisustvo kontaminanata; visoka vlažnost	Slama; piljevina; lišće
	Parkovski otpad	Kombinacija brzo i sporo razgrađivih materijala; doprinosi poroznosti i aeraciji	Promenljiv sadržaj vlage i odnosa C/N	
Poljoprivredni otpad	Žetveni ostaci, slama, silaža	Bogati celulozom i hemicelulozom; doprinose strukturi i aeraciji;	Visok sadržaj lignina; visok odnos C/N ; spora razgradnja bez predtretmana	ODKO; životinjski ekskrementi
	Životinjski ekskrementi	Prirodna mikroflora; ubrzavaju proces; stabilan supstrat	Neprijatan miris; visok sadržaj vlage	Slama; drvena sečka; biljni ostaci
	Lignocelulozni materijali	Ključni za humifikaciju; povećavaju poroznost; poboljšavaju dugoročnu plodnost zemljišta	Spora razgradnja; visok odnos C/N	Kuhinjski otpad; trava; ekskrementi
Industrijski otpad	Surutka, pivski trop, otpad od prerade voća i povrća	Visoka razgradljivost; bogat mikro i makronutrijentima	Visok sadržaj vlage; nepovoljan odnos C/N ; rizik od pH nestabilnosti	Slama; biljni ostaci; životinjski ekskrementi

ODKO, koji obuhvata ostatke hrane i baštenskog otpada, ima visok biološki potencijal, ali često sadrži neorganske primese (plastika, staklo, metal) koje je neophodno ukloniti pre upotrebe. Nakon separacije i homogenizacije, ova sirovina se može uspešno koristiti u kompostiranju, uz adekvatnu kombinaciju sa lignoceluloznim materijalima kako bi se postigao optimalan odnos C/N i poboljšala struktura smeše (Vučurović, 2014). Kuhinjski otpad i ostaci iz domaćinstava bogati su azotom i lako razgrađivim komponentama, što ih čini pogodnim za male i lokalne sisteme kompostiranja. Međutim, često sadrže visok procenat vlage i brzo fermentišu, zbog čega se preporučuje njihovo kombinovanje sa piljevinom, papirom, slamom ili suvim lišćem. Ova kombinacija omogućava ravnotežu između azota i ugljenika, smanjuje rizik od prekomerne vlage i formira kompost visoke nutritivne vrednosti (Aworanti, 2023).

Lignocelulozni materijali (slama, drvena masa, biljni ostaci) igraju bitnu ulogu u formiranju stabilnih huminskih supstanci. Tokom mikrobiološke razgradnje, njihove složene strukture se razlažu na huminske i fulvo kiseline koje poboljšavaju plodnost zemljišta,

sposobnost zadržavanja vlage i vezivanje nutrijenata. Lignocelulozni materijali, iako sporo razgradivi, ključni su za humifikaciju i trajni doprinos plodnosti zemljišta.

Pravilno odabrane i kombinovane sirovine omogućavaju da kompostiranje bude alat za regeneraciju zemljišta i zatvaranje nutritivnih tokova. U tabeli 2.3 dat je pregled sirovina pogodnih za kompostiranje, kao i preporučene kombinacije njihovog mešanja. Za razliku od jednostavnog deponovanja ili čak AD, kompostiranje zahteva pažljivo formiranje smeše, pri čemu svaka sirovina ima specifičnu hemijsku, fizičku i mikrobiološku funkciju. Uravnotežen odnos C/N i sadržaj vlage i prisustvo strukturnih materijala obezbeđuju stabilan tok razgradnje, intenzivnu mikrobiološku aktivnost i formiranje komposta, bogatog huminskim supstancama.

2.2.3. Tokovi nutrijenata u prirodnim, antropogenim i cirkularnim tokovima

Kretanje nutrijenata u prirodnim ciklusima predstavlja osnovu za očuvanje plodnosti zemljišta i stabilnosti ekosistema. Nutrijenti neprekidno kruže između atmosfere, zemljišta, vode i živih organizama, obezbeđujući biljkama i mikroorganizmima optimalne uslove za rast i razvoj. Ovi biogehemijski ciklusi omogućavaju obnavljanje resursa i dugoročno očuvanje biološke ravnoteže (Vitousek, 1982; Brady, 1990; Sellers, 2018).

Antropogene aktivnosti, naročito intenzivna poljoprivreda, sagorevanje fosilnih goriva i neadekvatno upravljanje otpadom, značajno narušavaju prirodne tokove nutrijenata. Takođe, prekomerna upotreba mineralnih đubriva, uklanjanje biljne biomase i zagađenje voda dovode do gubitaka nutrijenata, degradacije zemljišta i eutrofikacije, ali i do povećane emisije GHG (Vitousek, 1982; Berner, 1998; Berner, 2004). Na taj način remeti se prirodni bilans nutrijenata i smanjuje otpornost ekosistema.

Savremeni koncepti upravljanja organskim otpadom zasnovani na principima CE imaju za cilj ublažavanje posledica ljudskog delovanja i obnovu funkcionalnosti prirodnih tokova. Procesi poput kompostiranja i AD imitiraju prirodne mehanizme kruženja materije, omogućavajući povratak azota, fosfora, kalijuma i stabilnih oblika ugljenika u zemljište. Na taj način zatvaraju se ciklusi materije i energije, smanjuju gubici i podstiče dugoročna održivost agroekosistema (Vitousek, 1982; Ågren, 2012). U nastavku teksta analiziraju se prirodni i antropogeni tokovi pomenutih nutrijenata kroz njihove transformacije i mehanizme biodostupnosti.

2.2.3.1. Prirodni i antropogeni ciklusi kretanja nutrijenata

Nutrijenti su hemijski elementi i jedinjenja od suštinskog značaja za rast i metabolizam biljaka i mikroorganizama, kao i za stabilnost trofičkih mreža. U zavisnosti od količine u kojoj

su potrebni organizmima, dele se na makronutrijente (azot, fosfor, kalijum, sumpor, kalcijum, magnezijum) i mikronutrijente (gvožđe, mangan, cink, bakar, bor, molibden). Njihova dostupnost određuje ključne procese u ekosistemu, uključujući fotosintezu, sintezu proteina, regulaciju pH vrednosti i osmotsku ravnotežu u tlu (Vitousek, 1982; Brady, 1990; Sellers, 2018). Iako se ugljenik ponekad svrstava među makronutrijente, on se zapravo glavni strukturni element organske materije, koji čini osnovu svih bioloških jedinjenja i ima ključnu ulogu u ciklusima materije i energije.

U okviru ovog istraživanja poseban akcenat stavljen je na ciklus ugljenika i tri osnovna makronutrijenta: ugljenika, azota, fosfora i kalijuma. Kruženje ovih elemenata odvija se kroz povezanost atmosfere, biosfere, hidrosfere i litosfere, pri čemu stalno prelaze između različitih rezervoara kroz fizičke, hemijske i biološke transformacije koje određuju njihovu biodostupnost (Sellers, 2018; Brady, 1990).

Ugljenik

Ciklus ugljenika predstavlja proces koji obuhvata kretanje ovog elementa kroz atmosferu, biosferu, hidrosferu i litosferu (Sellers, 2018). U atmosferi se ugljenik najčešće javlja u obliku CO_2 i CH_4 . Razmena između atmosfere i biosfere odvija se putem fotosinteze, kojom biljke fiksiraju CO_2 i pretvaraju ga u organska jedinjenja koristeći sunčevu energiju, i respiracije, tokom koje se CO_2 vraća u atmosferu (Berner, 1998). U hidrosferi, CO_2 se rastvara u vodi i formira H_2CO_3 , koja disosuje na HCO_3^- i CO_3^{2-} jone. Ovi joni učestvuju u formiranju sedimentnih stena, što predstavlja dugoročna skladišta ugljenika (Berner, 2004). U biosferi se ugljenik prenosi kroz lanac ishrane od proizvođača do potrošača i razlagača, dok se u litosferi najveće rezerve nalaze u sedimentnim stenama, fosilnim gorivima i karbonatima.

Prema Vitoušek (Vitousek) (1982), kruženje ugljenika u ekosistemima obuhvata ključne procese: fotosintezu, opadanje biljnog materijala, njegovu razgradnju i skladištenje u trajnim biljnim strukturama. Organski ugljenik se delom oslobađa u atmosferu razgradnjom, a delom ostaje vezan u humusu, doprinoseći njegovom dugoročnom skladištenju. Intenzitet kruženja zavisi od dostupnosti drugih nutrijenata, posebno azota, jer njegovo prisustvo ubrzava fotosintezu i rast biomase. Mikrobiološka aktivnost u tlu i odnos C/N dodatno određuju brzinu razgradnje: visok sadržaj ugljenika usporava mineralizaciju i smanjuje dostupnost azota biljkama, dok uravnotežen odnos omogućava stabilne procese.

Prirodni ciklus ugljenika značajno remete antropogene aktivnosti, jer ovi procesi oslobađaju velike količine CO_2 i CH_4 koje biosfera i hidrosfera ne mogu dovoljno brzo

apsorbovati, što dovodi do povećane koncentracije GHG i narušavanja klimatske ravnoteže. Krčenje šuma dodatno smanjuje kapacitet biosfere za vezivanje ugljenika, dok sagorevanje biljne biomase oslobađa dodatne količine CO_2 u atmosferu. Okeani, kao glavni rezervoari za apsorpciju CO_2 , podložni su zakiseljavanju, što umanjuje njihovu sposobnost vezivanja i utiče na morske organizme koji koriste karbonate za izgradnju skeleta.

Azot

Ciklus azota je složen biogeochemijski proces u kome se ovaj element transformiše kroz atmosferu, zemljište i vodene sisteme, čineći ga dostupnim za biološku upotrebu. Iako azot čini oko 78% atmosfere, u molekularnom obliku on nije pristupačan većini organizama. U organskom otpadu azot se najčešće nalazi u organskim formama, poput proteina, aminokiselina i uree, koje se tokom razgradnje mikrobiološkim putem pretvaraju u NH_3 i NH_4^+ . Biološku fiksaciju azota sprovode specifične bakterije (npr. *Rhizobium*, *Azotobacter*), dok se prirodna fiksacija odvija i putem električnih pražnjenja u atmosferi, pri čemu nastaju oblici NH_3 i NH_4^+ koje biljke mogu direktno usvajati. U zemljištu se NH_4^+ oksiduje do NO_2^- , a zatim do NO_3^- kroz proces nitrifikacije, čime se obezbeđuju oblici azota najpristupačniji biljkama. U anaerobnim uslovima nitrati se redukuju do gasovitih oblika N_2 i N_2O putem denitrifikacije. Istovremeno, razgradnjom organske materije oslobađa se NH_3 , čime se zatvara prirodni ciklus azota (Sellers, 2018). Azot ima ključnu ulogu u ekosistemima jer učestvuje u sintezi proteina, enzima i hlorofila, a njegova dostupnost direktno određuje produktivnost biomase. U ekosistemima siromašnim azotom biljke razvijaju strategije očuvanja, poput reapsorpcije nutrijenata iz starijih tkiva i produženog životnog veka listova, dok u uslovima sa visokim sadržajem azota dolazi do ubrzanog rasta i većeg prinosa biomase (Vitousek, 1982).

Mikrobiološka aktivnost u tlu i odnos C/N presudno utiču na brzinu mineralizacije. Organska materija sa visokim odnosom C/N (iznad 30) sporije se razgrađuje, što može ograničiti dostupnost azota biljkama, dok uravnotežen odnos u opsegu od 20 do 30 omogućava stabilnu mikrobnu aktivnost i efikasno kruženje nutrijenata (Vitousek, 1982).

Prirodni ciklus azota u velikoj meri remete ljudske aktivnosti. Intenzivna poljoprivreda i industrijski Haber-Boš (*Haber-Bosch*) proces, kojim se proizvode veštačka đubriva, omogućili su skok u poljoprivrednoj proizvodnji, ali i stvorili višak azota koji biljke ne mogu u potpunosti usvojiti. Taj višak se ispira u površinske i podzemne vode u obliku NO_3^- , što dovodi do eutrofikacije i hipoksije, dok isparavanje NH_3 i emisija N_2O iz zemljišta doprinose zakiseljavanju, zagađenju vazduha i klimatskim promenama. Prema Vitoušek (1982),

ekosistemi izloženi visokom unosu azota pokazuju smanjenu efikasnost njegove upotrebe i povećane gubitke kroz ispiranje i gasovite emisije, što destabilizuje prirodne cikluse i remeti interakcije između biljaka, mikroorganizama i hemijskih procesa.

Fosfor

Za razliku od ciklusa azota i ugljenika, ciklus fosfora ne podrazumeva značajnu razmenu sa atmosferom, već se uglavnom odvija unutar litosfere, hidrosfere i biosfere. Fosfor je esencijalan za brojne biohemijske procese, uključujući sintezu DNK, RNK i ATP-a, glavnog nosioca ćelijske energije. U prirodi se fosfor pretežno nalazi u obliku PO_4^{3-} , koji se oslobađa iz fosfatnih stena putem erozije i ulazi u zemljište gde ga biljke apsorbuju kroz korenov sistem. U organskom otpadu fosfor se javlja u organskim formama, kao što su fosfolipidi, nukleinske kiseline i fitati, koje tokom razgradnje materijala mikrobiološkom aktivnošću prelaze u neorganski oblik, PO_4^{3-} , direktno dostupan biljkama.

Tokom razgradnje organskog otpada, oslobođeni fosfor se ponovo uključuje u ciklus materije, vraćajući se u zemljište ili taložeći u sedimentima vodenih ekosistema, pa se zbog tog procesa ciklus fosfora odvija sporo, ali ima ključnu ulogu u regeneraciji ekosistema i očuvanju produktivnosti zemljišta i vodenih sistema (Vitousek, 1982). U mnogim ekosistemima fosfor predstavlja ograničavajući nutrijent za rast biljaka jer i ako ga ima u početnoj fazi u dovoljnim količinama, a često se vezuje za minerale gvožđa, aluminijuma i kalcijuma, postajući hemijski nedostupan. U tropskim šumama, gde je zemljište hronično siromašno fosforom, biljke razvijaju strategije očuvanja kao što su produžen životni vek listova i reapsorpcija fosfora iz starijih tkiva. U umerenim ekosistemima dostupnost fosfora je veća, pa ciklus kruženja teče brže i omogućava intenzivniju produktivnost (Vitousek, 1982). Brzina mineralizacije organskog fosfora zavisi od mikrobiološke aktivnosti i hemijskih svojstava zemljišta. U kiselim uslovima proces je usporen, dok u neutralnim i alkalnim zemljištima mikroorganizmi efikasnije oslobađaju fosfor iz organske materije. Efikasnost kruženja fosfora u ekosistemima zavisi od sposobnosti biljaka i mikroorganizama da maksimalno iskoriste i recikliraju dostupne količine ovog elementa.

Ljudske aktivnosti značajno narušavaju prirodni ciklus fosfora. Intenzivna poljoprivreda i industrijska proizvodnja fosfornih đubriva povećavaju unos rastvorljivog PO_4^{3-} u zemljište. Kratkoročno to doprinosi većoj produktivnosti, ali višak fosfora koji biljke ne mogu usvojiti ispira se u površinske vode, gde se takođe stvaraju uslovi za eutrofikaciju. Tokom ovog procesa dolazi do ubrzanog rasta algi, čija razgradnja troši velike količine

kiseonika, uzrokujući hipoksiju i gubitak biodiverziteta. Za razliku od azota, višak fosfor se ne uklanja gasovitim transformacijama, već se akumulira u sedimentima, što usporava njegov prirodni ciklus i može izazvati dugoročne poremećaje u vodenim ekosistemima. Ovi procesi imaju ozbiljne posledice po kvalitet vode, biodiverzitet i stabilnost ekosistema, pa održivo upravljanje fosforom zahteva racionalnu upotrebu đubriva i ponovnu upotrebu fosfora iz TOV.

Kalijum

Ciklus kalijuma karakteriše brzo kruženje između zemljišta, vode i biosfere. U prirodi se kalijum nalazi pre svega u mineralima kao što su ortoklas i muskovit, iz kojih se oslobađa tokom procesa raspadanja stena i ulazi u zemljište. U zemljištu se javlja u tri oblika: kao rastvorljivi K^+ , dostupan biljkama, kao K^+ vezan za čestice gline i kao fiksirani K^+ , u mineralima koji se oslobađa sporije. Biljke apsorbiraju rastvorljivi K^+ kroz koren i koriste za održavanje osmotske ravnoteže, aktivaciju enzima i fotosintezu. Nakon ulaska u biosferu, kalijum cirkuliše kroz lance ishrane i vraća se u zemljište razgradnjom organske materije. Za razliku od fosfora, kalijum se lako rastvara u vodi i kreće kroz vodene ekosisteme, a zbog ograničenog taloženja u sedimentima njegov ciklus je kraći i intenzivniji (Brady, 1990).

Kalijum je od ključnog značaja za održavanje plodnosti zemljišta i vitalnih funkcija biljaka. On reguliše vodni režim biljaka, učestvuje u sintezi proteina i doprinosi otpornosti useva na stresne uslove. Zbog svoje rastvorljivosti on se lako gubi ispiranjem, što ga čini posebno osetljivim na promene u načinu korišćenja zemljišta.

Prirodni ciklus kalijuma remeti se intenzivnom poljoprivredom i nepravilnim upravljanjem zemljišnim resursima. Biljke brzo iscrpljuju kalijum iz gornjih slojeva zemljišta, dok se njegov prirodni povrat odvija znatno sporije. U područjima gde nadoknada minerala kroz prirodne procese ili đubriva nije dovoljna, zemljište postaje osiromašeno, što direktno utiče na pad prinosa i smanjenu produktivnost. Pored toga, eksploatacija i prerada kalijumskih ruda, proizvodnja mineralnih đubriva i njihova intenzivna upotreba u poljoprivredi dovode do gubitka značajnih količina ovog elementa iz lokalnih ekosistema, čime se narušava prirodna ravnoteža između njegovog oslobađanja i akumulacije.

Međusobna zavisnost nutrijenata u zemljištu

Kruženje i interakcije nutrijenata kroz prirodu imaju ključnu ulogu u očuvanju produktivnosti i stabilnosti ekosistema. Tradicionalni principi, poput Libigovog (*Liebig*) zakona minimuma, ukazivali su da rast biljaka zavisi od nutrijenta koji je najmanje dostupan, dok je Mičerlihov (*Mitscherlich*) zakon međusobnog dejstva naglasio da efekti nutrijenata ne

deluju izolovano, već u zavisnosti od njihovih međusobnih odnosa i stepena zasićenja sistema. Povećanje količine jednog elementa neće imati potpun efekat ukoliko drugi ostane u deficitu, dok njihova sinergija omogućava maksimalnu produktivnost i stabilnost ekosistema. Presudnu ulogu ima odnos između mobilnih, imobilisanih i biljci dostupnih formi nutrijenata, jer od njihove dinamike zavisi brzina usvajanja i efikasnost kruženja u sistemu. Savremena istraživanja potvrđuju da ovi odnosi nisu linearni, već da međuzavisnosti između više elemenata oblikuju dinamiku kruženja nutrijenata, efikasnost bioloških procesa i adaptivne strategije biljaka (Ågren, 2012).

Međuzavisnost nutrijenata posebno se uočava u odnosu azota i fosfora. Azot omogućava sintezu proteina, enzima i hlorofila, dok fosfor ima centralnu ulogu u energetskom metabolizmu i izgradnji genetskog materijala. Njihova zajednička dostupnost određuje brzinu fotosinteze i akumulaciju biomase. U slatkovodnim ekosistemima fosfor je najčešće ograničavajući element, dok je u morskim ekosistemima to uglavnom azot. U poljoprivrednoj praksi, unošenje većih količina azota (preko 200-300 kg/ha godišnje) može privremeno povećati prinose, ali istovremeno ubrzava ispiranje fosfora u vodene tokove, što dovodi do eutrofikacije.

Važnu ulogu ima i odnos C/N , koji određuje brzinu mineralizacije i stepen u kome biljke mogu koristiti oslobođene hranljive materije. Visok sadržaj ugljenika usporava razgradnju i smanjuje biodostupnost azota, dok uravnotežen odnos obezbeđuje stabilnu mikrobnu aktivnost i efikasno kruženje nutrijenata. Kada je odnos C/N niži od optimalnog, dolazi do viška azota u obliku NH_3 , koji se lako gubi isparavanjem, što narušava nutritivnu ravnotežu i smanjuje efikasnost procesa razgradnje. U toj ravnoteži oblikuje se i raspodela između mobilnih i stabilnih frakcija organske materije, što direktno utiče na biodostupnost nutrijenata biljkama. Ova povezanost pokazuje da ciklusi ugljenika i azota funkcionišu u neraskidivoj interakciji i čine deo integrisane biogeohemijske mreže.

Kalijum, iako često u drugom planu, deluje kao regulator sistema. Njegova uloga u održavanju osmotske ravnoteže i aktivaciji enzima omogućava biljkama da efikasno koriste azot i fosfor. Nedostatak kalijuma ograničava sposobnost biljaka da pravilno koriste ostale nutrijente, čime se posredno destabilizuje nutritivni bilans ekosistema.

Antropogene aktivnosti dodatno komplikuju prirodnu međuzavisnost nutrijenata. Intenzivna upotreba mineralnih đubriva, emisije azotnih jedinjenja i ispuštanje otpadnih voda bogatih nutrijentima menjaju prirodne tokove, uzrokuju zakiseljavanje zemljišta, eutrofikaciju vodotokova i gubitak biodiverziteta. Na taj način narušava se ravnoteža između vezanih,

mobilnih i dostupnih oblika nutrijenata, što dugoročno smanjuje produktivnost agroekosistema i otpornost prirodnih sistema.

Zaključno, međuzavisnost nutrijenata pokazuje da ekosistemi ne funkcionišu kroz izolovane cikluse, već kroz dinamičnu mrežu povezanih procesa. Kada antropogene aktivnosti naruše te odnose, posledice se odražavaju u degradaciji resursa i poremećaju biogeohemijskih ciklusa. Primena principa CE u upravljanju organskim otpadom, posebno kroz kompostiranje, omogućava postepeno oslobađanje nutrijenata (Lardinois & van de Klundert, 1993). Razumevanje ovih odnosa od važnog je značaja jer upravo parametri poput odnosa C/N , uloge kalijuma i ravnoteže između mobilnih i biljci dostupnih formi nutrijenata čine osnovu za dalji razvoj modela za integrisano upravljanje organskim otpadom, što je glavni cilj ove disertacije.

2.2.3.2. Kruženje nutrijenata u cirkularnoj ekonomiji

Za razliku od linearnog sistema, u kome se značajne količine nutrijenata gube deponovanjem ili sagorevanjem, CE podstiče njihovu transformaciju kroz kompostiranje i AD. Na ovaj način obezbeđuje se povratak nutrijenata zemljištu, smanjuje njegova degradacija, smanjuje se pritisak na prirodne resurse i smanjuje zavisnost od veštačkih đubriva (Lardinois i van de Klundert, 1993; Nsimba, 2020). Efikasnost kruženja nutrijenata kroz CE ne zavisi samo od njihove hemijske forme već i od uslova sredine. Važni faktori su vlažnost, temperatura, pH zemljišta i mikrobiološka aktivnost, jer oni zajedno određuju intenzitet razgradnje organske materije, brzinu mineralizacije i stepen dostupnosti nutrijenata biljkama. Optimalne vrednosti ovih parametara omogućavaju efikasniji rad mikroorganizama, stabilnije formiranje komposta i digestata i dugoročnije zadržavanje nutrijenata u sistemu. Nasuprot tome, nepovoljni uslovi dovode do smanjenja količine dostupnih nutrijenata. Tako, prirodni uslovi postaju jednako važni kao i tehnološki procesi kompostiranja i AD, jer neposredno oblikuju tokove materije i utiču na stabilnost samog sistema. Kruženje nutrijenata kroz CE posmatra se kao niz povezanih bioloških i hemijskih procesa koji obuhvataju transformaciju organske materije od otpada do biljke, a razumevanje tih transformacija, od razgradnje tokom kompostiranja do ponovne ugradnje u biljna tkiva, omogućava praćenje materije i energije kroz ciklus kruženja. Povratak nutrijenata zemljištu u CE se vrši kroz dva osnovna proizvoda: kompost i digestat.

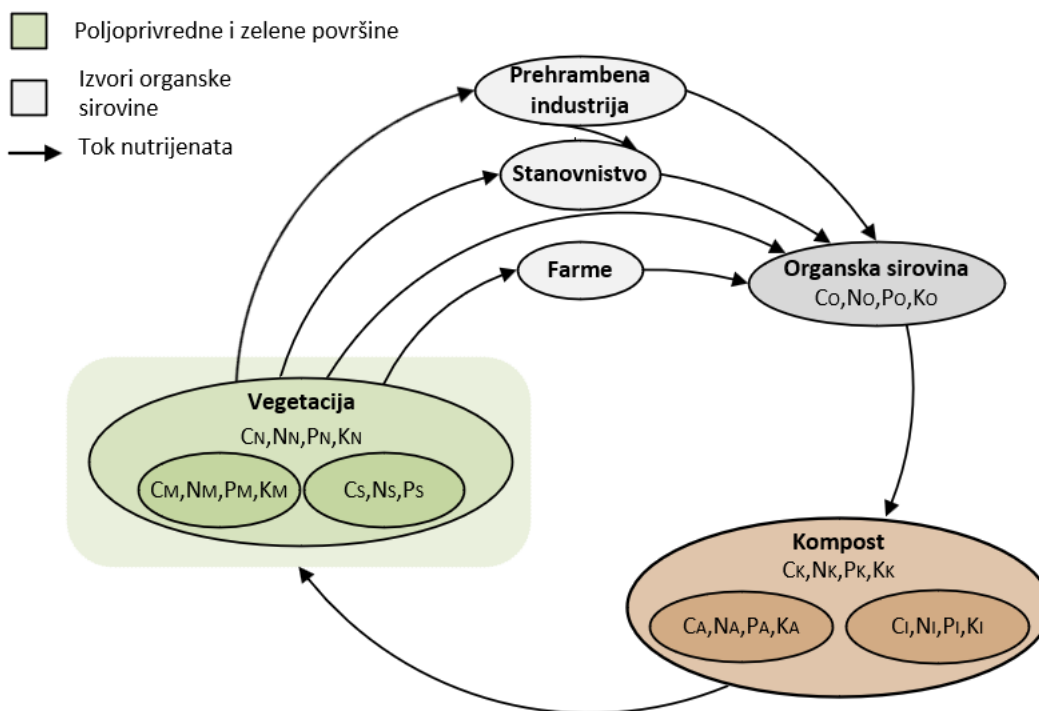
Na početku procesa kompostiranja organske sirovine sadrže elemente u organskim formama (C_o , N_o , P_o , K_o), kao što je prikazano na slici 2.7. Ugljenik, C_o , se nalazi u sastavu svih organskih jedinjenja. Azot, N_o , se nalazi u proteinima, aminokiselinama i urei.

Tok procesa transformacije nutrijenata ↓	Otpadna organska materija	Forme nutrijenata u "sirovjoj" smeši Co, No, Po, Ko	
	Kompost	Forme nutrijenata u kompostu C _K , N _K , P _K , K _K	
		Asimilabilne forme nutrijenata u kompostu C _A , N _A , P _A , K _A	Imobilisane forme nutrijenata u kompostu C _I , N _I , P _I , K _I
	Vegetacija	Forme nutrijenata u biljci C _N , P _N , N _N , K _N	
		Strukturne forme nutrijenata u biljci C _S , N _S , P _S	Mobilne forme nutrijenata u biljci C _M , P _M , N _M , K _M

Slika 2.7 Forme nutrijenata tokom procesa kompostiranja (autorska šema)

Fosfor, P_O , se nalazi u organskim fosfatima, nukleinskim kiselinama i fosfolipidima, dok je kalijum, K_O , prisutan u lako rastvorljivim solima kao što su KH_2PO_4 i K_2SO_4 .

Tokom tretmana ove forme nutrijenata prelaze u stabilnije oblike karakteristične za kompost (C_K , N_K , P_K , K_K). Ugljenik, C_K , se vezuje u huminske i fulvo kiseline. Azot, N_K , prelazi u mineralne oblike NH_4^+ i NO_3^- . Fosfor, P_K , se transformiše u ortofosfate, $H_2PO_4^-$ i HPO_4^{2-} , dok kalijum, K_K , ostaje u rastvorljivim solima poput K_2CO_3 . U ovoj fazi razlikuju se asimilabilne forme nutrijenata (C_A , N_A , P_A , K_A), koje su biljkama lako dostupne, i imobilisane forme (C_I , N_I , P_I , K_I), koje su vezane za organske materijale komposta i oslobađaju se postepeno tokom mineralizacije. Tokom povraćaja nutrijenata u biljni sistem, oni prelaze u forme prisutne u vegetaciji, označene kao C_N , N_N , P_N , K_N , koje se dalje razvrstavaju na strukturne (C_S , N_S , P_S) i mobilne (C_M , N_M , P_M , K_M) oblike. Strukturni oblici integrišu se u stabilna biljna tkiva poput ćelijskih zidova, proteina i nukleinskih kiselina, dok mobilni oblici obezbeđuju energiju i gradivne molekule za metaboličke procese, fotosintezu i rast novih ćelija. Ova podela omogućava biljkama da balansiraju između stabilnog rasta i prilagođavanja promenama u okruženju koristeći raspoložive resurse. Važno je napomenuti da kalijum, iako bitan za biljni metabolizam, ne ulazi u strukturne komponente i tretira se isključivo kao mobilni element.



Slika 2.8 Kruženje nutrijenata kroz tokove CE (autorska šema)

Kada se radi o procesu AD, ugljenik se pojavljuje u obliku rastvorljivih organskih jedinjenja i gasovitih produkata (CO_2 i CH_4), pri čemu se CH_4 koristi kao izvor energije, dok deo stabilne organske materije ostaje u digestatu. Azot prelazi u formu NH_4^+ , fosfor u $H_2PO_4^-$ i HPO_4^{2-} , a kalijum u jone K^+ koji se zadržavaju u tečnoj frakciji digestata. Za razliku od kompostiranja, gde dominiraju stabilne huminske i fulvo frakcije koje sadrže imobilisane oblike nutrijenata, u digestatu preovlađuju mineralne i rastvorljive komponente koje predstavljaju asimilabilne forme (C_A , N_A , P_A , K_A). Ovi oblici su biljkama odmah dostupni nakon primene digestata na zemljištu. Manji deo nutrijenata ostaje vezan u organskoj materiji digestata i čini imobilisane frakcije (C_I , N_I , P_I , K_I), koje se nalaze u stabilnim kompleksima poput nepotpuno razgrađenih polisaharida, aminokiselina, nukleinskih kiselina i organskih fosfata, a vremenom se postepeno mineralizuju.

Dostupnost nutrijenata biljkama ne zavisi samo od njihove hemijske forme, već i od uslova sredine, pre svega od pH vrednosti zemljišta. Tako, fosfor pri pH manjem od 6 formira nerastvorljive komplekse sa aluminijumom i gvožđem, dok pri pH većem od 8 prelazi u teško pristupačan kalcijum fosfat. Optimalna pH vrednost za njegovo usvajanje korenovim sistemom je u opsegu od 6 do 7. Azot se u kiselim uslovima stabilizuje u formi NH_4^+ , dok u neutralnim i alkalnim uslovima se nalazi u obliku nitrata. Kalijum je generalno lako dostupan, ali mu pristupačnost može biti smanjena prisustvom drugih katjona u zemljištu. Ove razlike jasno

pokazuju da pH vrednost i jonske interakcije neposredno određuju efikasnost usvajanja nutrijenata i time utiču na rast i produktivnost biljaka.

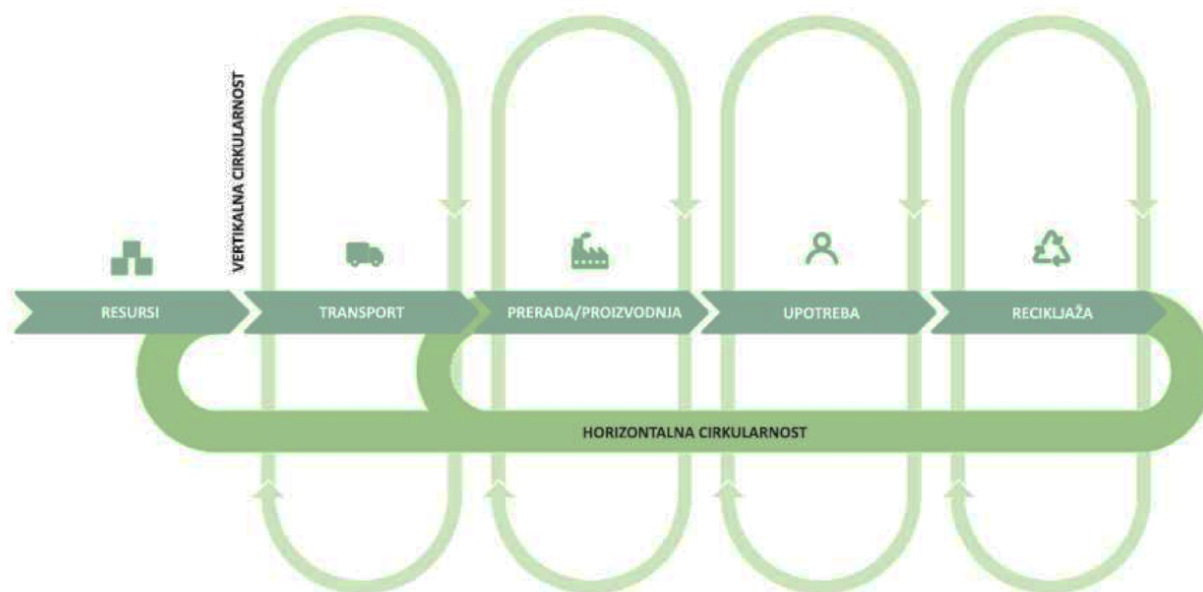
Modeli poput Agrenovog omogućavaju kvantitativnu analizu tokova i međuzavisnosti ugljenika, azota i fosfora u biljci, s ciljem optimizacije unosa nutrijenata i povećanja efikasnosti upotrebe komposta. Iako ne obuhvata kalijum, ovaj model pruža vredne uvide u dinamiku C-*N-P* sistema, kao i u ograničenja koja proističu iz njihovih međusobnih odnosa. Na taj način, procesi kompostiranja i AD zajedno omogućavaju zatvaranje osnovnih materijalnih i energetskih tokova u okviru modela kruženja nutrijenata.

Slika 2.8 ilustruje tok transformacije nutrijenata kroz zatvorenu petlju CE, počevši od sirove organske materije sakupljene iz komunalnih delatnosti, poljoprivrede i prehrambene industrije, kroz procese kompostiranja i formiranja stabilnih i asimilabilnih oblika, sve do njihovog usvajanja korenovim sistemom i raspodele u biljkama koje rastu na površinama gde se kompost primenjuje. Na taj način jasno se definiše povratna veza između organske materije, njenog tretmana i biljne proizvodnje, čime se materijalni ciklus zatvara, a nutrijenti kontinuirano kruže unutar posmatranog sistema.

2.3. OCENA EFIKASNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE

Savremeni razvoj CE zahteva prelazak sa tradicionalnog linearnog modela, u kome se resursi eksploatišu, koriste i odbacuju, na održiviji cirkularni pristup, gde je naglasak na produženju životnog veka materijala i smanjenju otpada. Ova tranzicija postaje ključna za unapređenje efikasnosti korišćenja resursa i očuvanje životne sredine, što je prepoznato na globalnom nivou kroz brojne strategije OR. U ovom kontekstu, cirkularnost označava sposobnost ekonomskog sistema da materijale, proizvode i resurse zadrži u upotrebi što je duže moguće. Vrednost tih resursa obnavlja se kroz procese ponovne upotrebe, popravke i reciklaže, uz minimalno generisanje otpada i gubitaka. Na taj način smanjuje se potreba za novim resursima i umanjuje negativan uticaj na životnu sredinu. Da bi se pratio napredak u tranziciji sa linearnog na cirkularni model, razvijeni su različiti indikatori i indeksi kojima se meri ostvarenje ekonomskih, ekoloških i društvenih aspekata CE.

Efikasnost korišćenja resursa, količina generisanog otpada, stepen zatvaranja materijalnih i energetskih tokova, kao i njihov uticaj na društvo i životnu sredinu postaju objektivno merljivi parametri. Na osnovu ovih pokazatelja moguće je prepoznati ključne izazove, usmeravati politike i kontinuirano unapređivati primenu CE na svim nivoima.



Slika 2.9 Prikaz horizontalnih i vertikalnih tokova u cirkularnim lancima vrednosti (Glušćević, Kaluđerović, 2019)

Posebna pažnja posvećuje se lancima vrednosti, koji se u literaturi prepoznaju kao jedan od ključnih elemenata ekonomskog sistema. Oni predstavljaju fizičke i vremenske putanje kroz koje se stvara i zadržava dodatna vrednost materijala, proizvoda ili usluga. U linearnom modelu, oni se prikazuju kao pravolinijska putanja, od ekstrakcije sirovina do trajnog zbrinjavanja proizvoda. UCE lanci vrednosti oblikovani su tako da materijali i proizvodi ostaju u upotrebi duže vreme, kroz procese kao što su ponovna upotreba, popravka i reciklaža. Na taj način vrednost se zadržava tokom više ciklusa, a otpad se značajno smanjuje. Važno je naglasiti da se cirkularni lanci vrednosti ne svode samo na reciklažu na kraju životnog ciklusa proizvoda.

Otpad može nastajati u svim fazama lanca vrednosti, a suština cirkularnog pristupa ogleda se u njegovom vraćanju u proizvodni proces kad god je to moguće. Zbog toga se razlikuju horizontalna i vertikalna cirkularnost (slika 2.9). Horizontalna cirkularnost podrazumeva razmenu resursa i materijala između različitih sektora ili preduzeća (industrijska simbioza), dok vertikalna cirkularnost označava njihovo zadržavanje i ponovnu upotrebu unutar istog proizvoda, procesa ili lanca vrednosti. Kako bi se pratila kretanja resursa kroz lance vrednosti i merila efikasnost CE, razvijene su brojne metodologije koje omogućavaju poređenje stepena cirkularnosti između različitih zemalja, sektora i industrijskih grana, ali i identifikaciju oblasti koje zahtevaju dodatno unapređenje (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Pouzdana merenja tokova materijala i energije, njihovog obnavljanja i zadržavanja unutar sistema prepoznata su kao temelj za sprovođenje analiza. Indikatori koji se najčešće koriste uključuju stopu reciklaže, količinu generisanog otpada po glavi stanovnika, udeo

sekundarnih sirovina u ukupnoj potrošnji resursa, kao i stepen materijalne i energetske cirkularnosti (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Njihov razvoj zasniva se na detaljnom proučavanju postojećih metodologija i standarda, što omogućava kreiranje novih alata za procenu cirkularnosti, prilagođenih specifičnostima upravljanja organskim otpadom.

U nastavku poglavlja su prikazani najznačajniji indikatori koji se koriste u evropskoj i međunarodnoj praksi, dok su indikatori, prilagođeni IUOO, razvijeni u okviru ove disertacije. Oni obuhvataju stepen uključivanja dostupnih organskih sirovina u sistem, količinu curenja materije i energije i cirkularnost materije i energije. Razvijeni indikatori omogućavaju primenu principa CE i objektivnu procenu efikasnosti modela za IUOO na nivou posmatrane teritorije u eksperimentalnom delu istraživanja.

2.3.1. Opšti pregled indikatora cirkularne ekonomije

Indikatori CE služe za kvantifikaciju učinka cirkularnih praksi i identifikaciju oblasti koje zahtevaju unapređenje. Njihov značaj ogleda se u mogućnosti da se precizno sagleda kako se resursi koriste, kako se smanjuje otpad i u kojoj meri se podstiče obnova prirodnih sistema i razvoj održivih poslovnih modela.

Prema dimenzijama analize, indikatori se najčešće grupišu na ekonomske, ekološke, društvene i operativne. Ekonomski pokazatelji obuhvataju udeo recikliranih materijala, efikasnost upotrebe resursa, trajanje proizvoda i troškove povezane s cirkularnim rešenjima. Ekološki se odnose na emisije, korišćenje sekundarnih sirovina i očuvanje ekosistema. Društveni pokrivaju aspekte poput obrazovanja zaposlenih, saradnje sa partnerima i prihvatanja cirkularnih praksi među potrošačima. Operativni se vezuju za unutrašnje procese, kao što su dizajn proizvoda za duži životni vek, cirkularne prakse nabavke, digitalni sistemi za praćenje resursa i razvoj tehnoloških inovacija.

Jedan od najpoznatijih okvira je *Circulytics*, razvijen od strane fondacije Elen Mekartur (Ellen MacArthur Foundation, 2023), koji integriše ove dimenzije kroz procenu strategije, inovacija, kapaciteta i uticaja na prirodu. Indikatori cirkularnosti materijala i upravljanja otpadom ukazuju na efikasnost resursnih tokova, dok indikatori inovacija i regeneracije ocenjuju doprinos preduzeća razvoju novih tehnologija i obnovi ekološke ravnoteže.

Najvažniji indikatori ovog okvira prikazani su u tabeli 9.3, gde su sistematizovani prema tematskim oblastima (strategija, inovacije, ljudi i veštine, operacije, spoljni angažman, ishodi i regeneracija prirode), metodologiji merenja, povezanosti sa ciljevima OR, KPI vrednostima, nivoima primene i tipovima uticaja. Ovakvi analitički modeli pomažu

organizacijama da identifikuju oblasti za optimizaciju i usklade se sa međunarodnim inicijativama. Međutim, njihova primena pokazuje i ograničenja, posebno kada se prenose na lokalne i regionalne kontekste. Na primer, istraživanja u Malopoljskom regionu u Poljskoj ukazuju na potrebu za razvojem indikatora koji odražavaju izazove poput niske upotrebe sekundarnih sirovina i slabog inovacionog kapaciteta (Avdiushchenko & Zajac, 2019).

Indikatori se mogu primenjivati na više nivoa. Na mikro nivou analiziraju se performanse organizacija, kroz indikatore kao što su ponovna upotreba i smanjenje količine otpada. Mezo nivo obuhvata industrijske klastere, regionalne strategije i saradnju među sektorima, dok makro nivo obuhvata nacionalne i međunarodne tokove u tranziciji ka cirkularnim modelima (Sánchez-Ortiz, 2020). Višeslojnost primene omogućava dublje analize i jasnije prepoznavanje oblasti koje zahtevaju unapređenje.

Ipak, postojeća metodologija često zanemaruje aspekte životnog ciklusa proizvoda i veze između poslovnih aktivnosti i očuvanja ekosistema. Zbog toga je neophodan razvoj naprednijih okvira koji uključuju lokalne specifičnosti, inovacije i makroekonomske faktore. Takav pristup omogućava preciznije praćenje napretka i oblikovanje strategija usklađenih sa lokalnim potrebama i globalnim ciljevima OR.

2.3.2. Indikatori cirkularne ekonomije u Evropskoj Uniji

EU je, putem Eurostata, razvila okvir za praćenje napretka CE u državama članicama, zasnovan na 11 indikatora. Ovi indikatori omogućavaju analizu ključnih aspekata CE, uključujući korišćenje resursa, upravljanje otpadom, upotrebu sekundarnih sirovina i procenu ekonomskih i društvenih efekata. Na osnovu njih se oblikuju strategije koje podržavaju prelazak ka održivijem ekonomskom modelu. Prema podacima Evropske komisije (Eurostat, 2018), indikatori su grupisani u pet kategorija: proizvodnja i potrošnja, upravljanje otpadom, sekundarne sirovine, konkurentnost i inovacije i globalna održivost i otpornost. Ove kategorije pokrivaju sve faze CE, od ulaska sirovina u proizvodni proces do uticaja na društvo i životnu sredinu. Detaljan pregled ovih indikatora, zajedno sa njihovim opisima i ciljevima, predstavljen je u tabeli 9.4. u prilogu.

Kategorija *proizvodnja i potrošnja* obuhvata potrošnju materijala, zelenu javnu nabavku i generisanje otpada. Potrošnja materijala meri količinu sirovina koje ulaze u ekonomiju, zelena javna nabavka prikazuje udeo sredstava uloženih u održive proizvode i usluge, dok se generisanje otpada odnosi na generisane količine otpada tokom proizvodnje i potrošnje.

U oblasti *upravljanja otpadom*, indikatori uključuju ukupne stope reciklaže i reciklažu specifičnih tokova otpada. Prva pokazuje udeo recikliranog otpada u ukupnoj količini, dok druga prati reciklažu elektronskog otpada, plastike i biootpada. Ovi pokazatelji pomažu u prepoznavanju slabosti i mogućnosti za unapređenje sistema reciklaže.

Indikatori vezani za *sekundarne sirovine* odnose se na udeo recikliranih materijala u ukupnoj potrošnji i tokove trgovine sekundarnim sirovinama. Cilj je povećanje upotrebe recikliranih materijala i smanjenje zavisnosti od primarnih resursa.

U okviru *konkurentnosti i inovacija*, analiziraju se privatne investicije, broj zaposlenih u relevantnim sektorima i broj patenata. Ovi podaci pokazuju u kojoj meri CE doprinosi rastu i razvoju novih tehnologija.

Kategorija *globalne održivosti i otpornosti* meri doprinos CE smanjenju emisija gasova i sigurnosti snabdevanja sirovinama. Fokus je na smanjenju zavisnosti EU od uvoza kroz lokalne tokove resursa.

Ovi indikatori služe za praćenje napretka, identifikaciju prepreka i definisanje mera koje podstiču razvoj. Na osnovu prikupljenih podataka, strategije se usmeravaju ka ciljevima klimatske neutralnosti i efikasnijem korišćenju resursa (European Commission, 2023).

2.3.3. Indeksi uspešnosti cirkularne ekonomije

Indeksi CE predstavljaju napredne metrike koje objedinjavanjem više indikatora omogućavaju evaluaciju performansi i poređenje na različitim nivoima, od sektora i regiona do pojedinačnih organizacija. Kvantifikovanjem ključnih aspekata, kao što su efikasnost u korišćenju resursa, smanjenje emisija, rast reciklaže i produženje trajnosti proizvoda, ovi indeksi pružaju pouzdanu osnovu za praćenje napretka u primeni principa CE, prepoznavanje slabih tačaka i donošenje strateških odluka (Elia, 2017).

Hijerarhijski indeks otpada (Waste Hierarchy Index - WHI) razvijen je za procenu kvaliteta upravljanja otpadom u skladu s osnovnim principima cirkularnosti. Integracijom različitih praksi: od prevencije i ponovne upotrebe, preko reciklaže, do spaljivanja i deponovanja. WHI rangira aktivnosti na skali od -100% do +100%. Pozitivne vrednosti ukazuju na visok stepen usklađenosti sa principima CE, dok negativne vrednosti pokazuju dominaciju praksi koje odudaraju od održivih ciljeva (Pires & Martinho, 2019). Za razliku od tradicionalnih pokazatelja kao što je stopa reciklaže, WHI omogućava uvid u širu sliku upravljanja svim tokovima otpada. Njegova primena donosi konkretne smernice za

unapređenje sistema, bilo na lokalnom ili nacionalnom nivou, dok fleksibilna metodologija omogućava prilagođavanje različitim ekonomskim uslovima (Pires, 2019).

Indeks konkurentnosti u CE (Circular Economy Index - CEI) razvijen je kao alat za vrednovanje napretka zemalja u sprovođenju CE. CEI kombinuje ekološke, ekonomske i društvene aspekte kroz tri subindeksa: upravljanje resursima (SRM), društveno ponašanje (SB) i poslovne operacije (BO). SRM meri efikasnost upotrebe resursa preko pokazatelja kao što su produktivnost materijala i reciklažne stope. SB ispituje učestvovanje građana u praksama poput popravki i alternativnih modela potrošnje, dok BO beleži aktivnosti preduzeća usmerene na produženje životnog ciklusa proizvoda i korišćenje otpada kao sirovine. CEI se izračunava metodom analize omota podataka (DEA), koja omogućava uporedivost normalizovanih vrednosti. Analiza rezultata u Evropi pokazuje razlike među zemljama: Finska i Švedska prednjače, dok Rumunija i Bugarska zaostaju, pre svega zbog nedovoljno razvijenih kapaciteta u ključnim oblastima (Mitrović & Veselinov, 2018).

Ovi indeksi nisu samo instrumenti merenja, već i alati za oblikovanje strategija i ciljeva u prelasku ka održivim modelima. Njihovo uvođenje u planiranje i analizu omogućava donosiocima odluka i organizacijama da sagledaju performanse u celini, identifikuju prioritetne tačke za unapređenje i usmere strategije u pravcu veće cirkularnosti. Na taj način, doprinosi se donošenju informisanih i dugoročno održivih odluka.

2.3.4. Indikatori cirkularne ekonomije relevantni za upravljanje organskim otpadom

Efikasno upravljanje organskim otpadom ima ključnu ulogu u tranziciji ka CE, jer smanjuje negativne uticaje na životnu sredinu i omogućava ponovno korišćenje resursa. Organski otpad se može preraditi u kompost, biogoriva i bioprodukte (Velasco-Muñoz, 2021), a posebno definisani indikatori kvantifikuju učinke ovih procesa i pružaju osnovu za unapređenje sistema i donošenje odluka. Najčešće obuhvataju smanjenje emisija GHG, povećanje stope reciklaže i obnavljanje bioloških resursa. Među najznačajnijim indikatorima ističu se stopa preusmeravanja otpada sa deponija, koja pokazuje u kojoj meri se organski otpad koristi u procesima kompostiranja i AD (Mujtaba, 2023), efikasnost kompostiranja, koja meri brzinu i kvalitet transformacije u stabilan materijal bogat hranljivim materijama (Velasco-Muñoz, 2021), kao i energetska efikasnost digestije, izražena kroz količinu proizvedenog biogasa. Ekonomska održivost procenjuje se analizom troškova i prihoda, uključujući prodaju komposta i energije, čime se podržava planiranje dugoročnih strategija. Indikatori imaju i društvenu dimenziju, jer ukazuju na nivo uključenosti građana i lokalnih zajednica u odvajanju



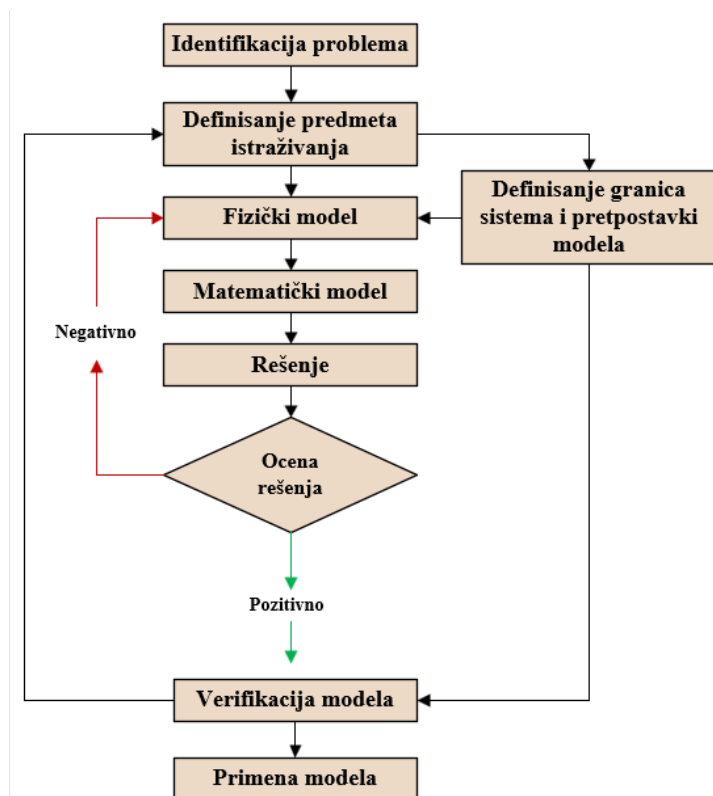
otpada i saradnji u sistemima upravljanja. Informisani potrošači i jednostavni mehanizmi odvajanja povećavaju učešće, dok tehnološke inovacije, poput biorafinerija koje koriste lignoceluloznu biomasu, povezuju poljoprivredni i urbani otpad i otvaraju prostor za proizvodnju biogoriva i bioplastike (Mujtaba, 2023).

Zaključno, iako postojeći indikatori pružaju vredne uvide, potrebno je razviti integrisane pokazatelje koji istovremeno prate tokove nutrijenata i energije (Velasco-Muñoz, 2021). Takav pristup omogućio bi sveobuhvatniju procenu sistema, jačanje uloge upravljanja organskim otpadom u CE i doprinos globalnim ciljevima OR.

3. MODEL INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM SA ASPEKTA CIRKULARNE EKONOMIJE

Upravljanje organskim otpadom danas se sve intenzivnije razvija u skladu sa načelima održivog razvoja. Kao odgovor na ove izazove, savremeni koncept CE prepoznaje se kao sredstvo za prelazak sa linearnog na zatvoreni i samoodrživi sistem upravljanja resursima. U tom kontekstu, predmet ove disertacije je analiza potencijala upravljanja organskim otpadom kroz principe CE, sa posebnim osvrtom na specifičnosti i mogućnosti primene u Republici Srbiji.

Za efikasnije uspostavljanje sistema IUOO razvijen je algoritam, prikazan na slici 3.1, koji funkcioniše kao grafički prikaz procesa planiranja i donošenja odluka, olakšavajući razvoj modela u skladu s principima CE. Algoritam započinje identifikacijom problema, nakon čega definisanje predmeta istraživanja daje okvir za razumevanje oblasti i aspekata koje model obuhvata, dok formiranje fizičkog modela omogućava da se taj koncept pretvori u konkretan fizički model, koji predstavlja osnovu za dalji razvoj matematičkog modela.



Slika 3.1 Algoritam za razvoj modela integralnog upravljanja organskim otpadom primenom principa CE (autorska šema)

Matematički model se razvija sa ciljem da kvantitativno prikaže karakteristike i ponašanje sistema upravljanja organskim otpadom. Definisanje granica modela obuhvata određivanje geografskog, procesnog i vremenskog okvira sistema IUOO, čime se jasno utvrđuje obim analize i sprečava njeno širenje van relevantnih procesa. Pretpostavke modela služe da se procesi unutar sistema pojednostave i učine pogodnim za analizu i simulaciju, što omogućava lakšu interpretaciju i preciznije rezultate. Rešenje dobijeno matematičkim modelom

se zatim podvrgava evaluaciji, a ako rezultat nije zadovoljavajući, koristi se za unapređenje i kalibraciju modela. Nakon uspešne evaluacije sledi verifikacija, kojom se potvrđuje pouzdanost modela pre njegove primene u realnim uslovima. Istraživanje polazi od pretpostavke da se organska materija sa posmatrane teritorije može uključiti u zatvoreni sistem koji teži cirkularnosti tokova materije i energije.

Model IUOO je zasnovan na principima prirodnog kruženja materije, sa ciljem da se smanji nastajanje otpada i gubitak energije, uz ponovnu upotrebu i optimalno iskorišćenje raspoloživih resursa. Jedan od doprinosa ovog rada jeste razvoj fizičkog modela, koji prikazuje tok materije i energije unutar predloženog zatvorenog sistema. Model jasno prikazuje strukturu i međusobne veze između pojedinačnih komponenti: izvora otpada, procesa obrade i krajnjih korisnika proizvoda tretmana. Na taj način olakšava se razumevanje kompleksnih interakcija u okviru sistema, kao i identifikacija ključnih tačaka za optimizaciju resursnih tokova. Kao dodatna vrednost, model omogućava prepoznavanje kritičnih mesta gubitaka i oblasti sa neravnomernim opterećenjem, čime se stvaraju pretpostavke za unapređenje efikasnosti i zatvaranje materijalne petlje.

Paralelno sa fizičkim modelom, razvijen je matematički model za kvantitativnu simulaciju kretanja i obrade različitih vrsta organskog otpada. Na osnovu ulaznih podataka o količinama i hemijskom sastavu dostupnih sirovina, model optimizuje sastav sirovinske mešavine u cilju maksimizacije prinosa biogasa kao i postizanja zadovoljavajućeg kvaliteta komposta i digestata. Takođe, model omogućava i procenu količine proizvedene energije, potrebne za funkcionisanje sistema (tretman, transport, prerada), kao i količine nutrijenata koje se mogu vratiti u sistem putem komposta i digestata. Na taj način ne samo da se omogućava zatvaranje tokova materije i energije, već se mogu dimenzionisati tehnički kapaciteti sistema u skladu sa raspoloživim resursima.

Da bi se ocenila efikasnost predloženog sistema, definisani su specifični indikatori koji mere stepen uključivanja organskih sirovina u tokove CE, curenje materije i energije iz sistema, kao i cirkularnost materije i energije unutar sistema. Dodatno, postavljeni su kriterijumi za minimalne vrednosti ovih indikatora koji služe kao merni standardi za ocenjivanje uspešnosti primene principa CE u praksi.

Konačno, model se može primeniti u praktičnim uslovima na konkretnom geografskom području. Na osnovu identifikovanih i kvantifikovanih izvora organskog otpada, moguće je definisati tokove materije i energije, prilagoditi sastav sirovinske mešavine, odrediti potrebne kapacitete za tretman i uspostaviti funkcionalnu zatvorenu petlju. Ovakvom primenom

omogućava se kontinuirano praćenje performansi sistema, merenje efikasnosti zatvaranja tokova i ocena stepena primene principa CE.

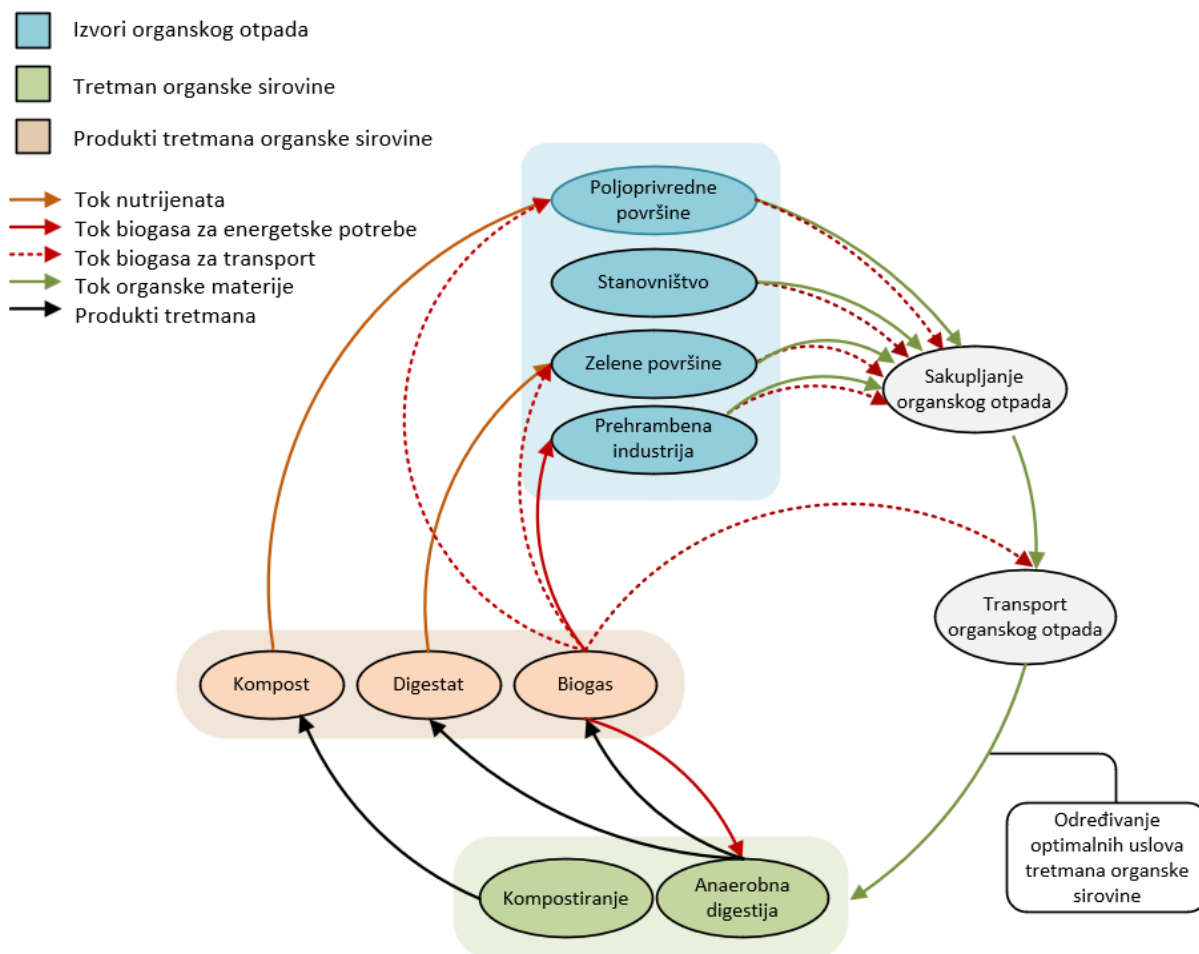
Na taj način, integracijom fizičkog i matematičkog modela uz sistem precizno definisanih indikatora, ovo istraživanje pruža sveobuhvatan okvir za razumevanje, primenu i evaluaciju održivog upravljanja organskim otpadom, usklađenog sa savremenim zahtevima za zaštitu životne sredine i racionalno korišćenje resursa.

3.1. FIZIČKI MODEL INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM

Algoritam prikazan na slici 3.1 prikazuje sled logičkih koraka koji počinju definisanjem predmeta istraživanja, a zatim obuhvataju formiranje fizičkog modela, razvoj matematičkog modela i uspostavljanje sistema indikatora. Fizički model za IUOO predstavlja prvi operativni korak za kvantitativno modelovanje i analizu sistema. Njegova svrha je da prikaže tokove materije i energije unutar zatvorene petlje i omogući identifikaciju ključnih tačaka na kojima se ostvaruje integracija organskog otpada u zatvorenu petlju, čime se obezbeđuje racionalno korišćenje resursa i smanjenje gubitaka. Model je zasnovan na definisanim pretpostavkama koje određuju okvir njegove primene i uslove funkcionisanja.

Model obuhvata tri glavna izvora organskog otpada: poljoprivredu, prehrambenu industriju i komunalne delatnosti. U sektoru poljoprivrede analizirani su otpadni tokovi nastali tokom žetve žitarica (pšenica, kukuruz, ječam, raž, tritikale), rezidbe voćaka i stočarske proizvodnje. Prehrambena industrija obuhvata tokove iz mlecarskog, uljarskog, mesno-prerađivačkog i konditorskog sektora, dok komunalne delatnosti uključuju biorazgradivi komunalni otpad, mulj iz postrojenja za TOV i otpad sa javnih zelenih površina.

Nakon identifikacije i kvantifikacije izvora, otpad se prikuplja i transportuje do postrojenja za biološki tretman, gde prolazi kroz AD i kompostiranje. U okviru formirane petlje biogas dobijen AD koristi se za zadovoljenje energetske potrebe postrojenja i transporta (organskog otpada, komposta i digestata), čime se zatvara energetska deo petlje. Kompost i digestat vraćaju se na zemljište, čime se zatvara materijalni deo petlje kroz povraćaj nutrijenata (C , N , P , K) i unapređuje plodnost zemljišta. Kompost i digestat primenjuju se na površinama sa kojih je organska materija prvobitno prikupljena, čime se omogućava obnavljanje zemljišta i ponovni rast biomase. Organska sirovina koja se na taj način ponovo generiše ulazi u sledeći ciklus kroz poljoprivrednu proizvodnju, prehrambenu industriju i svakodnevne komunalne aktivnosti, čime se petlja prirodno vraća na početak.



Slika 3.2 Vizualizacija fizičkog modela za IUOO primenom principa CE i osnovnih relacija u njemu (autorska šema)

Šema fizičkog modela, prikazana na slici 3.2, ilustruje međusobne funkcionalne veze između pojedinačnih komponenti sistema, od izvora otpada i procesa obrade do izlaznih proizvoda i njihovog povratka u ciklus. Na osnovu analize bilansa materijalnih i energetske tokova kvantifikuje se stepen uključenja organske materije u sistem. Količine materijala koje nije moguće obraditi tretmanom predstavljaju funkcionalne gubitke, odnosno „curenja“ iz sistema, i ukazuju na potencijal za dodatnu optimizaciju modela i povećanje ukupne cirkularnosti. Na taj način zatvorena petlja funkcioniše kao dinamičan sistem u kojem se materija i energija neprekidno transformišu i vraćaju u materijalne i energetske tokove. Organski otpad prikupljen iz komunalnih, industrijskih i poljoprivrednih izvora preradom se pretvara u korisne proizvode, dok se energija proizvedena u sistemu koristi za njegovo samoodrživo funkcionisanje. Ovim se ostvaruje potpuna integracija materijalnih i energetske tokova u skladu sa principima CE i postavlja osnova za razvoj modela koji može biti primenjen i u drugim lokalnim zajednicama.

Pretpostavke u okviru modela IUOO

Svaki model se zasniva na pretpostavkama koje definišu njegova ograničenja i mogućnosti, omogućavajući predstavljanje realnih procesa u uprošćenom obliku radi efikasne analize i simulacije. Iako olakšavaju analizu, ove pretpostavke nameću ograničenja koja je neophodno uzeti u obzir pri primeni modela u realnim uslovima.

Opšte pretpostavke modela IUOO čine njegov metodološki okvir i obezbeđuju primenljivost nezavisno od lokalnih specifičnosti. One definišu ključne aspekte sistema: izvore otpada, tretman, transport i logistiku otpada i proizvoda tretmana energetske podržanih biogasom, održivost sistema i kvalitet krajnjih proizvoda u skladu sa principima CE. U nastavku su prikazane opšte pretpostavke modela, raspoređene prema glavnim fazama upravljanja otpadom, od generisanja do finalne valorizacije.

Izvori organskog otpada (Pretpostavka 1): Izvori organskog otpada obuhvataju tri glavne kategorije: komunalne aktivnosti, poljoprivredu i industriju. Otpad iz komunalnih aktivnosti obuhvata biorazgradivi deo komunalnog otpada iz domaćinstava, parkovski otpad i mulj iz sistema za TOV. U okviru poljoprivrede, organski otpad nastaje u stočarstvu (ekskrementi iz uzgoja goveda, svinja, ovaca i živine), ratarstvu (žetveni ostaci žitarica kao što su pšenica, ječam, kukuruz, raž, tritikale i ovas, kao i uljarica poput suncokreta, uljane repice i soje, te šećerne repe i duvana) i voćarstvu (biljna masa dobijena rezidbom jabuka, krušaka, šljiva, trešanja, višanja, oraha, lešnika, breskvi, kajsija, nektarina, malina i kupina). Industrijski izvori, pre svega prehrambena industrija, obuhvataju otpad iz različitih sektora: mlinsko-pekerskog i konditorskog (otpadno brašno, ostaci testa i šećernih masa), mlekerskog (surutka i drugi nusproizvodi), mesne industrije (neiskorišćeni delovi životinjskog porekla), proizvodnje alkoholnih pića i piva (pivski trop i talog iz fermentacionih sudova), prerade voća i povrća (kore, semenke, pulpa i ostaci nakon ceđenja i kuvanja) i riboprerađivačkog sektora.

Efikasnost razdvajanja otpada (Pretpostavka 2): Pretpostavlja se da domaćinstva i industrijski subjekti pravilno izdvajaju organski otpad na izvoru.

Karakteristike i dostupnost otpada (Pretpostavka 3): Pretpostavlja se da je dostupnost otpada konstantna tokom cele godine i da njegov sastav odgovara prosečnim vrednostima iz literature, bez značajnih sezonskih oscilacija.

Centralizacija tretmana (Pretpostavka 4): Biološki tretmani otpada, AD i kompostiranje, sprovode se na jednoj lokaciji radi smanjenja logističkih troškova. Lokacija

obuhvata postrojenje za AD, prostor za kompostiranje, skladištenje proizvoda tretmana i prateću infrastrukturu, a bira se u blizini glavnih izvora otpada radi optimizacije transporta.

Proces AD (Pretpostavka 5): Digestija se sprovodi u termofilnom režimu na temperaturi od najmanje 60°C, sa hidrauličkim vremenom zadržavanja od 14 dana. Digestori su gasno nepropusni, termički izolovani i opremljeni sistemom za zagrevanje.

Proces kompostiranja (Pretpostavka 6): Kompostiranje se sprovodi na otvorenom, pod uticajem spoljašnjih uslova, uz povremeno okretanje radi obezbeđivanja aeracije i ujednačavanja materijala.

Efikasnost razgradnje (Pretpostavka 7): Tokom AD, pretpostavlja se da se 60% ukupne organske materije razlaže i pretvara u biogas, dok preostalih 40% ostaje u digestatu u obliku nerazgrađene organske materije i drugih komponenti. Biogas se, u skladu s tipičnim sastavom, sastoji od 60% CH_4 i 40% CO_2 , pri čemu se ostali gasovi zanemaruju u ovom proračunu. Na osnovu toga, 36% ukupne organske materije prelazi u CH_4 , a 24% u CO_2 .

Transport i logistika organske materije energetski podržani biogasom (Pretpostavka 8): Energetski zahtevi za transport otpada, digestata i komposta pokrivaju se biogasom proizvedenim u procesu AD. Sistem transporta funkcioniše stabilno i usklađeno sa radom postrojenja, čime se obezbeđuje kontinuitet i efikasnost logističkog lanca.

Samoodrživost sistema (Pretpostavka 9): Sve energetske potrebe sistema, uključujući proces AD i transport, zadovoljavaju se isključivo biogasom dobijenim u AD, bez angažovanja spoljašnjih izvora energije.

Održavanje sistema (Pretpostavka 10): Planirano održavanje opreme, digestora i transportnih vozila vrši se bez značajnih prekida u radu postrojenja.

Kvalitet proizvoda (Pretpostavka 11): Dobijeni kompost ispunjava zakonske i ekološke uslove za primenu u poljoprivredi i na javnim površinama. Prema Pravilniku, klasifikovan je kao organski oplemenjivač, pri čemu sadržaj ukupnog azota, fosfora i kalijuma mora biti najmanje 1% za svaku komponentu.

Zaključno, opšte pretpostavke definišu konceptualni okvir modela nezavisan od lokalnih uslova. Za njegovu primenu na primeru Grada Niša potrebno je definisati specifične pretpostavke koje odražavaju lokalne uslove, a koje će biti prikazane u studiji slučaja.

3.2. MATEMATIČKI MODEL INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM

Matematički model IUOO predstavlja formalizovan prikaz realnog sistema putem matematičkih izraza, funkcija i parametara, omogućavajući kvantifikaciju i analizu odnosa između njegovih elemenata. Za razliku od fizičkog modela, koji ilustruje strukturu sistema, matematički model omogućava precizno predviđanje performansi, optimizaciju procesa i donošenje odluka zasnovanih na kvantitativnim podacima.

U okviru ove disertacije razvijen je matematički model koji služi za ocenu performansi zatvorenog sistema i procenu efikasnosti primene CE kroz stepen uključivanja organskih sirovina u tokove materije i energije, određivanje curenja i procenu njihove cirkularnosti. Model omogućava kvantitativnu analizu resursnih tokova, praćenje integracije elemenata sistema i identifikaciju faktora koji utiču na njegovu održivost. Model integriše materijalni i energetski bilans, koji omogućava praćenje raspodele i iskorišćenja sirovina i energije unutar sistema. Na taj način obezbeđuje se objektivna procena njegove efikasnosti i identifikacija mogućnosti za unapređenje. Primena modela omogućava sprovođenje različitih simulacija i scenarija primene CE, čime se doprinosi boljem razumevanju interakcija između elemenata sistema.

Matematički model razvijen u okviru ovog istraživanja strukturisan je tako da prati logiku fizičkog modela sistema. Obuhvata sledeće funkcionalne celine:

1. Karakterizacija ulaznih sirovina (izvori, sakupljanje i transport organskog otpada),
2. Definisanje optimalnih uslova tretmana organske sirovine,
3. Tretman organske sirovine,
4. Produkti tretmana organske sirovine,
5. Materijalni i energetski bilans formiranog sistema.

U nastavku ovog poglavlja će detaljnije biti objašnjen svaki deo matematičkog modela IUOO.

3.2.1. Karakterizacija ulaznih sirovina

U skladu sa Pretpostavkom 1, kao izvori organskih sirovina na razmatranom području identifikuju se komunalne delatnosti, prehrambena industrija i poljoprivreda. U tabeli 3.1 prikazane su vrste sirovina i njihove karakteristike: udeo C , N , P , K , lignina, odnos C/N , udeo vlage i suve materije, kao i količine koje se generišu na godišnjem nivou.

Tabela 3.1 Godišnje količine i karakteristike organskih sirovina na razmatranom području

Organska sirovina	Sirovina 1 (S_1)	Sirovina 2 (S_2)	...	Sirovina N (S_n)
Udeo ugljenika C [%]	C_1	C_2	...	C_n
Udeo azota N [%]	N_1	N_2	...	N_n
Udeo fosfora P [%]	P_1	P_2	...	P_n
Udeo kalijuma K [%]	K_1	K_2	...	K_n
Udeo lignina L [%]	L_1	L_2	...	L_n
Odnos C/N	C/N_1	C/N_2	...	C/N_n
Udeo vlage W [%]	W_1	W_2	...	W_n
Udeo suve materije $SM(I-W)$ [%]	SM_1	SM_2	...	SM_n
Generisane količine Q [t/god]	Q_1	Q_2	...	Q_n

Generisana količina organske materije Q_{org} u razmatranom sistemu koja se može tretirati, javlja se kao zbir količina pojedinačnih vrsta organske sirovine na posmatranoj teritoriji i može se opisati relacijom 3.1:

$$Q_{org} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad i, n \in N \quad (3.1)$$

pri čemu su $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ generisane količine pojedinačnih organskih sirovina $S_1, S_2, \dots, S_n$ na godišnjem nivou [t/god]. Prema Pretpostavci 2, generisana količina organske materije se sakuplja i transportuje do postrojenja za tretman.

3.2.2. Definisanje optimalnih uslova tretmana organske sirovine

Uslovi pod kojima se tretiraju organske sirovine direktno utiču na nesmetano odvijanje procesa i kvalitet krajnjih proizvoda. Precizno definisanje ovih uslova osigurava održiv i ekonomski isplativ proces tretmana organske sirovine. U ovom delu razmatraju se optimalni parametri za tretman organskih sirovina.

Biološki tretmani koji se koriste za preradu organske sirovine (AD i kompostiranje) predstavljaju složene biološke mehanizme razlaganja organske materije, pri čemu na tok procesa prerade mogu uticati njihovi fizički i hemijski parametri. Fizički parametri obuhvataju temperaturu, hidrauličko vreme retenzije, sadržaj vlage, gustinu, veličinu čestica i rastvorljivost materije, dok hemijski parametri uključuju pH vrednost, elementarni sastav (C, N, P), odnos C/N , prisustvo toksičnih jedinjenja (npr. teških metala), sadržaj lignina i prisustvo mikro i makronutrijenata. Nesmetano odvijanje procesa prerade u velikoj meri zavisi od pravilnog upravljanja ovim parametrima, jer njihova odstupanja mogu dovesti do poremećaja u radu sistema.

Za potrebe modeliranja, pretpostavka je da se AD i kompostiranje odvijaju u kontrolisanim, konstantnim uslovima, čime se neutrališe varijabilnost procesnih parametara i obezbeđuje verodostojnost modela i dalji proračun (*Pretpostavke 3 i 4*). Parametar koji se u

ovom kontekstu razmatra kao promenljiva jeste odnos mešanja različitih organskih sirovina. Odnos mešanja sirovina može biti pod uticajem različitih faktora kao što su količina organske materije, morfološki i elementarni sastav, količina suve materije i vlage, količina biorazgradive materije, odnos C/N , prisustvo inhibitora u organskoj materiji i slično. Optimalni odnos mešanja organskih sirovina u AD i kompostiranja određuje se na osnovu više kriterijuma, među kojima su najvažniji: dostupna količina sirovine, sadržaj vlage i odnos C/N u elementarnom sastavu. U zavisnosti od vrste tretmana, u analizu se uključuju i dodatni parametri: sadržaj lignina kod AD kao ograničavajući faktor i sadržaj fosfora kod kompostiranja u cilju postizanja željenog kvaliteta krajnjeg proizvoda.

Optimizacija parametara procesa anaerobne digestije

Da bi se izvršila optimizacija odnosa mešanja različitih organskih sirovina sa ciljem postizanja što većeg prinosa biogasa, korišćen je simpleks metod višekriterijumske optimizacije. Kao ulazni parametri pri optimizaciji korišćeni su elementarni sastav otpada, posebno sadržaj ugljenika i azota, odnos C/N i sadržaj lignina. Glavni problem, prilikom razvoja ovog modela, bio je problem donošenja odluka i planiranja koji uključuje višestruke suprotstavljene ciljeve koji bi trebali da se razmatraju istovremeno. Budući da povećanje sadržaja ugljenika u elementarnom sastavu organskih sirovina često prati i porast sadržaja lignina, dolazi do konflikta između optimizacije odnosa C/N i ograničenja u pogledu što manjeg sadržaja lignina u konačnoj mešavini sirovina.

Primena metode Globalnog kriterijuma, gde se minimizira rastojanje između neke poželjne referentne tačke u prostoru ciljeva i dostižne regije ciljeva (Zelany, 1974; Yu, 1973), omogućava izbor kompromisnog rešenja koje je najbliže idealnom u višekriterijumskom prostoru. Model za optimizaciju parametara zasniva se na matematičkim funkcijama koje kvantifikuju ukupne sadržaje ključnih elemenata u mešavini sirovina, uključujući ugljenik, azot i lignin. Ukupni sadržaj ugljenika $C(q)$, azota $N(q)$, lignina $L(q)$ i vlage $W(q)$ izraženi su kao zbrojevi doprinosa pojedinačnih sirovina, uzimajući u obzir njihove odgovarajuće udele u sirovini. Ove relacije su prikazane jednačinama 3.2-3.5.

1. Ukupni sadržaj ugljenika $C(q)$:

$$C(q) = \sum_{i=1}^n C_i q_{ad,i} \quad (3.2)$$

2. Ukupni sadržaj azota $N(q)$:

$$N(q) = \sum_{i=1}^n N_i q_{ad,i} \quad (3.3)$$

3. Ukupni sadržaj lignina $L(q)$:

$$L(q) = \sum_{i=1}^n L_i q_{ad,i} \quad (3.4)$$

4. Ukupni sadržaj vlage $W(q)$:

$$W(q) = \sum_{i=1}^n W_i q_{ad,i} \quad (3.5)$$

pri čemu su:

C_i, N_i, L_i, W_i - sadržaji ugljenika, azota, lignina i vlage u sirovini S_i ,

$q_{ad,i}$ - predstavlja udeo svake sirovine u mešavini.

Ukupan udeo svih sirovina mora da zadovolji sledeće uslove (relacija 3.5):

$$\sum_{i=1}^n q_{ad,i} = 1, \quad q_{ad,i} > 0, \forall i \quad (3.6)$$

Za stabilnu mikrobiološku aktivnost metanogenih bakterija, odnos C/N treba da se održava u rasponu od 20 do 30 (Rocamora, 2020), što je prikazano relacijom 3.7.

$$20 \leq \frac{C(q)}{N(q)} \leq 30 \quad (3.7)$$

Dostižna regija (dopustiva oblast) D definiše se dodatnim uslovima, kao što je odnos C/N , koji određuje opseg vrednosti relevantnih za proces optimizacije. Ovaj uslov može biti preciznije izražen pomoću dve nejednačine:

$$C(q) \geq 20N(q)$$

$$C(q) \leq 30N(q)$$

Višekriterijumska optimizacija parametara može se iskazati kroz skup funkcija ciljeva, od kojih se neke maksimizuju, a druge minimizuju, kao što je prikazano relacijom 3.8:

$$\left\{ \max_{x \in D} f_1(x), \min_{x \in D} f_2(x) \right\} \quad (3.8)$$

pri čemu:

$f_1(x)$ predstavlja maksimizaciju sadržaja ugljenika $C(q)$,

$f_2(x)$ predstavlja minimizaciju sadržaja lignina $L(q)$.

Sada se sagledavani problem može predstaviti relacijom 3.9:

$$\left\{ \max_{q=(q_{ad,i}) \in D} C(q), \min_{q=(q_{ad,i}) \in D} L(q) \right\} \quad (3.9)$$

Pri tome se sadržaj azota $N(q)$ prati sa ciljem da bude što bliži minimumu.

Da bi se rešio višekriterijumski problem definisan ciljnim funkcijama $f_1(x)$ i $f_2(x)$ koristi se metod globalnog kriterijuma, koji minimizira rastojanje između vrednosti ciljeva $f_i(x)$ i referentnih vrednosti f_i^* u prostoru ciljeva. Globalni kriterijum je definisan relacijom 3.10:

$$\min_{x \in D} G_r(x) = \left| \frac{f_{1,max}^* - f_1(x)}{f_{1,max}^* - f_{1,min}^*} \right|^r + \left| \frac{f_2(x) - f_{2,min}^*}{f_{2,max}^* - f_{1,min}^*} \right|^r \quad (3.10)$$

Sada se sagledavani problem može predstaviti na sledeći način:

$$\min_{q=(q_{ad,i}) \in D} G(q) = \left| \frac{C_{max}^* - C(q)}{C_{max}^* - C_{min}^*} \right|^2 + \left| \frac{L(q) - L_{min}^*}{L_{max}^* - C_{min}^*} \right|^2 \quad (3.11)$$

pri čemu su:

D - dostižna regija definisana skupom ograničenja,

C_{max}^*, C_{min}^* - granične vrednosti sadržaja ugljenika,

L_{max}^*, L_{min}^* - granične vrednosti sadržaja lignina.

Rešavanjem globalnog kriterijuma primenom simpleks metode određuje se optimalna kombinacija udela $q_{ad,i}$, koja predstavlja Pareto optimalno rešenje, odnosno tačku ravnoteže između konfliktnih ciljeva, povećanja sadržaja ugljenika u mešavini sirovina radi većeg prinosa biogasa i smanjenja sadržaja lignina, uz poštovanje svih postavljenih ograničenja.

Optimizacija parametara procesa kompostiranja

Glavni izazov prilikom razvoja modela za optimizaciju procesa kompostiranja bio je donošenje odluka i planiranje, pri čemu su razmatrani višestruki i često suprotstavljeni ciljevi. U ovom kontekstu, optimizacija je usmerena na postizanje optimalnog sadržaja fosfora u krajnjem kompostu, uzimajući u obzir odnos ugljenika, azota i fosfora, kao ulazne parametre. Pored toga, neki parametri, poput sadržaja vlage u konačnoj mešavini i sadržaja kalijuma, praćeni su tokom procesa, ali nisu direktno uključeni u optimizaciju.

Analogno postupku korišćenom za definisanje optimalnih parametara AD, i u procesu kompostiranja primenjen je višekriterijumski pristup optimizaciji, prilagođen specifičnostima ovog procesa i zasnovan na kvantitativnim pokazateljima nutritivnog sastava komposta.

Korišćenje simpleks metoda višekriterijumske optimizacije omogućava precizno definisanje ciljeva i ograničenja, pri čemu se minimizacija rastojanja od referentne tačke i

dostižne regije ciljeva vrši uzimajući u obzir sve relevantne parametre i karakteristike kompostiranja. Da bi se izvršila optimizacija, potrebno je predstaviti matematičke funkcije koje kvantitativno opisuju koncentracije ključnih elemenata u mešavini sirovina, pri čemu su ove funkcije definisane relacijama 3.12-3.16:

1. Ukupni sadržaj ugljenika $C(q)$:

$$C(q) = \sum_{i=1}^n C_i q_{k,i} \quad (3.12)$$

2. Ukupni sadržaj azota $N(q)$:

$$N(q) = \sum_{i=1}^n N_i q_{k,i} \quad (3.13)$$

3. Ukupni sadržaj fosfora $P(q)$:

$$P(q) = \sum_{i=1}^n P_i q_{k,i} \quad (3.14)$$

4. Ukupni sadržaj kalijuma $K(q)$:

$$K(q) = \sum_{i=1}^n K_i q_{k,i} \quad (3.15)$$

5. Ukupni sadržaj vlage $W(q)$:

$$W(q) = \sum_{i=1}^n W_i q_{k,i} \quad (3.16)$$

pri čemu su:

C_i, N_i, P_i, K_i, W_i - sadržaji ugljenika, azota, fosfora, kalijuma i vlage u sirovini S_i ,

$q_{k,i}$ - udeo svake sirovine u mešavini koja se kompostira.

Ukupan udeo svih sirovina mora zadovoljiti uslov u relaciji 3.5. Pored toga, model postavlja uslov da sadržaj fosfora u mešavini mora biti najmanje 1%, što se matematički može izraziti sledećom relacijom:

$$P(q) \geq 0,01 \quad (3.17)$$

Uslov za optimalan odnos C/N u procesu kompostiranja zasniva se na istom principu kao i u procesu AD, prikazanom u prethodnom poglavlju, i definisan je jednačinom (3.6). U okviru višekriterijumske optimizacije, funkcije ciljeva formalizuju se kroz maksimizaciju i minimizaciju, kako je prikazano u formuli (3.7). Konkretno, $f_1(x)$ predstavlja maksimizaciju sadržaja ugljenika $C(q)$, dok $f_2(x)$ označava minimizaciju sadržaja fosfora $P(q)$. Na osnovu toga, problem se može predstaviti sledećom relacijom:

$$\left\{ \max_{q=(q_{k,i}) \in S} C(q), \min_{q=(q_{k,i}) \in S} P(q) \right\} \quad (3.18)$$

Pri tome se sadržaj azota $N(q)$ prati sa ciljem da bude što bliži minimumu, dok se sadržaji kalijuma, $K(q)$ i vlage, $W(q)$ prate bez dodatnih uslova.

Na osnovu formule (3.9), globalni kriterijum, koji minimizira rastojanje između vrednosti ciljeva $f_i(x)$ i referentnih vrednosti f_i^* u prostoru ciljeva, za ovaj konkretan slučaj može se predstaviti na sledeći način:

$$\min_{q=(q_{k,i}) \in S} G(q) = \left| \frac{C_{max}^* - C(q)}{C_{max}^* - C_{min}^*} \right|^2 + \left| \frac{P(q) - P_{min}^*}{P_{max}^* - C_{min}^*} \right|^2 \quad (3.19)$$

pri čemu su:

C_{max}^*, C_{min}^* - granične vrednosti sadržaja ugljenika,

P_{max}^*, P_{min}^* - granične vrednosti sadržaja fosfora.

Primena simpleks metode za rešavanje globalnog kriterijuma rezultira optimalnom kombinacijom udela $q_{k,i}$, koja definiše Pareto optimalnu tačku i postiže ravnotežu između konfliktnih ciljeva. Na ovaj način, omogućava se postizanje maksimalnog prinosa komposta u procesu kompostiranja uz istovremeno zadovoljenje svih postavljenih ograničenja.

3.2.3. Tretman organskih sirovina

Nakon utvrđivanja optimalnih parametara za odvijanje procesa AD i kompostiranja, neophodno je definisati ukupnu količinu organske sirovine Q_t koja se tretira u okviru razvijenog fizičkog modela. Ova količina predstavlja ukupni ulaz organske materije u tokove CE i sastoji se iz dva dela, dela namenjenog AD i dela namenjenog kompostiranju. Ukupna količina izražava se sledećom relacijom:

$$Q_t = Q_{t,ad} + Q_{t,komp} \quad (3.20)$$

pri čemu su:

Q_t - ukupna količina organske sirovine tretirane u sistemu [t/dan],

$Q_{t,ad}$ - količina organske sirovine namenjene procesu AD [t/dan],

$Q_{t,komp}$ - količina organske sirovine namenjene procesu kompostiranja [t/dan].

U tabeli 3.2 predstavljene su raspoložive količine organskih sirovina za tretman, kao i udeo svake organske sirovine u ukupnoj mešavini prilikom AD ($q_{ad,1}, q_{ad,2}, \dots, q_{ad,n}$) i kompostiranja ($q_{k,1}, q_{k,2}, \dots, q_{k,n}$).

Tabela 3.2 *Raspoložive količine organskih sirovina u anaerobnoj digestiji i kompostiranju*

Organska sirovina	Raspoložive količine Q [t/god]	Udeo organske sirovine u mešavini prilikom procesa anaerobne digestije, q_{ad}	Udeo organske sirovine u mešavini prilikom procesa kompostiranja, q_k
Sirovina 1 (S_1)	Q_1	$q_{ad, 1}$	$q_{k, 1}$
Sirovina 2 (S_2)	Q_2	$q_{ad, 2}$	$q_{k, 2}$
...	...	...	...
Sirovina N (S_n)	Q_n	$q_{ad, n}$	$q_{k, n}$

Kako bi se omogućila optimizacija sastava mešavine i povećala efikasnost sistema CE, pored ukupnih količina, važno je definisati udeo svake organske sirovine u ukupnoj mešavini za svaki od procesa (AD i kompostiranje):

- *Udeo organske sirovine pri anaerobnoj digestiji ($q_{ad, i}$)*

Udeo organske sirovine S_i u mešavini za AD definiše se kao odnos količine te sirovine $Q_{t,ad}$ prema ukupnoj količini svih sirovina u digestiji:

$$q_{ad, i} = \frac{Q_{t,ad, i}}{\sum_{j=1}^n Q_{t,ad, j}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.21)$$

pri čemu je:

$\sum_{j=1}^n Q_{t,ad, j}$ - ukupna količina sirovina koja se tretira AD [t/dan].

- *Udeo organske sirovine pri kompostiranju ($q_{k, i}$)*

Udeo organske sirovine S_i u mešavini za kompostiranje definiše se kao odnos njene mase $Q_{t, komp, i}$ i ukupne mase svih sirovina namenjenih kompostiranju u sistemu. Ovaj udeo izražava se sledećom relacijom:

$$q_{k, i} = \frac{Q_{t, komp, i}}{\sum_{j=1}^n Q_{t, komp, j}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.22)$$

pri čemu je:

$\sum_{j=1}^n Q_{t, komp, j}$ - ukupna količina sirovina koja se tretira kompostiranjem [t/dan].

Nakon sagledavanja udela pojedinačnih sirovina u ukupnoj mešavini, potrebno je odrediti količine organske materije koje će biti tretirane u okviru razvijenog modela. Količine sirovina raspoređuju se između dva procesa, AD i kompostiranja, pri čemu se njihov tretman određuje na osnovu karakteristika materijala i optimizovanih uslova procesa.

1. Tretman organske sirovine procesom anaerobne digestije (član $Q_{t, ad}$)

Tretman organske sirovine predviđen modelom može se vršiti AD, gde su produkti biogas i digestat. Količina organske materije predviđene za tretman AD, prema relaciji 3.21,

označena je kao $Q_{t, ad}$ i predstavlja zbir količina svih pojedinačnih organskih frakcija namenjenih ovom procesu, što se može izraziti sledećom relacijom:

$$Q_{t, ad} = Q_{t, ad, 1} + Q_{t, ad, 2} + \dots + Q_{t, ad, n} = \sum_{i=1}^n Q_{t, ad, i}, i, n \in N \quad (3.23)$$

2. Tretman organske sirovine procesom kompostiranja (Član $Q_{t, komp}$)

Tretman organske sirovine procesom kompostiranja predviđen modelom podrazumeva aerobnu razgradnju organske sirovine u spoljnim uslovima sa povremenim okretanjem da bi se izvršila potrebna aeracija sirovine tokom procesa prerade. Količina organske materije koje će biti tretirana kompostiranjem je označena kao $Q_{t, komp}$, a predstavlja zbir količina svih pojedinačnih organskih frakcija koje će biti kompostirane, i može se predstaviti relacijom:

$$Q_{t, komp} = Q_{t, komp, 1} + Q_{t, komp, 2} + \dots + Q_{t, komp, n} = \sum_{i=1}^n Q_{t, komp, i}, i, n \in N \quad (3.24)$$

Tretiranje ukupne količine nastale organske mase na posmatranoj teritoriji Q_{org} pri optimalnim uslovima, je u realnosti jako teško izvodljivo. Da bi se u približili realnom stanju stvari, u relaciji 3.1, koja opisuje materijalne tokove organske sirovine, se javlja potreba za uvođenjem novog člana c koji predstavlja stepen uključenosti organske sirovine u tokove CE, i tada relacija 3.20 dobija sledeći oblik:

$$Q_t = Q_{t, ad} + Q_{t, komp} = cQ_{org} \quad (3.25)$$

Stepen uključenosti organske sirovine u tokove CE, c , izračunava se kao odnos tretirane i sakupljene (generisane) organske materije u pomatranom sistemu, i opisan je relacijom 3.26:

$$c = \frac{Q_t}{Q_{org}} = \frac{Q_{t, ad} + Q_{t, komp}}{Q_{org}}, 0 \leq c \leq 1 \quad (3.26)$$

Na osnovu definisanog stepena uključenosti organske sirovine u tokove CE, c , može se definisati stepen curenja organske materije iz tokova CE, l koji se može definisati sledećom relacijom 3.27:

$$l = 1 - c = \frac{Q_{org} - Q_t}{Q_{org}} = \frac{Q_{org} - (Q_{t, ad} + Q_{t, komp})}{Q_{org}}, 0 \leq l \leq 1 \quad (3.27)$$

Stepen l predstavlja količinu generisane organske materije koja nije iskorišćena unutar zatvorene petlje. Nakon primene optimalnog odnosa mešanja organskih sirovina ($q_{c, i}$, $q_{ad, i}$), materijalni bilans zatvorene petlje 3.25 dobija sledeći oblik:

$$Q_t = cQ_{org} = c(Q_{t, ad} + Q_{t, komp}) = c\left(\sum_{i=1}^n Q_{t, ad, i} + \sum_{i=1}^n Q_{t, komp, i}\right) \quad (3.28)$$

$$0 \leq c \leq 1; i, n \in N$$

Pri čemu sledeći uslovi moraju biti zadovoljeni:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_i + \dots + Q_n = Q_{org}$$

$$q_{ad,1} + q_{ad,2} + q_{ad,3} + \dots + q_{ad,i} + \dots + q_{ad,n} = 1$$

$$q_{k,1} + q_{k,2} + q_{k,3} + \dots + q_{k,i} + \dots + q_{k,n} = 1$$

Optimizacijom procesa kompostiranja i AD postiže se maksimalno iskorišćenje organske materije, što predstavlja osnovu za analizu produkata tretmana.

3.2.4. Produkti tretmana organske sirovine

Nakon sprovedene optimizacije procesa kompostiranja i AD, analiziraju se ključni produkti tretmana organske sirovine: biogas, digestat i stabilizovani kompost. Analiza će najpre obuhvatiti produkte AD, sa posebnim osvrtom na prinos biogasa kao ključni parametar ovog procesa.

1. Količina biogasa (Q_{bg})

Prinos biogasa zavisi od sadržaja organskog ugljenika u sirovini i efikasnosti procesa AD, dok njegov energetski potencijal određuje koncentracija CH_4 u gasnoj mešavini i donja toplotna moć CH_4 . Kvantitativna procena količine biogasa koji se može proizvesti iz određene sirovine temelji se na sadržaju ugljenika u optimalnoj mešavini supstrata, pri čemu ukupna količina raspoloživog ugljenika $C(q)$ zavisi od količine pojedinačnih sirovina i njihovog sadržaja ugljenika C_i (relacija 3.2).

Efikasnost konverzije organskog ugljenika u biogas označena je koeficijentom η , koji predstavlja procenat ukupne organske materije koja se razlaže tokom AD. Prema pretpostavci 7 modela, 60% ukupne organske materije se razgrađuje i prelazi u biogas, dok preostalih 40% ostaje u digestatu, čime se vrednost koeficijenta η postavlja na 0,6. Ako se pretpostavi da biogas sadrži 60% CH_4 i 40% CO_2 , raspodela ugljenika u gasnoj fazi vrši se proporcionalno ovom sastavu, pri čemu 60% razgrađenog ugljenika prelazi u CH_4 , a 40% u CO_2 . U okviru ove analize ostali gasovi se zanemaruju. Na osnovu navedenih pretpostavki, količina proizvedenog biogasa Q_{bg} može se izračunati sledećom relacijom:

$$Q_{bg} = \eta \sum_{i=1}^n C_i q_{ad,i} \quad (3.29)$$

pri čemu je:

Q_{dig} - ukupna količina proizvedenog biogasa [m^3/dan],

η - koeficijent efikasnosti konverzije organske materije u biogas [-]

C_i - sadržaji ugljenika u sirovini S_i ,

$q_{ad, i}$ - predstavlja udeo svake sirovine u mešavini.

S obzirom na to da je CH_4 glavni nosilac energije u biogasu i ključni element u energetsom bilansu sistema, njegova donja toplotna moć H_{d, CH_4} mora biti uključena u proračun ukupnog energetskeg potencijala biogasa. Udeo CH_4 u biogasu x_{CH_4} može varirati u zavisnosti od karakteristika ulazne sirovine i uslova AD, te se njegova vrednost u modelima najčešće podešava u skladu sa raspoloživim eksperimentalnim podacima kako bi se postigla veća preciznost. Prema pretpostavci 7 modela, udeo CH_4 u biogasu iznosi 60%, odnosno $x_{CH_4} = 0,6$. Donja toplotna moć CH_4 uzima se kao približno $35,8 \text{ MJ/m}^3$. Na osnovu ukupne količine proizvedenog biogasa Q_{bg} , njegov energetski potencijal može se izračunati sledećom relacijom:

$$E_{bg} = Q_{bg} x_{CH_4} H_{d, CH_4} \quad (3.30)$$

pri čemu je:

H_{d, CH_4} - donja toplotna moć CH_4 [MJ/m^3],

x_{CH_4} - udeo CH_4 u biogasu [-].

2. Količina digestata (Q_{dig})

Digestat je sekundarni proizvod koji nastaje tokom AD razgradnjom organske materije. Ova materija nije u potpunosti razložena i digestat sadrži nerazgrađene organske i neorganske komponente, kao i značajan udeo vode. Količina digestata zavisi od ukupne količine tretirane sirovine i stepena konverzije sirovine u digestat. Ova veza se izražava sledećom relacijom:

$$Q_{dig} = Q_{t, ad} k_{dig} \quad (3.31)$$

pri čemu su:

Q_{dig} - ukupna količina digestata [t/dan ili m^3/dan],

$Q_{t, ad}$ - ukupna količina sirovine upućene na AD [t/dan ili m^3/dan],

k_{dig} - stepen konverzije sirovine u digestat [-].

Stepen konverzije k_{dig} definiše odnos između količine tretirane sirovine i proizvedenog digestata i zavisi od karakteristika sirovine, kao i od uslova AD. U mezofilnim uslovima, vrednosti ovog parametra najčešće se kreću u opsegu od 0,4 do 0,6, dok se u termofilnim režimima, usled intenzivnije razgradnje, kreću u rasponu od 0,3 do 0,5 (Weinrich, Nelles, 2021). Prema pretpostavci 7 k_{dig} iznosi 0,4.

3. Količina komposta (Q_{komp})

Kompost predstavlja stabilizovani produkt razgradnje organskog otpada dobijen procesom kompostiranja. Njegov prinos zavisi od ukupne količine tretirane sirovine i stepena konverzije sirovine u kompost, odnosno dela mase koji ostaje nakon završetka procesa. Ova zavisnost se izražava sledećom relacijom:

$$Q_{kom} = Q_{t,komp} k_{komp} \quad (3.32)$$

pri čemu su:

Q_{komp} - ukupna količina proizvedenog komposta [t/dan ili m³/dan],

$Q_{t,komp}$ - ukupna količina sirovine upućene na kompostiranje [t/dan ili m³/dan],

k_{komp} - stepen konverzije sirovine u kompost [-].

Stepen konverzije sirovine k_{komp} zavisi od tipa i svojstava tretirane sirovine, kao i od efikasnosti samog procesa kompostiranja. Za sirovine sa visokim sadržajem organske materije i vlage, ovaj koeficijent se obično kreće u opsegu od 0,4 do 0,6. Za suvlje frakcije ili materijale sa nižim sadržajem biorazgradivih materija, vrednosti konverzionog koeficijenta su niže i kreću se između 0,3 i 0,5 (Haug, 1993). Gubitak mase tokom kompostiranja uglavnom nastaje usled razgradnje organske materije i isparavanja vode, a veličina tih gubitaka direktno utiče na krajnji prinos komposta.

3.2.5. Materijalni i energetski bilans sistema

Materijalni i energetski bilans sistema predstavljaju ključne aspekte za analizu efikasnosti upravljanja procesima tretmana organske sirovine. U okviru ovog poglavlja, prvo će biti analiziran energetski bilans, koji obuhvata energiju dobijenu iz biogasa i njenu potrošnju za različite procese unutar sistema. Nakon toga, fokus će biti na materijalnom bilansu, sa detaljnom analizom ulaznih i izlaznih tokova sirovina i produkata.

3.2.5.1 Energetski bilans sistema

Energetski bilans sistema (E_{bil}) obuhvata analizu proizvodnje energije tretmanom otpada i potrošnje energije tokom sakupljanja otpada, održavanja sistema za proizvodnju energije, kao i transporta produkata tretmana. Njime se procenjuje efikasnost iskorišćenja energije dobijene iz biogasa za potrebe različitih faza sistema i omogućava optimizacija energetske resursa. Energetski bilans definiše razliku između ukupne energije dobijene iz biogasa i energije potrebne za rad sistema. Ukupna energija iz biogasa obuhvata količinu energije koja se može dobiti u AD, dok ukupna energija potrebna za rad sistema, E_{pot} , uključuje

sve energetske zahteve, kao što su zagrevanje digestora, transport sirovina i produkata kao i druge operative potrebe. Ova razlika određuje energetske status sistema i može se izraziti:

$$E_{bil} = E_{bg} - E_{pot} \quad (3.33)$$

pri čemu su:

E_{bg} - ukupna energija dobijena iz biogasa [MJ/dan],

E_{pot} - ukupna potrebna energija za rad sistema [MJ/dan],

E_{bil} - energetske bilans sistema [MJ/dan].

Na osnovu vrednosti E_{bil} , energetske status sistema može se klasifikovati kao:

- $E_{bil} > 0$: Višak energije: sistem proizvodi više energije nego što troši, omogućavajući dodatnu upotrebu energije za druge procese.
- $E_{bil} = 0$: Energetska neutralnost: energija iz biogasa u pokriva potrebe sistema.
- $E_{bil} < 0$: Energetski deficit: energija iz biogasa nije dovoljna, pa je potrebno obezbediti dodatne izvore energije.

Ovaj bilans omogućava identifikaciju ključnih energetske tokova i predstavlja osnovu za optimizaciju procesa, čime se doprinosi održivosti sistema.

1. Proizvodnja energije iz biogasa

U prethodnom potpoglavlju, relacijama (3.29) i (3.30), definisani su prinos biogasa i energetske potencijal sistema dobijen iz AD.

2. Energetske potrebe sistema

Ukupna energija potrebna za rad sistema predstavlja zbir energije za zagrevanje digestora, energije potrebne za transport sirovina i produkata, kao i energije utrošene u proizvodnim procesima koji generišu otpad koji se koristi kao sirovina. Energija za zagrevanje digestora obuhvata toplotnu energiju neophodnu za održavanje optimalnih uslova AD. Energija za transport sirovina i produkata odnosi se na potrošnju energije za prevoz organskog otpada do postrojenja za tretman, kao i za transport digestata i komposta do mesta njihove upotrebe, dok energija za proizvodne procese uključuje energetske potrošnju industrijskih postrojenja čiji otpadni tokovi ulaze u sistem upravljanja organskim otpadom. Ukupna energetske potreba sistema izražava se relacijom 3.34:

$$E_{pot} = E_{dig} + E_{trans} + E_{pp} \quad (3.34)$$

pri čemu su:

E_{pot} - ukupna energija potrebna za rad sistema [MJ/dan],

E_{dig} - energija za zagrevanje digestora [MJ/dan],

E_{trans} - energija za transport sirovina i produkata [MJ/dan],

E_{pp} - energija utrošena u proizvodnim procesima koji generišu otpad [MJ/dan].

2.1. Energija za zagrevanje digestora (E_{dig})

Zagrevanje digestora predstavlja ključnu komponentu energetske potrebe sistema, jer obezbeđuje optimalne uslove za AD. Energija potrebna za ovaj proces zavisi od više faktora, uključujući ukupnu količinu tretirane sirovine, specifični toplotni kapacitet vode i temperaturnu razliku između početne temperature sirovine i radne temperature digestora. Energija potrebna za zagrevanje digestora izražava se sledećom relacijom:

$$E_{dig} = Q_{t,ad} c_{voda} \Delta T \quad (3.35)$$

pri čemu su:

E_{dig} - energija za zagrevanje digestora [MJ/dan],

$Q_{t,ad}$ - ukupna količina sirovine za AD [t/dan],

c_{voda} - specifični toplotni kapacitet vode [MJ/t°C],

ΔT - temperaturna razlika između početne i radne temperature digestora [°C].

Potrebna količina biogasa za zagrevanje digestora predstavlja količnik između energije neophodne za ovaj proces i proizvoda udela CH_4 u biogasu i njegove donje toplotne moći. Potrošnja biogasa izražava se sledećom relacijom:

$$V_{dig} = \frac{E_{dig}}{x_{CH_4} H_{d,CH_4}} \quad (3.36)$$

pri čemu je:

V_{dig} - potrebna zapremina biogasa za zagrevanje digestora [m³/dan],

x_{CH_4} - udeo CH_4 u biogasu [-],

H_{d,CH_4} - donja toplotna moć CH_4 [MJ/m³].

2.2. Energija za transport sirovina i produkata (E_{trans})

Transport sirovina, uključujući organski otpad, digestat i kompost, čini važan deo ukupne energetske potrošnje sistema. Količina energije potrebna za ovaj proces zavisi od tri glavna faktora: mase materijala koji se prevozi, udaljenosti na koju se transportuje i specifične

potrošnje energije po toni i pređenom kilometru. Na osnovu tih parametara, ukupna energija potrebna za transport može se izračunati sledećom relacijom:

$$E_{trans} = \sum_{i=1}^n Q_{trans,i} d_i c_{trans} \quad (3.37)$$

pri čemu je:

$Q_{trans,i}$ - masa materijala koji se transportuje [t/dan],

d_i - udaljenost transporta [km],

c_{trans} - specifična potrošnja energije [MJ/t·km],

E_{trans} - ukupna energija potrebna za transport [MJ/dan].

Da bi se obezbedila energija potrebna za transport u okviru sistema, koristi se deo proizvedenog biogasa. Potrebna količina biogasa zavisi od ukupne potrošnje energije za transport, kao i od energetske karakteristika samog biogasa, pre svega udela CH_4 i njegove donje toplotne moći. Količina biogasa neophodna za transport izračunava se prema relaciji:

$$V_{trans} = \frac{E_{trans}}{x_{CH_4} H_{d,CH_4}} \quad (3.38)$$

pri čemu je:

V_{trans} - količina biogasa neophodna za transport [m³/dan],

x_{CH_4} - udeo CH_4 u biogasu [-],

H_{d,CH_4} - donja toplotna moć CH_4 [MJ/m³].

2.3. Energija za proizvodne procese (E_{pp})

Energetska potreba za proizvodne procese koji generišu otpad koristi se u ukupnom energetske bilansu sistema i zavisi od količine proizvedenih materijala i specifične energetske potrošnje po jedinici proizvoda. Ukupna energija potrebna za proizvodne procese izražava se sledećom relacijom:

$$E_{pp} = \sum_{j=1}^m Q_{pp,j} e_{pp,j} \quad (3.39)$$

pri čemu je:

E_{pp} - ukupna energija potrebna za proizvodne procese [MJ/dan],

$Q_{pp,j}$ - količina proizvoda [t/dan],

$e_{pp,j}$ - specifična energetska potrošnja po jedinici proizvoda [MJ/t].

Definisane relacije omogućavaju preciznu procenu energetske potrebe sistema za zagrevanje digestora i transport materijala. Ove energetske potrebe zadovoljavaju se korišćenjem biogasa proizvedenog u sistemu, što omogućava formiranje zatvorenog energetskog ciklusa, gde sistem funkcioniše kao zatvorena petlja. U ovakvom sistemu sva energija generisana iz biogasa koristi se za podmirivanje potreba procesa unutar sistema.

Ukoliko se u zatvorenoj petlji generiše višak energije, taj višak se definiše kao energetske curenje, jer predstavlja energiju koja nije iskorišćena za zadovoljavanje potreba sistema. Kako bi se kvantitativno procenila energetska efikasnost i održivost zatvorenog sistema, koristi se concept stepena cirkularnosti energije.

Stepen cirkularnosti energije, C_e , definiše se kao odnos energije potrebne za zadovoljavanje potreba sistema E_{pot} i ukupne energije generisane unutar zatvorene petlje E_{bg} . Izražava se sledećom relacijom:

$$C_e = \frac{E_{pot}}{E_{bg}} 100\% \quad (3.40)$$

Stepen cirkularnosti energije C_e predstavlja ključan pokazatelj energetske efikasnosti zatvorenog sistema i meri koliko dobro sistem koristi energiju generisanu unutar petlje za podmirivanje svojih potreba. Njegova vrednost omogućava procenu održivosti sistema i identifikaciju potencijalnih gubitaka ili viška energije.

- $C_e = 100\%$: Kada je stepen cirkularnosti jednak 100%, sistem je energetski potpuno održiv i koristi svu energiju generisanu iz biogasa za podmirivanje svojih potreba. U ovakvom slučaju ne dolazi do energetskog curenja niti potrebe za dodatnim izvorima energije. Ova situacija predstavlja idealni scenario za zatvorene energetske petlje.
- $C_e < 100\%$: Kada je stepen cirkularnosti manji od 100%, sistem nije u mogućnosti da zadovolji sve energetske potrebe koristeći samo energiju generisanu unutar petlje. Ovaj deficit ukazuje na potrebu za eksternim izvorima energije kako bi se omogućilo nesmetano funkcionisanje sistema. Niža vrednost C_e signalizira slabiju efikasnost i veću zavisnost od spoljnih resursa.
- $C_e > 100\%$: Kada je stepen cirkularnosti veći od 100%, sistem proizvodi višak energije, koja nije iskorišćena unutar petlje. Ovaj višak energije predstavlja energetske curenje, jer nije usmeren na podmirivanje potreba sistema. Međutim, višak može biti koristan za dodatne procese izvan sistema, kao što su proizvodnja električne energije, grejanje ili prodaja energije trećim stranama.

Interpretacija stepena cirkularnosti omogućava identifikaciju ključnih izazova u upravljanju energijom unutar sistema i pruža smernice za optimizaciju procesa. Na primer:

- U slučajevima kada je $C_e < 100\%$, potrebno je razmotriti mogućnosti za povećanje efikasnosti konverzije biogasa u energiju ili smanjenje energetske potrebe sistema, poput optimizacije zagrevanja digestora ili smanjenja troškova transporta.
- Kada je $C_e > 100\%$, preporučuje se planiranje dodatne upotrebe viška energije, čime se sistemu povećava ukupna održivost i smanjuje energetske curenje.

Stepen cirkularnosti energije C_e je pokazatelj održivosti i efikasnosti zatvorenog energetskog sistema. Njegova interpretacija pruža uvid u balans između proizvodnje i potrošnje energije, identifikuje potencijalne energetske gubitke i omogućava donošenje strateških odluka za unapređenje sistema. Optimalan C_e teži 100%, čime se postiže potpuna cirkularnost i samoodrživost procesa.

3.2.5.2. Materijalni bilans sistema

Materijalni bilans obuhvata količine ulaznih i izlaznih tokova organske materije, procenu curenja materije i energije i formiranje indikatora koji mere cirkularnost materije i energije. Time se obezbeđuje sveobuhvatan uvid u efikasnost korišćenja resursa, uz povezivanje fizičkih procesa tretmana i bioloških ciklusa povraćaja nutrijenata. Materijalni bilans sistema pruža kvantitativnu analizu ulaznih i izlaznih tokova organske materije u okviru zatvorene petlje. Ovaj bilans omogućava procenu efikasnosti iskorišćenja materijala, identifikaciju potencijalnih gubitaka i optimizaciju procesa u sistemu CE. Materijalni bilans se zasniva na dva ključna elementa koji omogućavaju praćenje i optimizaciju materijalnih tokova unutar zatvorene petlje CE:

- Ukupna generisana količina organske materije, Q_{org} , predstavlja početni ulazni tok materijala u sistem i obuhvata sav organski otpad iz komunalnog sektora, poljoprivrede i prehrambene industrije.
- Ukupna tretirana količina organske sirovine, Q_t , obuhvata materijale obrađene kroz AD ($Q_{t, ad}$) i kompostiranja ($Q_{t, kom}$), čime se ostvaruje povraćaj resursa u sistem u formi biogasa, digestata i komposta.

Ukupna tretirana količina organske sirovine direktno zavisi od stepena uključenja organske sirovine, c , i može se izraziti kao zbir ukupne količine organske materije potrebne za zadovoljenje materijalno-energetskih potreba sistema, Q_{pot} , i količine materije koja curi iz zatvorene petlje Q_c :

$$c Q_{org} = Q_t = Q_{pot} + Q_c \quad (3.41)$$

Količina materije koja curi iz sistema, Q_c , je deo komposta ili digestata koji nije iskorišćen unutar zatvorene petlje. Curenje materije, Q_c , i stepen uključenja organske sirovine, c , koriste se kao indikatori CE za ocenu performansi zatvorene petlje. Pored toga, uslovi normalizacije koji osiguravaju da su svi ulazni tokovi pravilno raspodeljeni između tretmana AD i kompostiranja definisani su:

$$\sum_{i=1}^n q_{ad,i} = 1, \quad \sum_{i=1}^n q_{k,i} = 1,$$

Ovi uslovi osiguravaju da se sva organska materija unutar sistema u potpunosti distribuiraju između dostupnih tretmana, pri čemu se ukupni udeo pojedinačnih sirovina u svakom procesu sumira do 1, čime se postiže materijalna ravnoteža sistema. Ukupna tretirana količina organske materije, označena kao Q_{pot} , sastoji se od dve glavne komponente: organske materije namenjene AD $Q_{t, ad, u}$, i organske materije namenjene kompostiranju $Q_{t, kom, u}$. Njihov zbir određuje ukupnu količinu materijala koji ulazi u sistem za tretman i izražava se sledećom relacijom:

$$Q_{pot} = Q_{t, ad, u} + Q_{t, kom, u} \quad (3.42)$$

Materijal tretiran AD, $Q_{t, ad, u}$, delimično se konvertuje u biogas, dok preostali deo formira digestat, koji se koristi za obogaćivanje zemljišta. S druge strane, materijal namenjen kompostiranju, $Q_{t, kom, u}$, transformiše se u kompost.

Ukupna potrebna količina materijala u sistemu može se takođe iskazati kroz konačne proizvode tretmana, uključujući biogas, digestat i kompost. Biogas je označen kao $Q_{bg, u}$ i koristi se za energetske potrebe sistema. Digestat $Q_{dig, u}$ primenjuje poboljšanje kvaliteta parkovskog zemljišta, dok se kompost $Q_{kom, u}$ koristi kao organsko đubrivo. Ovi materijalni tokovi kvantifikuju se sledećom relacijom:

$$Q_{pot} = Q_{bg, u} + Q_{dig, u} + Q_{kom, u} \quad (3.43)$$

Za slučajeve kada je potrebno odrediti specifične zahteve komposta prema biljnoj vrsti, neophodno je poznavati količinu nutrijenata koja treba da bude prisutna u kompostu. Detaljan prikaz tokova i transformacija nutrijenata u okviru zatvorene petlje dat je u poglavlju 2.2.3, gde su opisani principi kruženja i forme nutrijenata u procesima kompostiranja i AD. Optimizacijom sastava smeše supstrata pre i tokom procesa kompostiranja moguće je dobiti kompost čiji se nutritivni sadržaj, posebno fosfor, može precizno kontrolisati. Agrenov model

(2012) koristi sistem diferencijalnih jednačina za određivanje potrebnih količina nutrijenata, pri čemu su koeficijenti utvrđeni eksperimentalno za različite biljne vrste.

U nastavku su prikazani procesi sinteze i bilansa strukturnih (C_S , N_S , P_S) i mobilnih formi ugljenika, azota i fosfora (C_M , N_M , P_M) (Agren, 2012). Ovi procesi kvantitativno opisuju kako se nutrijenti raspoređuju između stabilnih tkiva i lako dostupnih rezervi u biljci, kao i međusobne zavisnosti koje određuju efikasnost rasta i razvoja.

1. Sinteza strukturnog ugljenika (C_S):

Strukturni ugljenik, C_S , predstavlja osnovu čvrstih biljnih tkiva, jer je ugrađen u stabilne i teško razgradive organske molekule, poput celuloze, hemiceluloze i lignina. Njegovo formiranje je uslovljeno dostupnošću strukturnog azota, koji je neophodan za sintezu proteina, enzima i ribozoma, čime se omogućava rast i razvoj biljke. Brzina sinteze strukturnog ugljenika zavisi od dostupne količine strukturnog azota i efikasnosti njegove konverzije u strukturni ugljenik. Efikasnost ovog procesa definiše se koeficijentom sinteze ugljenika, U_{CN} , koji izražava koliko ugljenika biljka može sintetisati po jedinici apsorbovanog azota. Na osnovu ovih parametara, brzina sinteze strukturnog ugljenika može se izraziti sledećom relacijom:

$$\frac{dC_S}{dt} = U_{CN}N_S \quad (3.44)$$

pri čemu je:

$\frac{dC_S}{dt}$ - brzina sinteze strukturnog ugljenika [gC/dan],

U_{CN} - koeficijent sinteze ugljenika [gC/ gN dan],

N_S - količina strukturnog azota [gN].

2. Bilans mobilnog ugljenika u biljci (C_M):

Brzina sinteze mobilnog ugljenika, C_M , u biljci određena je nizom faktora, uključujući intenzitet fotosinteze, brzinu pretvaranja mobilnog u strukturni ugljenik, kao i količinu mobilnog ugljenika alociranu za unos ključnih nutrijenata, pre svega azota i fosfora. Mobilni ugljenik predstavlja skup lako pristupačnih i prenosivih organskih molekula, koji služe kao izvor energije i gradivni materijal za odvijanje osnovnih metaboličkih procesa, rast i razvoj biljke. Njegova sinteza putem fotosinteze kvantifikuje se koeficijentom sinteze mobilnog ugljenika, U_{CNL} , koji pokazuje količinu mobilnog ugljenika generisanu po jedinici azota apsorbovanog iz okruženja. Efikasnost rasta biljke, Y , izražava se faktorom koji odražava gubitke energije pri konverziji mobilnog u strukturni ugljenik. Alokacija mobilnog ugljenika

za unos azota i fosfora određena je koeficijentom njegove potrošnje, U_{CL} . Na osnovu navedenih parametara, brzina promene mobilnog ugljenika u biljci izražava se sledećom relacijom:

$$\frac{dC_M}{dt} = U_{CNL}N_S - \frac{1}{Y} \frac{dC_S}{dt} - U_{CL}C_M \quad (3.45)$$

pri čemu su:

$\frac{dC_M}{dt}$ - brzina sinteze mobilnog ugljenika [gC/dan],

U_{CNL} - koeficijent sinteze mobilnog ugljenika [gC / gN dan],

N_S - količina strukturnog azota [gN],

Y - faktor rasta biljke [gC/gC],

U_{CL} - koeficijent alikacije mobilnog ugljenika [gC/dan],

C_M - količina mobilnog ugljenika [gC],

3. Sinteza strukturnog azota (N_S):

Strukturni azot N_S predstavlja azot koji se nalazi u biljnim tkivima i ključan je za sintezu enzima, proteina i ribozoma, čime direktno utiče na rast i razvoj biljke. Brzina njegove sinteze zavisi od dostupnosti mobilnog azota N_M , koji biljka apsorbuje iz zemljišta i strukturnog fosfora, P_S , koji omogućava njegovu integraciju u biljna tkiva. Proces formiranja strukturnog azota modelovan je prema Majklis-Mentenovoj (*Michaelis-Menten*) kinetici, koja osigurava realističan opis unosa azota u zavisnosti od njegove koncentracije u biljci. Efikasnost konverzije azota u strukturni azot definiše se koeficijentom, U_{NP} , koji izražava brzinu formiranja strukturnog azota u zavisnosti od dostupnog fosfora. Konstanta a_N predstavlja polovinu maksimalne koncentracije azota u biljci. Na osnovu ovih parametara, brzina promene strukturnog azota može se izraziti sledećom relacijom:

$$\frac{dN_S}{dt} = U_{NP} \frac{N_M/C_S}{N_M/C_S + a_N} P_S \quad (3.46)$$

pri čemu su:

$\frac{dN_S}{dt}$ - brzina sinteze strukturnog azota [gN/dan]

U_{NP} - koeficijent efikasnosti konverzije azota u zavisnosti od fosfora [gN / gP dan],

N_M - količina mobilnog azota u biljci [gN],

a_N - Majklis-Mentenova konstanta za azot [gN / gC],

P_S - količina strukturnog fosfora [gP].

4. Sinteza strukturnog fosfora (P_S)

Strukturni fosfor, P_S , predstavlja ključnu komponentu biljnog tkiva i igra važnu ulogu u energetsom metabolizmu i sintezi nukleinskih kiselina. Brzina njegove sinteze zavisi od dostupnosti mobilnog fosfora P_L , koji biljka apsorbira iz zemljišta, i strukturnog azota N_S , koji omogućava njegovu integraciju u biljna tkiva. Proces sinteze strukturnog fosfora modelovan je prema kinetičkom modelu koji ograničava maksimalnu brzinu unosa, čime se osigurava realističan opis apsorpcije i ugradnje fosfora u biljna tkiva. Efikasnost konverzije fosfora u strukturni fosfor definiše se koeficijentom, U_{PL} , koji izražava brzinu formiranja P_S u zavisnosti od dostupnog azota. Konstanta a_P predstavlja polovinu maksimalne koncentracije fosfora u biljci. Na osnovu ovih parametara, brzina promene strukturnog fosfora može se izraziti sledećom relacijom:

$$\frac{dP_S}{dt} = U_{PL} \frac{P_M/C_S}{P_M/C_S + a_P} N_S \quad (3.47)$$

pri čemu su:

$\frac{dP_S}{dt}$ - brzina sinteze strukturnog fosfora [gP/dan],

U_{PL} - koeficijent efikasnosti konverzije fosfora u odnosu na azot [gP / gC dan],

P_M - količina mobilnog fosfora u biljci [gP],

a_P - Majklis-Mentenova konstanta za fosfor [gP / gC].

5. Bilans mobilnog azota u biljci (N_M)

Mobilni azot, N_M , predstavlja lako dostupnu form azota u biljci, koja se koristi za ključne metaboličke procese, uključujući sintezu strukturnog azota, N_S . Njegov bilans zavisi od unosa asimilabilnog azota iz zemljišta N_A i njegove potrošnje za izgradnju strukturnih tkiva. Parametar “ e ” označava udeo ukupne energije biljke koji se usmerava ka apsorpciji azota iz zemljišta, dok se efikasnost tog procesa definiše koeficijentom U_{CL} , koji izražava brzinu pretvaranja energetske resursa u azotni prinos. Promena količine mobilnog azota u biljci rezultat je njegovog unosa i integracije u biljna tkiva, a može se kvantitativno izraziti sledećom relacijom:

$$\frac{dN_M}{dt} = eU_{CL}C_MN_A - \frac{dN_S}{dt} \quad (3.48)$$

pri čemu su:

$\frac{dN_M}{dt}$ - brzina promene mobilnog azota [gN/dan],

e - udeo resursa alociranih za unos azota [-],

U_{CL} - koeficijent efikasnosti unosa azota [gN / gC dan],

N_A - dostupna količina azota u zemljištu [gN].

6. Bilans mobilnog fosfora u biljci, (P_M)

Mobilni fosfor, P_M , predstavlja lako dostupnu formu fosfora u biljci, koja se koristi u ključnim metaboličkim procesima, uključujući sintezu strukturnog fosfora P_S . Njegova količina u biljci zavisi od unosa asimilabilnog fosfora iz zemljišta, P_A , i njegove ugradnje u strukturna tkiva. Deo ukupnih energetskih resursa biljke koji se usmerava na apsorpciju fosfora označen je kao $(1 - e)$, pri čemu je e udeo resursa namenjen unosu azota. Efikasnost apsorpcije fosfora definiše se koeficijentom, U_{CL} , koji izražava brzinu pretvaranja dostupne energije u fosforni prinos. Bilans mobilnog fosfora u biljci zasniva se na razlici između njegovog unosa i potrošnje: povećanje P_M nastaje unosom fosfora iz zemljišta, dok se smanjenje javlja usled njegove transformacije u strukturni fosfor. Ovaj odnos se kvantitativno izražava sledećom jednačinom:

$$\frac{dP_M}{dt} = (1 - e)U_{CL}C_MP_A - \frac{dP_S}{dt} \quad (3.49)$$

pri čemu su:

$\frac{dP_M}{dt}$ - brzina sinteze mobilnog fosfora [gP/dan],

$(1 - e)$ - udeo energetskih resursa alociranih za unos fosfora [-],

P_A - dostupna količina fosfora u zemljištu [gP].

Ukupna količina azota C_N definiše se kao zbir strukturnog azota N_S i mobilnog azota N_L , dok se ukupna količina fosfora C_P određuje kao zbir strukturnog P_S i mobilnog fosfora P_M . Na isti način, ukupni ugljenik označava se kao zbir svih oblika ugljenika prisutnih u biljci. Ovi odnosi omogućavaju bolje razumevanje alokacije nutrijenata i njihovog uticaja na rast i razvoj biljke. Odnos ukupnog azota i fosfora izražava se sledećom relacijom:

$$C_N/C_P = \frac{N_S + N_M}{P_S + P_M} \quad (3.50)$$

Da bi se obezbedio održiv i efikasan povraćaj nutrijenata zemljištu i biljkama, koriste se jednačine koje kvantifikuju unos azota i fosfora. Koeficijenti u Agrenovom modelu određuju se empirijski, putem merenja unosa nutrijenata, sinteze biljnih tkiva i fotosinteze, ili kroz modelovanje i optimizaciju na osnovu podataka iz terenskih eksperimenata. Njihove vrednosti zavise od vrste biljke i ekoloških faktora, poput dostupnosti nutrijenata, temperature i vlažnosti

zemljišta. Vrednosti ovih koeficijenata dostupne su u literaturi za različite biljne vrste. Optimizacijom sirove smeše predviđeno je da sadržaj fosfora u $Q_{t,komp}$ bude najmanje 1%, što je ključni parametar za kvalitet komposta namenjenog povraćaju nutrijenata, u skladu sa Pravilnikom. Ovaj prag zadovoljava osnovne nutritivne zahteve za opštu primenu, dok se za specifične biljne kulture koristi analiza prema Agrenovom modelu. Na osnovu literature moguće je utvrditi optimalne koncentracije nutrijenata za različite vrste, čime se kompost može prilagoditi specifičnim agronomskim zahtevima.

Curenje materije, Q_c , iz sistema odnosi se na deo komposta ili digestata koji nije iskorišćen unutar zatvorene petlje CE. Ovo curenje predstavlja potencijalni gubitak vrednih resursa i ukazuje na mogućnosti za unapređenje sistema kako bi se obezbedila maksimalna upotreba proizvedenih materijala i smanjilo nepotrebno rasipanje. Stepem cirkularnosti materije, C_m , definiše se kao odnos između ukupne količine tretirane materije i materije koja se koristi unutar sistema, u odnosu na ukupnu količinu materije u zatvorenoj petlji, koja uključuje i curenje materije Q_c . Izražava se sledećom relacijom:

$$C_m = \frac{Q_{pot} + Q_t}{Q_{pot} + Q_t + Q_c} 100\% \quad (3.51)$$

pri čemu je:

Q_t - ukupna količina tretirane materije [t/dan],

Q_{pot} - ukupna potrebna količina materijala u sistemu [t/dan].

Vrednost C_m od 100% ukazuje na potpuno efikasan sistem bez materijalnih gubitaka, dok niže vrednosti signaliziraju prisustvo curenja, najčešće usled nedovoljne iskorišćenosti sirovina. Analiza ulaznih i izlaznih tokova, kao i unutrašnje raspodele materijala, omogućava dublje razumevanje sistema i identifikaciju ključnih tačaka za njegovo poboljšanje.

4. MATERIJALI I METODE

Razvijeni model IUOO, zasnovan na principima CE, koncipiran je tako da poveže tokove materije i energije u zatvorenom sistemu i omogući njihovo kvantitativno praćenje putem definisanih indikatora. Sistem se posmatra integralno, ne samo kroz pojedinačne procese već i kroz njihove međusobne veze. Primena modela prikazana je na studiji slučaja za grad Niš, gde su definisani ulazni podaci i izvršena verifikacija modela poređenjem optimalnih mešavina dobijenih matematičkim putem sa stvarnim odnosima mešanja sirovina u biogasnom postrojenju. Grad Niš, koji obuhvata urbane i ruralne oblasti i raspolaže raznovrsnim tokovima organskog otpada, odabran je kao reprezentativan primer za testiranje razvijenog koncepta. Studija slučaja obuhvata geografske i demografske karakteristike teritorije, vrste i količine otpada i pretpostavke zasnovane na lokalnim uslovima, čime je formiran eksperimentalni okvir i obezbeđena osnova za sprovođenje simulacija.

4.1. OPIS STUDIJE SLUČAJA

U cilju praktične primene razvijenog modela IUOO i njegove verifikacije u realnim uslovima sprovedena je studija slučaja za grad Niš. Ova studija omogućava povezivanje teorijskog i eksperimentalnog dela istraživanja sa lokalnim karakteristikama posmatranog sistema, čime se obezbeđuje realna procena performansi modela.

4.1.1. Lokacija i opis studije slučaja

Grad Niš se nalazi u jugoistočnom delu Srbije, prostire se na površini od 596,71 km² i prema popisu iz 2022. godine ima 278.867 stanovnika (Republički zavod za statistiku, 2022). Prema podacima JKP „Mediana“ (2016), godišnje se proizvede 65.348 t komunalnog otpada, od čega 27,32% (17.866 t) čini organska frakcija. Komunalni otpad se prikuplja i odlaže na gradsku deponiju „Bubanj“. Na javnim površinama površine 3.030.526 m² nastaje oko 8.855 t parkovskog otpada, koji obuhvata travu, lišće i granje. Ruralna područja Niškog okruga generišu oko 135.569 t svinjskih i 498.739 t goveđih ekskremenata, 78.460-117.960 t slame i 438.820 t sena godišnje. Industrijski otpad, poput otpada iz mleکارa (132 t) i pivskog tropa (9.191 t), takođe predstavlja značajan resurs.

4.1.2. Karakterizacija organskih sirovina

Dostupne organske sirovine predstavljaju osnovu za primenu modela IUOO, koji omogućava efikasnije korišćenje materijalnih i energetske tokova. U tabeli 4.1 prikazane su

vrste i količine organskog otpada dostupnog na teritoriji grada Niša i okoline, zajedno sa osnovnim karakteristikama koje određuju njihovu pogodnost za AD i kompostiranje.

Tabela 4.1 *Vrste i količine organskog otpada dostupnog u Gradu Nišu i okolini (Chen et al., 2022; Cogger et al., 2002; Gómez-Brandón et al., 2008; Hungria et al., 2017; Ikram et al., 2017; Karak., 2014; Kebede, 2020; Kumar et al., 2011; Labatut et al., 2011; Petric, Avdihodžić, & Ibrić, 2015; Petric, Šestan, & Šestan, 2009; PUC "Mediana," 2016; Shi., 2022; Toscano et al., 2013; Udourioh et al., 2025; Boldrin & Christensen, 2010; Díaz et al., 1993)*

Vrsta otpada	Količina [t/god]	W [%]	C [%]	N [%]	C/N odnos	L [%]	P [%]	K [%]	Prinos biogasa [m ³ /kg VS]
Komunalni otpad									
ODKO	17.866,00	70,00	47,90	3,10	15,45	4,59	0,28	0,78	0,65
Parkovski otpad	8.855,00	60,00	47,80	3,40	14,00	30,00	0,30- 1,37	0,50- 1,00	0,10-0,20
Poljoprivredni otpad									
Svinjski ekskrementi	135.569,00	82,50	39,14	3,92	10,00	1,83	3,69	0,74	0,25-0,50
Govedi ekskrementi	498.739,00	78,20	33,61	8,95	3,80	1,70	0,86	2,05	0,20-0,30
Slama	78.460,00- 117.960,00	10,80	42,00	0,45	92,72	6,53	2,65	14,84	0,35-0,45
Seno	438.820,00	17,00	41,80	0,73	57,03	5,51	0,30	2,00	0,56
Industrijski otpad									
Otpad iz mlekare	132,00	92,00	32,60	3,80	13,00	0,00	3,47	1,70	0,70
Pivski trop	9.191,00	66,00	53,00	3,81	15,00	12,00- 28,00	0,60	0,50	0,30

Podaci iz tabele 4.1 služe kao ulazni podaci u simulacijama primene modela IUOO.

4.1.3. Specifične pretpostavke vezane za studiju slučaja.

U nastavku su prikazane pretpostavke koje odražavaju uslove i ograničenja grada Niša i njegovog okruženja, radi prilagođene primene razvijenog modela IUOO.

Geografske granice (Pretpostavka 12): Model je razvijen za grad Niš i okolna ruralna područja, s postrojenjem za tretman otpada lociranim u blizini deponije „Bubanj“. Pretpostavlja se da se transport organskog otpada odvija istim rutama kao i transport komunalnog otpada. Takva lokacija postrojenja za AD i kompostiranje dodatno smanjuje troškove i vreme prevoza. Tabela 4.2 prikazuje potrošnju dizel goriva za prevoz komunalnog i organskog otpada na teritoriji grada Niša. Prema standardu EN 590:2009, donja toplotna moć dizel goriva iznosi 43,1 MJ/kg, a gustina 0,83 kg/l. Na osnovu donje toplotne moći od 35,85 MJ/l za dizel i 26 MJ/m³ za biogas (Pretpostavka 14), izračunato je da 1,37 m³ biogasa može zameniti 1 l dizela. Ukupna godišnja potrošnja od 127.663 l dizela odgovara 175.116 m³ biogasa. Za prevoz 1 t otpada do postrojenja potrebno je 7,14 l dizela, odnosno 9,78 m³ biogasa. Na osnovu ovih odnosa određena je i potrebna količina biogasa za transport otpada tokom godine.

Tabela 4.2 *Potrošnja dizel goriva za transport otpada u Nišu (Izvor: PUC "Mediana," 2016)*

Mesec	Potrošnja dizel goriva za transport komunalnog čvrstog otpada [l/dan]	Potrošnja dizel goriva za transport ODKO [l/dan]
Januar	1.341,00	366,36
Februar	1.302,00	355,71
Mart	1.238,00	338,22
April	1.328,00	362,81
Maj	1.167,00	318,82
Jun	1.224,00	334,40
Jul	1.235,00	337,40
Avgust	1.304,00	356,25
Septembar	1.272,00	347,51
Oktobar	1.364,00	372,64
Novembar	1.368,00	373,74
Decembar	1.208,00	330,03
Godišnja potrošnja	466.949,00	127570,47

Transport (Pretpostavka 13): Transport organskog otpada koristi postojeće rute i infrastrukturu, uz minimalne dodatne troškove za logistiku. Energetski zahtevi za transport pokrivaju se proizvedenim biogasom.

Sastav biogasa (Pretpostavka 14): Na osnovu Pretpostavke 7, biogas dobijen iz optimalne mešavine sadrži 60% CH_4 , što omogućava preciznu energetsku procenu i optimizaciju procesa. Energetska vrednost takvog biogasa iznosi 21,5 MJ/m³ i koristi se za proračun energetskih potreba postrojenja i transporta.

Energetski zahtevi za održavanje radnih uslova digestora (Pretpostavke 15 i 16)

- **Temperatura supstrata (Pretpostavka 15):** Za proračun toplotnih gubitaka pretpostavlja se da je temperatura supstrata na ulazu u digestor jednaka prosečnoj mesečnoj spoljnoj temperaturi vazduha u Nišu, dok se prosečna godišnja vrednost uzima kao 13°C.

Tabela 4.3 *Prosečne mesečne spoljašnje temperature u Nišu (RHMZ)*

Mesec	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Prosečna t (°C/dan)
Prosečna t (°C)	2,10	3,60	6,90	11,50	18,40	20,20	25,30	25,00	20,10	12,10	7,70	2,90	13,00

Ova pretpostavka pojednostavljuje proračune toplotnih gubitaka uzimajući u obzir klimatske uslove specifične za posmatranu lokaciju.

- **Toplotni gubici (Pretpostavka 16):** Koeficijent prenosa toplote kroz zidove digestora je 0,70 W/m²°C.

Specifične pretpostavke za Grad Niš, u kombinaciji sa opštim, obezbeđuju prilagođavanje modela lokalnim uslovima i predstavljaju osnovu za njegovu primenu i ocenu efikasnosti u okviru studije slučaja.

4.2. METODOLOGIJA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja zasnovana je na integrisanom pristupu koji povezuje matematičko modelovanje, analizu materijalnih i energetske tokova i procenu performansi sistema pomoću indikatora CE. Takav pristup omogućava sagledavanje sistema i kroz pojedinačne procese i kroz njihove međusobne veze u okviru zatvorene petlje, što je ključno za razumevanje stepena cirkularnosti. Fizički model opisuje odnose između ulaznih sirovina, tretmana i izlaznih tokova, čime se obezbeđuje uvid u povezanost svih komponenti i funkcionisanje sistema u celini. Na toj osnovi razvijen je matematički model koji omogućava kvantifikaciju i optimizaciju bitnih parametara, dok analiza bilansa materije i energije pokazuje efikasnost zatvaranja tokova. Evaluacija pomoću indikatora CE daje merljive pokazatelje održivosti i potvrđuje mogućnost primene modela u realnim uslovima. Ovako oblikovan metodološki okvir povezuje teorijski pristup sa stvarnim podacima i lokalnim ograničenjima. Njegova primenljivost proverena je kroz tri grupe simulacija: eksplorativnu, evaluacionu i validacionu. Plan istraživanja definiše opšti i posebne ciljeve i način njihovog ostvarivanja, dok su korišćeni softverski alati za obradu i analizu podataka predstavljeni u završnom delu poglavlja. Poseban značaj metodologije ogleda se u povezivanju materijalnih i energetske tokova u zatvoreni sistem, primeni merljivih indikatora CE i istovremenoj proceni nutritivnog i energetskeg potencijala organskog otpada, čime se model potvrđuje i kao praktičan alat.

4.2.1. Plan eksperimentalnog istraživanja

U ovom delu rada, na osnovu ulaznih podataka prikazanih u poglavlju 4.1, definisan je metodološki okvir istraživanja i opisane su planirane eksperimentalne aktivnosti. Na osnovu opšteg, glavnog i posebnih ciljeva oblikovan je plan istraživanja. Plan istraživanja obuhvata šest međusobno povezanih simulacija raspoređenih u tri grupe. Njihov redosled osmišljen je tako da obezbedi logičan tok, od razvoja fizičkog i matematičkog modela i razumevanja unutrašnjih procesa (eksplorativna faza), preko evaluacije performansi sistema u pogledu materijalnih i energetske tokova i nutritivnog potencijala komposta, do završne validacije matematičkog modela. Na taj način omogućeno je testiranje modela kroz različite uslove i pristupe, čime se obezbeđuje provera hipoteza, ostvarenje postavljenih ciljeva istraživanja i ocena mogućnosti primene razvijenog modela u realnim sistemima. Pregled ciljeva, ključnih parametara i očekivanih ishoda svake od šest simulacija dat je u planu istraživanja (tabela 4.4).

Prva grupa obuhvata tri simulacije i predstavlja eksplorativnu fazu istraživanja usmerenu na razvoj fizičkog i matematičkog modela, kao i na razumevanje unutrašnjih procesa

u sistemu. U okviru ove faze vrši se provera modela za formiranje optimalne ulazne mešavine sirovina, kvantifikuju se materijalni i energetski tokovi, prate procesi anaerobne digestije i kompostiranja i određuju osnovni bilansi sistema. Na taj način ispituje se kapacitet modela da prikaže tokove unutar zatvorene petlje, identifikuje kritične parametre, kao što su odnos C/N, sadržaj lignina i raspoloživost nutrijenata, i predvidi efikasnost sistema u pogledu proizvodnje energije i povraćaja nutrijenata.

Tabela 4.4 Plan istraživanja

Simulacija	Opis simulacije		Kriterijumi modelovanja	Posmatrani parametri	Očekivani ishodi	
	Tretman	Sirovine				
Eksplorativna faza						
1	Anaerobna digestija	ODKO, SL, SN, GE, SE	Odnos C/N : 20-30; 25-30, Min L	W, prinos biogasa	Provera modela za određivanje optimalnih odnosa mesavina	
2	Kompostiranje	ODKO, SL, SN, GE, SE	Odnos C/N : 20-30; 25-30, Min P od 1%	W, N, K		
3	Anaerobna digestija	ODKO, PO	Materijalno-energetski bilans zatvorene petlje IUOO		Procena kapaciteta sistema IUOO	
Evaluaciona faza						
Scenario						
4	BS1	Kompostiranje	ODKO, PO	Odnos C/N : 25-30, min P od 1%	W, N, K	Ocena zatvorene petlje (2 sirovine)
	BS2	Anaerobna digestija	ODKO, PO	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje (2 sirovine)
	S1	Kompostiranje	ODKO, PO, PT	Odnos C/N : 25-30, min P od 1%	W, N, K	Ocena zatvorene petlje (3 sirovine)
	S2	Anaerobna digestija	ODKO, PO, PT	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje (3 sirovine)
	S3	Anaerobna digestija	ODKO, PO, OM	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje (3 sirovine)
	S4	Anaerobna digestija	ODKO, PO, PT, OM	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje (4 sirovine)
	S5	Kompostiranje	ODKO, PO, PT, OM	Odnos C/N : 25-30, min P od 1%	W, N, K	Ocena zatvorene petlje (4 sirovine)
	S6	Anaerobna digestija	ODKO, PO	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje kombinovanim tretmanom (2 sirovine)
		Kompostiranje	ODKO, PO	Odnos C/N : 25-30, min P od 1%	W, N, K	
	S7	Anaerobna digestija	ODKO, PO, PT	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje kombinovanim tretmanom (3 sirovine)
		Kompostiranje	ODKO, PO, PT	Odnos C/N : 25-30, min P od 1%	W, N, K	
	S8	Anaerobna digestija	ODKO, PO, PT, OM	Odnos C/N : 20-30; min L	W , prinos biogasa	Ocena zatvorene petlje kombinovanim tretmanom (4 sirovine)
		Kompostiranje	ODKO, PO, PT, OM	Odnos C/N : 25-30, min P od 1%	W, N, K	
5	Kompostiranje	ODKO, SL, SN, GE, SE	Odnos C/N : 20-30; 25.30, min P od 1%	Nutritivne potrebe ječma za P	Procena potencijala komposta za nutritivni povraćaj	
Validaciona faza						
6	Anaerobna digestija	GE, surutka, melasa, silaža, glicerol	Odnos C/N : 20-30; 25.30; 20-21.4), udeo glicerina: 0-2%	Prinos biogasa	Validacija modela u realnim uslovima	

Druga grupa obuhvata dve simulacije i ima evaluacioni karakter. Njena osnovna svrha postavljena je kao sagledavanje mogućnosti zatvaranja materijalne i energetske petlje korišćenjem organskog otpada tako da se zadovolje potrebe posmatranog sistema. U okviru ove grupe primenjeni su indikatori CE, odnosno stepen uključivanja sirovina u kružne tokove, curenje materije i energije i ukupna cirkularnost materijalnih i energetskih tokova. Posebna pažnja usmerena je i na analizu nutritivnog potencijala komposta. Na ovaj način omogućeno je da kapacitet razvijenog modela bude procenjen kroz pouzdane i merljive pokazatelje cirkularnosti, nutritivne vrednosti i održivosti sistema.

Treća grupa obuhvata jednu simulaciju koja predstavlja validacionu fazu istraživanja. Njena svrha je verifikacija matematičkog modela za određivanje optimalne mešavine sirovina za AD kroz poređenje sa realnim uslovima, čime se potvrđuje pouzdanost i primenljivost razvijenog modela.

Plan istraživanja je koncipiran tako da simulacije prate logičan razvoj modela od njegovog formiranja i razumevanja osnovnih procesa, preko procene performansi sistema u pogledu zatvaranja materijalnih i energetskih tokova i nutritivnog potencijala komposta, do završne validacije matematičkog modela u realnim uslovima. Na ovaj način obezbeđeno je da se svaki od postavljenih ciljeva istraživanja proveri kroz odgovarajuću fazu, čime se ostvaruje postupna i konzistentna evaluacija razvijenog modela.

4.2.2. Primenjeni softverski alati

Za sprovođenje simulacija i analizu rezultata korišćeni su specijalizovani softverski alati koji omogućavaju razvoj matematičkih modela, organizaciju podataka i interpretaciju rezultata.

Wolfram Mathematica korišćena je za razvoj i testiranje matematičkog modela. Softver je omogućio rešavanje višekriterijumskih optimizacija, kao što su maksimizacija prinosa biogasa i minimizacija sadržaja lignina. Takođe, korišćen je za vizualizaciju rezultata i primenu simboličkih i numeričkih analiza neophodnih za simulacije.

Microsoft Excel korišćen je za organizaciju ulaznih podataka o vrstama otpada, njihovim fizičko-hemijskim karakteristikama i generisanim količinama. Excel je omogućio pripremu i analizu osnovnih podataka potrebnih za simulacije, kao i izradu tabela koje su služile kao ulazni podaci za matematički model.

Primena ovih alata bila je ključna za implementaciju simulacija i obradu podataka, obezbeđujući pouzdane rezultate za analizu predloženog modela.

5. ANALIZA MODELA INTEGRALNOG UPRAVLJANJA ORGANSKIM OTPADOM

Na osnovu ulaznih podataka i metodološkog okvira iz poglavlja 4, u ovom poglavlju je prikazana primena i analiza razvijenog modela IUOO, sprovedena u skladu sa principima CE. Cilj sprovedene analize bio je da se sagleda funkcionalnost, održivost i praktična primenljivost modela, kao i da se potvrdi ostvarenje postavljenih ciljeva istraživanja.

Analiza obuhvata tri istraživačke faze: eksplorativnu, evaluacionu i validacionu. Eksplorativna faza fokusira se na proveru modela za određivanje optimalnih smeša sirovina za AD i kompostiranje. U okviru ove faze određuju se granice sistema i procenjuje energetska i materijalna samoodrživost modela za studiju slučaja grada Niša. Evaluaciona faza obuhvata analizu različitih tipova zatvorenih petlji u okviru IUOO i ocenu njihove efikasnosti na osnovu indikatora CE, među kojima su stepen uključenja organske materije u tokove CE, curenje materije i energije i cirkularnost materije i energije. Pored toga, kroz analizu nutritivnog potencijala komposta procenjuje se mogućnost povraćaja nutrijenata u zemljište i doprinos stvaranju zatvorenog ciklusa kruženja materije unutar CE. Validaciona faza ima za cilj proveru pouzdanosti i tačnosti matematičkog modela, kroz poređenje rezultata dobijenih simulacijom sa empirijskim podacima.

Svaka faza obuhvata ulazne podatke, postupak modeliranja i dobijene rezultate, sa naglaskom na njihovu interpretaciju u odnosu na postavljene ciljeve istraživanja. Na taj način, analiza uspostavlja metodološku vezu između poglavlja 4 i 6, potvrđujući praktičnu vrednost i primenljivost razvijenog koncepta, te stvarajući osnovu za njegovo dalje unapređenje i širu primenu u sistemima IUOO.

5.1. EKSPLOLATIVNA FAZA

Eksplorativna faza istraživanja postavlja osnovu za ostvarenje opšteg cilja, koji se odnosi na analizu mogućnosti uključivanja maksimalnih količina organskog otpada u IUOO po principima CE. Cilj ove faze je da se, primenom razvijenog modela, ispita sposobnost dostupnih sirovina da omoguće zatvaranje materijalno-energetske petlje, uzimajući u obzir kriterijume od značaja za procese AD i kompostiranja. U okviru ove faze definisani su početni uslovi istraživanja, koji su obuhvatili karakteristike ulaznih sirovina i održavanje procesnih parametara u granicama stabilnosti sistema. Istraživanje je obuhvatilo tri simulacije koje predstavljaju logičke korake u razumevanju procesa i tokova u sistemu IUOO.

Prva simulacija usmerena je na optimizaciju odnosa mešanja sirovina za proces AD, sa ciljem postizanja najvećeg mogućeg prinosa biogasa uz minimalan sadržaj lignina. Kriterijumi su obuhvatili održavanje odnosa C/N u optimalnom opsegu (20-30 i 25-30) i minimizaciju sadržaja L , budući da njegovo prisustvo ograničava razgradnju organske materije, dok je sadržaj W praćen. Primenjen je višekriterijumski metod optimizacije, kojim su određene optimalne kombinacije sirovina na osnovu Pareto optimalne tačke.

Druga simulacija fokusirana je na proces kompostiranja, pri čemu su kriterijumi uključivali održavanje odnosa C/N u optimalnom opsegu (20-30 i 25-30) i kontrolu osnovnih nutrijenata (N , P , K). U skladu sa važećim pravilnicima, zahtevano je da kompost sadrži najmanje 1 % P , dok su sadržaji N , K i W posmatrani kao faktori koji utiču na stabilnost i kvalitet krajnjeg proizvoda. I ovde je primenjen višekriterijumski metod, kojim su određene optimalne smeše sirovina za traženi kvalitet komposta.

Zajedno, ove dve simulacije predstavljaju proveru razvijenog modela u pogledu njegove sposobnosti da odredi optimalne mešavine sirovina za različite biološke procese tretmana otpada, anaerobnu digestiju i kompostiranje.

Treća simulacija je usmerena na izračunavanje materijalnih i energetske tokova integrisanog sistema IUOO, pri čemu su osnovni tokovi komunalnog otpada grada Niša (ODKO i parkovski otpad) tretirani kroz proces AD, koji obezbeđuje izvor energije za transport i funkcionisanje sistema. Za razliku od prethodnih, koje su bile fokusirane na pojedinačne procese, ova simulacija sagledava sistem u celini, analizirajući ravnotežu između raspoloživih resursa i potreba sistema.

5.1.1. Simulacija 1: Optimizacija odnosa mešanja organskih sirovina za anaerobnu digestiju

Prva simulacija sprovedena je radi optimizacije odnosa mešanja organskih sirovina, sa ciljem postizanja maksimalnog prinosa biogasa uz minimalan sadržaj lignina u smeši. Proces optimizacije zasnovan je na održavanju odnosa C/N u dva definisana opsega (20-30 i 25-30), pri čemu su praćeni sadržaj vlage i prinos biogasa, posmatran kao ponderisana funkcija doprinosa pojedinačnih sirovina. Na osnovu sprovedene analize, model je identifikovao optimalnu mešavinu sirovina.

Ulazni podaci

U ovoj simulaciji korišćeni su podaci o vrstama i količinama organskih sirovina dostupnih na teritoriji Niša i okolnih ruralnih područja. U analizu su uključeni ODKO,

poljoprivredni ostaci (seno i slama) i životinjski ekskrementi (govedi i svinjski). Osnovne karakteristike sirovina, uključujući sadržaj C i N , odnos C/N , sadržaj L i prinos biogasa, i njihove dostupne količine korišćene kao ulazni parametri prikazane su u tabeli 4.1. Podaci se zasnivaju na istraživanjima koja potvrđuju uticaj odnosa C/N i sadržaja L na prinos biogasa (Zhang et al., 2012; Lu, 2014; Triolo et al., 2012).

Proces modeliranja

Matematički model primenjen u simulaciji razvijen je prema metodologiji opisanoj u radu Momčilović (2018) i zasniva se na podacima o dostupnim sirovinama i njihovom elementarnom sastavu. Radi jasnijeg prikaza procesa modeliranja, pri određivanju optimalnog odnosa mešanja sirovina za postizanje najvećeg prinosa biogasa uz minimalan sadržaj lignina, model je najpre identifikovao mešavinu sa najvećim sadržajem ugljenika, zatim kombinaciju sa najmanjim sadržajem lignina, a potom i kompromisno rešenje definisano Pareto optimizacijom. Na taj način, rezultati su prikazani u logičnom nizu, od pojedinačnih kriterijuma ka njihovom objedinjavanju. Podaci o karakteristikama otpada (tabela 4.1) poslužili su kao osnova za višekriterijumsku optimizaciju sprovedenu kroz dve iteracije sa različitim ograničenjima odnosa C/N . Prva je obuhvatila širi opseg od 20 do 30, dok je druga analizirala užu interval od 25 do 30, čime je proces postao zahtevniji i precizniji. Korišćenjem jednačina 3.2-3.5, problem je redukovao na četiri funkcije sa pet varijabli. Analiza je zasnovana na mešanju pet organskih sirovina dostupnih na teritoriji grada Niša.

$$C(q) = 39,14q_{ad,1} + 33,61q_{ad,2} + 42,00q_{ad,3} + 41,80q_{ad,4} + 47,90q_{ad,5}$$

$$N(q) = 3,90q_{ad,1} + 8,95q_{ad,2} + 0,435q_{ad,3} + 0,73q_{ad,4} + 3,10q_{ad,5}$$

$$L(q) = 1,83q_{ad,1} + 1,70q_{ad,2} + 6,53q_{ad,3} + 5,51q_{ad,4} + 4,59q_{ad,5}$$

$$W(q) = 82,50q_{ad,1} + 78,20q_{ad,2} + 10,80q_{ad,3} + 17,00q_{ad,4} + 70,00q_{ad,5}$$

Primenom prethodno opisanih ograničenja modela iz jednačie 3.6, dobija se dopustiva oblast:

$$D \begin{cases} q_{ad,1} + q_{ad,2} + q_{ad,3} + q_{ad,4} + q_{ad,5} = 1 \\ -39,26q_{ad,1} - 145,39q_{ad,2} + 33,00q_{ad,3} + 27,20q_{ad,4} - 14,10q_{ad,5} \geq 0 \\ 78,46q_{ad,1} + 234,89q_{ad,2} - 28,50q_{ad,3} - 19,90q_{ad,4} + 45,10q_{ad,5} \geq 0 \end{cases}$$

Koristeći gore pomenutu metodu optimizacije (simpleks metodu), rešenja pojedinačnih problema su:

$$\max C(q) = 46,13 = C(0; 0; 0,2994; 0; 0,7006), q \in D$$

$$\min L(q) = 4,00 = C(0,4093; 0; 0; 0,5907; 0), q \in D$$

Rešenje konkretnog višekriterijumskog problema, definisanog jednačinom 3.7 na istoj izvodljivoj oblasti, je Pareto optimalna tačka.

$$\min G(q) = G(0,3245; 0,000006; 0,000257055; 0,539097; 0,136374), q \in D$$

Na kraju, rešenje sagledavanog glavnog problema je Pareto optimalna tačka

$$q^* = 0,3245; 0,000006; 0,000257055; 0,539097; 0,136374$$

U Pareto optimalnoj tački uslov da se odnos $20 \leq \frac{C(q)}{N(q)} \leq 30$ je zadovoljen i optimizovane vrednosti funkcija sadržaja ugljenika $C(q)$, sadržaja lignina $L(q)$ i sadržaja vlage $W(q)$ iznose:

$$C^* = C(q^*) = 45,04$$

$$L^* = L(q^*) = 4,76$$

$$W^* = W(q^*) = 50,68$$

U drugoj iteraciji, postavljanjem užih granica odnosa C/N u opsegu od 25 do 30, proces optimizacije postaje složeniji, jer novo ograničenje sužava dopustivu oblast D . Takvo ograničenje utiče na izbor sirovina i dovodi do promene pojedinačnih udela (varijabli $q_{ad,i}$). Uvođenje ovog uslova dovodi do niza promena u procesu optimizacije. Pre svega, dolazi do redukcije dopustive oblasti D , jer strože definisanje opsega odnosa C/N eliminiše deo prethodnih Pareto optimalnih tačaka i zahteva ponovnu evaluaciju rešenja. Istovremeno se prilagođavaju vrednosti funkcija: maksimalni sadržaj ugljenika $C(q)$ i minimalni sadržaj lignina $L(q)$ koriguju se tako da novo rešenje ispunji dodatni uslov. Prinos biogasa se prati kao zavisna promenljiva u odnosu na zadate kriterijume optimizacije. Na osnovu toga formiraju se nove Pareto optimalne tačke koje predstavljaju uravnotežen odnos između sadržaja lignina i odnosa C/N u optimalnoj smeši. Na strožih granica, nova Pareto optimalna tačka:

$$q^* = 0,0241589; 0,000000191; 0,000000314; 0,570215; 0,405626$$

U Pareto optimalnoj tački dodatni uslov $25 \leq \frac{C(q)}{N(q)} \leq 30$ je zadovoljen i optimizovane vrednosti funkcija sadržaja ugljenika $C(q)$ i sadržaja lignina $L(q)$ iznose:

$$C^* = C(q^*) = 44,21$$

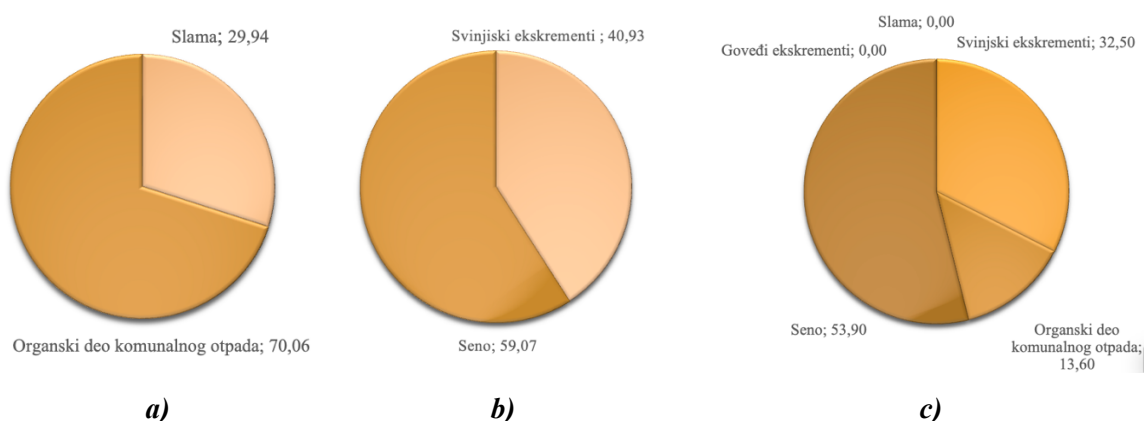
$$L^* = L(q^*) = 5,04$$

$$W^* = W(q^*) = 40,08$$

Rezultati simulacije i uticaj postavljenih ograničenja biće dalje analizirani i razmatrani u narednim poglavljima.

Rezultati

U prvoj iteraciji, maksimizacija sadržaja ugljenika (Slika 5.1a) dovela je do formiranja mešavine sirovina sa 46,13% C, dobijenog kombinovanjem 29,94% slame i 70,06% ODKO (prilog 9.5). Minimizacijom sadržaja L (Slika 5.1b) on je sveden na 4,00%, pri čemu je optimalna kombinacija postignuta mešanjem 40,93% svinjskih ekskrementa i 59,07% sena, dok ostale sirovine nisu bile uključene (prilog 9.5).



Slika 5.1 Optimalni odnos mešanja sirovina sa ograničenjem odnosa C/N 20-30 a) za maksimizaciju sadržaja ugljenika b) za minimizaciju sadržaja lignina c) u Pareto optimalnoj tački

Konačna Pareto optimizacija (Slika 5.1c) obuhvatila je 32,45% svinjskih ekskrementa, 53,90% sena, 13,63% ODKO i 0% goveđih ekskrementa i slame (prilog 9.5). Optimalna mešavina karakteriše se odnosom C/N od 20,0003, sadržajem L od 4,19% i W 50,68%, čime su zadati kriterijumi u potpunosti ispunjeni (prilog 9.5). Ovaj sastav obezbeđuje ravnotežu između energetskeg potencijala i smanjenog sadržaja lignina, uz korišćenje sirovina dostupnih tokom cele godine na teritoriji grada Niša. U tabeli 5.1 prikazani su odnosi mešanja i količine organske sirovine koje se mogu tretirati na teritoriji grada Niša. Sirovine su mešane u optimizovanim udelima kako bi se iskoristila celokupna količina ODKO. Ukupan udeo svinjskih ekskrementa, sena i ODKO čini 99,98% ukupne mešavine. Učešće goveđih ekskrementa i slame, od 0,0006% i 0,025%, može se zanemariti jer nema značajan uticaj na rezultate optimizacije.

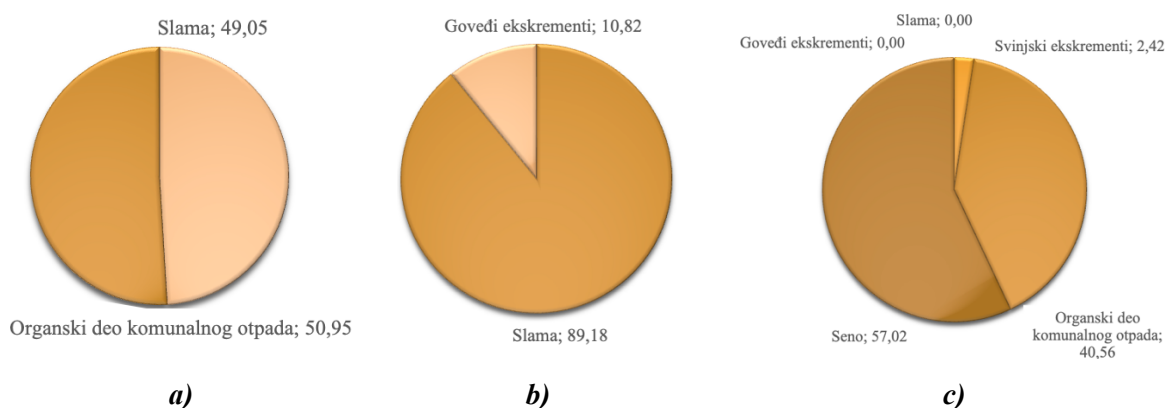
Tabela 5.1 Optimalni odnos supstrata za odnos C/N u rasponu 20-30

Organska sirovina	Svinjski ekskrementi	Govedi ekskrementi	Slama	Seno	ODKO
Udeo [%]	32,45	0,0006	0,025	53,90	13,63
Količina [m ³]	42.534,00	0,78	32,76	70.651,00	17.866,00

S obzirom na sličnosti u elementarnom sastavu, moguće su zamene u slučaju nedostatka pojedinih sirovina. Tako, goveđi ekskrementi mogu zameniti svinjske, dok slama može

zameniti seno. Ove zamene omogućavaju veću fleksibilnost sistema i efikasnije iskorišćenje dostupnih resursa.

U drugoj iteraciji, sprovedenoj za uži opseg odnosa C/N od 25 do 30, maksimizacija sadržaja ugljenika (Slika 5.2a) rezultirala je mešavinom sirovina sa 45,00% ugljenika, dobijenim kombinovanjem 49,04% slame i 50,95% ODKO (prilog 9.5). Minimizacija sadržaja lignina (Slika 5.2b) postignuta je na nivou od 6,00%, mešanjem 10,82% goveđih ekskrementa i 89,17% slame (prilog 9.5). Pareto optimalna tačka (Slika 5.2c) obuhvatila je 2,41% svinjskih ekskrementa, 57,02% sena i 40,56% ODKO, dok su slama i goveđi ekskrementi bili prisutni u zanemarljivim udelima od 0,000019% i 0,000031%, sa karakteristikama mešavine: odnos C/N 25, L 5,04 % i W 40,08%. Za razliku od šireg opsega, u ovom slučaju su goveđi ekskrementi i slama praktično eliminisani, dok seno i komunalni otpad čine osnovu optimalne kombinacije.



Slika 5.2 Optimalni odnos mešanja sirovina sa ograničenjem odnosa C/N 25-30 a) za maksimizaciju sadržaja ugljenika b) za minimizaciju sadržaja lignina c) u Pareto optimalnoj tački

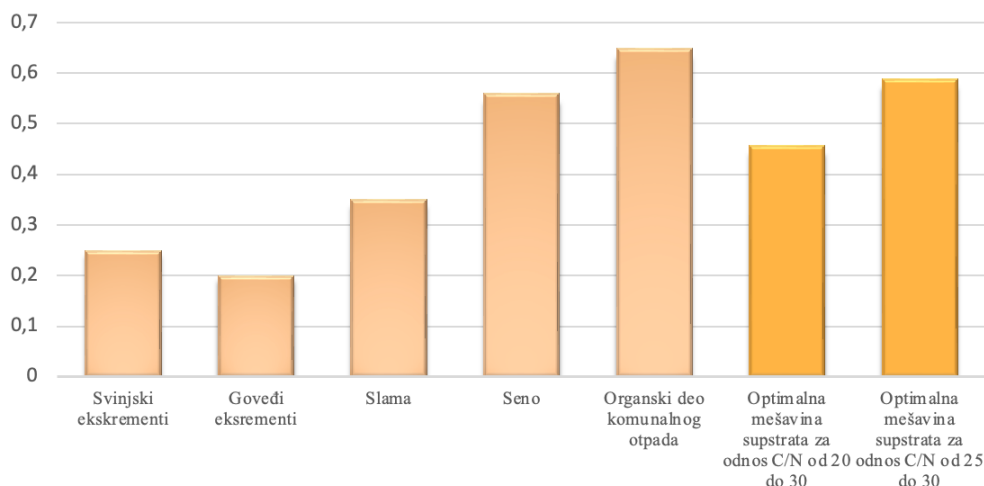
U tabeli 5.2 prikazani su odnosi mešanja u Pareto optimalnoj tački za opseg odnosa C/N od 25 do 30, kao i količine organske sirovine koje se mogu tretirati na teritoriji grada Niša u dobijenom optimalnom udelu. Ukupan udeo sena i ODKO čini 97,58% mešavine, dok je doprinos svinjskih ekskrementa manji, a goveđi ekskrementi i slama su eliminisani jer njihov udeo ne utiče na postizanje optimalnih rezultata.

Tabela 5.2 Optimalni odnos supstrata u ko-digestiji za odnos C/N u rasponu 25-30

Organska sirovina	Svinjski ekskrementi	Goveđi ekskrementi	Slama	Seno	ODKO
Udeo [%]	2,41	0,000019	0,000031	57,02	40,56
Količina [m ³]	1.062,00	0,84	1,37	25.126,00	17.866,00

U nastavku je prikazan prinos biogasa u zavisnosti od pojedinih oblasti odnosa C/N . Radi jasnijeg poređenja, na slici 5.3 predstavljeni su prinosi biogasa za obe iteracije i pojedinačne sirovine. Za širi opseg prinos biogasa iznosi 0,472 m³/kg VS, dok uži opseg

obezbeđuje viši prinos od 0,589 m³/kg VS. Međutim, godišnja proizvodnja je veća u širem opsegu (38.192.511 m³) u poređenju sa užim (15.203.872 m³).



Slika 5.3 Poređenje prinosa biogasa pojedinačnih supstrata i optimalnih mešavina

U poređenju sa pojedinačnim sirovinama, optimalne mešavine sirovina ostvaruju veći prinos biogasa u odnosu na svinjske i goveđe ekskreme, slamu i seno, ali manji u odnosu na ODKO. Na osnovu toga, može se zaključiti da kombinovanje sirovina doprinosi postizanju stabilnijih povoljnijih uslova u AD.

5.1.2. Simulacija 2: Optimizacija odnosa mešanja organskih sirovina za kompostiranje

Druga simulacija sprovedena je radi optimizacije odnosa mešanja organskih sirovina za proces kompostiranja, sa ciljem postizanja minimalnog sadržaja fosfora od 1% uz očuvanje stabilnog odnosa *C/N*. Proces optimizacije zasnovan je na održavanju odnosa *C/N* u dva definisana opsega (20-30 i 25-30), uz ograničenje da sadržaj fosfora ne bude manji od 1%. Tokom simulacije prate se vrednosti azota, kalijuma i vlage radi sagledavanja nutritivnog sastava i kvaliteta dobijenog komposta (poglavlje 2.2.3).

Ulazni podaci

Za potrebe druge simulacije korišćeni su podaci o količinama i karakteristikama sirovina dostupnih na teritoriji grada Niša. Posmatrane su iste sirovine kao u prvoj simulaciji: ODKO, seno, slama i životinjski ekskrementi (goveđi i svinjski). Njihove količine i karakteristike, uključujući odnos *C/N*, sadržaj *N*, *P*, *K* i vlage, prikazane su u tabeli 4.1.

Proces modeliranja

Pri modeliranju procesa kompostiranja, matematički model je primenjen radi određivanja optimalnog odnosa mešanja organskih sirovina koji obezbeđuje stabilan proces i

zadovoljava nutritivne zahteve komposta. U prvoj fazi identifikovana je mešavina sa najvećim sadržajem C , zatim ona sa minimalnim sadržajem P od 1%, dok su sadržaji K i W praćeni kao prateći, ali neograničavajući faktori. Na osnovu tih kriterijuma određena je optimalna mešavina koja istovremeno obezbeđuje uravnotežen odnos C/N i adekvatne nutritivne vrednosti. Optimizacija je sprovedena kroz dve iteracije sa različitim granicama odnosa C/N : prva u širem intervalu od 20 do 30, a druga u užem, od 25 do 30, radi preciznijeg definisanja optimalne kombinacije. Analiza je zasnovana na mešanju pet organskih sirovina iz studije slučaja grada Niša, a podaci o njihovom sastavu (tabela 4.1) korišćeni su kao ulazne vrednosti u postupku višekriterijumske optimizacije. Korišćenjem razvijenog modela iz poglavlja 3, problem je redukovao na pet funkcija sa pet varijabli koje definišu međusobne odnose sirovina u smeši.

$$C(q) = 39,14q_{ad,1} + 33,61q_{ad,2} + 42,00q_{ad,3} + 41,80q_{ad,4} + 47,90q_{ad,5}$$

$$N(q) = 3,9q_{ad,1} + 8,95q_{ad,2} + 0,43q_{ad,3} + 0,733q_{ad,4} + 3,10q_{ad,5}$$

$$P(q) = 3,69q_{ad,1} + 0,86q_{ad,2} + 2,65q_{ad,3} + 0,30q_{ad,4} + 0,28q_{ad,5}$$

$$K(q) = 0,74q_{ad,1} + 2,05q_{ad,2} + 14,84q_{ad,3} + 2,00q_{ad,4} + 0,78q_{ad,5}$$

$$W(q) = 82,50q_{ad,1} + 78,2q_{ad,2} + 10,80q_{ad,3} + 17,00q_{ad,4} + 70,00q_{ad,5}$$

Primenom prethodno opisanih ograničenja modela iz jednačina 3.12-3.16, dobija se dopustiva oblast D :

$$D \begin{cases} q_{ad,1} + q_{ad,2} + q_{ad,3} + q_{ad,4} + q_{ad,5} = 1 \\ 38,86q_{ad,1} + 145,39q_{ad,2} - 33,30q_{ad,3} - 27,14q_{ad,4} + 14,10q_{ad,5} \geq 0 \\ 77,86q_{ad,1} + 234,89q_{ad,2} - 28,95q_{ad,3} - 19,81q_{ad,4} + 45,10q_{ad,5} \geq 0 \end{cases}$$

Primenom višekriterijumske metode optimizacije, utvrđena su rešenja za pojedinačne optimizacione probleme:

$$\max C(q) = 46.1076 = C(0,0,0.303797,0,0.696203), q \in D$$

$$\min P(q) = 1 = C(0.192714,0.0833895,0,0.723896,0), q \in D$$

Rešenje konkretnog višekriterijumskog problema, definisanog jednačinom 3.7 na istoj dopustivoj oblasti D , predstavlja Pareto optimalnu tačku.

$$\min G(q) = G(0,00000209115; 0; 0,303794; 0; 0,696203), q \in D$$

Na kraju, rešenje glavnog problema je Pareto optimalnu tačka:

$$q^* = 0,00000209115; 0; 0,303794; 0; 0,696203$$

U Pareto optimalnoj tački uslov $\frac{C(q)}{N(q)} = 20,09 \in [20,30]$ je zadovoljen i vrednosti funkcija sadržaja ugljenika $C(q)$, azota $N(q)$, fosfora $P(q)$, kalijuma $K(q)$ i vlage $W(q)$ su:

$$C^* = C(q^*) = 46,10$$

$$N^* = N(q^*) = 2,29$$

$$P^* = P(q^*) = 1,00$$

$$K^* = K(q^*) = 5,05$$

$$W^* = W(q^*) = 52,01$$

U drugoj iteraciji, postavljanjem strožih granica za odnos C/N između 25 i 30 proces optimizacije postaje složeniji, jer se time značajno sužava dopustiva oblast D. Ovo ograničenje eliminiše deo prethodno definisanih Pareto optimalnih tačaka i zahteva ponovnu evaluaciju rešenja u okviru nove, uže oblasti. Dodavanje ovog uslova utiče na prilagođavanje vrednosti funkcija, pri čemu se maksimalni sadržaj ugljenika i definisani minimalni sadržaj fosfora menjaju kako bi rešenje zadovoljilo novo ograničenje. Kao rezultat, formira se nova Pareto optimalna tačka koja predstavlja ravnotežu između odnosa C/N i ostalih kriterijuma optimizacije. Novo rešenje je usklađeno sa zahtevima kompostiranja unutar definisanih granica, sa ciljem postizanja optimalnog sadržaja nutrijenata u kompostu. Na osnovu simulacije za uži opseg granica, novo rešenje je:

$$q^* = 0,00000000524; 0,00000000219676; 0,309995, 0.204948; 0,485077$$

U Pareto optimalnoj tački uslov $\frac{C(q)}{N(q)} = 25 \in [25,30]$ je zadovoljen i vrednosti funkcija sadržaja ugljenika $C(q)$, azota $N(q)$, fosfora $P(q)$, kalijuma $K(q)$ i vlage $W(q)$ su:

$$C^* = C(q^*) = 44,82$$

$$N^* = N(q^*) = 1,79$$

$$P^* = P(q^*) = 1,01$$

$$K^* = K(q^*) = 5,38$$

$$W^* = W(q^*) = 40,78$$

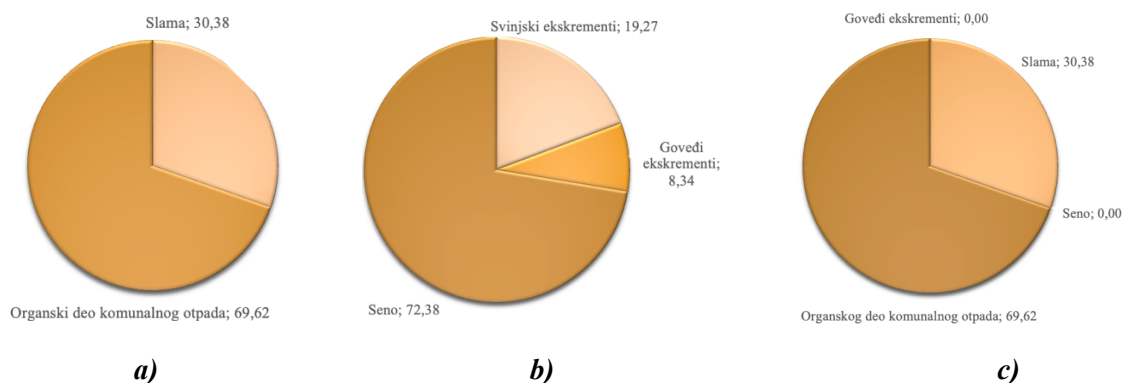
Rezultati simulacije i efekti postavljenih ograničenja biće temeljno razmotreni i analizirani u sledećim poglavljima.

Rezultati

Rezultati prve iteracije, sprovedene za širi opseg odnosa C/N (20-30), prikazani su na slici 5.4. Optimalna mešavina za maksimalni sadržaj ugljenika (Slika 5.4a) sadržala je 46,10% C, dobijenih kombinovanjem 30,38% slame i 69,62% ODKO, bez učešća svinjskih i govedih ekskrementa i sena (prilog 9.6). Minimalni sadržaj fosfora od 1% (Slika 5.4b) postignut je

mešavinom 19,27% svinjskih ekskrementa, 8,33% goveđih ekskrementa i 72,38% sena, dok slama i ODKO nisu bili uključeni (prilog 9.6).

Pareto optimalna tačka (Slika 5.4c, Tabela 5.3) pokazuje da je pri kombinovanju sirovina dobijen odnos C/N od 20,09, uz 46,11% C , 1% P , 2,29% N , 5,05% K i 52,02% W . Najveći udeo ima ODKO (69,62%) i slama (30,38%), dok su svinjski ekskrementi zastupljeni u minimalnom udelu, a goveđi ekskrementi i seno nisu uključeni.



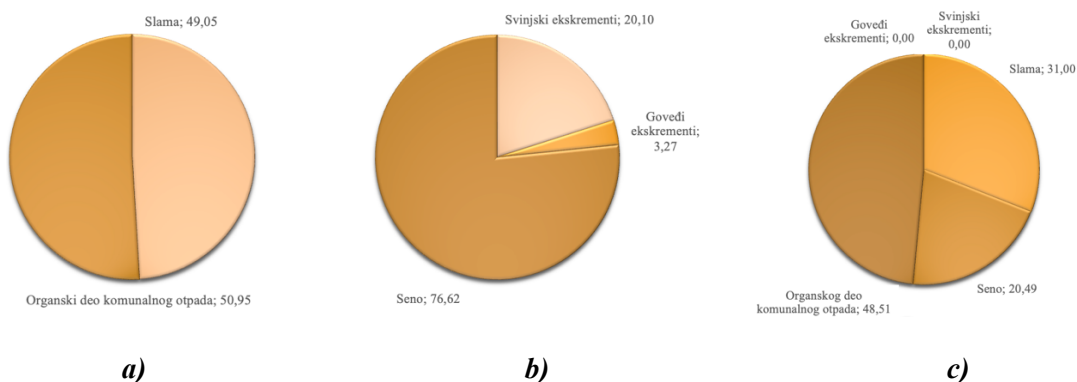
Slika 5.4 Optimalni odnos mešanja sirovina za odnos C/N 20-30 a) za maksimizaciju sadržaja ugljenika b) za minimalni sadržaja fosfora od 1% c) u Pareto optimalnoj tački

U tabeli 5.3 prikazan je oprimalan odnos mešanja sirovina za odnos C/N u rasponu od 20 do 30 kao i količine organskih sirovina koje je moguće tretirati na teritoriji grada Niša.

Tabela 5.3 Optimalni odnos supstrata za odnos C/N u rasponu 20-30

Organska sirovina	Svinjski ekskrementi	Goveđi ekskrementi	Slama	Seno	ODKO
Udeo [%]	0,0002	0	30,37	0	69,62
Količina [m ³]	0,05	0	7.794,00	0	17.866,00

U drugoj iteraciji, sprovedenoj za uži opseg odnosa C/N od 25 do 30, proces optimizacije bio je složeniji jer je zahtevao preciznije prilagođavanje udela sirovina.



Slika 5.5 Optimalni odnos mešanja sirovina za odnos C/N 25-30 a) za maksimizaciju sadržaja ugljenika b) za minimalni sadržaja fosfora od 1% c) u Pareto optimalnoj tački

Na slici 5.5a prikazana je mešavina sa maksimalnim sadržajem C od 45,01%, dobijena kombinovanjem 49,05% slame i 50,95% ODKO (prilog 9.6). Na slici 5.5b prikazana je optimalna mešavina sa minimalnim sadržajem fosfora od 1%, koju čine 20,1% svinjskih ekskrementa, 3,27% goveđih ekskrementa i 76,62% sena, dok su slama i ODKO zastupljeni sa 0,00%. Konačna Pareto optimalna tačka za uži opseg odnosa C/N od 25 do 30 prikazana je u tabeli 5.4 i na slici 5.5c. Dobijena optimalna mešavina sastoji se pretežno od ODKO (48,50%), slame (30,99%) i sena (20,49%), dok su svinjski i goveđi ekskrementi zastupljeni samo simbolično, sa udelima od 0,0000005% i 0,0000002%, što je zanemarljivo. Karakteristike mešavine sirovina su: odnos C/N 25, uz 44,82% C , 1,01% P , 1,79% N , 5,38% K i 40,78% W .

Tabela 5.4 Optimalni odnos supstrata za C/N u rasponu 25-30

Organska sirovina	Svinjski ekskrementi	Goveđi ekskrementi	Slama	Seno	ODKO
Udeo [%]	0,0000005	0,0000002	30,99	20,49	48,50
Količina [m ³]	0,00019	0,00008	11.417,50	7.548,49	17.866,00

Rezultati druge iteracije pokazuju da uži opseg odnosa C/N zahteva detaljnije balansiranje sirovina i favorizuje kombinaciju sena, slame i ODKO, dok je doprinos ekskrementa praktično zanemarljiv.

5.1.3. Simulacija 3: Analiza materijalnih i energetske tokova u upravljanju organskim otpadom

Treća simulacija usmerena je na izračunavanje materijalnih i energetske tokova u sistemu IUOO, radi procene njegove efikasnosti u zatvaranju tokova u skladu sa principima CE. Za razliku od prethodnih simulacija, koje su bile usmerene na proveru funkcionalnosti modela kroz optimizaciju odnosa mešanja sirovina za AD i kompostiranje, ova analiza obuhvata detaljno sagledavanje funkcionisanja sistema putem izrade bilansa materije i energije. Pri tome su ODKO i parkovski otpad korišćeni kao osnovne sirovine koje nastaju u okviru komunalnih delatnosti. U ovoj fazi primenjuje se isključivo AD, izabrana kao glavni izvor energije neophodan za transport i tretman sirovina unutar zatvorene petlje.

Ulazni podaci

Za potrebe Simulacije 3 korišćeni su podaci o upravljanju organskog i parkovskog otpada u gradu Nišu, koje prikuplja i transportuje JKP „Medjiana“. Godišnja količina organskog otpada u okviru komunalnog otpada iznosi 17.866 t (tabela 4.1). JKP „Mediana“ održava ukupno 3.030.526 m² javnih zelenih površina, što predstavlja mogućnost za povraćaj nutrijenata. Ovi podaci predstavljaju osnovu za analizu i simulaciju IUOO kroz primenu

principa CE, s ciljem povećanja efikasnosti i održivosti sistema. Dnevna količina ODKO u Nišu iznosi oko 48,94 t/dan (≈ 50 t/dan), pri čemu je vlažnost 70%, pa je pretpostavljena gustina 1.000 kg/m^3 jednaka gustini vode. Organski otpad razdvaja se na izvoru, u domaćinstvima, i odlaže u biorazgradivu ambalažu, dok se opasne materije sakupljaju odvojeno radi očuvanja čistoće sirovine za tretman. Nakon razdvajanja, otpad se transportuje do postrojenja za AD, koje se nalazi u blizini deponije „Bubanj“, korišćenjem istih transportnih ruta kao za komunalni otpad, što omogućava optimizaciju transportnih i energetske troškova. Postrojenje je projektovano za dnevni kapacitet od 50 m^3 otpada, odnosno godišnji kapacitet od približno 18.250,00 t. Proces obrade se odvija u dva paralelna digestora zapremine po 350 m^3 , u termofilnim uslovima (60°C), sa vremenom zadržavanja od 14 dana. Za potrebe proračuna usvaja se stepen konverzije sirovine u digestat ($k_{dig} = 0,4$). Pretpostavljeni prinos biogasa iz ODKO iznosi $0,65 \text{ m}^3/\text{kg VS}$, uz sadržaj suve materije od 30%. Udeo CH_4 u proizvedenom biogasu iznosi 60% ($H_d = 21,5 \text{ MJ/m}^3$), dok su procesni gubici procenjeni na oko 15%. Dobijeni biogas i digestat imaju različite primene u okviru lokalnog sistema:

- Biogas se koristi za rad postrojenja za AD, uključujući zagrevanje digestora i održavanje temperature procesa, kao i za potrebe transporta organskog otpada i digestata.
- Digestat se koristi za đubrenje javnih zelenih površina koje održava JKP „Mediana“, čime se omogućava povraćaj nutrijenata u zemljište.

Proces modeliranja

Proces modeliranja bio je usmeren na ispitivanje mogućnosti da se korišćenjem organskog i parkovskog otpada u gradu Nišu obezbedi dovoljna količina energije za transport i tretman otpada, čime bi se ostvarila zatvorena petlja namenjena samo tretmanu organskog otpada u gradu. Cilj analize bio je da se istraži mogućnost energetske samoodrživosti IUOO, uz identifikaciju ključnih materijalnih i energetske tokova u sistemu.

Analizirane su sve faze toka materijala i energije: transport otpada, tretman kroz AD, kao i transport krajnjih proizvoda (biogas i digestat). Tokom modeliranja izvršena je detaljna analiza energetske potreba sistema, procena količina proizvedenog biogasa i digestata, kao i raspodela proizvedene energije za različite faze procesa. U sklopu modela definisane su sve pretpostavke (navedene u poglavljima 3.1. i 4.2.3), a simulacija je sprovedena kako bi se ocenila efikasnost sistema i mogućnost optimizacije materijalnih i energetske tokova prema principima CE. Rezultati omogućavaju procenu stepena zatvaranja materijalno-energetske petlje, kao i identifikaciju potencijala za dalju optimizaciju resursne efikasnosti u lokalnom

kontekstu. Ukupna energija proizvedena iz biogasa iznosi 178.181,25 MJ/dan, odnosno 49.494,79 kWh/dan, čime se u potpunosti pokrivaju energetske potrebe sistema i obezbeđuje određeni višak raspoložive energije. Energetski zahtevi za AD, uključujući zagrevanje supstrata i održavanje temperature digestora, iznose 9.418,5 MJ/dan, dok gubici toplote iz digestora iznose samo 883,6 MJ/dan. Transport otpada i digestata zahteva dodatnih 550 m³ biogasa dnevno, što ukupno predstavlja manje od 7% dnevne proizvodnje biogasa.

Model je osmišljen tako da smanji energetske gubitke i troškove transporta. Digestori su postavljeni u blizini izvora sirovina i deponije, čime se smanjuju logistički troškovi. Takođe, AD obezbeđuje dovoljne količine biogasa za samoodrživ rad sistema, čime se postiže energetska nezavisnost. Prema proračunima, čak i uz sezonske varijacije u spoljašnjoj temperaturi i količinama otpada, sistem može funkcionisati stabilno, bez potrebe za dodatnim izvorima energije. Detaljan proračun sistema prikazan je u radu (Momčilović, 2017), koji potvrđuje održivost i efikasnost ovakvog pristupa.

Rezultati

Na osnovu prikazanih rezultata godišnje simulacije jasno je da predloženi model IUOO uspešno pokazuje mogućnost zatvaranja energetskog ciklusa u okviru sistema zasnovanog na principima CE. Proizvedeni biogas tokom obrade otpada obezbeđuje pokrivanje svih energetskih potreba postrojenja, što obuhvata rad anaerobnog digestora, zagrevanje supstrata, transport organskog otpada i distribuciju digestata, pri čemu se ostvaruje i višak energije.

Tabela 5.5 Godišnji i mesečni energetski bilans zatvorene petlje

Mesec	Dobijena energija iz biogasa [MJ/dan]	Energija za grejanje digestora [MJ/dan]	Energija za grejanje supstrata [MJ/dan]	Energija za transport otpada [MJ/dan]	Energija za transport digestata [MJ/dan]	Višak energije [MJ/dan]
Januar	178.181,25	169.658,00	9.418,50	14.308,00	4.927,00	-20.130,25
Februar	178.181,25	165.253,00	9.418,50	13.891,00	4.927,00	-15.308,25
Mart	178.181,25	155.593,00	9.418,50	13.203,00	4.927,00	-4.960,25
April	178.181,25	142.114,00	9.418,50	14.167,00	4.927,00	7.554,75
Maj	178.181,25	121.869,00	9.418,50	12.444,00	4.927,00	29.522,75
Jun	178.181,25	116.621,00	9.418,50	13.051,00	4.927,00	34.163,75
Jul	178.181,25	101.667,00	9.418,50	13.175,00	4.927,00	48.993,75
Avgust	178.181,25	102.557,00	9.418,50	13.905,00	4.927,00	47.373,75
Septembar	178.181,25	116.914,00	9.418,50	13.563,00	4.927,00	33.358,75
Oktobar	178.181,25	140.356,00	9.418,50	14.553,00	4.927,00	8.926,75
Novembar	178.181,25	153.249,00	9.418,50	14.591,00	4.927,00	-4.004,25
Decembar	178.181,25	167.314,00	9.418,50	12.881,70	4.927,00	-16.359,95
Godišnje	65.036.156,25	50.223.662,00	3.437.752,00	4.978.829,00	1.798.355,00	4.597.922,05
Prosek dnevno	178.181,25	137.764,00	9.418,50	13.644,80	4.927,00	12.427,61

Ukupna količina energije dobijena iz biogasa na godišnjem nivou iznosi 65.036.156,25 MJ, dok su ukupni energetske zahtevi sistema 50.223.458 MJ (tabela 5.5). To znači da se 77,2% proizvedene energije troši na potrebe sistema, dok preostalih 22,8% ostaje kao višak energije (4.597.922,05 MJ), što se može koristiti za dodatne funkcije, uključivanje u mrežu ili eksterne potrošače. Detaljnija struktura energetske potrošnje pokazuje da se najveći deo energije koristi za rad digestora (68,03%), zatim za transport organskog otpada (6,31%), dok na transport komposta otpada 2,28% ukupno proizvedene energije. Najveće energetske potrebe zabeležene su tokom zimskih meseci (decembar, januar i februar), kada su dodatni zahtevi za zagrevanje supstrata izraženiji, dok su najniže tokom jula i avgusta. Na osnovu proporcionalne analize, iz 1 tone organskog otpada dobija se 4.322,76 MJ energije (što odgovara 166,25 m³ biogasa). Za tretman i transport 1 tone otpada potrebno je 3.216,46 MJ (123,71 m³ biogasa). To znači da se viškom energije koji ostaje nakon obrade jedne tone može dodatno transportovati još 3,37 t otpada, odnosno ukupno 4,37 t može biti tretirano i transportovano zahvaljujući energiji sadržanoj u jednoj toni otpada. Ovi nalazi potvrđuju da sistem ne samo da zatvara energetske tokove, već ostvaruje visok stepen energetske efikasnosti i doprinosi ukupnoj održivosti upravljanja otpadom.

Tabela 5.5 prikazuje mesečnu raspodelu proizvedene energije iz biogasa i energetske potrebe sistema (grejanje digestora i supstrata, transport otpada i komposta), kao i raspoloživ višak energije na godišnjem i prosečnom dnevnom nivou. Tokom zimskih meseci, kada su potrebe za zagrevanjem digestora i supstrata najveće, bilans je negativan. U januaru se, na primer, beleži manjak od 20.130,25 MJ/dan. Nasuprot tome, leti sistem ostvaruje značajne viškove energije pa je u julu zabeležen plus od 48.993,75 MJ/dan. Kada se posmatra celokupna godina, jasno je da sistem ostvaruje pozitivan bilans jer ukupna količina viška dostiže 4.597.922,05 MJ. To potvrđuje da raspoloživa energija ne samo da pokriva sve interne potrebe već i stvara prostor za dodatnu upotrebu.

5.2. EVALUACIONA FAZA

Polazeći od rezultata eksplorativne faze, u kojoj je potvrđeno da razvijeni model uspešno optimizuje mešavine organskog otpada i omogućava zatvaranje osnovnih materijalno-energetskih tokova u sistemu IUOO na teritoriji grada Niša, evaluaciona faza bila je usmerena na proveru održivosti i primenljivosti modela u realnim uslovima. Cilj ove faze bio je da se ispita u kojoj meri razvijeni model može obezbediti ravnotežu između energetske samoodrživosti i materijalne cirkularnosti, kao i da se proceni potencijal sistema za povraćaj

nutrijeana kroz kompostiranje. U okviru ove faze korišćeni su indikatori CE: stepen uključivanja sirovina u tokove sistema, curenje materije, curenje energije, cirkularnost materije i energije, kao i nutritivni kapacitet komposta. Evaluaciona faza obuhvatila je dve simulacije (Simulacije 4 i 5), čime je prošireno razumevanje performansi sistema i omogućeno testiranje modela u složenijim uslovima integralnog upravljanja.

Četvrta simulacija predstavljala je logičan nastavak prethodnih istraživanja, u kojima su kroz Simulacije 1 i 2 analizirani pojedinačni procesi AD i kompostiranja, dok je u Simulaciji 3 definisan minimalni skup uslova pod kojima je moguće formirati zatvorenu materijalno-energetsku petlju za posmatranu studiju slučaja. Na osnovu tih nalaza, Simulacija 4 analizirala je različite kombinacije tretmana organskog otpada u okviru IUOO (AD, kompostiranje i njihova kombinacija), sa ciljem da se utvrdi u kojoj meri njihova integracija doprinosi zatvaranju materijalnih i energetskih tokova. Analizom deset scenarija (BS1, BS2, S1-S8) izvršeno je poređenje različitih kombinacija sirovina i tretmana, pri čemu je svaki scenario evaluiran na osnovu materijalno-energetskog bilansa i vrednosti indikatora CE. Poseban akcenat stavljen je na identifikaciju scenarija koji omogućavaju najveći stepen cirkularnosti materije i energije, uz minimalne gubitke u zatvorenoj petlji.

Peta simulacija proširila je analizu na nutritivni kapacitet komposta i njegovu usklađenost sa potrebama poljoprivrednih kultura, čime je omogućeno sagledavanje doprinosa modela materijalnoj održivosti sistema. Analizom je ispitana mogućnost zamene mineralnih đubriva i povraćaja nutrijeana (C , N , P , K) u zemljište, čime se uspostavlja veza između sistema upravljanja otpadom i održivog upravljanja zemljištem.

Na ovaj način evaluaciona faza omogućila je sveobuhvatno sagledavanje praktične vrednosti razvijenog modela IUOO, kroz poređenje različitih pristupa i njihovu prilagodljivost lokalnim i regionalnim uslovima.

5.2.1. Simulacija 4: Primena modela za integralno upravljanje organskim otpadom

Četvrta simulacija sprovedena je radi analize sistema IUOO kroz primenu principa CE, sa ciljem sagledavanja stepena u kojem različite sirovine mogu biti uključene u zatvorene materijalne i energetske tokove. Simulacija je obuhvatila izradu materijalnog i energetskog bilansa, identifikaciju gubitaka (curenja), određivanje indikatora i procenu efikasnosti sistema u okviru CE. Poseban akcenat stavljen je na analizu performansi tretmana sirovina primenom AD i kompostiranja, kroz deset scenarija koji obuhvataju dva bazna (BS1 i BS2) i osam razvojnih (S1-S8). Scenariji se razlikuju prema broju i vrsti uključenih sirovina, kao i prema

primenjenom tretmanu, AD, kompostiranju ili kombinovanom pristupu. Analizom sprovedenom u okviru ove simulacije procenjena je mogućnost postizanja potpune cirkularnosti materijalnih i energetskih tokova kroz imodel IUOO. Dobijeni rezultati obuhvataju količine tretiranog otpada, optimalni odnos mešanja sirovina, odnos C/N i indikatore CE (stepen uključenja organske materije u tokove CE, curenje materije i energije i cirkularnost materije i energije), koji zajedno predstavljaju osnov za sveobuhvatnu ocenu efikasnosti i održivosti Sistema, koji zajedno pružaju osnov za ocenu održivosti sistema.

Ulazni podaci

Osnovna ideja u razmatranju mogućnosti uključivanja različitih supstrata u tokove CE jeste maksimalno korišćenje dostupnog ODKO i parkovskog otpada, dok se sirovine iz prehrambene industrije, poput otpada iz mlekarica i pivskog tropa, uključuju u meri koja je procesno, ekonomski i organizaciono opravdan0.

Na osnovu rezultata prethodne faze istraživanja određeni su optimalni odnosi mešanja sirovina, pri čemu se odnos C/N kreće od 20-30 za AD i 25-30 za kompostiranje, uz sadržaj vlage od 60-70% (Cobo, 2018). U izuzetnim slučajevima, kada model ne pronalazi održivo rešenje u zadatom opsegu, odnos C/N može se spustiti do 15, čime se obezbeđuju minimalni uslovi za odvijanje procesa i zatvaranje materijalno-energetske petlje.

Analizirani supstrati uključuju ODKO, parkovski otpad, otpad iz mlekarica i pivski trop, svi generisani na teritoriji grada Niša. Njihove dostupne količine i karakteristike, prikazane u tabeli 4.1, predstavljaju ulazne podatke za analizu scenarija IUOO. Prethodna istraživanja potvrđuju da količine i sastav organskog otpada značajno utiču na uspešnu integraciju supstrata u sistem CE (Tanimu, 2015). Na osnovu definisanih parametara u eksplorativnoj fazi formirane su optimalne mešavine supstrata, koje su poslužile kao osnova za razvoj scenarija usmerenih na potpuno uključivanje dostupnih sirovina u integrisani sistem i zatvaranje materijalno-energetskih tokova.

Proces modeliranja

Supstrati koji su tretirani AD i kompostiranja uključuju ODKO i parkovski otpad, dok će druge sirovine, poput otpada iz mlecarske industrije i pivskog tropa, dolaziti iz industrija poput prerade mleka ili proizvodnje piva. Tretman organskog otpada obuhvata sirovine generisane na optimalnoj udaljenosti od mesta tretmana. Biogas dobijen obradom organskih sirovina koristi se za zadovoljenje energetskih potreba postrojenja i transporta, dok se višak biogasa prepoznaje kao energetski gubitak iz zatvorene petlje. Za proračun se koristi

ponderisani prinos biogasa. Kompost dobijen procesom kompostiranja ili AD sa naknadnom stabilizacijom koristi se za pokrivanje potreba tla za nutrijentima na mestima gde je prikupljen parkovski otpad. Višak proizvedenog komposta prepoznaje se kao materijalni gubitak iz zatvorene petlje. U okviru istraživanja razvijeno je deset scenarija, od kojih su dva osnovna (BS1 i BS2) i osam razvojnih (S1-S8). Na osnovu ulaznih podataka i krajnjih proizvoda svakog scenarija procenjuje se njegova održivost i efikasnost zatvaranja materijalno-energetskih tokova. U tu svrhu menjane su kombinacije supstrata u optimalnim mešavinama kako bi se ispitao uticaj broja i vrste uključenih sirovina na rezultate procesa i performanse sistema. Posebno je analizovano kako dodavanje ili izostavljanje pojedinih frakcija utiče na postignuti nivo cirkularnosti. Pored toga, kod odabranih mešavina ispitivan je i uticaj vrste tretmana, odnosno AD, kompostiranja ili njihove kombinacije, na ukupnu efikasnost sistema. Na taj način pojedini scenariji obuhvataju tretman organskog otpada kroz AD ili kompostiranje optimalnih mešavina supstrata, dok poslednja tri scenarija uključuju kombinovani tretman svih supstrata primenom oba procesa.

Osnovni scenario 1 (BS1) predviđa kompostiranje 13.417 t/god organske sirovine. Ova količina obuhvata 4.562 t ODKO i 8.855 t parkovskog otpada. Mešavina sirovina je u definisanom odnosu od 34% ODKO i 66% parkovskog otpada. Odnos C/N u smeši iznosi 25,05, dok je sadržaj W 63,4%, a P 1%. Sadržaj N iznosi 3,29%, a K 0,78%. (tabela 5.6.)

Tabela 5.6 Ključne karakteristike scenarija BS1

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj fosfora [%]
BS1	13.417,00	ODKO	34,00	25,05	63,4	1,00
		Parkovski otpad	66,00			

Osnovni scenario 2 (BS2) obuhvata AD tretman 17.866 t/god organske sirovine (ODKO 9.011 t, PO 8.855 t). Mešavina (50,45% ODKO, 49,55% PO) ima C/N 22,60, W 65,02% i lignin 17,35% (tabela 5.7).

Tabela 5.7 Ključne karakteristike scenarija BS2

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj lignina [%]
BS2	17.866,00	ODKO	50,45	22,60	65,02	17,35
		Parkovski otpad	49,55			

Scenario 1 (S1) obuhvata kompostiranje 13.022 t/god organske sirovine (ODKO 2.475 t, PO 8.855 t, PT 1.692,86 t). Mešavina (19% ODKO, 68% PO, 13% PT) ima C/N 25,28, W 62,68%, P 1,07%, N 3,43% i K 0,73% (tabela 5.8).

Tabela 5.8 Ključne karakteristike scenarija S1

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj fosfora [%]
S1	13.022,00	ODKO	19,00	25,28	62,68	1,07
		Parkovski otpad	68,00			
		Pivski trop	13,00			

Scenario 2 (S2) predviđa primenu AD za tretman 27.057 t/god organske sirovine. U ovom scenariju tretira se ukupna količina ODKO (9.011 t), parkovskog otpada (8.855 t) i pivskog tropa (9.172,32 t). Mešavina u odnosu 33,3% ODKO, 32,7% parkovskog otpada i 33,9% pivskog tropa ima C/N odnos 20,03, sadržaj vlage 65,27% i lignina 18,12% (tabela 5.9).

Tabela 5.9 Ključne karakteristike scenarija S2

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj lignina [%]
S2	27.057,00	ODKO	33,30	20,03	65,27	18,12
		Parkovski otpad	32,70			
		Pivski trop	33,90			

Scenario 3 (S3) predviđa primenu AD za tretman 17.998,00 t/god organske sirovine. U ovom scenariju tretira se ODKO (8.999 t), parkovskog otpada (8.855 t) i otpada iz mlekare (132,00 t). Mešavina u odnosu 50,00% ODKO, 49,20% parkovskog otpada i 0,80% pivskog tropa ima C/N odnos 20,03, sadržaj vlage 65,27% i lignina 18,12% (tabela 5.10).

Tabela 5.10 Ključne karakteristike scenarija S3

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj lignina [%]
S3	17.998,00	ODKO	50,00	22,57	65,22	17,06
		Parkovski otpad	49,20			
		Otpad iz mlekare	0,80			

Scenario 4 (S4) predviđa tretman 27.189 t/god sirovine AD. Tretira se ukupna količina ODKO (9.011 t), parkovskog otpada (8.855 t), pivskog tropa (9.191 t) i otpada iz mlekara (132 t). Mešavina u odnosu 33,14% ODKO, 32,56% parkovskog otpada, 33,8% pivskog tropa i 0,4% otpada iz mlekara ima C/N odnos 20,00, sadržaj W 65,38% i L 11,57% (tabela 5.11).

Tabela 5.11 Ključne karakteristike scenarija S4

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj lignina [%]
S4	27.189,00	ODKO	33,14	20,00	65,38	11,57
		Parkovski otpad	32,56			
		Pivski trop	33,80			
		Otpad iz mlekare	0,40			

Tabela 5.12 Ključne karakteristike scenarija S5

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj fosfora [%]
S5	12.471,00	ODKO	14,00	25,69	62,58	1,11
		Parkovski otpad	71,00			
		Pivski trop	14,20			
		Otpad iz mlekare	0,80			

Scenario 5 (S5) predviđa kompostiranje 12.471 t/god organske sirovine. U ovom scenariju tretira se deo ODKO (1.745,54 t), ukupna količina parkovskog otpada (8.855 t), deo pivskog tropa (99,76 t) i otpad iz mlekara (132 t). Mešavina u odnosu 14% ODKO, 71% parkovskog otpada, 14,2% pivskog tropa i 0,8% otpada iz mlekara ima C/N odnos 25,69, sadržaj vlage 62,58% i fosfora 1,11% (tabela 5.12). Sadržaj azota je 3,45% i kalijuma 0,76%.

Tabela 5.13 Ključne karakteristike scenarija S6

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj fosfora/lignina [%]
Kompostiranje	6.725,00	ODKO	34,00	25,05	63,4	1,00
		Parkovski otpad	66,00			
Anaerobna digestija	9.589,00	ODKO	50,50	22,60	65,02	17,35
		Parkovski otpad	49,50			
S6	16.314,00					

Scenario 6 (S6) kombinuje AD i kompostiranje za tretman 16.314 t/god organske sirovine. Od toga se 9.589 t tretira AD u mešavini od 50,5% ODKO i 49,5% parkovskog otpada (C/N 22,60; W 65,02%), dok se preostalih 6.725 t obrađuje kompostiranjem uz mešavinu 34% ODKO i 66% parkovskog otpada (C/N 25,05; W 63,4%; P 1%; N 3,29%; K 0,76%). Karakteristike scenarija prikazane su u tabeli 5.13.

Tabela 5.14 Ključne karakteristike scenarija S7

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj fosfora/lignina [%]
Kompostiranje	13.022,00	ODKO	19,00	25,28	62,68	1,07
		Parkovski otpad	68,00			
		Pivski trop	13,00			
		ODKO	33,30			
Anaerobna digestija	22.118,00	Parkovski otpad	32,70	20,03	65,27	18,12
		Pivski trop	33,90			
S7	35.140,00					

Scenario 7 (S7) kombinuje AD i kompostiranje za tretman 35.140 t/god sirovine. Od toga se 22.118 t tretira AD u mešavini od 33,3% ODKO, 33,9% pivskog tropa i 32,7%

parkovskog otpada (C/N 20,03; W 65,27%). Preostalih 13.022 t obrađuje se kompostiranjem, uz mešavinu 19% ODKO, 68% parkovskog otpada i 13% pivskog tropa (C/N 25,28; W 62,68%; P 1,07%; N 3,43%; K 0,73%). Karakteristike scenarija prikazane su u tabeli 5.14.

Tabela 5.15 Ključne karakteristike scenarija S8

Scenario	Količina organske sirovine [t/god]	Organska sirovina	Optimalni udeo organskih sirovina [%]	C/N mešavine	Vlaga mešavine [%]	Sadržaj fosfora/lignina [%]
Kompostiranje	12.471,00	ODKO	14,00	25,69	62,58	1,11
		Parkovski otpad	71,00			
		Pivski trop	14,20			
		Otpad iz mlekare	0,8			
Anaerobna digestija	14.718,00	ODKO	51,9	15,00	67,45	11,57
		Parkovski otpad	0,00			
		Pivski trop	48,1			
		Otpad iz mlekare	0,00			
S8	27.189,00					

Scenario 8 (S8) kombinuje kompostiranje i AD za tretman 27.189 t/god organske sirovine. Od toga se 12.471 t, koja predstavlja mešavinu svih frakcija, tretira kompostiranjem u odnosu 14% ODKO, 71% parkovskog otpada, 14,2% pivskog tropa i 0,8% otpada iz mlekara (C/N 25,69; W 62,58%; P 1,11%; N 3,45%; K 0,76%). Preostalih 14.718 t obrađuje se AD, uz mešavinu 51,9% ODKO i 48,1% pivskog tropa (C/N 15; W 67,45%; L 11,57%), dok parkovski otpad i otpad iz mlekara nisu zastupljeni. Karakteristike scenarija prikazane su u tabeli 5.15.

U svim razvijenim scenarijima, dobijeni biogas i kompost koriste se za zadovoljenje energetske potrebe i vraćanje nutrijenata zemljištu, dok se viškovi prepoznaju kao gubici u zatvorenoj petlji. Dobijeni kompost se koristi za površine javnog zelenila, čije su ukupne potrebe procenjene na 3.723 t/god za 3.030.526 m² zelenih površina.

Rezultati

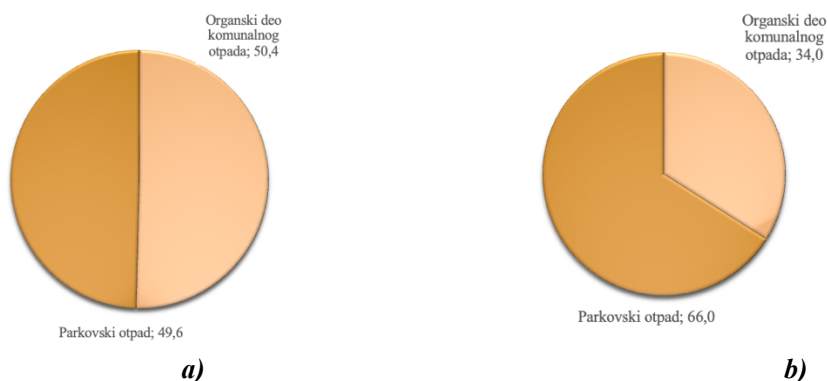
U okviru četvrte simulacije analizirana je mogućnost postizanja potpune cirkularnosti materijalnih i energetske tokova kroz integrisani model upravljanja organskim otpadom. Rezultati se odnose na deset scenarija (BS1, BS2, S1-S8) i obuhvataju količine tretiranog otpada, strukturu mešavina, odnos C/N , sadržaj vlage, kao i indikatore cirkularnosti materije i energije. Detaljni tabelarni prikaz svih rezultata dat je u tabelama 9.5-9.6. Rezultati baznih i naprednih scenarija (BS1-S5) prikazani su na slici 5.6 (a-g) i odnose se na strukturu mešavine korišćenih sirovina, odnos C/N i sadržaj vlage u optimalnim mešavinama sirovina.



Slika 5.6 Struktura organskog otpada u scenariju a) BS1 b) BS2 c) S1 d) S2 e) S3 f) S4 g) S5

U baznim scenarijima BS1 i BS2 tretira se 13.417 t, odnosno 17.866 t/god. Mešavine se sastoje od 34-50% ODKO i 50-66% parkovskog otpada. Odnosi C/N iznose 25,05 (BS1) i 22,60 (BS2), uz vlagu od 63-65%, čime se postižu stabilni uslovi za kompostiranje i proizvodnju biogasa. Napredni scenariji S1-S5 uključuju dodatne sirovine kao što su pivski trop i otpad iz mlekarne, sa količinama od 12.471 do 27.189 t/god. Udeo ODKO kreće se od 14 do 50%, parkovskog otpada od 32 do 71%, dok udeo industrijskog otpada ne prelazi 34%. Odnos C/N varira između 20,00 i 25,69, a sadržaj vlage između 62,6-65,4.

Scenario S6 obuhvata tretman 16.314 t otpada godišnje, od čega se 9.589 t usmerava na AD, a 6.725 t na kompostiranje. Raspodela supstrata po tretmanima prikazana je na slici 5.7. U procesu digestije koristi se mešavina od 50,5% ODKO i 49,5% parkovskog otpada, sa odnosom C/N od 22,60 i vlagom od 65,02%. Za kompostiranje se koristi mešavina od 34% ODKO i 66% parkovskog otpada, sa odnosom C/N od 25,05 i vlagom od 63,4%.



Slika 5.7 Struktura organskog otpada u scenariju S6 a) za anaerobnu digestiju b) za kompostiranje

Scenario S7 obuhvata najveću količinu organske sirovine, ukupno 35.140 t/god. Tretman se sprovodi kombinovanjem AD, u kojoj se prerađi 22.118 t, i kompostiranja sa 13.022 t. Raspodela supstrata po tretmanima prikazana je na slici 5.8.



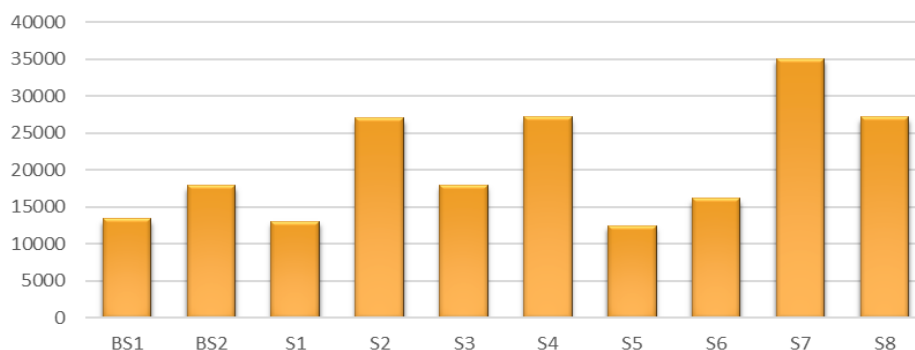
Slika 5.8 Struktura organskog otpada u scenariju S7 a) za anaerobnu digestiju b) za kompostiranje

Scenario S8 obuhvata tretman 27.189 t/god, kroz kombinaciju kompostiranja (12.471 t) i AD (14.718 t). U kompostiranju su zastupljeni svi tipovi otpada, dok u digestiji mešavina sadrži 51,5% ODKO i 48,5% pivskog tropa, što je prikazano na slici 5.9.



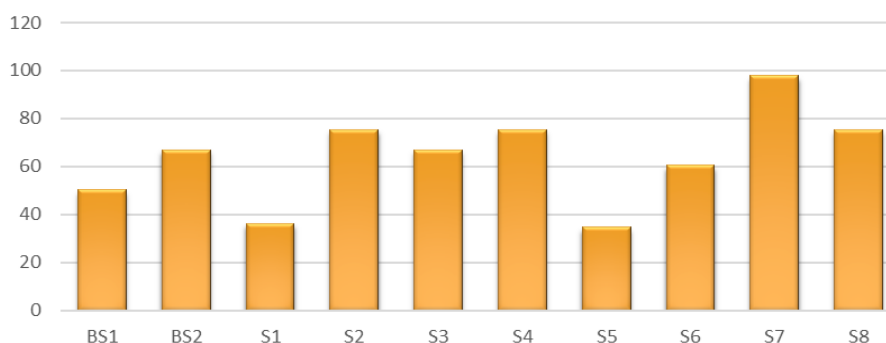
Slika 5.9 Struktura organskog otpada u scenariju S8 a) za anaerobnu digestiju b) za kompostiranje

Na slici 5.10 prikazana je ukupna količina organske sirovine koja se tretira u svakom scenariju. Najveće vrednosti ostvaruju scenariji S2, S4, S7 i S8, između 27.000 i 35.000 t/god, dok BS1 i S5 imaju najmanje količine, između 12.000 i 13.500 t/god.



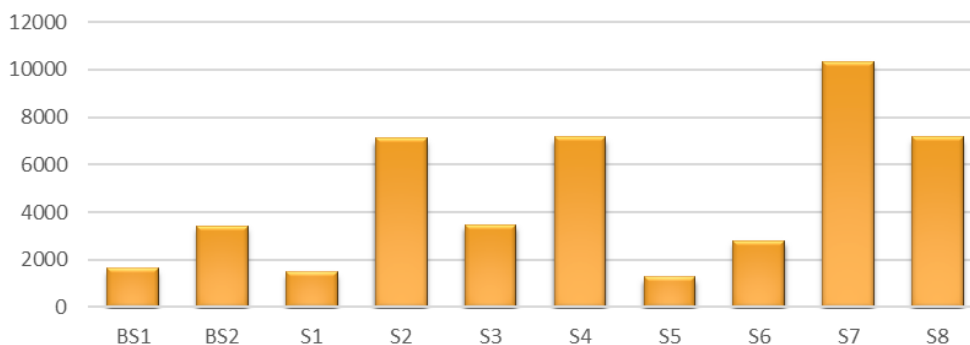
Slika 5.10 Količina tretirane organske sirovine [t/god]

Na slici 5.11 prikazan je stepen uključenja organske sirovine u tokove CE. Scenariji koji obuhvataju AD (BS2, S2, S3, S4, S6, S7 i S8) postižu visoke vrednosti, od 60,36% do 97,79%, dok scenariji zasnovani isključivo na kompostiranju (BS1, S1 i S5) imaju niže vrednosti, u rasponu od 34,60% do 50,21%.



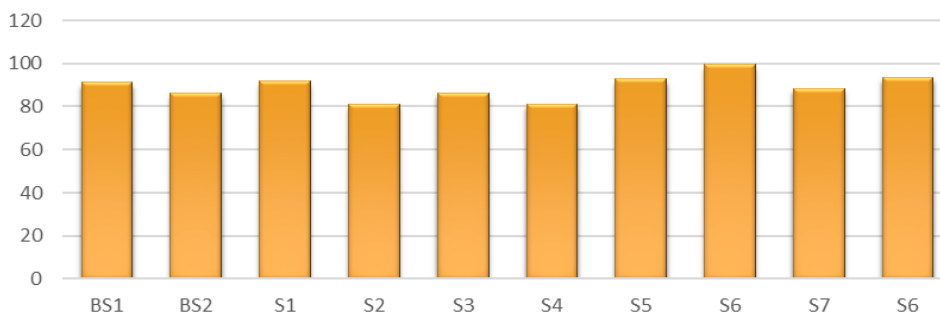
Slika 5.11 Stepen uključenja organske sirovine [%]

Na slici 5.12 prikazano je curenje materije u analiziranim scenarijima. Najveći gubici zabeleženi su u S2, S4, S6 i S8, sa više od 10.300 t/god, dok BS1, S1 i S5 imaju najmanja curenja, između 1.265 i 1.643 t/god.



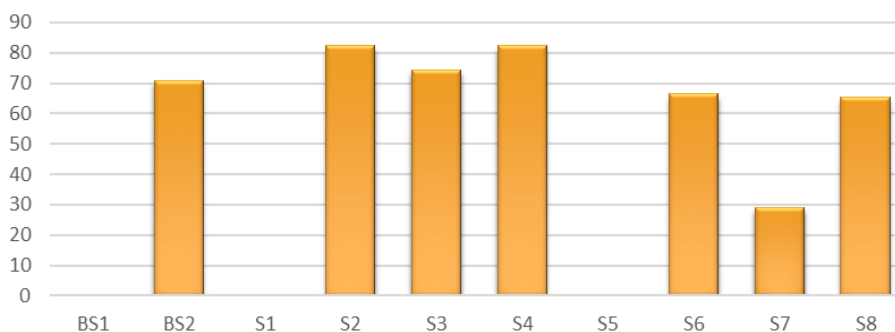
Slika 5.12 Curenje materije [t/god]

Na slici 5.13 prikazana je cirkularnost materije. Najviši nivo zabeležen je u scenarijima BS1, S1 i S5, gde cirkularnost prelazi 90%, dok scenario S6 dostiže čak 99,44%. Niže vrednosti ostvaruju scenariji S2, S3, S4, S7 i S8, sa cirkularnošću između 80% i 88%.



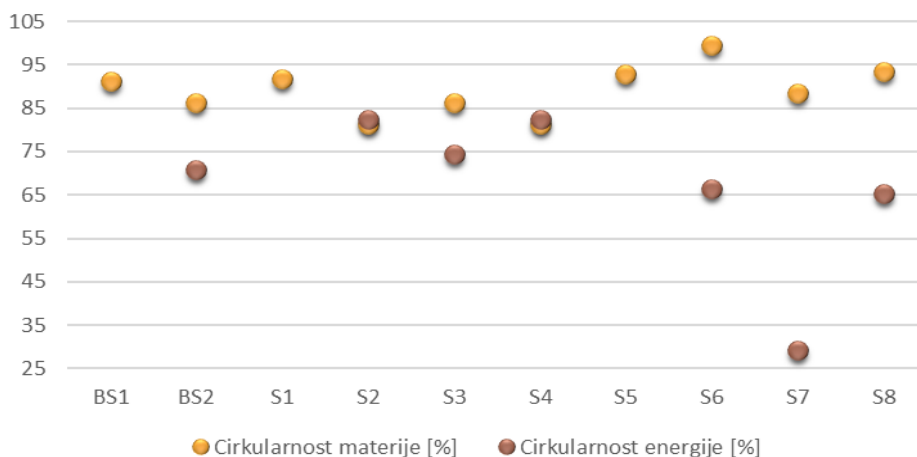
Slika 5.13 Cirkularnost materije [%]

Na slici 5.14 prikazana je cirkularnost energije. Najviše vrednosti postižu scenariji S2 i S4, sa po 82,29%, dok scenario S6 ostvaruje 66,50%. Scenario S7, i pored najvećeg obima tretiranog otpada, beleži samo 29,14%, što ukazuje na velike energetske gubitke. Scenariji BS1, S1 i S5, koji su zasnovani na kompostiranju, ne generišu energiju i stoga nisu uključeni u prikaz cirkularnosti energije.



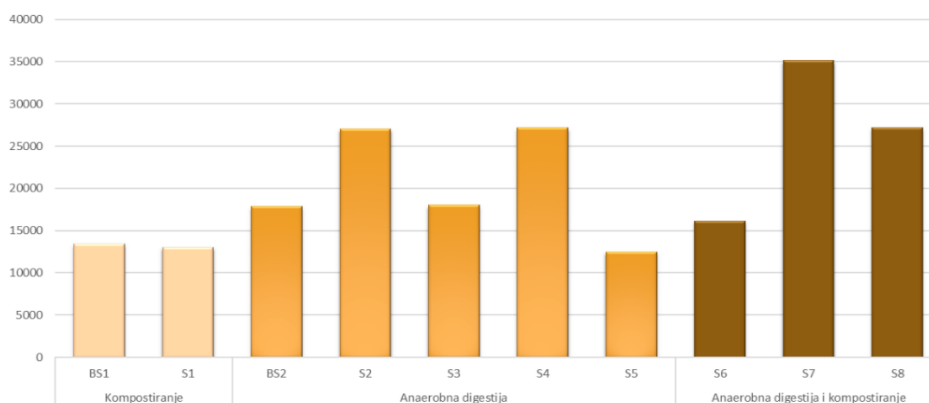
Slika 5.14 Cirkularnost energije [%]

Na slici 5.15 dat je pregled cirkularnosti materije i energije po scenarijima. Rezultati pokazuju da scenariji zasnovani na kompostiranju ostvaruju najveću materijalnu cirkularnost, dok scenariji sa AD postižu uravnoteženiji odnos između materijalne i energetske cirkularnosti. Scenario S6 izdvojio se kao najefikasniji kompromis, jer istovremeno obezbeđuje visok stepen očuvanja materije i značajan nivo energetske cirkularnosti.



Slika 5.15 Upoređenje cirkularnosti materije i energije [%]

Na slici 5.16 prikazana je količina tretiranog otpada po scenariju i metodu tretmana. Scenario S7 ima najveći kapacitet tretmana, sa 35.118 t/god, dok scenariji S2, S4 i S8 takođe prelaze 27.000 t/god. Scenariji BS1, S1 i S5 imaju najmanje vrednosti, sa količinama između 12.471 i 13.416 t/god. Detaljne karakteristike svih scenarija prikazane su u tabelama 9.5 i 9.6 u prilogu.



Slika 5.16 Distribucija tretiranog otpada podeljenog prema primenjenom tretmanu [t/god]

Zaključno, rezultati četvrte simulacije pokazali su da se integrisani sistem može posmatrati kroz različite scenarije tretmana, pri čemu se postižu značajne razlike u obimu tretiranog otpada, materijalnoj i energetske cirkularnosti, kao i u veličini gubitaka, što pruža osnovu za detaljnu evaluaciju i izbor optimalnog modela u narednom poglavlju.

5.2.2. Simulacija 5: Analiza nutritivnog potencijala komposta

Peta simulacija usmerena je na procenu da li je moguće formirati optimalne mešavine sirovina koje, nakon procesa kompostiranja, mogu obezbediti kompost sa nutritivnim karakteristikama usklađenim sa potrebama određene biljne vrste (ječma). U okviru simulacije

ispitivano je da li kompost proizveden iz optimizovanih mešavina može da zadovolji zahteve biljke u pogledu ključnih elemenata neophodnih za rast i razvoj. Kriterijumi analize obuhvatili su održavanje odnosa C/N u dva definisana opsega (20-30 i 25-30), minimalni sadržaj fosfora od 1% i praćenje koncentracija C , N , K i W u formiranim smešama.

Ulazni podaci

Za potrebe Simulacije 5, usmerene na procenu nutritivnog potencijala komposta za potrebe ječma, korišćeni su ulazni podaci dobijeni u drugoj simulaciji, u kojoj su formirane optimalne mešavine sirovina kroz dve iteracije optimizacije prema kriterijumima odnosa C/N i minimalnog sadržaja P od 1%, dok je sadržaj K i W praćen.

Rezultati prve iteracije druge simulacije, sprovedene pri opsegu odnosa C/N od 20 do 30, predstavljaju prvi skup ulaznih podataka za Simulaciju 5. Prema ovim rezultatima, optimalna mešavina obuhvata 69,62% ODKO i 30,38% slame, uz minimalno učešće svinjskih ekskrementa (0,0002%), dok seno i goveđi ekskrementi nisu zastupljeni. Mešavina postiže odnos C/N 20,09, sadržaj C od 46,11%, P od 1%, K od 5,05% i vlažnost od 52,02%.

Rezultati druge iteracije druge simulacije, u kojoj je odnos C/N analiziran u užem opsegu od 25 do 30, predstavljaju drugi skup ulaznih podataka za Simulaciju 5. Prema ovim rezultatima, optimalna mešavina sadrži 48,51% ODKO, 31% slame i 20,49% sena, uz tragove svinjskih (0,0000524%) i goveđih ekskrementa (0,00002197%). Karakteristike ove mešavine uključuju odnos C/N od 25, sadržaj C od 44,82%, P od 1,02%, K od 5,39% i W od 40,79%.

Ovi rezultati druge simulacije korišćeni su kao ulaz u Simulaciju 5, koja ispituje da li kompost nastao iz optimizovanih mešavina može da obezbedi adekvatan povraćaj nutrijenata biljnoj kulturi ječma.

Proces modeliranja i rezultati

Kao referentna osnova procenu nutritivnog potencijala komposta usvojen je minimalni sadržaj fosfora u zemljištu za ječam (*Hordeum vulgare*), definisan prema Agrenovom modelu (2012) i podacima Klejton i saradnika (2024). Minimalna koncentracija od 0,25 mmol P/kg zemljišta, odnosno 0,000774%, predstavlja prag ispod kojeg dolazi do nutritivnog ograničenja rasta, pa je korišćena kao kriterijum za poređenje sa sadržajem asimilabilnog fosfora P_a u kompostu dobijenom iz optimalnih mešavina sirovina. Transformacije nutrijenata tokom kompostiranja prikazane su u poglavlju 2.2.3. Na osnovu njih, asimilabilne forme fosfora čine približno 20-30% ukupnog fosfora u kompostu, dok je kalijum gotovo u potpunosti prisutan u asimilabilnoj formi, jer tokom kompostiranja ne ulazi u stabilne organske ili mineralne

strukture, što ukazuje da se ukupni sadržaj kalijuma u kompostu gotovo u potpunosti može smatrati biljkama dostupnim. U okviru ove simulacije primenjuje se faktor konverzije organske sirovine u kompost $k_{kom}=0,4$, koji određuje koliki deo ukupne organske mase prelazi u stabilni kompost. Ovaj faktor je ključan za izračunavanje koncentracija fosfora i kalijuma u krajnjem proizvodu, jer omogućava poređenje njihovih vrednosti u optimalnoj smeši sirovina i u formiranom kompostu. Model obezbeđuje uvid i u međukorake izračunavanja, uključujući početne forme fosfora i kalijuma u mešavinama sirovina (P_O , K_O), njihove transformisane forme u kompostu (P_K , K_K), kao i njihove asimilabilne forme (P_A , K_A) i njihove ukupne koncentracije.

Tabela 5.16 Količine nutrijenata tokom transformacije kroz proces kompostiranja

Forme nutrijenata [%]	Optimalni odnos mešanja za odnos C/N od 20 do 30 (Iteracija 1)	Optimalni odnos mešanja za odnos C/N od 25 do 30 (Iteracija 2)
P_O	1,00	1,02
K_O	5,05	5,39
P_K	2,50	2,55
K_K	12,62	13,47
P_A	0,50	0,51
K_A	12,62	13,47
$P_{A, min}$	0,000774	0,000774

Dobijene vrednosti P i K u svim oblicima transformacija prikazane su u tabeli 5.16.

5.3. VALIDACIONA FAZA

Šesta simulacija imala je za cilj validaciju matematičkog modela za optimizaciju odnosa mešanja sirovina u AD. Validacija je sprovedena kroz poređenje rezultata modela sa empirijskim podacima dobijenim iz industrijske prakse, čime je sagledana tačnost modela u odnosu na realne uslove. Kriterijumi validacije obuhvatili su upoređivanje odnosa mešanja organski sirovina i prinosa biogasa između optimizovanih vrednosti i podataka iz rada biogasnog postrojenja mlekare „Lazar“ Blace. Posebna pažnja posvećena je tehničkim, sirovinskim i operativnim izazovima u praksi, kako bi se obezbedila što realnija procena usklađenosti modela i empirijskih rezultata.

Ulazni podaci

Farma krava i mlekara „Lazar“ nalazi se u opštini Blace, Republika Srbija. Kapacitet farme je oko 1.000 krava, a dnevno se prerađuje 50.000 l mleka. U okviru farme funkcioniše postrojenje za proizvodnju biogasa koje se sastoji od ukopanog mokrog kontinuiranog anaerobnog digestora i kogeneracionog postrojenja. Kogeneraciono postrojenje je

projektovano sa kapacitetom: električna snaga od 1.000 kW, toplotna snaga od 1.060 kW i godišnja proizvodnja električne energije preko 7.000.000 kWh. Dobijeni biogas koristi se za proizvodnju električne energije, dok se otpadna toplota koristi za zagrevanje digestora i sušenje digestata. Planirani kapacitet proizvodnje biogasa iznosio je 480 Nm³/h, ali prosečan dobijeni prinos, pod pretpostavkom da supstrat sadrži 50% VS na osnovu suve materije, iznosi 366 Nm³/h, odnosno 0,322 m³/kg VS supstrata (Amon et al., 2006; Park et al., 2010).

Tabela 5.17 Udeo i karakteristike supstrata korišćenih u biogasnom postrojenju „Lazar“

Organska sirovina	Udeo [%]	C [%]	N [%]	C/N	Prinos biogasa [m ³ /kg VS]
Silaža kukuruza	44,10	29,60	0,80	37,00	0,35-0,55
Surutka	21,40	29,80	2,20	13,50	0,80
Govedi ekrementi	26,70	39,10	2,40	15,90	0,20-0,30
Melasa	3,10	32,20	0,80	36,10	0,42-0,61
Glicerin	1,70	60,00	0,00	-	1,29
Ukupno	100,00	-	-	21,40	0,32

Anaerobni digestor se sastoji od tri prelivne komore, pri čemu svaka komora ima sopstveni sistem mešanja. Vreme retenzije iznosi 21 dan. AD odvija se na temperaturi od 38°C. U prvoj komori se odvija hidroliza, u drugoj se odvijaju kisele faze, a u trećoj metanogeneza. U AD se koristi mešavina silaže kukuruza, surutke, govedih ekskremenata, melase i glicerina iz proizvodnje biodizela. Silaža se koristi kao supstrat zbog visokog C/N odnosa i ima prinos biogasa od 0,35-0,55 m³/kg VS (Steffen, 1998). Melasa se koristi u malim količinama zbog visokog sadržaja C, čime se poboljšava odnos C/N konačne mešavine, i ima prinos biogasa od 0,42-0,61 m³/kg VS (Detman et al., 2017). Glicerin se može dodati (do 6%) za dodatno povećanje odnosa C/N i ima prinos biogasa od 1,295 m³/kg VS (Binkley & Wolfrom, 1953). Konačna mešavina sadrži manje od 16% suve materije, dok je izračunati odnos C/N 21,4 na osnovu odnosa mešanja i literaturnih podataka o elementarnom sastavu sirovina (Li et al., 2015). Optimalni odnos mešanja sirovina koji se trenutno koristi je dobijen empirijski.

Proces modeliranja

Za validaciju je korišćen matematički model za optimizaciju mešanja sirovina za AD, detaljno opisan u poglavlju 3 i primenjen u potpoglavljima 5.1.1 i 5.1.2. Cilj validacije bio je upoređivanje optimalnih odnosa mešanja sirovina dobijenih modelom sa eksperimentalnim vrednostima koje se koriste u posmatranom postrojenju. Poseban fokus stavljen je na uticaj promene odnosa C/N i dodatka glicerina na prinos biogasa. Uzimajući u obzir elementarni sastav, dostupne količine i odnos C/N mešavine, višekriterijumska optimizacija definisala je optimalne odnose mešanja pet odabranih sirovina u različitim graničnim uslovima, uz pripadajuće vrednosti prinosa biogasa (Li, Liu, & Sun, 2015). Matematički model validiran je

na primeru mlekare „Lazar“, pri čemu su podaci o elementarnom sastavu sirovina preuzeti iz literature (tabela 5.17) (Binkley, 1953). Za validaciju korišćeno pet sirovina: goveđi ekskrementi, silaža kukuruza, surutka, melasa i glicerin. Korišćenjem jednačina 3.2-3.3 i pet odabranih sirovina, problem optimizacije redukovan je na dve funkcije sa pet varijabli.

$$C(q) = 29,60q_{ad,1} + 29,80q_{ad,2} + 39,18q_{ad,3} + 32,20q_{ad,4} + 60,00q_{ad,5}$$

$$N(q) = 0,80q_{ad,1} + 2,20q_{ad,2} + 2,46q_{ad,3} + 0,89q_{ad,4} + 0,00q_{ad,5}$$

Kada je primenjen model, razmatrana su dva različita slučaja, kao i njegova validacija:

1. U prvom slučaju sprovedena je višekriterijumska optimizacija kako bi se odredio najpovoljniji odnos pet sirovina za maksimalni prinos biogasa pri C/N odnosu u rasponu od 20 do 25, uz unapred definisan udeo glicerina od 0 do 2%.

2. U drugom slučaju sprovedena je višekriterijumska optimizacija kako bi se odredio najpovoljniji odnos pet supstrata za najveći prinos biogasa pri C/N odnosu u rasponu od 20 do 30, uz unapred definisan udeo glicerina od 0 do 2%.

3. Validacija modela izvršena je sprovođenjem višekriterijumske optimizacije sa ciljem određivanja najpovoljnijeg odnosa mešanja pet sirovina za najveći prinos biogasa pri C/N odnosu u rasponu od 20 do 21,4, uz unapred definisan udeo glicerina od 1 do 2%. Dobijeni rezultati upoređeni su sa stvarnim odnosom mešanja sirovina koji se koristi u mlekari „Lazar“. Primenom prethodno opisanih ograničenja modela iz jednačina 3.7, dopustiva oblast je:

1. U prvom slučaju, kada se C/N odnos kreće u rasponu od 20 do 25:

$$D \begin{cases} q_{ad,1} + q_{ad,2} + q_{ad,3} + q_{ad,4} + q_{ad,5} = 1 \\ 13,60q_{ad,1} - 14,20q_{ad,2} - 10,02q_{ad,3} - 14,40q_{ad,4} + 60,00q_{ad,5} \geq 0 \\ -9,60q_{ad,1} + 25,2q_{ad,2} + 22,32q_{ad,3} - 9,95q_{ad,4} - 60,00q_{ad,5} \geq 0 \end{cases}$$

2. U drugom slučaju, kada se C/N odnos kreće u rasponu od 20 do 30:

$$D \begin{cases} q_{ad,1} + q_{ad,2} + q_{ad,3} + q_{ad,4} + q_{ad,5} = 1 \\ 13,60q_{ad,1} - 14,20q_{ad,2} - 10,02q_{ad,3} - 14,4q_{ad,4} + 60,00q_{ad,5} \geq 0 \\ -5,6q_{ad,1} + 36,2q_{ad,2} + 34,64q_{ad,3} - 5,50q_{ad,4} - 60,00q_{ad,5} \geq 0 \end{cases}$$

3. Verifikacija modela izvršena je pri C/N odnosu u rasponu od 20 do 21,4:

$$D \begin{cases} q_{ad,1} + q_{ad,2} + q_{ad,3} + q_{ad,4} + q_{ad,5} = 1 \\ 13,60q_{ad,1} - 14,20q_{ad,2} - 10,02q_{ad,3} - 14,4q_{ad,4} + 60,00q_{ad,5} \geq 0 \\ -12,59q_{ad,1} + 16,91q_{ad,2} + 13,14q_{ad,3} - 13,27q_{ad,4} - 60,00q_{ad,5} \geq 0 \end{cases}$$

Dalja analiza sprovedena je na isti način kao i prethodna i prikazana je u okviru simulacije 1.

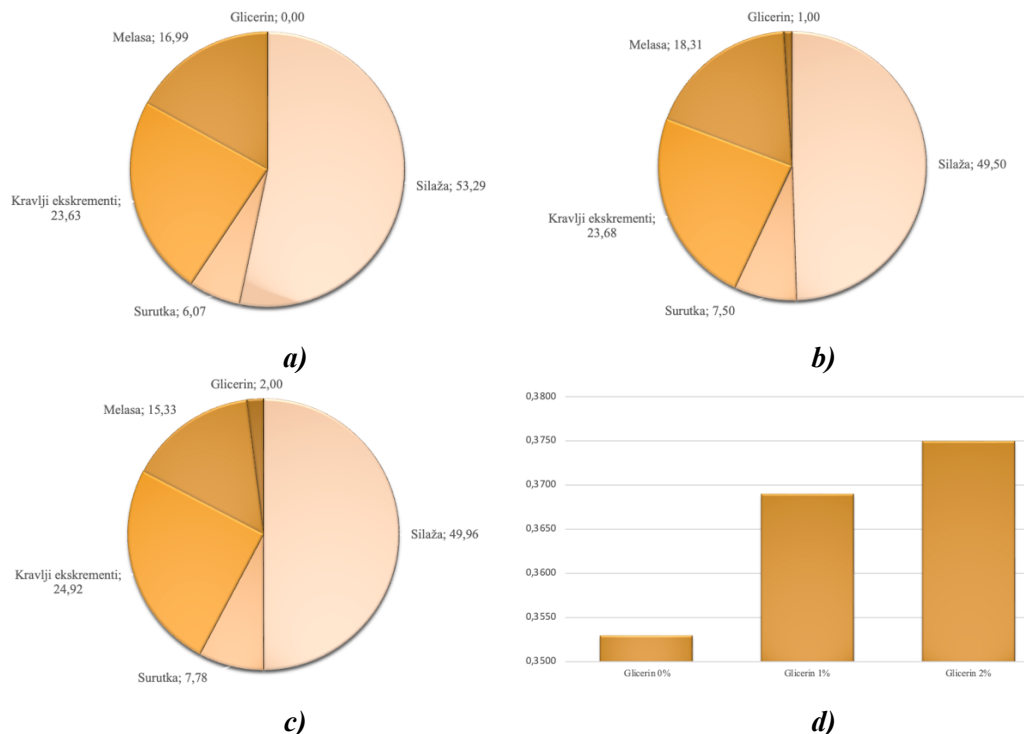
Rezultati

Da bi se zadovoljili odnosi C/N u opsegu od 20 do 25 ili od 20 do 30, neophodno je da sadržaj C , kao brojilac, teži maksimumu, dok sadržaj N , kao imenilac, teži minimumu. Iz tog razloga, model je korišćen za određivanje maksimalnog sadržaja C i minimalnog sadržaja N u smeši sirovina. Za oba slučaja, unapred definisani udeo glicerina se kretao od 0 do 2%. Tabela 5.18 prikazuje odnos mešanja sirovina i prinos biogasa za C/N odnos od 20 do 25.

Tabela 5.18 Odnos supstrata i prinos biogasa prema primenjenom modelu za odnos C/N u rasponu 20-25, sadržaj glicerina 0-2%

Sirovina	Odnos mešanja sirovina [%]					C/N	Prinos biogasa [m ³ /kg VS]
	Silaža	Surutka	Govedi ekskrementi	Melasa	Glicerin		
	53,29	6,07	23,63	16,99	0,00	25,00	0,353
	49,50	7,50	23,68	18,31	1,00	25,00	0,369
	49,96	7,78	24,92	15,33	2,00	25,00	0,375

U mešavini sa 0% glicerina silaža kukuruza ima najveći udeo od 53,2%, dok su udeli ekskremenata, melase i surutke iznose 23,6%, 17% i 6%. Dodavanjem 1% glicerina došlo je do smanjenja udela silaže za 4%, dok su se udeli surutke i melase povećali za 1,5% i 1,3%. Pri dodatku 2% glicerina, udeo melase se smanjio za 3%, dok se udeo ekskremenata povećao za 1,3%, što je rezultovalo najvišim prinosom biogasa od 0,375 m³/kg VS (slika 5.17).

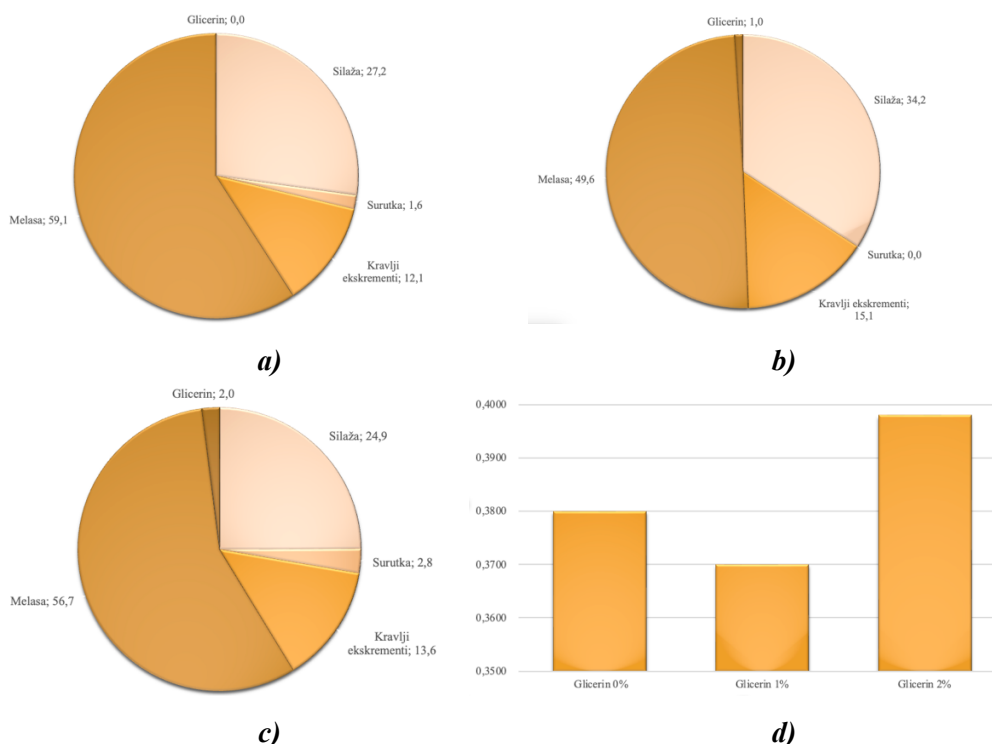


Slika 5.17 Odnos mešanja supstrata za C/N odnos u rasponu 20-25, a) sadržaj glicerina 0%, b) sadržaj glicerina 1%, c) sadržaj glicerina 2%, d) prinos biogasa [m³/kgVS] u odnosu na sadržaj glicerina

Tabela 5.19 Odnos mešanja supstrata i prinos biogasa prema primenjenom modelu za odnos C/N u rasponu 20-30, sadržaj glicerina 0-2%

Sirovina	Odnos mešanja sirovina [%]					C/N	Prinos biogasa [m ³ /kg VS]
	Silaža	Surutka	Goveđi ekskrementi	Melasa	Glicerin		
	27,2	1,6	12,1	59,1	0,00	30,00	0,380
	34,2	0,0	15,1	49,6	1,00	30,00	0,370
	24,9	2,8	13,5	56,7	2,00	30,00	0,398

Tabela 5.19 prikazuje odnos mešanja sirovina i prinos biogasa za opseg odnosa C/N od 20 do 30. U mešavini sa 0% glicerina melasa čini najveći udeo od 59,1%, dok su udeli silaže, ekskremenata i surutke iznosili 27,2%, 12,1% i 1,6%. Dodavanjem 1% glicerina udeo melase se smanjuje za 9,5%, dok udeli silaže i ekskremenata rastu za 7% i 3%, a surutka se potpuno eliminiše. Pri dodatku 2% glicerina udeo melase se dodatno smanjuje, dok prinos biogasa dostiže maksimum od 0,398 m³/kg VS (5.18).

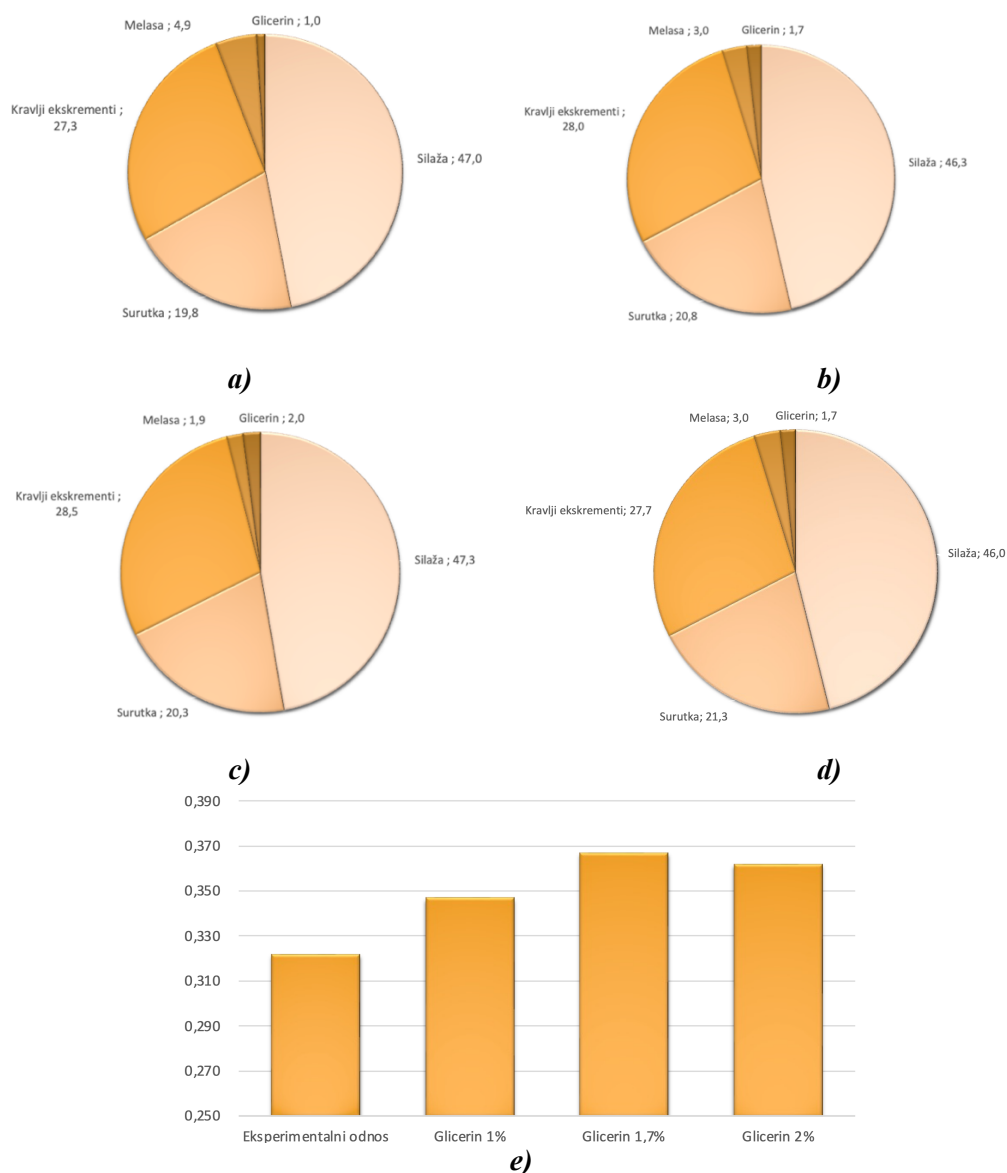


Slika 5.18 Odnos mešanja supstrata za C/N odnos u rasponu 20-30, a) sadržaj glicerina 0%, b) sadržaj glicerina 1%, c) sadržaj glicerina 2%, d) prinos biogasa [m³/kgVS] u odnosu na sadržaj glicerina

Tabela 5.20 Eksperimentalni i modelovani odnos mešanja supstrata i prinos biogasa u digestiji za odnos C/N u rasponu 20-21,4, sadržaj glicerina 1-2%

Sirovina	Odnos mešanja sirovina [%]					C/N	Prinos biogasa [m ³ /kg VS]
	Silaža	Surutka	Goveđi ekskrementi	Melasa	Glicerin		
Eksperimentalni	46,00	21,35	27,75	3,00	1,70	21,40	0,322
Predviđen modelom	46,99	19,83	27,30	4,85	1,00	21,40	0,347
	46,30	20,80	28,00	3,00	1,70	21,40	0,367
	47,27	20,34	28,48	1,90	2,00	21,40	0,362

Empirijski podaci pokazali su da mešavina sa 44% silaže, 21,3% surutke, 26,7% ekskremenata i 3% melase daje prinos biogasa od 0,322 m³/kg VS. Model je predvideo da povećanje udela silaže na 48,7% i smanjenje udela surutke na 19,8% povećava prinos na 0,347 m³/kg VS. Pri dodatku 1% glicerina prinos raste na 0,367 m³/kg VS, a pri 2% glicerina na 0,362 m³/kg VS, uz eliminaciju melase iz smeše, kao što je prikazano na slici 5.19.



Slika 5.19 Odnos mešanja supstrata za C/N odnos u rasponu 20-21.4, a) sadržaj glicerina 1%, b) sadržaj glicerina 1,7%, c) sadržaj glicerina 2%, d) eksperimentalni odnos mešanja organskih sirovina e) prinos biogasa [m³/kgVS] u odnosu na sadržaj glicerina

Ovi rezultati potvrđuju da model uspešno predviđa optimalne odnose mešanja sirovina i prinos biogasa u zadatim granicama odnosa C/N, uz mogućnost eliminacije sirovina, poput melase. Time je validiran model, kao i njegova primenljivost u uslovima AD.

6. DISKUSIJA REZULTATA

U ovom poglavlju izvršena je interpretacija rezultata dobijenih tokom analize modela IUOO. Cilj diskusije je da se kroz sve istraživačke faze sagleda ostvarenje opšteg, glavnog i posebnih ciljeva istraživanja i da se utvrdi u kojoj meri razvijeni model ispunjava postavljene zahteve. Poseban akcenat stavljen je na vezu između kvantitativnih nalaza simulacija i principa CE, pri čemu se rezultati ne posmatraju samo kao numeričke vrednosti, već i kao pokazatelji održivosti i zatvaranja materijalnih i energetske tokova.

U okviru sprovedenog istraživanja proces ispitivanja modela bio je organizovan u tri faze. Prva faza imala je za cilj da proveriti funkcionalnosti, čime je omogućena analiza sposobnosti modela da definiše optimalne mešavine za kompostiranje i anaerobnu digestiju, kao i identifikacija osnovnih tokova materije i energije u formiranom sistemu IUOO. Druga faza bila je usmerena na procenu efikasnosti razvijenog modela primenom indikatora CE, koji su omogućili kvantitativno sagledavanje stepena uključivanja organske materije u zatvorene tokove i procenu curenja materije i energije, kao i cirkularnost materije i energije. U okviru ove faze dodatno je analiziran nutritivni potencijal komposta, sa ciljem utvrđivanja mogućnosti povraćaja nutrijenata prema potrebama konkretne biljne vrste. Treća faza obuhvatila je validaciju modela poređenjem sa rezultatima realnih sistema anaerobne digestije, čime je izvršena provera tačnosti proračuna i potvrđena pouzdanost modela u predviđanju prinosa biogasa i optimalnih odnosa mešanja sirovina, čime je ujedno potvrđena njena primenljivost u stvarnim uslovima rada sistema.

Na ovaj način diskusija je oblikovana tako da svaka faza istraživanja dobija svoje mesto u tumačenju rezultata, od razumevanja unutrašnjih procesa, preko procene održivosti sistema, do konačne validacije matematičkog modela. Time se obezbeđuje celovit pregled doprinosa modela razvoju održivih sistema IUOO.

6.1. DISKUSIJA EKSPLORATIVNE FAZE

Eksplorativna faza istraživanja obuhvatila je tri simulacije usmerene na početnu proveru modela i razumevanje ponašanja procesa i tokova u sistemu IUOO.

Prva simulacija bila je fokusirana na optimizaciju odnosa mešanja sirovina uz ograničenje odnosa C/N (od 20 do 30 i od 25 do 30), sa ciljem postizanja većeg prinosa biogasa pri minimalnom sadržaju lignina u smeši sirovina. Tokom analize praćen je i sadržaj vlage.

Druga simulacija proširila je analizu na proces kompostiranja, pri čemu su kao kriterijumi posmatrani sadržaji C , N , P , K i vlage. U skladu sa važećim Pravilnikom, zahtevano je da sadržaj fosfora iznosi najmanje 1%, dok su sadržaji azota, kalijuma i vlage posmatrani kao faktori koji utiču na stabilnost i kvalitet krajnjeg proizvoda.

Treća simulacija bila je usmerena na izračunavanje materijalnih i energetskih tokova u integrisanom sistemu, pri čemu su osnovni tokovi komunalnog otpada grada Niša (ODKO i parkovski otpad) tretirani isključivo procesom anaerobne digestije, sa ciljem obezbeđivanja izvora energije potrebnog za rad sistema.

Na ovaj način, eksplorativna faza omogućila je sveobuhvatno sagledavanje funkcionisanja sistema kroz dve komplementarne perspektive: proveru modela za optimizaciju ulaznih mešavina i zatvaranje materijalno-energetskih tokova. Time je postavljena osnova za definisanje granica sistema i formulisanje kriterijuma evaluacije, koji su dalje primenjeni u evaluacionoj fazi istraživanja.

6.1.1. Diskusija rezultata Simulacije 1

Rezultati prve simulacije imali su za cilj proveru sposobnosti modela da optimizuje odnose mešanja sirovina za proces anaerobne digestije kroz dve iteracije, u opsezima odnosa C/N od 20 do 30 i od 25 do 30. U okviru optimizacije primenjen je kriterijum minimalnog sadržaja lignina, dok su sadržaji vlage i prinos biogasa praćeni radi procene stabilnosti procesa i energetskog potencijala dobijene smeše.

U prvoj iteraciji simulacije, sprovedenoj za širi opseg odnosa C/N od 20 do 30, rezultati optimizacije pokazali su razlike između pojedinačnih kriterijuma i kompromisnog rešenja. Maksimizacijom sadržaja C postignut je udeo od 46,13% u mešavini 29,94% slame i 70,06% ODKO (slika 5.1a). Minimizacijom sadržaja L dobijen je udeo lignina od 4,00% u mešavini 40,93% svinjskih ekskrementa i 59,07% sena (slika 5.1b).

Pareto rešenje (slika 5.1c) obuhvatilo je 32,45% svinjskih ekskrementa, 53,90% sena i 13,63% ODKO, uz odnos C/N u smeši od 20,0003, sadržaj lignina od 4,19% i vlage 50,68%. Količine sirovina korišćene u ovom optimalnom sastavu zasnovane su na podacima iz tabele 4.1, u kojoj su prikazane ukupne količine dostupne na teritoriji grada Niša. U tabeli 5.1 prikazane su količine koje ulaze u optimalnu mešavinu, pri čemu udeo svinjskih ekskremenata, sena i ODKO čine 99,98% ukupne zapremine, odnosno 70.651,00 m³ sena, 42.534,00 m³ svinjskih ekskrementa i 17.866,00 m³ ODKO. Govedi ekskrementi i slama prisutni su u minimalnim količinama (0,78 m³ i 32,76 m³). Ovakva raspodela pokazuje da je optimalna

mešavina usklađena sa stvarno dostupnim količinama sirovina na teritoriji Niša i da omogućava uključivanje celokupnog ODKO u proces, što je bio osnovni kriterijum za definisanje ulaznih količina u simulaciji, pri čemu raspoložive količine omogućavaju kontinuiranu proizvodnju biogasa tokom cele godine.

Druga iteracija, sprovedena za uži opseg odnosa C/N od 25 do 30, pokazala je stroža ograničenja pri izboru sirovina i smanjenje broja sirovina u optimalnoj mešavini. Maksimizacija sadržaja C (slika 5.2a) rezultiralo je udelom C od 45,00% u mešavini 49,04% slame i 50,95% ODKO. Minimizacija sadržaja L (slika 5.2b) postignuta je mešavinom 10,82% goveđih ekskrementa i 89,17% slame, uz sadržaj L od 6,00%.

Konačno rešenje Pareto optimizacije predstavlja kompromisnu mešavinu koja istovremeno zadovoljava sve primenjene kriterijume optimizacije. Prema tom rešenju (slika 5.2c) optimalna mešavina obuhvatila je 2,41% svinjskih ekskrementa, 57,02% sena i 40,56% ODKO. Udeo goveđih ekskrementa iznosi 0,000019%, a slame 0,000031%, što ukazuje da su ove sirovine gotovo potpuno isključene iz optimalnog sastava. Karakteristike optimalne mešavine su odnos C/N od 25, sadržaj lignina 5,04% od i vlage 40,08%. Količine prikazane u tabeli 5.2 pokazuju da ukupan udeo sena i ODKO čini 97,58% mešavine, odnosno 25.126,00 m³ sena i 17.866,00 m³ ODKO. Svinjski ekskrementi učestvuju sa 1.062,00 m³, dok su goveđi ekskrementi i slama prisutni u vrlo malim količinama, 0,84 m³ i 1,37 m³.

Kada se uporede ulazne količine sirovina, širi opseg odnosa C/N od 20 do 30 obuhvata približno 131.085 m³ materijala, dok uži opseg od 25 do 30 uključuje oko 44.056 m³, što znači da uži interval koristi oko tri puta manji obim ulaznih sirovina. Posmatrano kroz broj sirovina koje ulaze u optimalnu mešavinu, širi opseg uključuje svih pet frakcija, dok uži opseg dovodi do gotovo potpunog isključenja goveđih ekskrementa i slame. Kada se opsezi posmatraju kroz udeo pojedinih frakcija, u širem intervalu najveće učešće imaju seno i svinjski ekskrementi, dok u užem intervalu seno i ODKO. U oba opsega uočava se da se određene sirovine mogu međusobno zameniti zbog sličnog elementarnog sastava, posebno seno sa slamom i svinjski sa goveđim ekskrementima. Prinosi biogasa za optimalne mešavine potvrđuju razlike između dva opsega odnosa C/N . U širem intervalu od 20 do 30 ostvaren je prinos od 0,472 m³/kg VS, dok uži interval od 25 do 30 dostiže 0,589 m³/kg VS (slika 5.3). Ukupna godišnja proizvodnja biogasa veća je u širem opsegu i iznosi 38.192.511 m³, dok uži opseg obezbeđuje 15.203.872 m³. Ovi rezultati ukazuju da uži opseg C/N daje viši prinos po jedinici suve materije, ali manji ukupan obim proizvedenog biogasa.

Poređenje dve iteracije pokazuje da izbor opsega odnosa C/N određuje strategiju upravljanja supstratima. Širi interval omogućava veću ukupnu proizvodnju zbog većeg obima uključenih sirovina, dok uži interval obezbeđuje veću efikasnost procesa po jedinici mase. Time se ukazuje da se operativni prioriteti sistema mogu definisati na osnovu potreba: ako je cilj maksimizacija ukupne proizvodnje, pogodniji je širi opseg odnosa C/N , dok uži opseg omogućava veću procesnu efikasnost. Ukupno posmatrano, rezultati potvrđuju da model može da se prilagodi različitim zahtevima i da prikazuje uticaj odnosa C/N na performanse procesa.

6.1.2. Diskusija rezultata Simulacije 2

Rezultati druge simulacije imali su za cilj proveru sposobnosti modela da optimizuje odnose mešanja sirovina za proces kompostiranja kroz dve iteracije, u opsezima odnosa C/N od 20 do 30 i od 25 do 30. U okviru optimizacije primenjeni su kriterijumi minimalnog sadržaja fosfora od 1% u smeši sirovina, dok su sadržaji kalijuma i vlage praćeni nutritivnog kvaliteta dobijenog komposta.

U prvoj iteraciji, koja je obuhvatila širi opseg odnosa C/N , maksimalan sadržaj ugljenika od 46,1% postignut je mešavinom od 30,38% slame i 69,62% ODKO (slika 5.4a). Minimalan sadržaj fosfora od 1% postignut je kombinovanjem 19,27% svinjskih ekskrementa, 8,34% goveđih ekskrementa i 72,38% sena (slika 5.4b). Optimalna mešavina uključila je 69,62% ODKO i 30,38% slame (slika 5.4c), pri čemu je postignut odnos C/N od 20,09, sadržaj ugljenika od 46,11%, azota od 2,29%, fosfora od 1%, kalijuma od 5,05% i vlaga od 52,02%. Količine sirovina prikazane su u tabeli 5.3, gde ODKO učestvuje sa 17.866,00 m³, a slama sa 7.794,00 m³, dok su ostale frakcije uključene u tragovima (0,05 m³ svinjskih ekskrementa).

U drugoj iteraciji, sa užim opsegom odnosa C/N , postavljeni su stroži kriterijumi koji su zahtevali preciznije formiranje mešavina. Maksimalan sadržaj ugljenika od 45,01% postignut je sa 49,05% slame i 50,95% ODKO (slika 5.5a). Minimalan sadržaj fosfora od 1% obezbedila je mešavina od 20,1% svinjskih ekskrementa, 3,27% goveđih ekskrementa i 76,62% sena (slika 5.5b). Optimalna mešavina u užem opsegu uključila je 48,51% ODKO, 31% slame i 20,49% sena (slika 5.5c), čime je postignut odnos C/N od 25,09, sadržaj ugljenika od 44,82%, azota od 1,79%, fosfora od 1,018%, kalijuma od 5,39% i vlaga od 40,78%. Količine sirovina prikazane su u tabeli 5.4, u kojoj ODKO učestvuje sa 17.866,00 m³, slama sa 11.417,50 m³, a seno sa 7.548,49 m³, dok su svinjski i goveđi ekskrementi prisutni u zanemarljivim vrednostima (0,00019 m³ i 0,00008 m³).

Kada se uporede ulazne količine sirovina, širi opseg odnosa C/N obuhvata približno 25.660 m³ materijala u optimalnoj mešavini, dok uži opseg uključuje oko 36.832 m³. Za razliku od Simulacije 1, gde je uži opseg zahtevao manju količinu ulaznih sirovina, u Simulaciji 2 uži opseg obuhvata veće ukupne količine. Posmatrano kroz broj sirovina koje ulaze u optimalnu mešavinu, širi opseg C/N u Simulaciji 2 uključuje praktično dve sirovine (ODKO i slamu), dok su svinjski i goveđi ekskrementi prisutni samo u tragovima. U užem opsegu u optimalnoj mešavini učestvuju tri sirovine (ODKO, slama i seno), što je rezultat strožeg odnosa C/N i potrebe za preciznijim balansiranjem komponenti. Kada se opsezi posmatraju kroz učešće pojedinih sirovina, u širem opsegu najveći doprinos imaju ODKO (69,62%) i slama (30,38%), dok uži opseg karakterišu ODKO (48,50%) i slama (30,99%), uz značajan udeo sena (20,49%). Dakle, ODKO zadržava ključnu ulogu u oba opsega, dok se uloga slame i sena menja u skladu sa zahtevima odnosa C/N .

Mogućnost zamene sirovina uočena je i u Simulaciji 2: slama i seno mogu biti međusobno zamenjive zbog sličnog elementarnog sastava i slične uloge u regulisanju odnosa C/N , dok svinjski i goveđi ekskrementi poseduju kompatibilne nutritivne karakteristike i mogu se zamenjivati u minimalnim udelima.

Poređenjem sadržaja C , N , P , K i vlage u optimalnoj smeši uočeno je da u širem opsegu (tabela 5.3) optimalna mešavina sadrži 46,11% C , 2,29% N , 1% P , 5,05% K i 52,02% vlage., dok u užem opsegu (tabela 5.4) postignuto je 44,82% C , 1,79% N , 1,018% P , 5,39% K i 40,78% vlage. U poređenju dva opsega, širi interval obezbeđuje viši sadržaj azota i ravnotežu u skladu sa početnim kriterijumima odnosa C/N , dok uži interval rezultuje nižom vlagom.

Širi opseg omogućava ostvarivanje traženih nutritivnih vrednosti uz jednostavniju mešavinu zasnovanu na ODKO i slami, dok uži opseg obezbeđuje preciznije upravljanje kvalitetom mešavine kroz uključivanje sena i veću kontrolu sadržaja vlage i fosfora. U oba opsega uočena je mogućnost zamene sirovina sličnog elementarnog sastava, što potvrđuje stabilnost i adaptivnost modela. Rezultati ukazuju da širi opseg pogoduje većoj količini kompostnog materijala, dok uži opseg omogućava bolju kontrolu kvaliteta finalnog proizvoda.

6.1.3. Diskusija rezultata Simulacije 3

Rezultati simulacije 3 pružaju sveobuhvatan pregled tokova materijala i energije u sistemu IUOO sa ciljem postizanja samoodrživosti u skladu s principima CE koristeći sirovine nastale komunalnih delatnostima procesom anaerobne digestije. Analiza obuhvata ključne

aspekte kao što su proizvodnja biogasa, logistika otpada, proizvodnja digestata i komposta, kao i sezonske varijacije u radu sistema.

Ukupna godišnja proizvodnja biogasa iznosila je 65.036.156 MJ, što je bilo dovoljno da se na godišnjem nivou zadovolje sve energetske potrebe sistema. Međutim, mesečna analiza pokazala je izražene sezonske razlike. Tokom zimskih meseci (decembar, januar i februar) beleženi su energetske deficiti od -15.000 do -20.000 MJ dnevno, jer je većina proizvedene energije bila utrošena na grejanje digestora (preko 160.000 MJ/dan) i supstrata (oko 9.400 MJ/dan). U prelaznim periodima, poput proleća i jeseni, bilans je bio gotovo uravnotežen, sa manjim suficitima ili manjim gubicima. Najveći viškovi energije ostvareni su tokom letnjih meseci (maj-avgust), kada su oni iznosili između 29.000 i 49.000 MJ dnevno. Na godišnjem nivou, ukupni višak energije dostigao je 4.597.922 MJ, što odgovara prosečnom dnevnom suficitu od 12.428 MJ. Ovi viškovi mogu se iskoristiti za proizvodnju električne energije ili uključivanje u mreže daljinskog grejanja.

Digestat se proizvodi u količini od približno 20 tona dnevno (oko 7.300 t/god). JKP „Mediana“ koristi 3.728 t/god za održavanje javnih zelenih površina, dok se preostalih 49% može dalje koristiti u poljoprivredi ili distribuirati građanima.

Transport otpada i digestata čine značajan deo energetske potrebe, oko 6,31% energije koristi se za prikupljanje i prevoz organskog otpada, a dodatnih 2,28% za transport digestata. Sistem omogućava godišnji transport svih količina organskog otpada koje nastaju na teritoriji grada Niša, čime se postiže zatvaranje tokova otpada u lokalnom okviru.

Sezonske varijacije imaju važan uticaj na rad sistema: tokom zimskih meseci troši se više energije zbog potrebe za grejanjem, dok leti dolazi do generisanja najvećih energetske viškova. Ova fluktuacija može se ublažiti merama optimizacije kao što su povećana obrada otpada u toplijim mesecima ili dodatna izolacija digestora tokom zime.

Rezultati su pokazali da sistem može da postigne potpunu energetske samoodrživost, jer se osnovne energetske potrebe mogu u celosti zadovoljiti procesom AD. Time se obezbeđuje nesmetan rad postrojenja i logističkih aktivnosti, uz mogućnost korišćenja digestata za lokalni povraćaj materije na javnim zelenim površinama. Model je pokazao stabilnost u različitim uslovima i visok stepen prilagodljivosti lokalnim količinama sirovina, čime potvrđuje da integralni sistem upravljanja organskim otpadom može da zadovolji energetske potrebe i doprinese zatvaranju materijalnih tokova u skladu sa principima CE.

6.2. DISKUSIJA EVALUACIONE FAZE

Polazeći od rezultata eksplorativne faze, u kojoj je potvrđeno da razvijeni model pouzdano formira optimalne mešavine organskih sirovina za anaerobnu digestiju i kompostiranje, razlikuje uticaj šireg i užeg opsega odnosa C/N i omogućava sagledavanje osnovnih energetske i materijalne tokova, za dalju analizu usvojen je opseg odnosa C/N od 20 do 30 za proces anaerobne digestije i od 25 do 30 za proces kompostiranja. Evaluaciona faza istraživanja bila je usmerena na proveru održivosti i primenljivosti modela u realnim uslovima. U ovoj fazi ispitivano je u kojoj meri model može da obezbedi ravnotežu između energetske samoodrživosti i materijalne cirkularnosti sistema, kao i da omogući povraćaj nutrijenata kroz proces kompostiranja u skladu sa zahtevima biljne vrste.

U evaluacionoj fazi korišćeni su indikatori CE, uključujući stepen uključenja sirovina u tokove sistema, curenje materije i energije, cirkularnost materije i energije i nutritivni kapacitet komposta. Ova faza obuhvatila je dve simulacije (Simulacije 4 i 5), čime je prošireno razumevanje performansi modela u složenijim uslovima integralnog upravljanja. U četvrtoj simulaciji analizirano je deset scenarija (BS1, BS2, S1-S8), koji se razlikuju prema broju uključenih sirovina (dve, tri ili četiri) i načinu tretmana (anaerobna digestija, kompostiranje ili njihova kombinacija). Svaki scenario ocenjen je na osnovu materijalno-energetskog bilansa i indikatora CE, sa posebnim akcentom na identifikaciju onih koji postižu najviši stepen cirkularnosti i najmanje gubitke u zatvorenoj petlji. Peta simulacija bila je usmerena na nutritivni kapacitet komposta i njegovu usklađenost sa potrebama biljnih kultura, čime je omogućeno sagledavanje doprinosa modela poljoprivrednoj primeni komposta. Razmatran je povraćaj ugljenika i nutrijenata (azota, fosfora i kalijuma) u zemljište, što omogućava povezivanje IUOO sa ciklusima biljne proizvodnje i procenu potencijala komposta da doprinese održavanju plodnosti zemljišta.

6.2.1. Diskusija rezultata Simulacije 4

Rezultati Simulacije 4 imali su za cilj procenu različitih pristupa IUOO kroz analizu scenarija BS1–S8, koji se razlikuju prema vrsti tretmana (kompostiranje, anaerobna digestija ili kombinovani pristup) i broju uključenih sirovina (dve, tri ili četiri). U okviru simulacije praćeni su stepen uključenja organske materije, curenje materije i energije, cirkularnost materije i energije i ukupno funkcionisanje sistema, kako bi se utvrdilo na koji način izbor tretmana i struktura mešavine utiču na zatvorenost tokova i efikasnost sistema.

Prema kriterijumima optimizacije za procese AD, cilj je bio da se postigne minimalan sadržaj L uz zadate odnose C/N . U sprovedenim simulacijama (BS2, S2, S3, S4, S6, S7 i S8) optimizacijom je obezbeđeno da sadržaj L ostane u rasponu od 11,57 % do 18,12 %, što ukazuje na uspešno smanjenje udela teško razgradive frakcije i povoljan preduslov za efikasnu produkciju biogasa. Dobijene vrednosti potvrđuju da su zahtevi optimizacije zadovoljeni, a budući koraci treba da budu usmereni na dalju redukciju lignina i povećanje biorazgradive komponente kako bi se povećala efikasnost procesa anaerobne digestije i prinos biogasa.

Prema Pravilniku, predviđeno je da sadržaj N , P i K bude veći od 1 % u kompostu. U sprovedenim scenarijima (BS1, S1, S5, S6, S7 i S8) optimizacijom je obezbeđeno da minimalni sadržaj P bude 1 %, dok su sadržaji N i K praćeni kao prateći pokazatelji nutritivnog kapaciteta. Rezultati pokazuju da sve analizirane smeše imaju sadržaj N iznad 3 %, dok su vrednosti K ispod 1 % (0,73-0,76 %). Budući pravci istraživanja biće usmereni na optimizaciju sadržaja svih nutrijenata iznad 1 %, ali su u okviru ovog istraživanja zahtevi optimizacije zadovoljeni.

Na osnovu izvedenih analiza i prikazanih rezultata može se zaključiti da različiti scenariji pružaju specifične prednosti i ograničenja u upravljanju organskim otpadom. Scenariji koji uključuju AD, kao što su S2, S4, S6 i S7, pokazali su najveći kapacitet obrade sirovina i visoku efikasnost u proizvodnji energije. Sa druge strane, scenariji koji se oslanjaju isključivo na kompostiranje, među kojima su BS1, S1 i S5, obezbedili su veću cirkularnost materije (iznad 90%), ali uz znatno manji obim obrade sirovina. Kombinovani pristupi, kakvi su primenjeni u scenarijima S6, S7 i S8, omogućili su sinergiju metoda i postizanje ravnoteže između energetske i materijalne cirkularnosti. Najvažnije je sagledati scenarije S6, S7 i S8, jer oni objedinjuju anaerobnu digestiju i kompostiranje, čime se istovremeno obezbeđuju materijalni i energetski tokovi, a s obzirom na to da svi obuhvataju kombinovane tretmane, potrebno ih je razmatrati i prema broju uključenih sirovina. Karakteristike ovih scenarija prikazane su u tabeli 6.1, koja daje pregled broja uključenih sirovina, tipa tretmana, osnovnih parametara mešavina za kompostiranje i anaerobnu digestiju, kao i indikatora CE.

Scenario S6 obuhvata kombinovani tretman dve sirovine i ukupnu količinu tretirane organske materije od 16.314,00 t/god. Optimalni udeli sirovina u mešavini za kompostiranje iznose 66% PO i 34% ODKO, čime se postiže odnos C/N od 25,05, vlaga od 63,40% i sadržaj fosfora iznad 1%, što ukazuje na dobar nutritivni potencijal komposta. U mešavini namenjenoj AD udeli su 51% ODKO i 49% PO, uz odnos C/N od 22,60 i vlagu od 65,02%, što obezbeđuje stabilne uslove anaerobne razgradnje.



Tabela 6.1 *Indikatori cirkularne ekonomije za scenarije S6-S8*

Scenario	S6				S7				S8												
Način tretmana	Kompostiranje		Anaerobna digestija		Ukupno	Kompostiranje			Anaerobna digestija			Ukupno	Kompostiranje				Anaerobna digestija				Ukupno
Količina tretiranje organske sirovine [t/god]	6.725,00		9.589,00		16.314,00	13.022,00			22.118,00			35.140,00	12.471,00				14.718,00				27.189,00
Količina dostupne organske sirovine [t/god]	#####					35.912,00											36.044,00				
Organska sirovina	ODKO	PO	ODKO	PO		ODKO	PO	PT	ODKO	PO	PT		ODKO	PT	PT	OM	ODKO	PO	PT	OM	
Optimalni udeo organskih sirovina	0,34	0,66	0,51	0,49		0,19	0,68	0,13	0,33	0,33	0,34		0,14	0,71	0,14	0,01	0,52	-	0,49	-	
Količine pojedinačnih organskih sirovina [t/god]	2.286,50	4.438,50	4.842,45	4.746,56		2.474,18	8.854,96	1.692,86	7.365,29	7.232,59	7.498,00		1.745,94	8.854,41	1.745,94	99,77	7.579,77	-	7.138,23	-	
Udeo pojedinačnih iskorišćenih sirovina u odnosu na dostupne količine	0,13	0,50	0,27	0,54		0,14	1,00	0,18	0,41	0,82	0,82		0,10	1,00	0,19	0,76	0,42	-	0,78	-	
C/N mešavine	25,05		22,60			25,28			20,03				25,69				15,00				
Vlaga mešavine [%]	63,40		65,02			62,68			65,27				62,58				67,45				
Raspodela tretmana	0,41		0,59		1,00	0,37			0,63			1,00	0,46				0,54				1,00
Stepen uključenja organske materije	0,25		0,36		0,61	0,36			0,62			0,98	0,35				0,41				0,75
Curenje materije [t/god]					2.802,60							10.333,00									7.152,60
Curenje energije [MJ/t po OS]	452,38					1.462,48											943,55				
Curenje energije [10^6 MJ/god]	8,07					53,93											27,41				
Cirkularnost materije [%]					87,73							79,00									81,21
Cirkularnost energije [%]	80,81					38,23											65,33				

Scenario S6 ostvaruje najniže curenje materije (2.802,60 t/god) i najniže curenje energije (452,38 MJ/t), dok visoke vrednosti cirkularnosti materije (87,73%) i energije (80,81%) ukazuju na najstabilniji i najzatvoreniji tok u okviru analiziranog sistema.

Povećanjem broja sirovina na tri, scenario S7 obuhvata ukupno 35.140,00 t/god tretirane organske materije. U mešavini za kompostiranje učešća sirovina iznose 68% PO, 19% ODKO i 13% PT, pri čemu se postiže odnos C/N od 22,60, vlaga od 65,02% i sadržaj fosfora iznad 1%. U mešavini namenjenoj AD udeli sirovina su uravnoteženi (33% ODKO, 33% PO, 34% PT), uz odnos C/N od 25,28 i vlagu od 62,68%. Raspodela tretmana pokazuje da se 22.118,00 t/god obrađuje u AD procesu, dok 13.022,00 t/god ide na kompostiranje.

Uprkos visokom stepenu uključenja (98%), scenario S7 je opterećen najvećim vrednostima gubitaka: curenje materije iznosi 10.333,00 t/god, a curenje energije 1.462,48 MJ/t, uz godišnje curenje od $53,93 \times 10^6$ MJ/god. Kao posledica, cirkularnost materije opada na 79,00%, a cirkularnost energije na 38,23%, što ukazuje na potrebu za širenjem upotrebnih kapaciteta (poljoprivrednih površina i procesa potrošnje energije).

U scenariju S8 tretira se ukupno 27.189,00 t/god organske materije. U mešavini za kompostiranje učešća sirovina iznose 71% PT, 14% ODKO, 14% PO i 1% OM, pri čemu se postiže odnos C/N od 15,00, vlaga od 67,45% i sadržaj fosfora iznad 1. Mešavina za AD sastoji se od 52% ODKO i 49% PO, uz odnos C/N od 25,69 i vlagu od 62,58%. Raspodela tretmana pokazuje da 12.471,00 t/god odlazi na kompostiranje, dok 14.718,00 t/god ulazi u AD. U poređenju sa scenarijem S7, scenario S8 ostvaruje niže vrednosti gubitaka: curenje materije opada na 7.152,60 t/god, a curenje energije na 943,55 MJ/t, uz godišnje curenje od $27,41 \times 10^6$ MJ/god. Povećanje broja sirovina, uz uravnotežene udele i povoljne procesne parametre, dovodi do porasta cirkularnosti materije (81,21%) i energije (65,33%), što ukazuje na stabilniji i zatvoreniji tok u odnosu na scenario sa tri sirovine.

Kako je ranije u poglavlju utvrđeno da kombinovani tretman kompostiranja i AD predstavlja najpovoljniji pristup IUOO, poređenje scenarija S6, S7 i S8 fokusirano je na količine tretirane organske materije i pripadajuće indikatore cirkularnosti. Scenario S6 ostvaruje najniže gubitke i najstabilnije tokove, ali tretira najmanje količine sirovina. Scenario S8 uključuje veći broj sirovina i postiže povoljne vrednosti cirkularnosti uz smanjene gubitke u odnosu na S7, ali tretira manje količine organske materije. Scenario S7 tretira najveću količinu organske materije i dostiže najviši stepen uključenja, što ga čini najperspektivnijim za proširenje. Uprkos većim vrednostima curenja, sposobnost scenarija S7 da uključi najveće

količine sirovina i održi funkcionalnost sistema ukazuje da predstavlja najpovoljniju opciju za razvoj skalabilnog i resursno efikasnog sistema IUOO.

6.2.2. Diskusija rezultata Simulacije 5

Rezultati Simulacije 5 ukazuju da kompost proizveden na osnovu optimalnih mešavina sirovina iz druge simulacije obezbeđuje koncentracije fosfora i kalijuma koje značajno prevazilaze minimalne nutritivne zahteve ječma. Minimalno potreban nivo fosfora od 0,25 mmol P/kg zemljišta (0,000774%), prepoznat kao granična vrednost ispod koje dolazi do ograničenja rasta ječma, višestruko je nadmašen u obe analizirane mešavine. Udeo ukupnog P u smeši sirovina koja se kompostira iznosi 1,00% u prvoj i 1,02% u drugoj iteraciji, dok je sadržaj asimilabilnog P_a za obe iteracije oko 0,50%, takođe daleko iznad minimalnog praga neophodnog za nesmetan rast biljke. U pogledu kalijuma, kompost dobijen iz optimalnih mešavina takođe obezbeđuje visoke koncentracije ovog nutrijenta. Udeo K u kompostu kreće se između 5,05% i 5,39%, uz gotovo potpunu prisutnost kalijuma u asimilabilnoj formi ($K_a \approx 12,62$ -13,47%). Ovakva dostupnost kalijuma ukazuje na visok potencijal komposta da obezbedi kontinualnu i stabilnu snabdevenost ječma, posebno uzimajući u obzir da kalijum ne ulazi u nerastvorljiva jedinjenja i ostaje u jonizovanom obliku koji biljke lako usvajaju.

Poređenjem optimalnih mešavina iz dve iteracije može se uočiti da uži opseg odnosa C/N (25-30) dovodi do formiranja komposta sa nešto nižim sadržajem ugljenika, ali sa blago povećanim udelom P i K , što može biti povoljno u agroekološkim uslovima koji zahtevaju intenzivniji nutritivni odgovor. S druge strane, širi opseg C/N (20-30) obezbeđuje kompost sa većim udelom organske materije i višim sadržajem vlage, što može doprineti poboljšanju strukture zemljišta, pri čemu su P i K ostali u optimalnim granicama.

Sveukupno posmatrano, obe smeše organskih sirovina ispunjavaju nutritivne potrebe ječma u skladu sa Agrenovim modelom i zakonom međusobnog delovanja nutrijenata. U skladu sa Libigovim zakonom minimuma, nijedan od analiziranih nutrijenata ne predstavlja ograničavajući faktor u rastu i razvoju ječma, što potvrđuje da kompost dobijen iz optimalnih mešavina predstavlja adekvatan izvor fosfora i kalijuma za ovu biljnu kulturu.

6.3. DISKUSIJA VALIDACIONE FAZE

Validacionom fazom ispitana je tačnost razvijenog matematičkog modela za slučaj AD kroz poređenje modelovanih i eksperimentalno dobijenih mešavina sirovina u biogasnom postrojenju, pri čemu su korišćene sledeće sirovine: kukuruzna silaža, goveđi ekskrementi,

melasa, slama i glicerin. Matematički model je zatim primenjen na iste sirovine korišćene u posmatranom postrojenju, koristeći literaturne podatke o elementarnom sastavu i prinosu biogasa, i optimizovan kroz tri iteracije u opsezima odnosa C/N 20-30, 20-25 i 20-21,4, uz ograničenje glicerina od 0-2%.

U poređenju modelovanih smeša sirovina sa eksperimentalno korišćenom smešom, prvo je analiziran opseg odnosa C/N od 20 do 30. Smeše dobijene u ovoj iteraciji značajno se razlikuju od eksperimentalne, pre svega zbog znatno manjeg udela silaže (24,9-34,2% u modelu u odnosu na 46% u eksperimentu) i mnogo većeg udela melase, koja u modelu dostiže 49,6-59,1%, dok u eksperimentalnoj smeši iznosi svega 3%. Udeo goveđih ekskrementa je takođe niži nego u eksperimentu, dok je sadržaj glicerina u približnom opsegu.

Druga iteracija, sprovedena za odnos C/N od 20 do 25, daje smeše koje se u većoj meri približavaju eksperimentalnoj. Udeo silaže je veoma visok (49,5-53,3%) i nalazi se bliže eksperimentalnoj vrednosti od 46%. Udeo goveđih ekskremenata je takođe umeren i sličan eksperimentalnom, dok su udeli glicerina unutar opsega. Međutim, udeo melase ostaje znatno viši u modelu nego u eksperimentu, a udeo surutke je višestruko niži od eksperimentalnog (oko 7% u modelu naspram 21,35% u eksperimentu).

Najbolje poklapanje postignuto je u iteraciji sprovedenoj u uskom opsegu odnosa C/N od 20 do 21,4. U ovom slučaju modelovane vrednosti gotovo u potpunosti reprodukuju eksperimentalnu smešu. Udeo silaže u modelu odstupa manje od 1,3 procentna poena u odnosu na eksperimentalnu vrednost, dok su udeo goveđih ekskrementa i surutke takođe u vrlo uskoj zoni odstupanja. Udeo melase kreće se od 1,9% do 4,85%, pri čemu jedna modelovana vrednost precizno odgovara eksperimentalnoj od 3%. Udeo glicerina, koji se kreće od 1% do 2%, u potpunosti se uklapa u eksperimentalni opseg od 1,7%. Ovakav nivo slaganja jasno potvrđuje da model, kada se primeni u dovoljno uskom opsegu odnosa C/N , može verno da reprodukuje odnos mešanja sirovina.

Kada se sagledava prinos biogasa, opsegu odnosa C/N od 20 do 30 model daje u rasponu od 0,370 do 0,398 m³/kg VS, što je značajno iznad eksperimentalno izmerenog prinosa od 0,322 m³/kg VS. Druga iteracija, sprovedena za odnos C/N od 20 do 25, daje nešto niže i uravnoteženije prinose biogasa, u opsegu od 0,353 do 0,375 m³/kg VS. Najbolje poklapanje sa eksperimentalnom vrednošću ostvareno je u iteraciji odnosa C/N od 20 do 21,4. Prinosi biogasa modelovani u ovom opsegu iznose 0,347, 0,367 i 0,362 m³/kg VS, što predstavlja povećanje od približno 8-14% u odnosu na eksperimentalnu vrednost od 0,322 m³/kg VS. Iako su modelovane vrednosti veće, odstupanje je znatno manje nego u prethodne dve iteracije i u



skladu je sa strukturom sirovina, koja u ovom opsegu gotovo u potpunosti reprodukuje eksperimentalnu raspodelu

Zaključno, validaciona faza je potvrdila da matematički model pouzdano predviđa optimalne mešavine sirovina i očekivane prinose biogasa u zadatim granicama odnosa C/N . Za povećanje tačnosti modela u budućim analizama preporučuje se korišćenje laboratorijski određenog elementarnog sastava lokalno dostupnih sirovina, čime bi se dodatno unapredila preciznost predikcija i prilagodljivost specifičnim tehnološkim i regionalnim uslovima.

7. ZAKLJUČAK

Iako organska otpadna materija predstavlja izvor nutrijenata i hemijski vezane energije, u praksi se i dalje pretežno odlaže na deponije, posebno u zemljama u tranziciji kao što je Srbija, čime se gubi njen materijalni i energetske potencijal. Prelazak sa linearnog na cirkularni model omogućava povraćaj materije i energije u sistem i njihovu ponovnu upotrebu. Zbog prostorne rasprostranjenosti i heterogenosti izvora organskog otpada, kao i promenljivog sastava sirovina, neophodan je integralni pristup upravljanju organskim otpadom koji povezuje biološke procese tretmana, tehničke zahteve i logističke procese u jedinstvenu celinu. Kroz istraživanje sprovedeno u okviru ove doktorske disertacije pokazano je da je moguće IUOO primenom principa CE, kroz razvoj modela koji omogućava zatvaranje tokova materije i energije i istovremeno zadovoljenje potreba sistema uz očuvanje prirodnih resursa.

U okviru ove disertacije sprovedena je teorijska analiza koja je poslužila kao osnova za razvoj modela IUOO zasnovanog na principima CE. Razmotren je koncept CE, karakteristike organskog otpada kao resursa i mogućnosti njegovog tretmana kompostiranjem i AD, sa naglaskom na transformacije nutrijenata kroz cirkularne tokove.

Analizirani su evropski indikatori i indeksi CE relevantni za upravljanje organskim otpadom, čime je utvrđeno da postojeći indikatori ne omogućavaju adekvatnu procenu performansi integralnih sistema. Zbog toga je formiran novi set indikatora usklađenih sa principima CE, koji obuhvataju stepen uključenja organskih sirovina, curenje materije i energije i cirkularnost materije i energije. Ovi indikatori predstavljaju osnovu za ocenu razvijenog modela i interpretaciju dobijenih rezultata.

Za bolje razumevanje problema razvijen je fizički model IUOO zasnovan na principima CE. Model prikazuje tokove materije i energije unutar zatvorene petlje, kroz procese sakupljanja, transporta, tretmana i povraćaja nutrijenata. Obuhvata tri glavna toka organskog otpada: poljoprivredni, industrijski i komunalni, i prikazuje njihovu međusobnu povezanost u okviru integralnog sistema. Proces kompostiranja i AD omogućavaju zatvaranje materijalnih i energetskih tokova; biogas se koristi za potrebe transporta i rada sistema za tretman, dok se kompost i digestat vraćaju na zemljište sa kog je organska sirovina prikupljena, čime se ostvaruje povraćaj nutrijenata i zatvaranje materijalne petlje. Opšte pretpostavke fizičkog modela definišu njegov konceptualni okvir, nezavisan od lokalnih uslova, što omogućava njegovu primenu u različitim sistemima upravljanja otpadom. Fizički model predstavlja osnovu za razvoj matematičkog modela IUOO.

Matematički model IUOO razvijen je tako da omogući određivanje optimalnih mešavina sirovina za kompostiranje i AD i procenu materijalnih i energetskih tokova sistema. Kriterijumi optimizacije obuhvatali su odnos C/N , minimalni sadržaj lignina kod AD i minimalni sadržaj fosfora od 1% kod kompostiranja. Model je primenjen u dva opsega odnosa C/N , od 20- 30 i od 25- 30, čime su dobijene optimalne mešavine sirovina zasnovane na stvarnom sastavu sirovina i prinosu biogasa.

Matematički model je strukturiran tako da omogući sagledavanje energetskog i materijalnog bilansa sistema. U okviru energetskog bilansa određeni su energetski potencijali sirovina i procenjene energetske potrebe sistema, na osnovu čega je utvrđeno da li sistem može da zadovolji sopstvene potrebe i u kojoj meri je energetski tok zatvoren. Materijalni bilans omogućio je praćenje kretanja organske materije i nutrijenata kroz kompostiranje i AD, uključujući promene oblika ugljenika, azota, fosfora i kalijuma, od njihovih početnih organskih formi prisutnih u mešavini sirovina, preko formi nastalih u kompostu koje postaju asimilabilne i biljkama dostupne, do mobilnih i strukturnih formi u biljkama. Poseban doprinos ovog istraživanja ogleda se u povezivanju formi definisanih Agrenovim modelom, mobilnih i strukturnih, sa materijalnom petljom i transformacijama unutar sistema, čime je omogućeno jasno sagledavanje načina na koji se petlja zatvara i obezbeđuje povraćaj nutrijenata biljkama.

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja formirana je baza podataka o vrstama, količinama i karakteristikama organskih sirovina dostupnih na teritoriji Republike Srbije, koja je služila kao izvor ulaznih podataka za model, a zbog svoje obimnosti prikazana je u prilogu.

Testiranje predloženog modela IUOO sprovedeno je prema planu istraživanja. U prvom delu je izvršena provera funkcionalnost modela kroz određivanje optimalnih mešavina za pojedine vrste tretmana, kao i kroz zatvaranje materijalnih i energetskih tokova u posmatranom sistemu IUOO. Dobijeni rezultati su potvrdili da je model uspešno odredio optimalne smeše sirovina u obe iteracije optimizacije za proces AD i kompostiranja. Širi interval odnosa C/N omogućio je uključivanje većeg broja sirovina, dok je uži interval doprineo stabilnijem procesu i efikasnijoj razgradnji materije. Kroz sprovedene simulacije u okviru eksplorativne faze pokazano je da je moguće zatvoriti materijalne i energetske tokove unutar IUOO koristeći isključivo organske sirovine iz komunalnih delatnosti (organski deo komunalnog otpada i parkovski otpad), tretirane procesom AD; podmirene su potrebe sistema za energijom, a dobijeni digestat je upotrebljen na javnim zelenim površinama.

Zahvaljujući rezultatima eksperimentalnog istraživanja iz prve faze, u kojoj je utvrđeno da širi opseg odnosa C/N (20-30) daje bolje rezultate kod AD, dok uži opseg odnosa C/N (25-

30) obezbeđuje stabilniji proces kompostiranja, ovi nalazi su zatim primenjeni kao kriterijum optimizacije za definisanje ulaznih mešavina u drugoj fazi istraživanja. Analizom definisanih scenarija utvrđeno je da je za postizanje zatvorene materijalno-energetske petlje neophodna primena kombinovanog tretmana.

Na osnovu analize kombinovanog tretmana sa dve sirovine, koji je obuhvatio 16.314 t/god organskog otpada, ostvaren je stepen uključenja organske materije od 0,61, dok je curenje materije iznosilo 2.802 t/god. Curenje energije iznosilo je 452,38 MJ/tOS, cirkularnost materije dostigla je 87,73%, a cirkularnost energije 80,81%. Ovakve vrednosti ukazuju da kombinacija dve sirovine omogućava dobar nivo integracije materijalnih tokova, ali uz uočljivo curenje materije koje ograničava cirkularnost sistema. Korišćena mešavina u AD sastojala se od 50,5% ODKO i 49,5% parkovskog otpada (*C/N* 22,60; *W* 65,02%; *L* 17,35%), dok je mešavina za kompostiranje obuhvatala 34% ODKO i 66% parkovskog otpada (*C/N* 25,05; *W* 63,4%; *P* 1%; *N* 3,29%; *K* 0,76%).

Dodavanjem treće sirovine tretirano je 35.140 t/god organskog otpada, a postignut je najviši stepen uključenja od 0,98, što ukazuje na gotovo potpuno uključivanje dostupnih sirovina u tokove sistema. Istovremeno, curenje materije dostiglo je 10.333 t/god, što pokazuje da veći materijalni protok i veća kompleksnost sistema dovode do povećanih gubitaka. Curenje energije iznosilo je 1.462,48 MJ/tOS, cirkularnost materije 79,00%, a cirkularnost energije 38,23%. Posmatrana mešavina za AD sadržala je 33,3% ODKO, 33,9% pivskog tropa i 32,7% parkovskog otpada (*C/N* 20,03; *W* 65,27%; *L* 18,12%), dok je u kompostiranju optimalna mešavina uključivala 19% ODKO, 68% parkovskog otpada i 13% pivskog tropa (*C/N* 25,28; *W* 62,68%; *P* 1,07%; *N* 3,43%; *K* 0,73%).

U scenariju sa četiri sirovine tretirano je 27.189 t/god organskog otpada, a postignut je stepen uključenja od 0,73. Curenje materije iznosilo je 7.152 t/god, što je manje u odnosu na scenarijo sa tri sirovine, ali i dalje znatno više u poređenju sa scenarijem koji uključuje dve sirovine. Curenje energije dostiglo je 943,55 MJ/tOS, cirkularnost materije iznosila je 81,21%, a cirkularnost energije 65,33%. Posmatrana mešavina za kompostiranje sastojala se od 14% ODKO, 71% parkovskog otpada, 14,2% pivskog tropa i 0,8% otpada iz mlekarar (*C/N* 25,69; *W* 62,58%; *P* 1,11%; *N* 3,45%; *K* 0,76%). Za AD optimalna mešavina je 51,9% ODKO i 48,1% pivskog tropa (*C/N* 15; *W* 67,45% *L* 11,57%).

Uporedna analiza svih scenarija pokazuje da se povećanjem broja sirovina postiže veća integracija materijalnih tokova, ali uz cenu značajno većeg curenja materije, što potvrđuje postojanje funkcionalne granice broja sirovina koje je moguće uspešno uključiti u sistem za

primenu ovog modela. Scenario sa tri sirovine ostvaruje najviši stepen uključenja (0,98) i obuhvata najveći tretirani tok od 35.140 t/god, pri čemu curenje materije od 10.333 t/god i curenje energije od 1.462,48 MJ/tOS ukazuju na najveći potencijal za proširenje sistema u materijalnom i energetsom pogledu. Ovaj scenario istovremeno ostvaruje nižu cirkularnost materije (79,00%) i naročito nisku cirkularnost energije (38,23%), što ukazuje na potrebu za dodatnom optimizacijom energetske tokova. Njegova struktura omogućava dalje proširenje kapaciteta sistema, čime se otvara prostor za unapređenje cirkularnosti materije i energije.

Scenario sa četiri sirovine postiže tretman od 27.189 t/god, uz stepen uključenja od 0,73 i curenje materije od 7.152 t/god, što predstavlja poboljšanje u odnosu na scenario sa tri sirovine. Curenje energije iznosi 943,55 MJ/tOS, a cirkularnost materije 81,21%, dok je cirkularnost energije 65,33%. Iako ovaj scenario pokazuje poboljšanu stabilnost procesa, njegova cirkularnost ostaje niža u poređenju sa scenarijem sa dve sirovine, a mogućnosti skaliranja su ograničenije.

Scenario sa dve sirovine pokazuje najbolji balans između stepena uključenja (0,61) i najnižeg zabeleženog curenja materije od 2.802 t/god, uz curenje energije od 452,38 MJ/tOS, cirkularnost materije od 87,73% i cirkularnost energije od 80,81%. Međutim, ovaj scenario, uz količinu organske materije od 16.314 t/god, ne pruža isti razvojni potencijal za proširenje sistema kao scenariji sa većim brojem sirovina.

Ovi rezultati ukazuju da je, u cilju postizanja uravnoteženog i prilagodljivog materijalno energetskog bilansa, potrebno usmeriti se na konfiguracije koje kombinuju visok stepen uključenja sa mogućnošću daljeg rasta sistema. Na osnovu dobijenih vrednosti, scenario sa tri sirovine i dalje se izdvaja kao najperspektivnija opcija u okviru IUOO zasnovanog na principima CE, uz potrebu za unapređenjem kako bi se smanjili materijalni i energetski gubici.

Primena matematičkog modela na kombinaciju od pet sirovina (ODKO, slama, seno, goveđi ekskrementi i svinjski ekskrementi) omogućila je određivanje optimalnih mešavina koje obezbeđuju kompost sa sadržajem nutrijenata u oblicima i količinama prilagođenim potrebama konkretnih biljnih kultura. Ovo predstavlja jedan od najznačajnijih doprinosa ove doktorske disertacije. U analizi je posmatrana kultura ječma i njene potrebe za NPK nutrijentima. U okviru šireg opsega odnosa C/N od 20 do 30, dobijena je optimalna mešavina sa udelom 69,62% ODKO i 30,38% slame i karakteristikama mešavine 1% P_O , 5,05% K_O , 2,50% P_K , 12,62% K_K , 0,50% P_A i 12,62% K_A uz 52,02% W . Ovaj profil nutrijenata zadovoljava nutritivne potrebe ječma. Za užu opseg odnosa C/N od 25 do 30 određena je optimalna mešavina u kojoj su pretežno zastupljeni ODKO (48,50%), slama (30,99%) i seno (20,49%), dok su udeli

svinjskih i govedih ekskrementa bili zanemarljivi, sa karakteristikama mešavine 1,02% P_O , 5,39% K_O , 2,55% P_K , 13,47% K_K , 51% P_A i 13,47% K_A , dok je $P_{A, min}$ iznosila 0,000774%. U poređenju sa nutritivnim potrebama ječma, ova mešavina obezbeđuje dovoljne količine asimilabilnih formi N , P i K , čime je potvrđeno da model omogućava formiranje komposta koji u potpunosti može zadovoljiti potrebe ove biljke za N , P i K . Dobijeni rezultati pokazuju da se i u širem i u užem opsegu odnosa C/N formiraju mešavine čiji nutritivni sastav ispunjava zahteve ječma, pri čemu u užem opsegu dolazi do blagog povećanja učešća asimilabilnih formi nutrijenata.

Verifikacija razvijenog modela za IUOO potvrđena je u validacionoj fazi istraživanja, u kojoj je višekriterijumska optimizacija bila korišćena za poređenje eksperimentalno dobijenih i modelovanih vrednosti optimalnih mešavina za AD i prinosa biogasa. Eksperimentalna mešavina od 46% silaže, 21,35% surutke, 27,75% govedih ekskrementa, 3% melase i 1,7% glicerina dala je prinos od 0,322 m³/kg VS, dok su modelovane kombinacije, formirane od istih supstrata uz minimalna odstupanja u njihovim udelima u odnosu na eksperimentalnu mešavinu, ostvarile prinose u rasponu od 0,347 do 0,367 m³/kg VS, pri konstantnom odnosu C/N od 21,40. Ovakva usklađenost eksperimentalnih i modelovanih vrednosti potvrdila je da matematički model pouzdano predviđa optimalne odnose mešanja i očekivane prinose biogasa.

Zaključno, sprovedeno istraživanje pokazalo je da integralni pristup upravljanju organskim otpadom omogućava stvaranje sistema koji istovremeno zatvara materijalne i energetske tokove, vraća nutrijente u zemljištu i smanjuje gubitke resursa. Time je potvrđeno da se principi CE u IUOO ne zadržavaju na teorijskom nivou, već mogu biti uspešno primenjeni u realnim uslovima.

Buduća istraživanja biće usmerena, pre svega, na unapređenje matematičkog modela uključivanjem dodatnih kriterijuma optimizacije, posebno minimalnog sadržaja azota i kalijuma. Uzimajući u obzir da povećanje broja i uključenosti sirovina dovodi do većih materijalnih i energetskih curenja, u daljim istraživanjima potrebno je ispitati u kojoj meri proširenje sistema na šire teritorije, poljoprivredne površine i proizvodne procese, kao i uključivanje većeg broja sirovina, zaista doprinosi povećanju cirkularnosti materije i energije. Od posebnog značaja za tačnost i primenljivost modela biće uspostavljanje veze između baze podataka ulaznih sirovina i njihovog eksperimentalno određenog elementarnog sastava, umesto oslanjanja na literaturne podatke.

8. LITERATURA

- Ågren, G. I., Wetterstedt, J. Å. M., & Billberger, M. F. K. (2012). *Nutrient limitation on terrestrial plant growth: Modeling the interaction between nitrogen and phosphorus*. New Phytologist, 194(4), 953-960. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04116.x>
- Akbay, H. E. G. (2024). *Anaerobic mono and co-digestion of agro-industrial waste and municipal sewage sludge: Biogas production potential, kinetic modelling, and digestate characteristics*. Fuel, 355, 129468. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129468>
- AkzoNobel. (2015). *The circular economy*. Akzo Nobel N.V. <https://report.akzonobel.com/2015/ar/case-studies/the-circular-economy.html>
- Al-Masri, M. R. (2001). *Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes*. Bioresource Technology, 77(1), 97-100. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00117-6)
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch, E., & Zollitsch, W. (2006). *Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation*. International Congress Series, 1293, 217-220
- Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). *Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and future trends*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 109(1-3), 95-105. <https://doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:095>
- Avdiushchenko, A., & Zajac, P. (2019). *Circular economy indicators as a supporting tool for European regional development policies*. Sustainability, 11(11), 3025. <https://doi.org/10.3390/su11113025>
- Aworanti, O. A., Essien, C. I., & Adeniyi, O. D. (2023). *Decoding anaerobic digestion: A holistic analysis of biomass waste technology, process kinetics, and operational variables*. Energies, 16(x), <https://doi.org/10.3390/en16083378>
- Ayilara, M., Olanrewaju, O., Babalola, O., & Odeyemi, O. (2020). *Waste management through composting: Challenges and potentials*. Sustainability, 12(11), 1-12. <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Berner, R. A. (1998). *The carbon cycle and CO₂ over Phanerozoic time: The role of land plants*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 353(1365), 75-82.
- Berner, R. A. (2004). *The Phanerozoic carbon cycle: CO₂ and O₂*. Oxford University Press.
- Bertolucci Paes, L. A., Bezerra, B. S., Deus, R. M., Jugend, D., & Gomes Battistelle, R. A. (2019). *Organic solid waste management in a circular economy perspective: A systematic review and SWOT analysis*. Journal of Cleaner Production, 118086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118086>
- Bhatt, A. H., Tao, L., & Dai, Z. (2020). *Economic perspectives of anaerobic digestion technology in the United States*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 39 (1), e13283. <https://doi.org/10.1002/ep.13283>
- Bilandžija, N., Voća, N., Krička, T., Matin, A., & Jurišić, V. (2012). *Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia*. Spanish Journal of Agricultural Research, 10(2), 292-298. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012102-126-11>
- Binkley, W., & Wolfrom, M. (1953). *Composition of cane juice and cane final molasses*. Advances in Carbohydrate Chemistry, 8, 291-314. [https://doi.org/10.1016/S0096-5332\(08\)60101-5](https://doi.org/10.1016/S0096-5332(08)60101-5)
- Borja, R., & Rincón, B. (2017). *Biogas production. Reference module in life sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09105-6>
- Borrello, M., Caracciolo, F., Lombardi, A., Pascucci, S., & Cembalo, L. (2017). *Consumers' perspective on circular economy strategy for reducing food waste*. Sustainability, 9(1), 141. <https://doi.org/10.3390/su9010141>



- Boulding, K. (1966). The economics of the coming spaceship Earth. In H. Jarrett (Ed.), *Environmental quality in a growing economy* (pp. 3-14). Resources for the Future/Johns Hopkins University Press.
- Brady, N. (1990) *The nature and properties of soils*. 10th Edition, Macmillan Publishing Company, Cranbury.
- Brundtland, G. H. (1987). *Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development*. United Nations. <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>
- Bustamante, M. A., Moral, R., Paredes, C., Pérez-Murcia, M. D., Morena, J., López-Mondejar, R., & Gómez, I. (2008). *Agrochemical characterization of winery and distillery wastes for agricultural purposes*. Waste Management, 28(10), 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.013>
- Calvin, K., et al. (2023). *Findings from the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Publications.
- Chen, Z., Bao, H., Wen, Q., Wu, Y., & Fu, Q. (2022). *Effects of H₃PO₄ modified biochar on heavy metal mobility and resistance genes removal during swine manure composting*. Bioresource Technology, 346, 126632. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126632>
- Choe U, Mustafa AM, Lin H, Xu J, Sheng K (2019): *Effect of bamboo hydrochar on anaerobic digestion of fish processing waste for biogas production*. Bioresource Technology 283 (2019): 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.084>
- Chohan, M. Z., Hussain, F., Ahmad, M., & Ali, S. (2020). *Utilization of fruit and vegetable waste for composting in sustainable agriculture*. Sustainable Agriculture Research, 10(3), 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132221>
- Christensen, T. H. (2011). *Solid waste technology and management*. Blackwell Publishing Ltd.
- City of Niš. <http://www.ni.rs>
- Clayton, J., Lemanski, K., Solbach, M. D., Temperton, V. M., & Bonkowski, M. (2024). *Two-way N x P fertilisation experiment on barley (Hordeum vulgare) reveals shift from additive to synergistic N-P interactions at critical phosphorus fertilisation level*. Frontiers in Plant Science, 15, 1346729. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1346729>
- Cogger, C. G., Bary, A. I., & Sullivan, D. M. (2002). *Fertilizing with yard trimmings: On-farm application of yard trimmings (EB 1926E)*. Washington State University. https://smallfarms.oregonstate.edu/sites/agscid7/files/eb1926e_1.pdf
- Demirbaş, A. (2010). *Fuel characteristics of olive husk and walnut, hazelnut, sunflower, and almond shells*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 32(3), 215–221. <https://doi.org/10.1080/009083102317243601>
- Detman, A., Chojnacka, A., Błaszczyk, M., Kaźmierczak, W., Piotrowski, J., & Sikora, A. (2017). *Biohydrogen and biomethane (biogas) production in the consecutive stages of anaerobic digestion of molasses*. Polish Journal of Environmental Studies, 26(5), 1023-1031.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>
- Dicks, H. (2016). *The philosophy of biomimicry*. Philosophy & Technology, 29(3), 223-243. <https://doi.org/10.1007/s13347-015-0210-2>
- Directorate-General for Environment. *Circular economy action plan*. https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/circular-economy-action-plan_en
- Ecostar. (2008). *Recycling organic waste in Europe and around the world*. <https://ecostar.eu.com/recycling-organic-waste-in-europe-and-around-the-world-ecostar/>
- El Achkar, J. H., Lendormi, T., Hobaika, Z., Salameh, D., Louka, N., Maroun, R. G., & Lanoisellé, J. L. (2021). *Anaerobic digestion of grape pomace: Biochemical characterization of the fractions and*

- methane production in batch and continuous digesters*. Waste Management, 50, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.028>
- Elango, D., Thinakaran, N., Panneerselvam, P., & Sivanesan, S. (2009). *Thermophilic composting of municipal solid waste*. Applied Energy, 86(5), 663–668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.06.009>
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). *Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis*. Journal of Cleaner Production, 142, 2741–2751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Ellacuria, S., Chen, Y., & Lam, S. S. (2021). *Review of organic waste-to-energy technologies as a part of a sustainable circular economy*. Enhanced Reader. <https://doi.org/10.3390/en17153797>
- Ellacuriaga, M., García-Cascallana, J., & Gómez, X. (2021). *Biogas production from organic wastes: Integrating concepts of circular economy*. Fuels, 2(2), 144–167. <https://doi.org/10.3390/fuels2020009>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>
- Ellen MacArthur Foundation. (2023). *Circulytics: Measuring circularity*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circulytics-esrs>
- Ellen MacArthur Foundation. *The butterfly diagram: Visualising the circular economy* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- Engin, M. E. (2022). *Optimization of organic waste management of Fethiye District* (Master's thesis). Department of Environmental Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye.
- EPEM. *Composting technologies*. Database of Waste Management Technologies. Pristupljeno: 24.8.2025, from <https://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/Composting-00.htm>
- Erdener, U. (2010). *Farklı karıştırma uygulamalarının kompost üzerine etkisi* (Master's thesis). Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye.
- European Commission, Eurostat. (2018). *Circular economy: Information and data* <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/information-data>
- European Commission. (2015). *Closing the loop - An EU action plan for the circular economy (COM(2015) 614)*. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF
- European Commission. (2023). *Measuring progress towards circular economy in the European Union - Key indicators for a revised monitoring framework*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (2024). *Biomass*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomass_en
- European Committee for Standardization. (2009). *EN 590:2009. Automotive fuels - Diesel - Requirements and test methods*. Brussels, Belgium.
- European Compost Network. (2022). *Compost and digestate for a circular bioeconomy: ECN data report 2022*. European Compost Network. <https://www.compostnetwork.info/wordpress/wp-content/uploads/ECN-rapport-2022.pdf>
- European Environment Agency (EEA). (2020). *Bio-waste in Europe - Turning challenges into opportunities*. EEA Report No. 04/2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/bio-waste-in-europe>
- European Environment Agency. (2023). *Accelerating the circular economy in Europe: State and outlook 2024*. <https://www.eea.europa.eu/publications/accelerating-the-circular-economy>
- European Environment Agency. *How far is Europe from reaching its ambition to double the circular use of materials?* <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>



European Feedstock Atlas. (2021). *Sugar beet leaves and tops - composition and biogas potential* (fact sheet). FoodWasteEXplorer / European Feedstock Atlas.

Eurostat. (2018). *Circular material use rate - Calculation method (2018 edition)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Eurostat. *Waste statistics*. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

Ezekoye, V. A., Okoro, G. I., Ofomatah, A., David, E., & Agdaogu, A. (2021). *Improving biogas yield using organic fraction of plant and animal wastes by co-digestion*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 730, 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/730/1/012037>

Feedipedia. (2012). Beet leaves and tops, fresh. In Feedipedia - An on-line encyclopedia of animal feeds.

Ferdeş, M., Paraschiv, G., Ionescu, M., Dincă, M. N., Moiceanu, G., & Zăbavă, B. Ş. (2023). *Anaerobic Co-Digestion: A Way to Potentiate the Synergistic Effect of Multiple Substrates and Microbial Diversity*. Energies, 16(5), 2116. <https://doi.org/10.3390/en16052116>

Fernandes, F., Viel, M., Sayag, D., & Andre, L. (1988). *Microbial breakdown of fats through in-vessel co-composting of agricultural and urban wastes*. Biological Wastes, 26, 33-48.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk*. Rome: FAO; London: Earthscan.

Fourti, O. (2013). *The maturity tests during the composting of municipal solid wastes*. Resources, Conservation and Recycling, 72, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.001>

Fujita, G. Y., & Chen, X. D. (2010). *Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: A case study of Kawasaki*. Journal of Cleaner Production, 18, 993-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.003>

Gluščević, M., & Kaluderović, Lj. (2019). *Analiza kapaciteta jedinica lokalne samouprave u pogledu stvaranja uslova za prelazak na cirkularnu ekonomiju* Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Projekat „Upravljanje otpadom u kontekstu klimatskih promena (DKTI)“, Beograd. ISBN: 978-86-80390-36-3.

Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., & Domínguez, J. (2008). *The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure*. Chemosphere, 70(3), 436-444. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.065>

Gómez-Camacho, C. E., Pirone, R., & Ruggeri, B. (2021). *Is the anaerobic digestion (AD) sustainable from the energy point of view?* Energy Conversion and Management, 231, 113857. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113857>

Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). *How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste production, and recycling in the EU and the world in 2005*. Journal of Industrial Ecology, 19, 765-777. <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>

Haldar, D., & Purkait, M. K. (2019). *Lignocellulosic conversion into value-added products: A review*. Process Biochemistry, 89, 110. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.10.001>

Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. CRC Press.

Hu, Q., Jung, J., Chen, D., Leong, K., Song, S., Li, F., ... Wang, C.-H. (2020). *Biochar industry to circular economy*. Science of The Total Environment, 143820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>

Hungría, J., Gutiérrez, M. C., Siles, J. A., & Martín, M. A. (2017). *Advantages and drawbacks of OFMSW and winery waste co-composting at pilot scale*. Journal of Cleaner Production, 164, 1050-1057. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.010>

- Ikram, S., Huang, L., Zhang, H., Wang, J., & Yin, M. (2017). *Composition and nutrient value proposition of brewers spent grain*. Journal of Food Science, 82, 2232–2242. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13794>
- Işık, T. (2009). *İstanbul'da evsel katı atıklar için farklı kompostlaştırma teknolojilerinin karşılaştırılması olarak değerlendirilmesi* (Master's thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.
- Itodo, I. N., & Awulu, J. O. (1999). *Effects of total solids concentrations of poultry, cattle, and piggery waste slurries on biogas yield*. Transactions of the ASAE, 42(6), 1853–1858. <https://doi.org/10.13031/2013.13350>
- JKP Mediana. (2014). *Podaci o čvrstom komunalnom otpadu u Nišu*. <http://www.jkpmediana.rs>
- Karak, T., Sonar, I., Paul, R. K., Das, S., Boruah, R. K., Dutta, A. K., & Das, D. K. (2014). *Composting of cow dung and crop residues using termite mounds as bulking agent*. Bioresource Technology, 169, 731–741. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.063>
- Kazimierski, P., Hercel, P., Suchocki, T., Smoliński, J., Plądzyk, A., Kardaś, D., Łuczak, J., & Januszewicz, K. (2021). *Pyrolysis of pruning residues from various types of orchards and pretreatment for energetic use of biochar*. Materials, 14(11), 2969. <https://doi.org/10.3390/ma14112969>
- Kebede, Y. (2020). *Analysis of the physico-chemical characteristics of brewers spent grain (BSG)*. Journal of Natural Sciences Research, 11(18). <https://iiste.org/JNSR/Vol11/No18/3.pdf>
- Kindzera, D., & Kochubei, V. (2025). *Comparison of the energy properties of sunflower stalk fibers for solid biofuel production*. Journal of Chemistry, Article ID 7990012.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. Resources, Conservation and Recycling, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). *Conceptualizing the circular economy (revisited): An analysis of 221 definitions*. Resources, Conservation and Recycling, 194, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). *A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste*. Waste Management, 69, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2020). *Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review*. Energy, 197, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>
- Kumar, M., Ou, Y. L., & Lin, J. G. (2011). *Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio*. Waste Management, 30(4), 602–609. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.12.019>
- Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2011). *Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates*. Bioresource Technology, 102(3), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>
- Lardinois, I., & van de Klundert, A. (Eds.). (1993). *Organic waste: Options for small-scale resource recovery*. TOOL, Amsterdam; WASTE Consultants, Gouda.
- Li, K., Liu, R., & Sun, C. (2015). *Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations*. Bioresource Technology, 198, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.106>
- Li, L., Wang, R., Jiang, Z., Li, W., Liu, G., & Chen, C. (2019). *Anaerobic digestion of tobacco stalk: biomethane production performance and kinetic analysis*. Environmental Science and Pollution Research, 26(5), 14250–14258. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04677-2>



- Ljajić, S. (2021). *Osobnosti i mogućnosti razvoja malih i srednjih preduzeća u modernim privredama*, Univerzitetska misao - časopis za nauku, kulturu i umjetnost Novi Pazar, 20, 190. <https://doi.org/10.5937/univmis21201901>
- Lu, F. (2014). *Lignin: Structural analysis, applications in biomaterials and ecological significance*. Nova Science Publishers.
- luLowe, E. A., & Evans, L. K. (1995). *Industrial ecology and industrial ecosystems*. Journal of Cleaner Production, 3(1-2), 47-53. [https://doi.org/10.1016/0959-6526\(95\)00045-G](https://doi.org/10.1016/0959-6526(95)00045-G)
- Malhi, S. S., Nyborg, M., & Soon, Y. K. (2010). *Long-term effects of balanced fertilization on forage yield, quality and nutrient uptake, soil organic C and N, and some soil quality characteristics*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 86(3), 267-278. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9306-3>
- Martelli-Tosi, M., Masson, M. L., Silva, N. C., Esposto, B. S., Barros, T. T., Assis, O. B. G., & Tapia-Blácido, D. R. (2017). *Chemical treatment and characterization of soybean straw and its fibers for use in composite materials*. Carbohydrate Polymers, 157, 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.013>
- Massaro V, Digiesi S, Mossa G, Ranieri L. *The sustainability of anaerobic digestion plants: a win-win strategy for public and private bodies*. Journal of Cleaner Production 2015; 104:445-59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.021>
- Masullo, A. (2017). *Organic waste management in a circular economy approach: Rebuilding the link between urban and rural areas*. Ecological Engineering, 101, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.016>
- Messaoudi, Y., Smichi, N., Moujahed, N., & Gargouri, M. (2023). *Hydrothermal and chemical pretreatment process for bioethanol production from agricultural and forest lignocellulosic wastes: Design and modeling*. Chemistry Africa, 6, 2381-2391. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00563-6>
- Miller, M., Thomas, S., & Rusnock, C. (2016). *Extending system readiness levels to assess and communicate human readiness*. Systems Engineering, 19(2), 146-157. <https://doi.org/10.1002/sys.21344>
- Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije. (2020). *Mapa puta za cirkularnu ekonomiju u Srbiji*. <https://www.ekologija.gov.rs/sites/default/files/2021-01/mapa-puta-za-cirkularnu-ekonomiju-u-srbiji.pdf>
- Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije. (2021). *Ex-ante analiza efekata za oblast cirkularne ekonomije*. https://www.ekologija.gov.rs/sites/default/files/2021-01/exante-analiza_efekata-za-oblast-cirkularne-ekonomije.pdf
- Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije. (2022). *Program razvoja cirkularne ekonomije u Republici Srbiji za period 2022-2024*. https://www.ekologija.gov.rs/sites/default/files/2022-12/program_razvoja_cirkularne_ekonomije_u_republici_srbiji_za_period_2022-2024_godine_0.pdf
- Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije. (2023). *Godišnji izveštaj o rezultatima sprovođenja akcionog plana za 2023. godinu za program razvoja cirkularne ekonomije u Republici Srbiji za period 2022-2024*.
- Mitrović, Đ., & Veselinov, M. (2018). *Measuring countries' competitiveness in circular economy: Composite index approach*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/328759704>
- Møller, H. B., Sommer, S. G., & Ahring, B. K. (2004). *Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure*. Biomass and Bioenergy, 26(5), 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008>
- Momčilović, A. J., Rajković, P. M., Stefanović, G. M., & Milutinović, B. B. (2020). *Material and energy flows in integrated organic waste management in a circular economy*. Proceedings of ECOS 2020 - The 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, June 29 - July 3, 2020, Osaka, Japan.

- Momčilović, A. J., Stefanović, G. M., Rajković, P. M., Stojković, N., Milutinović, B. B., & Ivanović, M. P. (2018). *The organic waste fractions ratio optimization in the anaerobic co-digestion process for the increasement of biogas yield*. Thermal Science, 22(Suppl. 5), S1525-S1534. <https://doi.org/10.2298/TSCI1855525M>
- Momčilović, A., Stefanović, G., Milutinović, B., Ivanović, M., & Alsheyab, M. A. T. (2017). *Model of organic waste management in terms of circular economy: Case study city of Niš*. Proceedings of ECOS 2017 - The 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, July 2-6, San Diego, California, USA.
- Momčilović, A., Stefanović, G., Savić, D., Rajković, P., Milutinović, B., & Čamagić, I. (2018). *Development of mathematical model for optimization of anaerobic co-digestion on the farm organic waste*. Proceedings of ECOS 2018 - The 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, June 17-22, 2018, Guimarães, Portugal.
- Moni, S., Mahmud, R., High, K., & Carbajales-Dale, M. (2019). *Life cycle assessment of emerging technologies: A review*. Journal of Industrial Ecology, 24(1), 52-63. <https://doi.org/10.1111/jiec.12965>
- Munir, M. T., Mohaddespour, A., Nasr, A. T., & Carter, S. (2021). *Municipal solid waste-to-energy processing for a circular economy in New Zealand*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111080. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111080>
- Neugebauer, M., Sołowiej, P., Piechocki, J., Czekala, W., & Janczak, D. (2017). *The influence of the C:N ratio on the composting rate*. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 6(1), 54-60. <https://doi.org/10.12720/sgce.6.1.54-60>
- Nigussie, A., Bruun, S., Kuyper, T. W., & de Neergaard, A. (2017). *Delayed addition of nitrogen-rich substrates during composting of municipal waste: Effects on nitrogen loss, greenhouse gas emissions, and compost stability*. Chemosphere, 166, 352-362. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.123>
- Nsimba, B., Ngoma, P. M., Basosila, N. L., & Esole, Y. (2020). *Energetic balance of biogas and fertilizing potential of digestate from anaerobic digestion of Manihot utilissima*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-53563/v1>
- Onwosi, C. O., Igbokwe, V. C., Odimba, J. N., Eke, I. E., Nwankwoala, M. O., Iroh, I. N., & Ezeogu, L. I. (2017). *Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges, and future prospects*. Journal of Environmental Management, 190, 144-146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>
- Öztürk, İ. (2010). *Katı atık yönetimi ve uygulamaları*. İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi 2, İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, İ., Demir, İ., Altınbaş, M., Arıkan, O. A., Çiftçi, T., Çakmak, İ. & Kiriş, A. (2015). *Kompost El Kitabı*. İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi 1, İstanbul, Türkiye.
- Pailthorp, R. E., J. W. Filbert, and G. A. Richter. 1987. *Treatment and disposal of potato wastes*. In: *Potato Processing*. W. F. Talburt and O. Smith, (eds.) AVI Publ. Co., Westport, CT, pp.747-788.
- Pan, S. Y., Du, M. A., Huang, I. T., Liu, I. H., & Chang, E. E. (2015). *Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for a circular economy system: A review*. Journal of Cleaner Production, 108, 409-421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.124>
- Panigrahi, S., & Dubey, B. (2019). *A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*. Renewable Energy, 143, 779. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>
- Park, M., Jo, J., Park, D., Lee, D., & Park, J. (2010). *Comprehensive study on a two-stage anaerobic digestion process for the sequential production of hydrogen and methane from cost-effective molasses*. International Journal of Hydrogen Energy, 35, 6194-6202. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.135>



- Pauli, G. (2010). *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Club of Rome.
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Johns Hopkins University Press.
- Petric, I., Avdihodžić, E., & Ibrić, N. (2015). *Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure*. Ecological Engineering, 75, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.12.006>
- Petric, I., Šestan, A., & Šestan, I. (2009). *Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure*. Process Safety and Environmental Protection, 87(3), 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2008.11.002>
- Pielhop, T., Amgarten, J., von Rohr, P. R., & et al. (2016). *Steam explosion pretreatment of softwood: The effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility*. Biotechnology for Biofuels, 9, 152. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0567-1>
- Pires, A., & Martinho, G. (2019). *Waste hierarchy index for circular economy in waste management*. Waste Management, 95, 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.003>
- Plazonić, I., Barbarić-Mikočević, Ž., & Antonović, A. (2016). *Chemical composition of straw as an alternative material to wood raw material in fibre isolation*. Drvena industrija, 67(2), 119–125.
- Pleisner, D. (2016). *Decentralized utilization of wasted organic material in urban areas: A case study in Hong Kong*. Ecological Engineering, 86, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.021>
- Pochwatka, P., Kowalczyk-Juško, A., Pitula, M., & Dach, J. (2025). *Energetic potential of tobacco waste within combustion or anaerobic digestion*. Energies, 18(4), 762.
- Pravilnik 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. 30/2017 i 31/2018). https://srda.rs/wp-content/uploads/eko-pravo/POLJOPRIVREDA/ZAKON_O_SREDSTVIMA_ZA_ISHRANU_BILJA_I_OPLEMENJIVACIMA_ZEMLJISTA/PRAVILNIK_O_USLOVIMA_ZA_RAZVRSTAVANJE_I_UTVRDJIVANJE_KVALITETA_SREDSTAVA_ZA_ISHRANU_BILJA.pdf
- Preston, F. (2012). *A global redesign? Shaping the circular economy*. Chatham House.
- PUC "Mediana". (2016). <http://www.jkpmediana.rs/>
- PUC "Mediana". (2016). *Izveštaj o upravljanju otpadom na teritoriji grada Niša*. Niš: Javno komunalno preduzeće "Mediana".
- Puschmann, T., & Alt, R. (2016). *Sharing economy*. Business & Information Systems Engineering, 58(1), 93–99. <https://doi.org/10.1007/s12599-015-0420-2>
- Raworth, K. (2017). *Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist*. Chelsea Green Publishing.
- Republic Institute for Statistics of Serbia. (2016). *Population*. <http://www.stat.gov.rs/WebSite/Public/PageView.aspx?pKey=163>
- Republički hidrometeorološki zavod Srbije (RHMZ). *Niš - Srednje mesečne, godišnje i ekstremne vrednosti temperature vazduha (1961-1990; 1981-2010)*. https://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/stanica_sr.php?moss_id=13388
- Republički zavod za statistiku. (2011). *Popis stanovništva grada Niša*. Republika Srbija, Beograd. <http://www.stat.gov.rs>
- Republički zavod za statistiku. (2012). *Podaci o poljoprivrednim gazdinstvima i proizvodnji u Nišu*. Republika Srbija, Beograd. <http://www.popispoljoprivrede.stat.rs/?p=4763>

- Rizos, V., Tuokko, K., & Behrens, A. (2017). *The circular economy: A review of definitions, processes, and impacts*. ResearchGate.
- Rocamora, I., Wagland, S. T., Villa, R., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2020). *Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance*. *Bioresource Technology*, 299, 122681. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122681>
- Rodríguez, J., Lema, J. M., & Kleerebezem, R. (2008). *Energy-based models for environmental biotechnology*. *Trends in Biotechnology*, 26(7), 366-374. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.04.003>
- Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). *Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: A review*. *Bioresources and Bioprocessing*, 5, Article 1. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>
- Sánchez-Ortiz, J., Rodríguez-Cornejo, V., Del Río-Sánchez, R., & García-Valderrama, T. (2020). *Indicators to measure efficiency in circular economies*. *Sustainability*, 12(11), 4483. <https://doi.org/10.3390/su12114483>
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., & Vo, D. N. (2022). *Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass*. *Bioresource Technology*, 344(Pt B), 126203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126203>
- Sariatli, F. (2017). *Linear economy versus circular economy: A comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability*. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 6(1), 31-34. <https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>
- Segning, H. B. S., Tangka, J. K., Djousse, K. B. M., Nsah-Ko, T., Lontsi, K. A., Tedongmo, G. J., & Nono, W. B. L. (2021). *Characterization of wet mesophilic biomethanization of three types of materials: Chicken dung, rabbit poop and pig slurry*. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 10(3), 67-75.
- Seidl PR, Goulart AK (2016) *Pretreatment processes for lignocellulosic biomass conversion to biofuels and bioproducts*. *Curr Opin Green Sustain Chem* 2:48-53.
- Seidl, P. R., & Goulart, A. K. (2020). *Application of computational methods for pretreatment processes of different biomass feedstocks*. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 26, 100366. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100366>
- Sharma, S., Kundu, A., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). *Sustainable environmental management and related biofuel technologies*. *Journal of Environmental Management*, 273, 111096. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111096>
- Shi, W., et al. (2022). *Examination of maximum legal application rates of dairy processing sludge*. *Journal of Environmental Management*, 301, 113880. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113880>
- Silva, M. E., Lemos, L. T., & Nunes, O. C. (2009). *Co-composting of poultry manure with low quantities of carbon-rich materials*. *Waste Management & Research*, 27(2), 969-979. <https://doi.org/10.1177/0734242X08096693>
- Šormaz, G. (2021). *Značaj preduzetništva i inovativnosti za ekonomski razvoj Republike Srbije*. *Trendovi u poslovanju* (Vol. 9, Issue 2, p. 30). Centar za kulturu "Vlada Divljan", Beograd <https://doi.org/10.5937/trendpos2102033s>
- Steffen, R., Szolar, O., & Braun, R. (1998). *Feedstocks for anaerobic digestion* Institute for Agrobiotechnology Tulln, University of Agricultural Sciences Vienna.
- Stolarski, M. J., Welenc, M., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Stolarski, J., & Wierzbicki, S. (2024). *Characteristics and changes in the properties of cereal and rapeseed straw used as energy feedstock*. *Energies*, 17(5), 1243. <https://doi.org/10.3390/en17051243>



- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). *A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation*. Journal of Cleaner Production, 42, 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- Thauer, R. K., Jungermann, K., & Decker, K. (1977). *Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria*. Bacteriological Reviews, 41(1), 100-180. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC414130/>
- Tisocco, S., Lenahan, J. J., Zhan, X., & Crosson, P. (2025). *Financial assessment of integrating anaerobic digestion with cattle farming for biomethane production - Implications for farm economics and the supply chain*. Biomass and Bioenergy, 195, 107702. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107702>
- Titus, B. D., Brown, K., Helmisaari, H. S., & et al. (2021). *Sustainable forest biomass: A review of current residue harvesting guidelines*. Energy Sustainability & Society, 11(10). <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>
- Toscano, G., Riva, G., Duca, D., Foppa Pedretti, E., Corinaldesi, F., & Rossini, G. (2013). *Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery*. Biomass and Bioenergy, 55, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.011>
- Toscano, G., Riva, G., Duca, D., Foppa Pedretti, E., Corinaldesi, F., & Rossini, G. (2013). *Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery*. Biomass and Bioenergy, 55, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.015>
- Toxopeus, M. E., de Koeijer, B. L. A., & Meij, A. G. G. H. (2015). *Cradle to cradle: Effective vision vs. efficient practice?* Procedia CIRP, 29, 384-389. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.068>
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Lineres, M., Chéneby, D., & Nicolardot, B. (2000). *Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization under nonlimiting nitrogen conditions*. Soil Science Society of America Journal, 64(3), 918-926.
- Triolo, J. M., Pedersen, L., Qu, H. Y., & Sommer, S. G. (2012). *Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production*. Bioresource Technology, 125, 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.079>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet*. <https://www.epa.gov/factsheets/advancing-sustainable-materials-management-2018>
- Udourioh, G. A., Solomon, M. M., & Okolie, J. A. (2025). *A review of the valorization of dairy industry wastes through thermochemical, biological, and integrated processes for value-added products*. Food Science of Animal Resources, 45(2), 375-408. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e2>
- van der Wurff, A. W. G., de Kreijl, C., van Geel, W. C. A., van Dijk, W., & Postma, J. (2016). *Handbook for composting and compost use in organic horticulture*. Louis Bolk Institute.
- Velasco-Muñoz, J. F., Mendoza, J. M. F., Aznar-Sánchez, J. A., & Gallego-Schmid, A. (2021). *Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies, and indicators*. Resources, Conservation and Recycling, 170, 105618. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105618>
- Vitousek, P. (1982). *Nutrient cycling and nutrient use efficiency*. The American Naturalist, 119(4), 553-572. <https://doi.org/10.1086/283931>
- Voća, N., Bilandžija, N., Jurišić, V., Matin, A., Krička, T., & Sedak, I. (2016). *Proximate, ultimate, and energy values analysis of plum biomass by-products: Croatia's potential*. Journal of Agricultural Science and Technology, 18, 1655-1666.
- Vučurović, D., Bajić, B., Trivunović, Z., Dodić, J., Željko, M., Jevtić-Mučibabić, R., & Dodić, S. (2021). *Biotechnological utilization of agro-industrial residues and by-products-Sustainable production of biosurfactants*. Foods, 13(5), Article 50711. <https://doi.org/10.3390/foods13050711>
- Vučurović, M., Razmovski, U.D., Miljić, V.S., Puškaš, M.M., Ačanski, K.A., and Pastor, R. (2014) *Thermo-acid pretreatment of starch-based kitchen waste for ethanol production*, Analecta, 1, pp.85-90.

- Wainaina, S., Kumar Awasthi, M., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., Taherzadeh, M. J. (2020). *Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies*. Bioresource Technology, 122778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>
- Wan, C., & Li, Y. (2012). *Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass*. Biotechnology Advances, 30(6), 1447-1457. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.03.003>
- Wang, K., & Tester, J. W. (2023). *Sustainable management of unavoidable biomass wastes*. Green Energy and Resources, 1(1), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100005>
- Weinrich, S.; Nelles, M. (2021). *Basics of Anaerobic Digestion: Biochemical Conversion and Process, Modelling*. (DBFZ-Report, 40). Leipzig: DBFZ. VIII, 9-76 S. ISBN: 978-3-946629-72-6
- Wu, D., Wei, Z., Mohamed, T. A., Zheng, G., Qu, F., Wang, F., Zhao, Y., & Song, C. (2022). *Lignocellulose biomass bioconversion during composting: Mechanism of action of lignocellulase, pretreatment methods and future perspectives*. Chemosphere, 286, 131635. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131635>
- Wu, J., Zhao, Y., Qi, H., Zhao, X., Yang, T., Du, Y., Zhang, H., & Wei, Z. (2017). *Identifying the key factors that affect the formation of humic substance during different materials composting*. Bioresource Technology, 244, 1193-1196. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.100>
- Wynd, F. L. (1952). Feed the soil. Scientific Monthly, 74(4), 223-229.
- Yu, P. L. (1973). *A class of solutions for group decision problems*. Management Science, 19(8), 936-946. <https://www.jstor.org/stable/2629125>
- Zakaria, M. R., Fujimoto, S., Hirata, S., & Hassan, M. A. (2014). *Ball milling pretreatment of oil palm biomass for enhancing enzymatic hydrolysis*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 173, 1778-1789. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-0964-5>
- Zaman, A. U. (2015). *A comprehensive review of the development of zero waste management: Lessons learned and guidelines*. Journal of Cleaner Production, 91, 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.013>
- Zelany, M. (1974). *A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal*. Computers & Operations Research, 1(3-4), 479-496.



9. PRILOZI

9.1. KLASIFIKACIJA I KARAKTERISTIKE ORGANSKOG OTPADA

Tabela 9.1 Klasifikacija i elementarni sastav organskog otpada u Republici Srbiji (Al-Masri, 2001; Akbay, 2024; Angelidaki & Ellegaard, 2003; Boldrin & Christensen, 2010; Bilandžija et al., 2012; Bustamante et al., 2008; Chen et al., 2022; Cogger et al., 2002; Demirbaş, 2010; Díaz et al., 1993; El Achkar et al., 2021; European Feedstock Atlas, 2021; Ezekoye et al., 2021; Feedipedia, 2012; Gómez-Brandón et al., 2008; Hungría et al., 2017; Ikram et al., 2017; Itodo & Awulu, 1999; Kazimierski et al., 2021; Karak, 2014; Kebede, 2020; Kindzera & Kochubei, 2025; Kumar et al., 2011; Labatut et al., 2011; Li et al., 2019; Martelli-Tosi et al., 2017; Møller, Sommer, & Ahring, 2004; Pailthorp, Filbert, & Richter, 1987; Peševski, 2010; Petric, Avdihodžić, & Ibrić, 2015; Petric, Šestan, & Šestan, 2009; Plazonić et al., 2016; Pochwatka et al., 2025; PUC „Mediana“, 2016; Republički zavod za statistiku, 2021; Segning et al., 2021; Shi, 2022; Stolarski et al., 2024; Toscano et al., 2013; Udourioh et al., 2025; Voća et al., 2016)

Vrsta otpada	Procenjena količina [t/god]*	C [%]	N [%]	P [%]	K [%]	L [%]	Odnos C/N	W [%]	Prinos biogasa [m3/kg VS]
Otpad iz komunalnih delatnosti									
Organski otpad iz domaćinstava	526.918,08	47,90	3,10	0,28	0,78	4,59	15,45	70,00	0,65
Mulj iz TOV	32.932,38	30,00-45,00	3,00-6,00	1,50-3,00	0,20-0,50	-	6,00-12,00	75,00-85,00	0,38
Parkovski otpad	-	47,80	3,40	0,30-1,37	0,50-1,00	30,00	14,00	60,00	0,10-0,20
Poljoprivredni otpad životinjskog porekla									
Govedi ekskrementi	10.884.466,67	33,61	8,95	0,86	2,05	1,70	3,80	78,20	0,20-0,30
Svinjski ekskrementi	4.668.800,00	39,14	3,92	3,69	0,74	1,83	10,00	82,50	0,25-0,50
Ovčiji ekskrementi	837.000,00	40,00- 45,00	2,00-3,00	0,35-0,55	0,70-1,20	15,00-20,00	15,00-22,00	55,00-65,00	0,06
Ekskrementi živine	1.082.130,00	3,13-4,52	0,11-0,39	2,30	1,30	-	6,10-9,10	13,33	0,36



Poljoprivredni otpad - žetveni ostaci									
Pšenica	1.458.208,20	42,00	0,45	2,65	14,84	6,53	92,72	10,80	0,35-0,45
Ječam	212.930,60	45,00	0,50	0,09	0,25	18,00	70,00	12,00	0,24
Kukuruz	2.889.154,10	44,60	0,85	0,21	0,40	17,50	52,00	13,00	0,26
Ovas	35.463,40	45,00	0,60	0,09	0,25	17,00	60,00	12,00	0,23
Raž	6.347,50	47,90	0,54	0,08	0,25	19,00	80,00	12,00	0,23
Tritikale	54.217,40	47,00	0,55	0,08	0,25	18,00	75,00	12,00	0,24
Uljana repica	60.842,60	42,50	0,70	0,16	0,80	21,50	61,00	12,00	0,21
Šećerna repa	1.078.225,50	41,00	1,90	0,19	2,50	5,50	20,00	70,00	0,25
Suncokret	327.318,80	44,00	0,90	0,15	2,00	17,00	48,00	12,00	0,25
Soja	254.003,60	42,20	1,45	0,39	1,50	16,40	28,00	12,00	0,24
Duvan	3.225,10	45,00	1,50	0,20	3,00	42,00	30,00	12,00	0,10
Lucerka	-	41,80	0,73	0,30	2,00	5,51	57,03	17,00	0,56
Poljoprivredni otpad - rezidbeni ostaci									
Jabuke	123059,30	47,36	0,74	0,05-0,08	0,35-0,60	18,00-34,00	64,00	44,86	0,18-0,22
Kruške	16994,58	46,53	0,76				61,22	40,91	
Dunje	3372,85	-	-						
Šljive	107439,15	48,15	0,84	0,04-0,07	0,40-0,70	20,00-28,00	57,32	41,76	0,16-0,20
Trešnje	8879,98	46,11	1,02				45,21	6,09	
Višnje	29789,50	45,76	0,92				49,74	6,68	
Kajsije	13429,00	48,16	0,54				89,19	6,00	
Breskve	17740,13	48,46	0,61				79,44	6,77	
Nektarine	8447,73	48,46	0,61				79,44	6,77	
Orasi	3989,70	47,92	0,99	-	-	-	48,40	3,65	-
Lešnici	1363,70	51,60	1,60	-	-	42,90	32,25	5,12	-
Industrijski otpad									
Otpad iz mlekarar	-	32,60	3,80	3,47	1,70	-	13,00	92,00	0,70
Pivski trop	-	53,00	3,81	0,60	0,50	12,00-28,00	15,00	66,00	0,30



Vinska komina	44164,88	47,00-52,00	1,5-2,2	0,10-0,20	2,00-3,50	28,00-35,00	22,00-30,00	55,00-70,00	0,20-0,30
Repini rezanci	-	44,00	1,60	0,10	1,20	-	27,50	15,00	0,28-0,32
Melasa	-	32,20	0,80	0,10-0,15	3,5-5,00	-	36,10	18,00-25,00	0,30-0,40
Otpad iz prerade krompira	-	42,20	1,02	0,04	-	-	41,18	-	-
Jabukov trop	-	45,00-48,00	1,4-1,8	0,08-0,012	0,90-1,20	15,00-20,00	25,00-35,00	70,00-80,00	-
Košnice (breskva/šljiva/kajsija)	-	48,00-52,00	0,6-0,8	0,05-0,010	0,40-0,60	30,00-50,00	60,00-80,00	8,00-15,00	-
Uljanje pogače (suncokret, soja)	-	50,00-55,00	4,00-7,00	0,60-1,20	0,60-1,20	12,00-18,00	7,00-12,00	8,00-12,00	-

**Procenjene vrednosti predstavljaju rezultat integrisane analize zasnovane na prinosima posmatranim u trogodišnjem periodu, čime je obezbeđena veća pouzdanost u sagledavanju varijabilnosti poljoprivredne proizvodnje. Podaci o površinama pod kulturama, broju grla stoke i broju stanovnika preuzeti su iz zvaničnih evidencija Republičkog zavoda za statistiku. Pored toga, literaturni izvori korišćeni su za definisanje specifičnih tehničkih parametara, uključujući prosečne količine otpada po stanovniku i ekvivalentnom stanovniku, prinose žetvenih ostataka po hektaru, kao i primenu koeficijenta od 0,325 za procenu količine rezidbenih ostataka na osnovu trogodišnjeg prosečnog prinosa. Takođe, procene generisanja ekskremenata po grlu preuzete su iz literature.*



ORGANSKI OPLEMENJIVAČI ZEMLJIŠTA

Tabela 9.2 Klasifikacija organskih oplemenjivača zemljišta (Pravilnik o uslovima za razvrstavanje i utvrđivanje kvaliteta sredstava za ishranu bilja, "Službeni glasnik RS", br. 30/2017 i 31/2018)

Naziv oplemenjivača u okviru tipa	Podaci o načinu proizvodnje i osnovnim sastojcima	Minimalni sadržaj hranljivih elemenata (u masenim %)	Ostali podaci o obeležavanju tipa	Sadržaj hranljivih elemenata koje treba deklarirati
Organski oplemenjivač humus	Proizvod životinjskog ili biljnog porekla ili dobijen obradom leonardita, lignita ili treseta, sa minimalnim sadržajem organske materije delimično humifikovane.	- Ukupna organska materija: 25% - Ekstrakt humusa ukupno (huminska kiselina + fulvo kiselina): 5% - Huminske kiseline: 3% - Maksimalna vlažnost: 40%	- pH - Električna provodljivost - C/N odnos - Min i max vlažnost - Postupak ili proces proizvodnje	- Ukupna organska materija - Ugljenik organski - Huminske kiseline - Organski azot (ako je više od 1%) - Fosfor-pentoksid ukupni (ako je više od 1%) - Kalijum-oksidi ukupni (ako je više od 1%)
Organski oplemenjivač kompost	Proizvod sanitarno ispravan i stabilizovan, dobijen biološkom aerobnom razgradnjom (uključujući termofilnu fazu), biorazgradivih organskih materija, pod kontrolisanim uslovima.	- Ukupna organska materija: 35% - Vlažnost: od 30 do 40% - C/N odnos < 20 - Nečistoće: kamenčići ili šljunak veličine 5 mm maksimum 5%. - Nečistoće (metali, staklo i plastika) prečnika više od 2 mm maksimum 3%. - 90% čestica mora prolaziti kroz sito 25 mm	- pH - Električna provodljivost - C/N odnos - Min i max vlažnost - Postupak ili proces proizvodnje	- Ukupna organska materija - Ugljenik organski - Huminske kiseline - Ukupni azot (ako je više od 1%) - Organski azot (ako je više od 1%) - Amonijačni azot (ako je više od 1%) - Fosfor-pentoksid ukupni (ako je više od 1%) - Kalijum-oksidi ukupni (ako je više od 1%) - Granulometrijski sastav
Organski oplemenjivač Biljni kompost	Proizvod sanitarno ispravan i stabilizovan, dobijen biološkom aerobnom razgradnjom (uključujući termofilnu fazu), isključivo od lišća, trave i orezivanjem biljnih delova, pod kontrolisanim uslovima.	- Ukupna organska materija: 40% - Vlažnost: od 30 do 40% - C/N odnos < 15 - Ne sadrži nečistoće ili inertne oblike kao što su kamen, šljunak, metal, staklo ili plastika.	- pH - Električna provodljivost - C/N odnos - Min i max vlažnost - Postupak ili proces proizvodnje	- Ukupna organska materija - Ugljenik organski - Huminske kiseline - Ukupni azot (ako je više od 1%) - Organski azot (ako je više od 1%) - Amonijačni azot (ako je više od 1%) - Fosfor-pentoksid ukupni (ako je više od 1%) - Kalijum-oksidi ukupni (ako je više od 1%) - Granulometrijski sastav
Organski	Stabilizovan proizvod	- Ukupna organska materija: 40%	- pH	- Ukupna organska materija



oplemenjivač Glistenjak	od organske materije dobijen od glistenjaka, pod kontrolisanim uslovima.	- Vlažnost: od 30 do 40% - C/N odnos < 20 - 90% čestica mora prolaziti kroz sito 25 mm	- Električna provodljivost - C/N odnos - Min i max vlažnost - Može se dodati uobičajeni trgovački naziv.	- Ugljenik organski - Huminske kiseline - Ukupni azot (ako je više od 1%) - Organski azot (ako je više od 1%) - Amonijačni azot (ako je više od 1%) - Fosfor-pentoksid ukupni (ako je više od 1%) - Kalijum-oksidi ukupni (ako je više od 1%) - Granulometrijski sastav
Organski oplemenjivač Treset od mahovina	Organski proizvod sa više treseta, formiran uglavnom od mahovina iz roda <i>Sphagnum</i> .	Ukupna organska materija 90%	- pH - Električna provodljivost - C/N odnos - Min i max vlažnost	- Ukupna organska materija - Ukupna organska materija (s.m.s.) - Ukupni azot (ako je više od 1%) - Granulometrijski sastav
Organski oplemenjivač Treset trava	Organski proizvod sa manje treseta, formiran uglavnom od travnih vrsta (<i>Carex</i> , <i>Phragmites</i>).	Ukupna organska materija 45%	- pH - Električna provodljivost - C/N odnos - Min i max vlažnost	- Ukupna organska materija - Ukupna organska materija (s.m.s.) - Ukupni azot (ako je više od 1%) - Granulometrijski sastav



9.2. INDIKATORI CIRKULARNE EKONOMIJE

Tabela 9.3 Ključni indikatori “Circulytics” okvira (Ellen McArthur Foundation, 2023)

Tematska oblast	Indikator	Metodologija merenja	SDG ciljevi	KPI vrednost	Nivo primene	Tip uticaja
Strategija i planiranje	Centralnost CE u liderstvu	Pregled strateških dokumenata i učestalosti pominjanja u internim komunikacijama.	SDG 12	CE deo strategije organizacije.	Mikro Mezo	Ekonomski Društveni
	Upravljanje rizicima za CE	Intervjui i pregledi procesa upravljanja rizicima.	SDG 12, SDG 13	Rizici CE uključeni u godišnje procese evaluacije.	Mikro Mezo	Ekološki Ekonomski
Inovacije	Podrška za cirkularne inovacije	Broj projekata usklađenih sa CE principima i procena korišćenja resursa za inovacije.	SDG 9, SDG 12	>50% budžeta za inovacije u CE projekte.	Mikro Mezo	Ekonomski
	Saradnja u inovacijama	Broj i kvalitet partnerstava sa eksternim akterima, poput univerziteta i dobavljača.	SDG 17	>3 partnerstva sa visokim uticajem godišnje.	Mikro Mezo	Društveni Ekonomski
Ljudi i veštine	Obuka zaposlenih o CE	Ankete o stopi učešća na obukama i evaluacija uticaja treninga.	SDG 4, SDG 12	>90% zaposlenih obučениh do 2025.	Mikro	Društveni
	Interna komunikacija o CE	Evaluacija internih biltena, sastanaka i drugih komunikacionih alata fokusiranih na CE.	SDG 12, SDG 8	Redovno informisanje zaposlenih o CE aktivnostima.	Mikro	Društveni
Operacije	Digitalni sistemi za CE	Pregled alata za praćenje resursa, reciklaže i energetske efikasnosti.	SDG 9, SDG 12	Potpuno integrisan CE sistem do 2024.	Mikro Mezo	Ekonomski Ekološki
	Cirkularne prakse nabavke	Pregled nabavnih politika i ugovora sa dobavljačima fokusiranih na reciklirane ili obnovljive materijale.	SDG 12	>50% nabavke usklađeno sa CE do 2025.	Mikro Mezo	Ekološki Ekonomski
Spoljni angažman	Saradnja sa dobavljačima	Pregledi ugovora, ankete i procene dobavljačkih lanaca.	SDG 12, SDG 17	>70% dobavljača usklađeno sa CE standardima.	Mikro Mezo	Ekološki Društveni
	Angažman u CE inicijativama	Pregledi eksternih događaja, članstva i doprinosa CE okvirima.	SDG 17	Učešće u >5 javnih CE inicijativa godišnje.	Mezo Makro	Društveni
Ishodi	Cirkularnost materijala	Analiza tokova materijala i procena životnog ciklusa.	SDG 12, SDG 13	>50% stopa cirkularnog korišćenja materijala.	Mikro Mezo Makro	Ekološki
	Energetska cirkularnost	Praćenje potrošnje energije i sertifikovani alati za merenje.	SDG 7, SDG 13	>75% energije iz obnovljivih izvora.	Mezo Makro	Ekološki Ekonomski
	Upravljanje otpadom	Mesečni ili godišnji izveštaji o otpadu po vrstama.	SDG 12, SDG 13	>80% otpada usmereno ka reciklaži.	Mikro Mezo	Ekološki
	Vodna cirkularnost	Revizije potrošnje vode i analiza sistema za reciklažu vode.	SDG 6, SDG 12	>50% reciklirane vode u svim procesima.	Mikro Mezo Makro	Ekološki
Regeneracija prirode	Regenerativna upotreba resursa	Terenska istraživanja i sertifikovane metodologije za procenu biodiverziteta i zdravlja ekosistema.	SDG 15	Pozitivan neto uticaj na biodiverzitet do 2030.	Mikro Mezo Makro	Ekološki



9.3. KLJUČNI INDIKATORI USPEŠNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE PREMA EU OKVIRIMA

Tabela 9.4 Indikatori uspešnosti CE prema EU okvirima (European Commission, Eurostat, 2018)

Kategorija	Indikator	Indikator (engleski naziv)	Opis	Cilj
Proizvodnja i potrošnja	Materijalna potrošnja	Material consumption	Meri količinu sirovina korišćenih u ekonomiji, fokusravajući se na smanjenje potrošnje resursa i odvajanju ekonomskog rasta od resursne potrošnje.	Optimizacija resursa i smanjenje ugljeničnog otiska.
	Zelena javna nabavka	Green public procurement	Prati procenat javnih sredstava uloženih u održive proizvode i usluge.	Promovisanje održive potrošnje kroz ulaganja javnog sektora.
	Generisanje otpada	Waste generation	Analizira ukupnu količinu otpada nastalog tokom ekonomskih aktivnosti i potrošnje.	Smanjenje ukupnog otpada i negativnih uticaja na životnu sredinu.
Upravljanje otpadom	Ukupne stope reciklaže	Overall recycling rates	Procenat ukupnog otpada koji se reciklira, uključujući različite materijale.	Povećanje reciklaže za prelazak ka održivim praksama.
	Reciklaža specifičnih tokova otpada	Recycling of specific waste streams	Analizira reciklažu specifičnih materijala, kao što su elektronski otpad, plastična ambalaža i biomasa.	Praćenje reciklaže ključnih materijala i rešavanje problema upravljanja otpadom.
Sekundarne sirovine	Udeo sekundarnih sirovina	Contribution of recycled materials to raw materials demand	Meri udeo recikliranih materijala u ukupnoj potrošnji sirovina, uključujući krajnje reciklažne stope za ključne materijale.	Smanjenje zavisnosti od primarnih resursa i povećanje cirkularnosti.
	Trgovina sekundarnim sirovinama	Trade in secondary raw materials	Prati tokove sekundarnih sirovina između država EU i sa ostatkom sveta.	Povećanje učešća sekundarnih materijala u globalnoj trgovini.
Konkurentnost i inovacije	Privatne investicije, radna mesta i dodata vrednost	Private investments, jobs, and gross value added	Analizira ulaganja, zapošljavanje i ekonomsku vrednost u sektorima reciklaže, popravke i ponovne upotrebe.	Promocija ekonomskog rasta kroz inovacije i cirkularne modele.
	Inovacije u CE	Innovation in CE	Prati broj patenata i tehnoloških inovacija povezanih sa reciklažom i sekundarnim sirovinama.	Podsticanje konkurentnosti i tehnološkog napretka u okviru EU.
Globalna održivost i otpornost	Globalna održivost kroz CE	Global sustainability from CE	Kvantifikuje doprinose CE globalnim ciljevima održivog razvoja kroz emisije GHG	Podrška klimatskoj neutralnosti i poštovanju planetarnih granica.
	Otpornost kroz CE	Resilience from CE	Merenje zavisnosti EU od uvoza materijala	Povećanje sigurnosti snabdevanja resursima kroz lokalne prakse.

9.4. KOD MATEMATIČKOG MODELA - SIMULACIJA 1 (*WOLFRAM MATHEMATICA*)

U ovom prilogu prikazan je kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, korišćenog za realizaciju prve simulacije matematičkog modela IUOO. Kod je formiran tako da definiše funkcije koje opisuju sadržaj ugljenika, azota, lignina i vlage u ulaznim sirovinama, kao i ograničenja sistema na osnovu kriterijuma odnosa C/N u opsegu od 20 do 30.

```
Clear["Global`*"];
(* UPOREBDIVANJE NORMALIZACIJA primena globalnog kriterijuma *)
Print["20<C/N<30"]
fC[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 39.14 x1 + 33.61 x2 + 42 x3 + 41.8 x4 + 47.9 x5;
gN[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 3.92 x1 + 8.95 x2 + 0.45 x3 + 0.73 x4 + 3.1 x5;
Lignin[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 1.83 x1 + 1.7 x2 + 6.53 x3 + 5.51 x4 + 4.59 x5;
fW[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 82.50 x1 + 78.20 x2 + 10.80 x3 + 17.00 x4 + 70.00 x5;
oblast = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 == 1 && x1 >= 0 && x2 >= 0 && x3 >= 0 &&
  x4 >= 0 && x5 >= 0 && fC[x1, x2, x3, x4, x5] - 20 gN[x1, x2, x3, x4, x5] >= 0 &&
  30 gN[x1, x2, x3, x4, x5] - fC[x1, x2, x3, x4, x5] >= 0;
maxfC = Maximize[fC[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["max fC = ", maxfC];
minfC = Minimize[fC[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["min fC = ", minfC];
maxfC[[1]]
Minimize[Lignin[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}]
maxminusL = Maximize[-Lignin[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
minminusL = Minimize[-Lignin[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["min Lignin= ", minminusL];
maxminusL[[1]]

rez = Minimize[(((maxfC[[1]] - fC[x1, x2, x3, x4, x5]) / (maxfC[[1]] - minfC[[1]]))^2 +
  ((maxminusL[[1]] + Lignin[x1, x2, x3, x4, x5]) /
  (maxminusL[[1]] - minminusL[[1]]))^2, oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["rez globalnim kriterijumom = ", rez];
xtab = Table[rez[[2, k, 2]], {k, 1, 5}];
Print["xtab = ", xtab // Chop // MatrixForm];
Print["fC[rez] = ",
  fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];
Print["Lignin[rez] = ", Lignin[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]],
  rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];
CkrozN = fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]],
  rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]] /
  gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];
Print["C kroz N = ", CkrozN // N];
Print["fW[rez] = ",
  fW[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];

20<C/N<30
max fC = {46.1338, {x1 -> 0., x2 -> 0., x3 -> 0.299363, x4 -> 0., x5 -> 0.700637}}
min fC = {40.448, {x1 -> 0., x2 -> 0.184988, x3 -> 0.815012, x4 -> 0., x5 -> 0.}}
46.1338
{4.00389, {x1 -> 0.409269, x2 -> 0., x3 -> 0., x4 -> 0.590731, x5 -> 0.}}
min Lignin= = {-6.00737, {x1 -> 0., x2 -> 0.108205, x3 -> 0.891795, x4 -> 0., x5 -> 0.}}
-4.00389
rez globalnim kriterijumom = {0.182093,
  {x1 -> 0.0616625, x2 -> 3.0689 x10^-8, x3 -> 1.3432 x10^-7, x4 -> 0.378969, x5 -> 0.559368}}
xtab = 
$$\begin{pmatrix} 0.0616625 \\ 3.0689 \times 10^{-8} \\ 1.3432 \times 10^{-7} \\ 0.378969 \\ 0.559368 \end{pmatrix}$$

fC[rez] = 45.0481
Lignin[rez] = 4.76846
C kroz N = 20.
fW[rez] = 50.6854
```

U ovom delu prikazan je kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, analogno prethodnom, samo je opseg odnosa C/N definisan u intervalu od 25 do 30.

```
Clear["Global`*"];
(* primena globalnog kriterijuma *)
Print["25<C/N<30"]
fC[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 39.14 x1 + 33.61 x2 + 42 x3 + 41.8 x4 + 47.9 x5;
gN[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 3.92 x1 + 8.95 x2 + 0.45 x3 + 0.73 x4 + 3.1 x5;
Lignin[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 1.83 x1 + 1.7 x2 + 6.53 x3 + 5.51 x4 + 4.59 x5;
fW[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_] := 82.50 x1 + 78.20 x2 + 10.80 x3 + 17.00 x4 + 70.00 x5;
oblast = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 == 1 && x1 ≥ 0 && x2 ≥ 0 && x3 ≥ 0 &&
  x4 ≥ 0 && x5 ≥ 0 && fC[x1, x2, x3, x4, x5] - 25 gN[x1, x2, x3, x4, x5] ≥ 0 &&
  30 gN[x1, x2, x3, x4, x5] - fC[x1, x2, x3, x4, x5] ≥ 0;
maxfC = Maximize[fC[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["max fC = ", maxfC];
minfC = Minimize[fC[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["min fC = ", minfC];
maxfC[[1]]
Minimize[Lignin[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}]
maxminusL = Maximize[-Lignin[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
minminusL = Minimize[-Lignin[x1, x2, x3, x4, x5], oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["min Lignin= ", minminusL];
maxminusL[[1]]

rez = Minimize[(((maxfC[[1]] - fC[x1, x2, x3, x4, x5]) / (maxfC[[1]] - minfC[[1]]))^2 +
  ((maxminusL[[1]] + Lignin[x1, x2, x3, x4, x5]) /
  (maxminusL[[1]] - minminusL[[1]]))^2, oblast, {x1, x2, x3, x4, x5}];
Print["rez globalnim kriterijumom = ", rez];
xtab = Table[rez[[2, k, 2]], {k, 1, 5}];
Print["xtab = ", xtab // Chop // MatrixForm];
Print["fC[rez] = ",
  fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];
Print["Lignin[rez] = ", Lignin[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]],
  rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];
CkrozN = fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]],
  rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]] /
  gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];
Print["C kroz N = ", CkrozN // N];
Print["fW[rez] = ",
  fW[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]], rez[[2, 5, 2]]];

25<C/N<30
max fC = {45.0062, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.490472, x4 → 0., x5 → 0.509528}}
min fC = {40.832, {x1 → 0., x2 → 0.13921, x3 → 0.86079, x4 → 0., x5 → 0.}}
45.0062
{4.45838, {x1 → 0.285766, x2 → 0., x3 → 0., x4 → 0.714234, x5 → 0.}}
min Lignin= {-6.00737, {x1 → 0., x2 → 0.108205, x3 → 0.891795, x4 → 0., x5 → 0.}}
-4.45838
rez globalnim kriterijumom = {0.181233,
  {x1 → 0.0241589, x2 → 1.91559 × 10-7, x3 → 3.14548 × 10-7, x4 → 0.570215, x5 → 0.405626}}
xtab = 
$$\begin{pmatrix} 0.0241589 \\ 1.91559 \times 10^{-7} \\ 3.14548 \times 10^{-7} \\ 0.570215 \\ 0.405626 \end{pmatrix}$$

fC[rez] = 44.2101
Lignin[rez] = 5.04792
C kroz N = 25.
fW[rez] = 40.0806
```

9.5. KOD MATEMATIČKOG MODELA - SIMULACIJA 2 (*WOLFRAM MATHEMATICA*)

U ovom prilogu prikazan je kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, korišćenog za realizaciju druge simulacije matematičkog modela IUOO. Kod je formiran tako da definiše funkcije koje opisuju sadržaj ugljenika, azota, fosfora i vlage u ulaznim sirovinama, kao i ograničenja sistema na osnovu kriterijuma odnosa C/N u intervalu od 25 do 30.

```
Clear["Global`*"];
(* 2024 - UPOREBIVANJE NORMALIZACIJA - primena globalnog kriterijuma *)
Block[{$MaxPrecision = 66, $MinPrecision = 64},
Print["25<C/N<30"];
xi = {x1_, x2_, x3_, x4_, x5_};
xp = {x1, x2, x3, x4, x5};
fC[xi] :=  $\frac{3914}{100}x1 + \frac{3361}{100}x2 + 42x3 + \frac{418}{10}x4 + \frac{479}{10}x5$ ;
gN[xi] :=  $\frac{392}{100}x1 + \frac{895}{100}x2 + \frac{45}{100}x3 + \frac{73}{100}x4 + \frac{31}{10}x5$ ;
fP[xi] :=  $3.69x1 + 0.86x2 + 2.65x3 + 0.30x4 + 0.28x5$ ;
fK[xi] :=  $0.74x1 + 2.05x2 + 14.84x3 + 2.00x4 + 0.78x5$ ;
fW[xi] :=  $82.50x1 + 78.20x2 + 10.80x3 + 17.00x4 + 70.00x5$ ;
oblast = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 == 1 && x1 ≥ 0 && x2 ≥ 0 && x3 ≥ 0 && x4 ≥ 0 &&
x5 ≥ 0 && fC[xp] - 25 gN[xp] ≥ 0 && 30 gN[xp] - fC[xp] ≥ 0 && 1 ≤ fP[xp];
minfC = Minimize[fC[xp], oblast, xp];
Print["min fC = ", N[minfC, 32]];
Print["min fC = ", minfC];
minfC[[1]] // Print;
maxfC = Maximize[fC[xp], oblast, xp];
Print["max fC = ", maxfC // N];
Print["maxfC[[1]] = ", maxfC[[1]] // N];
Minimize[fP[xp], oblast, xp] // Print;
minP = Minimize[fP[xp], oblast, xp];
Print["min P = ", minP // N];
minP[[1]] // Print;
maxP = Maximize[fP[xp], oblast, xp];
Print["max P = ", maxP // N];
maxP[[1]] // Print;
(* *)
Print["rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min"];
rezMaxMin = Minimize[ $\left(\frac{\text{maxfC}[[1]] - \text{fC}[\text{xp}]}{\text{maxfC}[[1]] - \text{minfC}[[1]]}\right)^2 +$ 
 $\left(\frac{\text{fP}[\text{xp}] - \text{minP}[[1]]}{\text{maxP}[[1]] - \text{minP}[[1]]}\right)^2$ , oblast, xp];
Print["rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= ", rezMaxMin];
Print["GRESKA globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= ",
rezMaxMin[[1]]];
xtabMaxMin = Table[rezMaxMin[[2, k, 2]], {k, 1, 5}];
Print["resenje = ", xtabMaxMin // Chop // MatrixForm];
rezMaxMinP = {rezMaxMin[[2, 1, 2]], rezMaxMin[[2, 2, 2]],
rezMaxMin[[2, 3, 2]], rezMaxMin[[2, 4, 2]], rezMaxMin[[2, 5, 2]]};
Print["fC[rez] = ", N[fC[rezMaxMinP], 32]];
Print["gN[rezMaxMinP] = ", gN[rezMaxMinP] // N];
Print["fP[rezMaxMinP] = ", fP[rezMaxMinP]];
```



```

Print["fK[rezMaxMinP] = ", fK[rezMaxMinP]];
Print["fW[rezMaxMinP] = ", fW[rezMaxMinP]];
CkrozNMaxMin = fC[rezMaxMinP] / gN[rezMaxMinP];
Print["C kroz N = ", N[CkrozNMaxMin, 64]];
Print["max fC = ", N[maxfC, 32]];
Print["maxfC[[1]] = ", maxfC[[1]] // N];
Print["min fP = ", minP[[1]] // N]
25<C/N<30

N::precsm : Requested precision 32 is smaller than $MinPrecision. Using $MinPrecision instead. >>
min fC = {40.832, {x1 → 0., x2 → 0.13921, x3 → 0.86079, x4 → 0., x5 → 0.}}
min fC = {40.832, {x1 → 0., x2 → 0.13921, x3 → 0.86079, x4 → 0., x5 → 0.}}
40.832
max fC = {45.0062, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.490472, x4 → 0., x5 → 0.509528}}
maxfC[[1]] = 45.0062
{1., {x1 → 0.201096, x2 → 0.0326534, x3 → 0., x4 → 0.766251, x5 → 0.}}
min P = = {1., {x1 → 0.201096, x2 → 0.0326534, x3 → 0., x4 → 0.766251, x5 → 0.}}
1.
max P = {3.00688, {x1 → 0.343154, x2 → 0., x3 → 0.656846, x4 → 0., x5 → 0.}}
3.00688
rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min
NMinimize::incst :
NMinimize was unable to generate any initial points satisfying the inequality constraints  $\{1 - 0.86 x_2 - 2.65 x_3 - 0.3 x_4 - 3.69 (1. - 1. x_2 - 1. x_3 - 1. x_4 - 1. x_5) - 0.28 x_5 \leq 0, \llcorner 1 \gg, \llcorner 1 \gg, -\frac{3361 x_2}{100} - 42 x_3 - \frac{209 x_4}{5} - \frac{1957}{50} (1. - 1. x_2 - \llcorner 1 \gg - 1. x_4 - 1. x_5) - \frac{479 x_5}{10} + 25 \left( \frac{179 x_2}{20} + \frac{9 x_3}{20} + \frac{73 x_4}{100} + \frac{98}{25} (1. - 1. x_2 - 1. x_3 - 1. x_4 - 1. x_5) + \frac{31 x_5}{10} \right) \leq 0\}$ .

The initial region specified may not contain any feasible points. Changing the initial region
or
specifying
explicit initial points
may provide a better solution. >>
rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= {0.00205681,
{x1 → 5.24217 × 10-9, x2 → 2.19676 × 10-9, x3 → 0.309975, x4 → 0.204948, x5 → 0.485077}}
GRESKA globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= 0.00205681
resenje =  $\begin{pmatrix} 5.24217 \times 10^{-9} \\ 2.19676 \times 10^{-9} \\ 0.309975 \\ 0.204948 \\ 0.485077 \end{pmatrix}$ 
fC[rez] = 44.821
gN[rezMaxMinP] = 1.79284
fP[rezMaxMinP] = 1.01874
fK[rezMaxMinP] = 5.38829
fW[rezMaxMinP] = 40.7872
C kroz N = 25.
max fC = {45.0062, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.490472, x4 → 0., x5 → 0.509528}}
maxfC[[1]] = 45.0062
min fP = = 1.

```

U ovom delu prikazan je kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, analogno prethodnom, s tom razlikom što je opseg odnosa C/N definisan u intervalu od 20 do 30.

```
Clear["Global`*"];
(* 2024 - UPOREĐIVANJE NORMALIZACIJA - primena globalnog kriterijuma *)
Block[{$MaxPrecision = 66, $MinPrecision = 64},
  Print["20<C/N<30"];
  xi = {x1_, x2_, x3_, x4_, x5_};
  xp = {x1, x2, x3, x4, x5};
  fC[xi] :=  $\frac{3914}{100}x1 + \frac{3361}{100}x2 + 42x3 + \frac{418}{10}x4 + \frac{479}{10}x5$ ;
  gN[xi] :=  $\frac{392}{100}x1 + \frac{895}{100}x2 + \frac{45}{100}x3 + \frac{73}{100}x4 + \frac{31}{10}x5$ ;
  fP[xi] := 3.69 x1 + 0.86 x2 + 2.65 x3 + 0.30 x4 + 0.28 x5;
  fK[xi] := 0.74 x1 + 2.05 x2 + 14.84 x3 + 2.00 x4 + 0.78 x5;
  fW[xi] := 82.50 x1 + 78.20 x2 + 10.80 x3 + 17.00 x4 + 70.00 x5;
  oblast = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 == 1 && x1 >= 0 && x2 >= 0 && x3 >= 0 && x4 >= 0 &&
    x5 >= 0 && fC[xp] - 20 gN[xp] >= 0 && 30 gN[xp] - fC[xp] >= 0 && 1 <= fP[xp];
  minfC = Minimize[fC[xp], oblast, xp];
  Print["min fC = ", N[minfC, 32]];
  Print["min fC = ", minfC];
  minfC[[1]] // Print;
  maxfC = Maximize[fC[xp], oblast, xp];
  Print["max fC = ", maxfC // N];
  Print["maxfC[[1]] = ", maxfC[[1]] // N];
  Minimize[fP[xp], oblast, xp] // Print;
  minP = Minimize[fP[xp], oblast, xp];
  Print["min P = ", minP // N];
  minP[[1]] // Print;
  maxP = Maximize[fP[xp], oblast, xp];
  Print["max P = ", maxP // N];
  maxP[[1]] // Print;
  (* *)
  Print["rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min"];
  rezMaxMin = Minimize[(((maxfC[[1]] - fC[xp]) / (maxfC[[1]] - minfC[[1]]))^2 +
    ((fP[xp] - minP[[1]]) / (maxP[[1]] - minP[[1]]))^2, oblast, xp];
  Print["rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= ", rezMaxMin];
  Print["GRESKA globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= ",
    rezMaxMin[[1]]];
  xtabMaxMin = Table[rezMaxMin[[2, k, 2]], {k, 1, 5}];
  Print["resenje = ", xtabMaxMin // Chop // MatrixForm];
  rezMaxMinP = {rezMaxMin[[2, 1, 2]], rezMaxMin[[2, 2, 2]],
    rezMaxMin[[2, 3, 2]], rezMaxMin[[2, 4, 2]], rezMaxMin[[2, 5, 2]]};
  Print["fC[rez] = ", N[fC[rezMaxMinP], 32]];
  Print["gN[rezMaxMinP] = ", gN[rezMaxMinP] // N];
  Print["fP[rezMaxMinP] = ", fP[rezMaxMinP]];
  Print["fK[rezMaxMinP] = ", fK[rezMaxMinP]];
  Print["fW[rezMaxMinP] = ", fW[rezMaxMinP]];
  CkrozNMaxMin = fC[rezMaxMinP] / gN[rezMaxMinP];
  Print["C kroz N = ", N[CkrozNMaxMin, 64]];
  Print["max fC = ", N[maxfC, 32]];
  Print["maxfC[[1]] = ", maxfC[[1]] // N];
  Print["min fP = ", minP[[1]] // N]
]
```

20<C/N<30

N::precsm : Requested precision 32 is smaller than \$MinPrecision. Using \$MinPrecision instead. >>



```
min fC = {40.448, {x1 → 0., x2 → 0.184988, x3 → 0.815012, x4 → 0., x5 → 0.}}
min fC = {40.448, {x1 → 0., x2 → 0.184988, x3 → 0.815012, x4 → 0., x5 → 0.}}
40.448
max fC = {46.1076, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.303797, x4 → 0., x5 → 0.696203}}
maxfC[[1]] = 46.1076
{1., {x1 → 0.192714, x2 → 0.0833895, x3 → 0., x4 → 0.723896, x5 → 0.}}
min P = {1., {x1 → 0.192714, x2 → 0.0833895, x3 → 0., x4 → 0.723896, x5 → 0.}}
1.
max P = {3.12495, {x1 → 0.456684, x2 → 0., x3 → 0.543316, x4 → 0., x5 → 0.}}
3.12495
rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min
rez globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min=
{1.04833 × 10-14, {x1 → 2.09115 × 10-6, x2 → 0., x3 → 0.303794, x4 → 0., x5 → 0.696203}}
GRESKA globalnim kriterijumom sa normalizacijom max - min= 1.04833 × 10-14
resenje = 
$$\begin{pmatrix} 2.09115 \times 10^{-6} \\ 0 \\ 0.303794 \\ 0 \\ 0.696203 \end{pmatrix}$$

fC[rez] = 46.1076
gN[rezMaxMinP] = 2.29495
fP[rezMaxMinP] = 1.
fK[rezMaxMinP] = 5.05135
fW[rezMaxMinP] = 52.0154
C kroz N = 20.0909
max fC = {46.1076, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.303797, x4 → 0., x5 → 0.696203}}
maxfC[[1]] = 46.1076
min fP = 1.
```



9.6. PREGLED BILANSA I INDIKATORA CIRKULARNE EKONOMIJE U SIMULACIJI 4

Tabela 9.5 Karakteristike scenarija BS1-S5

Scenario	BS1		BS2		S1		S2		S3		S4		S5									
Način tretmana	Kompostiranje		Anaerobna digestija		Kompostiranje		Anaerobna digestija		Anaerobna digestija		Anaerobna digestija		Kompostiranje									
Količina tretiranje organske sirovine [t/god]	13.417,00		17.866,00		13.022,00		27.057,00		17.998,00		27.189,00		12.471,00									
Količina dostupne organske sirovine [t/god]	26.721,00		26.721,00		35.912,00		35.912,00		26.853,00		36.044,00		36.044,00									
Organska sirovina	ODKO	PO	ODKO	PO	ODKO	PO	PT	ODKO	PO	PT	ODKO	PO	OM	ODKO	PO	PT	OM	ODKO	PO	PT	OM	
Optimalni udeo organskih sirovina	0,34	0,66	0,51	0,50	0,19	0,68	0,13	0,33	0,33	0,34	0,50	0,49	0,01	0,33	0,32	0,33	0,00	0,14	0,71	0,14	0,01	
Količine pojedinačnih organskih sirovina [t/god]	4.561,78	8.855,22	9.022,33	8.843,67	2.474,18	8.854,96	1.692,86	9.009,98	8.847,64	9.172,32	9.184,31	8.855,02	132,00	8.972,37	8.700,48	8.972,37	108,76	1.745,94	8.854,41	1.745,94	99,77	
Udeo pojedinačnih iskorišćenih sirovina u odnosu na dostupne količine	0,26	1,00	0,51	1,00	0,14	1,00	0,18	0,50	1,00	1,00	0,51	1,00	1,00	0,50	0,98	0,98	0,82	0,10	1,00	0,19	0,76	
C/N mešavine	25,05		22,60		25,28		20,03		22,57		20,00		25,69									
Vlaga mešavine [%]	63,40		65,02		62,68		65,27		65,22		65,38		62,58									
Pojedinacni prinos biogasa [m³/kg]	-		0,65		0,15		-		0,65		0,15		0,70		0,65		0,15		0,30		0,70	
Ponderisani prinos biogasa [m³/kg]	-		0,42		-		-		0,36		0,40		0,36		-		-		-		-	
Količina nastalog biogasa [m³/god]	-		3.826.897,20		-		4.967.665,20		3.671.592,00		4.991.900,40		-									
Količina nastalog komposta [t/god]	5.366,80		-		5.208,80		-		-		-		4.988,40									
Količina nastalog digestata [t/god]	-		7.146,40		-		10.822,80		7.199,20		10.875,60		-									
Energetski dobitci u formi biogasa [MJ/god]	-		82.278.289,80		-		106.804.801,80		78.939.228,00		107.325.858,60		-									
Energetski dobitci u formi biogasa [10^6 MJ/god]	-		82,28		-		106,80		78,94		107,33		-									
Energetski dobitci u formi biogasa [MJ / t OS god]	-		4.605,30		-		3.947,40		4.386,00		3.947,40		-									
Energetske potrebe za tretman i transport [MJ/t OS]	371,43		3.315,08		371,43		3.315,08		3.315,08		3.315,08		371,43									
Energetske potrebe za tretman i transport [MJ/god]	4.579.170,84		58.385.024,17		4.471.226,45		87.949.510,14		58.809.625,64		88.374.111,61		4.320.788,11									
Energetske potrebe za tretman i transport [10^6 MJ/god]	4,58		58,39		4,47		87,95		58,81		88,37		4,32									
Stepen uključenja organske materije	0,50		0,67		0,36		0,75		0,67		0,75		0,35									
Curenje materije [t/god]	1.643,80		3.423,40		1.485,80		7.099,80		3.476,20		7.152,60		1.265,40									
Curenje energije [MJ/t OS]	-371,43		1.290,22		-371,43		632,32		1.070,92		632,32		-371,43									
Curenje energije [10^6 MJ/god]	-4,58		23,89		-4,47		18,86		20,13		18,95		-4,32									
Cirkularnost materije [%]	91,25		86,31		91,85		81,26		86,20		81,21		92,75									
Cirkularnost energije [%]	n.a.		70,96		n.a.		82,35		74,50		82,34		n.a.									



Tabela 9.6 Karakteristike scenarija S6-S8

Scenario	S6				S7				S8											
Način tretmana	Kompostiranje		Anaerobna digestija		Ukupno		Kompostiranje		Anaerobna digestija		Ukupno		Anaerobna digestija		Kompostiranje				Ukupno	
Količina tretiranje organske sirovine [t/god]	6.725,00		9.589,00		16.314,00		13.022,00		22.118,00		35.140,00		14.718,00		12.471,00				27.189,00	
Količina dostupne organske sirovine [t/god]	26.721,00				35.912,00				36.044,00											
Organska sirovina	ODKO	PO	ODKO	PO	ODKO	PO	PT	ODKO	PO	PT	ODKO	PO	PT	OM	ODKO	PT	PT	OM		
Optimalni udeo organskih sirovina	0,34	0,66	0,51	0,50		0,19	0,68	0,13	0,33	0,33	0,34		0,52	-	0,49	-	0,14	0,71	0,14	0,01
Količine pojedinačnih organskih sirovina [t/god]	2.286,50	4.438,50	4.842,45	4.746,56		2.474,18	8.854,96	1.692,86	7.365,29	7.232,59	7.498,00		7.579,77	-	7.138,23	-	1.745,94	8.854,41	1.745,94	99,77
Udeo pojedinačnih iskorištenih sirovina u odnosu na dostupne količine	0,13	0,50	0,27	0,54		0,14	1,00	0,18	0,41	0,82	0,82		0,42	-	0,78	-	0,10	1,00	0,19	0,76
C/N mešavine		25,05		22,60				25,28			20,03				15,00					25,69
Vlaga mešavine [%]		63,40		65,02				62,68			65,27				67,45					62,58
Raspodela tretmana		0,41		0,59	1,00			0,37			0,63	1,00			0,54				0,46	1,00
Pojedinacni prinos biogasa [m³/kg]			0,65	0,15					0,65	0,15	0,30		0,65	0,15	0,30	0,70				
Ponderisani prinos biogasa [m³/kg]		-		0,40				-			0,36				0,49				-	
Količina nastalog biogasa [m³/god]		-		1.956.156,00				-			4.060.864,80				3.678.028,20				-	
Količina nastalog komposta [t/god]		2.690,00		-				5.208,80			-				-				4.988,40	
Količina nastalog digestata [t/god]		-		3.835,60				-			8.847,20				5.887,20				-	
Energetski dobitci u formi biogasa [MJ/god]		-		42.057.354,00				-			87.308.593,20				79.077.606,30				-	
Energetski dobitci u formi biogasa [10^6 MJ/god]		-		42,06				-			87,31				79,08				-	
Energetski dobitci u formi biogasa [MJ / t OS god]		-		2.577,99				-			2.484,59				2.908,44				-	
Energetske potrebe za tretman i transport [MJ/t OS]					2.125,61						1.022,12									1.964,89
Energetske potrebe za tretman i transport [MJ/god]					33.987.806,67						33.375.243,44									51.663.852,46
Energetske potrebe za tretman i transport [10^6 MJ/god]					33,99						33,38									51,66
Stepen uključenja organske materije		0,25		0,36	0,61			0,36			0,62	0,98			0,41				0,35	0,75
Curenje materije [t/god]		-1.033,00		112,60	2.802,60			1.485,80			5.124,20	10.333,00			2.164,20				1.265,40	7.152,60
Curenje energije [MJ/t po OS]					452,38						1.462,48									943,55
Curenje energije [10^6 MJ/god]					8,07						53,93									27,41
Cirkularnost materije [%]					87,73						79,00									81,21
Cirkularnost energije [%]					80,81						38,23									65,33

9.7. KOD MATEMATIČKOG MODELA - SIMULACIJA 6 (*WOLFRAM MATHEMATICA*)

U ovom prilogu prikazan kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, korišćenog za realizaciju šeste simulacije matematičkog modela IUOO. Kod je formiran tako da definiše funkcije koje opisuju sadržaj ugljenika, azota, lignina i vlage u ulaznim sirovinama, kao i ograničenja sistema u skladu sa kriterijumom odnosa C/N u intervalu od 20 do 21,4.

```
Clear["Global`*"];
(* 2018 -02-05 - globalni kriterijum / radjeno 2025, 5.10. *)
For[c = 0, c < 0.1, c = c + 0.01,
  Print["c = ", c];
  fC[x1_, x2_, x3_, x4_] := 29.6 x1 + 29.8 x2 + 39.18 x3 + 32.2 x4 + 60.0 * c;
  gN[x1_, x2_, x3_, x4_] := 0.8 x1 + 2.2 x2 + 2.46 x3 + 0.89 x4 + 0.0 c;
  oblast = {x1 + x2 + x3 + x4 == 1 - c && x1 ≥ 0 && x2 ≥ 0 &&
    x3 ≥ 0 && x4 ≥ 0 && fC[x1, x2, x3, x4] - 20 gN[x1, x2, x3, x4] ≥ 0 &&
    21.4 gN[x1, x2, x3, x4] - fC[x1, x2, x3, x4] ≥ 0};
  minfC = Minimize[fC[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["min fC = ", minfC];
  maxfC = Maximize[fC[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["max fC = ", maxfC];
  mingN = Minimize[gN[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["mingN = ", mingN];
  maxgN = Maximize[gN[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["maxgN = ", maxgN];
  Print[" $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}}$  = ",  $\frac{\text{maxfC}[[1]]}{\text{mingN}[[1]]}$  // N];

  rez = Minimize[{((maxfC[[1]] - fC[x1, x2, x3, x4]) / maxfC[[1]])^2 +
    ((gN[x1, x2, x3, x4] - mingN[[1]]) / mingN[[1]])^2, oblast, {x1, x2, x3, x4}}];
  Print["rez globalnim kriterijumom = ", rez];
  xtab = Table[rez[[2, k, 2]], {k, 1, 4}];
  Print["c = ", c, " xtab = ", xtab // Chop // MatrixForm];
  Print["fC[rez] = ",
    fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  Print["gN[rez] = ", gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]],
    rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  CkrozN = fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]] /
    gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  Print["C kroz N = ", CkrozN // N];
]

c = 0
min fC = {29.6839, {x1 → 0.580645, x2 → 0.419355, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {36.316, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.589681, x4 → 0.410319}}
mingN = {1.3871, {x1 → 0.580645, x2 → 0.419355, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.8158, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.589681, x4 → 0.410319}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}}$  = 26.1813
```

```
rez globalnim kriterijumom =
{0.0199932, {x1 → 0.483724, x2 → 0.189383, x3 → 0.265395, x4 → 0.0614977}}

c = 0   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.483724 \\ 0.189383 \\ 0.265395 \\ 0.0614977 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.3403
gN[rez] = 1.51123
C kroz N = 21.4
c = 0.01

min fC = {29.9911, {x1 → 0.554677, x2 → 0.435323, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {36.7243, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.608354, x4 → 0.381646}}
mingN = {1.40145, {x1 → 0.554677, x2 → 0.435323, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.83622, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.608354, x4 → 0.381646}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 26.2045$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0201662, {x1 → 0.46998, x2 → 0.198391, x3 → 0.273043, x4 → 0.0485865}}

c = 0.01   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.46998 \\ 0.198391 \\ 0.273043 \\ 0.0485865 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.6858
gN[rez] = 1.52737
C kroz N = 21.4
c = 0.02

min fC = {30.2983, {x1 → 0.52871, x2 → 0.45129, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.1326, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.627027, x4 → 0.352973}}
mingN = {1.41581, {x1 → 0.52871, x2 → 0.45129, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.85663, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.627027, x4 → 0.352973}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 26.2272$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0203363, {x1 → 0.472721, x2 → 0.203401, x3 → 0.284845, x4 → 0.0190333}}

c = 0.02   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.472721 \\ 0.203401 \\ 0.284845 \\ 0.0190333 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 33.027
gN[rez] = 1.54332
C kroz N = 21.4
c = 0.03

min fC = {30.6055, {x1 → 0.502742, x2 → 0.467258, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.541, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.6457, x4 → 0.3243}}
mingN = {1.43016, {x1 → 0.502742, x2 → 0.467258, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.87705, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.6457, x4 → 0.3243}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 26.2495$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0205035, {x1 → 0.418038, x2 → 0.223149, x3 → 0.28125, x4 → 0.0475631}}
```



```

c = 0.03   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.418038 \\ 0.223149 \\ 0.28125 \\ 0.0475631 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 33.3747
gN[rez] = 1.55956
C kroz N = 21.4
c = 0.04

min fC = {30.9126, {x1 → 0.476774, x2 → 0.483226, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.9493, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.664373, x4 → 0.295627}}
mingN = {1.44452, {x1 → 0.476774, x2 → 0.483226, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.89747, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.664373, x4 → 0.295627}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 26.2713$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0206678, {x1 → 0.41949, x2 → 0.228252, x3 → 0.292977, x4 → 0.0192809}}

c = 0.04   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.41949 \\ 0.228252 \\ 0.292977 \\ 0.0192809 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 33.7185
gN[rez] = 1.57563
C kroz N = 21.4
c = 0.05

min fC = {31.2198, {x1 → 0.450806, x2 → 0.499194, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {38.3577, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.683047, x4 → 0.266953}}
mingN = {1.45887, {x1 → 0.450806, x2 → 0.499194, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.91788, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.683047, x4 → 0.266953}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 26.2927$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0208294, {x1 → 0.390719, x2 → 0.241314, x3 → 0.296371, x4 → 0.0215958}}

c = 0.05   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.390719 \\ 0.241314 \\ 0.296371 \\ 0.0215958 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 34.0636
gN[rez] = 1.59176
C kroz N = 21.4
c = 0.06

min fC = {31.527, {x1 → 0.424839, x2 → 0.515161, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {38.766, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.70172, x4 → 0.23828}}
mingN = {1.47323, {x1 → 0.424839, x2 → 0.515161, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.9383, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.70172, x4 → 0.23828}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 26.3137$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0209883, {x1 → 0.109777, x2 → 0.321851, x3 → 0.229002, x4 → 0.279371}}

```



```
c = 0.06   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.109777 \\ 0.321851 \\ 0.229002 \\ 0.279371 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 34.4086
gN[rez] = 1.60788
C kroz N = 21.4
c = 0.07

min fC = {31.8342, {x1 → 0.398871, x2 → 0.531129, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.1743, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.720393, x4 → 0.209607}}
mingN = {1.48758, {x1 → 0.398871, x2 → 0.531129, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.95872, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.720393, x4 → 0.209607}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}} = 26.3343$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0211446, {x1 → 0.10874, x2 → 0.327463, x3 → 0.240211, x4 → 0.253587}}

c = 0.07   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.10874 \\ 0.327463 \\ 0.240211 \\ 0.253587 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 34.754
gN[rez] = 1.62402
C kroz N = 21.4
c = 0.08

min fC = {32.1414, {x1 → 0.372903, x2 → 0.547097, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.5827, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.739066, x4 → 0.180934}}
mingN = {1.50194, {x1 → 0.372903, x2 → 0.547097, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.97913, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.739066, x4 → 0.180934}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}} = 26.3544$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0212982, {x1 → 0.186133, x2 → 0.312245, x3 → 0.27325, x4 → 0.148372}}

c = 0.08   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.186133 \\ 0.312245 \\ 0.27325 \\ 0.148372 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 35.098
gN[rez] = 1.64009
C kroz N = 21.4
c = 0.09

min fC = {32.4486, {x1 → 0.346935, x2 → 0.563065, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.991, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.75774, x4 → 0.15226}}
mingN = {1.51629, {x1 → 0.346935, x2 → 0.563065, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.99955, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.75774, x4 → 0.15226}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}} = 26.3743$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0214494, {x1 → 0.296933, x2 → 0.288001, x3 → 0.315763, x4 → 0.00930334}}

c = 0.09   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.296933 \\ 0.288001 \\ 0.315763 \\ 0.00930334 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 35.4428
gN[rez] = 1.65621
C kroz N = 21.4
```

U ovom delu prikazan je kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, analogno prethodnom, samo je opseg odnosa C/N definisan u intervalu od 20 do 25.

```
Clear["Global`*"];
(* 2018 -02-05 - globalni kriterijum / radjeno 2025, 5.10. *)
For[c = 0, c < 0.1, c = c + 0.01,
  Print["c = ", c];
  fC[x1_, x2_, x3_, x4_] := 29.6 x1 + 29.8 x2 + 39.18 x3 + 32.2 x4 + 60.0 * c;
  gN[x1_, x2_, x3_, x4_] := 0.8 x1 + 2.2 x2 + 2.46 x3 + 0.89 x4 + 0.0 c;
  oblast = {x1 + x2 + x3 + x4 == 1 - c && x1 ≥ 0 && x2 ≥ 0 &&
    x3 ≥ 0 && x4 ≥ 0 && fC[x1, x2, x3, x4] - 20 gN[x1, x2, x3, x4] ≥ 0 &&
    25 gN[x1, x2, x3, x4] - fC[x1, x2, x3, x4] ≥ 0};
  minfC = Minimize[fC[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["min fC = ", minfC];
  maxfC = Maximize[fC[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["max fC = ", maxfC];
  mingN = Minimize[gN[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["mingN = ", mingN];
  maxgN = Maximize[gN[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["maxgN = ", maxgN];
  Print[" $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}}$  = ",  $\frac{\text{maxfC}[[1]]}{\text{mingN}[[1]]}$  // N];

  rez = Minimize[{(maxfC[[1]] - fC[x1, x2, x3, x4]) / maxfC[[1]]2 +
    (gN[x1, x2, x3, x4] - mingN[[1]]) / mingN[[1]]2, oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["rez globalnim kriterijumom = ", rez];
  xtab = Table[rez[[2, k, 2]], {k, 1, 4}];
  Print["c = ", c, " xtab = ", xtab // Chop // MatrixForm];
  Print["fC[rez] = ",
    fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  Print["gN[rez] = ", gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]],
    rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  CkrozN = fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]] /
    gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  Print["C kroz N = ", CkrozN // N];
]

c = 0
min fC = {29.6552, {x1 → 0.724138, x2 → 0.275862, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {36.316, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.589681, x4 → 0.410319}}
mingN = {1.18621, {x1 → 0.724138, x2 → 0.275862, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.8158, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.589681, x4 → 0.410319}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}}$  = 30.6152
rez globalnim kriterijumom =
{0.0201822, {x1 → 0.532914, x2 → 0.0607446, x3 → 0.23639, x4 → 0.169952}}

c = 0 xtab =  $\begin{pmatrix} 0.532914 \\ 0.0607446 \\ 0.23639 \\ 0.169952 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.3186
gN[rez] = 1.29275
C kroz N = 25.

c = 0.01
min fC = {29.9621, {x1 → 0.699655, x2 → 0.290345, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {36.7243, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.608354, x4 → 0.381646}}
```



```

mingN = {1.19848, {x1 → 0.699655, x2 → 0.290345, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.83622, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.608354, x4 → 0.381646}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.6423$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.020356, {x1 → 0.495068, x2 → 0.0749522, x3 → 0.236835, x4 → 0.183145}}

c = 0.01   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.495068 \\ 0.0749522 \\ 0.236835 \\ 0.183145 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.664
gN[rez] = 1.30656
C kroz N = 25.
c = 0.02

min fC = {30.269, {x1 → 0.675172, x2 → 0.304828, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.1326, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.627027, x4 → 0.352973}}
mingN = {1.21076, {x1 → 0.675172, x2 → 0.304828, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.85663, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.627027, x4 → 0.352973}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.6689$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0205269, {x1 → 0.499687, x2 → 0.0777939, x3 → 0.249199, x4 → 0.15332}}

c = 0.02   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.499687 \\ 0.0777939 \\ 0.249199 \\ 0.15332 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 33.0095
gN[rez] = 1.32038
C kroz N = 25.
c = 0.03

min fC = {30.5759, {x1 → 0.65069, x2 → 0.31931, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.541, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.6457, x4 → 0.3243}}
mingN = {1.22303, {x1 → 0.65069, x2 → 0.31931, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.87705, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.6457, x4 → 0.3243}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.695$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0206948, {x1 → 0.457889, x2 → 0.0931666, x3 → 0.248417, x4 → 0.170527}}

c = 0.03   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.457889 \\ 0.0931666 \\ 0.248417 \\ 0.170527 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 33.3538
gN[rez] = 1.33415
C kroz N = 25.
c = 0.04

min fC = {30.8828, {x1 → 0.626207, x2 → 0.333793, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.9493, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.664373, x4 → 0.295627}}
mingN = {1.23531, {x1 → 0.626207, x2 → 0.333793, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.89747, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.664373, x4 → 0.295627}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.7205$ 

```



```
rez globalnim kriterijumom =  
{0.0208598, {x1 → 0.464617, x2 → 0.0955671, x3 → 0.261239, x4 → 0.138576}}  
  
c = 0.04    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.464617 \\ 0.0955671 \\ 0.261239 \\ 0.138576 \end{pmatrix}$   
  
fC[rez] = 33.6981  
gN[rez] = 1.34792  
C kroz N = 25.  
c = 0.05  
min fC = {31.1897, {x1 → 0.601724, x2 → 0.348276, x3 → 0., x4 → 0.}}  
max fC = {38.3577, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.683047, x4 → 0.266953}}  
mingN = {1.24759, {x1 → 0.601724, x2 → 0.348276, x3 → 0., x4 → 0.}}  
maxgN = {1.91788, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.683047, x4 → 0.266953}}  
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.7455$   
rez globalnim kriterijumom =  
{0.0210221, {x1 → 0.422014, x2 → 0.111118, x3 → 0.260273, x4 → 0.156596}}  
  
c = 0.05    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.422014 \\ 0.111118 \\ 0.260273 \\ 0.156596 \end{pmatrix}$   
  
fC[rez] = 34.0428  
gN[rez] = 1.36171  
C kroz N = 25.  
c = 0.06  
min fC = {31.4966, {x1 → 0.577241, x2 → 0.362759, x3 → 0., x4 → 0.}}  
max fC = {38.766, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.70172, x4 → 0.23828}}  
mingN = {1.25986, {x1 → 0.577241, x2 → 0.362759, x3 → 0., x4 → 0.}}  
maxgN = {1.9383, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.70172, x4 → 0.23828}}  
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.77$   
rez globalnim kriterijumom =  
{0.0211817, {x1 → 0.465318, x2 → 0.103727, x3 → 0.283364, x4 → 0.087592}}  
  
c = 0.06    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.465318 \\ 0.103727 \\ 0.283364 \\ 0.087592 \end{pmatrix}$   
  
fC[rez] = 34.3871  
gN[rez] = 1.37548  
C kroz N = 25.  
c = 0.07  
min fC = {31.8034, {x1 → 0.552759, x2 → 0.377241, x3 → 0., x4 → 0.}}  
max fC = {39.1743, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.720393, x4 → 0.209607}}  
mingN = {1.27214, {x1 → 0.552759, x2 → 0.377241, x3 → 0., x4 → 0.}}  
maxgN = {1.95872, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.720393, x4 → 0.209607}}  
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 30.7941$   
rez globalnim kriterijumom =  
{0.0213386, {x1 → 0.446383, x2 → 0.112979, x3 → 0.289001, x4 → 0.0816372}}
```



```

c = 0.07    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.446383 \\ 0.112979 \\ 0.289001 \\ 0.0816372 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 34.7315
gN[rez] = 1.38926
C kroz N = 25.

c = 0.08

min fC = {32.1103, {x1 → 0.528276, x2 → 0.391724, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.5827, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.739066, x4 → 0.180934}}
mingN = {1.28441, {x1 → 0.528276, x2 → 0.391724, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.97913, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.739066, x4 → 0.180934}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}} = 30.8177$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.021493, {x1 → 0.407305, x2 → 0.127622, x3 → 0.288984, x4 → 0.096089}}

c = 0.08    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.407305 \\ 0.127622 \\ 0.288984 \\ 0.096089 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 35.0758
gN[rez] = 1.40303
C kroz N = 25.

c = 0.09

min fC = {32.4172, {x1 → 0.503793, x2 → 0.406207, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.991, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.75774, x4 → 0.15226}}
mingN = {1.29669, {x1 → 0.503793, x2 → 0.406207, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.99955, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.75774, x4 → 0.15226}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}} = 30.8409$ 

rez globalnim kriterijumom =
{0.0216448, {x1 → 0.390408, x2 → 0.13629, x3 → 0.295236, x4 → 0.0880667}}

c = 0.09    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.390408 \\ 0.13629 \\ 0.295236 \\ 0.0880667 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 35.4206
gN[rez] = 1.41682
C kroz N = 25.

```

U nastavku je prikazan kod razvijen u programu *Wolfram Mathematica*, analogno prethodnom, s tom razlikom što je opseg odnosa C/N proširen i definisan u intervalu od 20 do 30.

```
Clear["Global`*"];
(* 2018 -02-05 - globalni kriterijum / radjeno 2025, 5.10. *)
For[c = 0, c < 0.1, c = c + 0.01,
  Print["c = ", c];
  fC[x1_, x2_, x3_, x4_] := 29.6 x1 + 29.8 x2 + 39.18 x3 + 32.2 x4 + 60.0 * c;
  gN[x1_, x2_, x3_, x4_] := 0.8 x1 + 2.2 x2 + 2.46 x3 + 0.89 x4 + 0.0 c;
  oblast = {x1 + x2 + x3 + x4 == 1 - c && x1 ≥ 0 && x2 ≥ 0 &&
    x3 ≥ 0 && x4 ≥ 0 && fC[x1, x2, x3, x4] - 20 gN[x1, x2, x3, x4] ≥ 0 &&
    30 gN[x1, x2, x3, x4] - fC[x1, x2, x3, x4] ≥ 0};
  minfC = Minimize[fC[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["min fC = ", minfC];
  maxfC = Maximize[fC[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["max fC = ", maxfC];
  mingN = Minimize[gN[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["mingN = ", mingN];
  maxgN = Maximize[gN[x1, x2, x3, x4], oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["maxgN = ", maxgN];
  Print[" $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}}$  = ",  $\frac{\text{maxfC}[[1]]}{\text{mingN}[[1]]}$  // N];

  rez = Minimize[ $\left(\frac{\text{maxfC}[[1]] - \text{fC}[x1, x2, x3, x4]}{\text{maxfC}[[1]]}\right)^2 +$ 
     $\left(\frac{\text{gN}[x1, x2, x3, x4] - \text{mingN}[[1]]}{\text{mingN}[[1]]}\right)^2$ , oblast, {x1, x2, x3, x4}];
  Print["rez globalnim kriterijumom = ", rez];
  xtab = Table[rez[[2, k, 2]], {k, 1, 4}];
  Print["c = ", c, " xtab = ", xtab // Chop // MatrixForm];
  Print["fC[rez] = ",
    fC[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]], rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  Print["gN[rez] = ", gN[rez[[2, 1, 2]], rez[[2, 2, 2]],
    rez[[2, 3, 2]], rez[[2, 4, 2]]];
  CkrozN =  $\frac{\text{fC}[\text{rez}[[2, 1, 2]], \text{rez}[[2, 2, 2]], \text{rez}[[2, 3, 2]], \text{rez}[[2, 4, 2]]]}{\text{gN}[\text{rez}[[2, 1, 2]], \text{rez}[[2, 2, 2]], \text{rez}[[2, 3, 2]], \text{rez}[[2, 4, 2]]]}$ ;
  Print["C kroz N = ", CkrozN // N];
]

c = 0
min fC = {29.6268, {x1 → 0.866029, x2 → 0.133971, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {36.316, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.589681, x4 → 0.410319}}
mingN = {0.98756, {x1 → 0.866029, x2 → 0.133971, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.8158, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.589681, x4 → 0.410319}}
 $\frac{\text{maxfC}}{\text{mingN}}$  = 36.7734
rez globalnim kriterijumom =
{0.0203702, {x1 → 0.271702, x2 → 0.0160714, x3 → 0.121062, x4 → 0.591165}}

c = 0 xtab =  $\begin{pmatrix} 0.271702 \\ 0.0160714 \\ 0.121062 \\ 0.591165 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.3
gN[rez] = 1.07667
C kroz N = 30.
```



```

c = 0.01
min fC = {29.9334, {x1 → 0.843014, x2 → 0.146986, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {36.7243, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.608354, x4 → 0.381646}}
mingN = {0.99778, {x1 → 0.843014, x2 → 0.146986, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.83622, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.608354, x4 → 0.381646}}
maxfC
mingN = 36.806
rez globalnim kriterijumom =
{0.0205447, {x1 → 0.342434, x2 → 0.000109481, x3 → 0.151413, x4 → 0.496044}}

c = 0.01    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.342434 \\ 0.000109481 \\ 0.151413 \\ 0.496044 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.6443
gN[rez] = 1.08814
C kroz N = 30.

c = 0.02
min fC = {30.24, {x1 → 0.82, x2 → 0.16, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.1326, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.627027, x4 → 0.352973}}
mingN = {1.008, {x1 → 0.82, x2 → 0.16, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.85663, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.627027, x4 → 0.352973}}
maxfC
mingN = 36.8379
rez globalnim kriterijumom =
{0.0207163, {x1 → 0.249157, x2 → 0.0280105, x3 → 0.135765, x4 → 0.567068}}

c = 0.02    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.249157 \\ 0.0280105 \\ 0.135765 \\ 0.567068 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 32.9886
gN[rez] = 1.09962
C kroz N = 30.

c = 0.03
min fC = {30.5466, {x1 → 0.796986, x2 → 0.173014, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {37.541, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.6457, x4 → 0.3243}}
mingN = {1.01822, {x1 → 0.796986, x2 → 0.173014, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.87705, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.6457, x4 → 0.3243}}
maxfC
mingN = 36.8692
rez globalnim kriterijumom =
{0.020885, {x1 → 0.333587, x2 → 0.00835282, x3 → 0.169991, x4 → 0.458069}}

c = 0.03    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.333587 \\ 0.00835282 \\ 0.169991 \\ 0.458069 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 33.3332
gN[rez] = 1.11111
C kroz N = 30.

c = 0.04
min fC = {30.8532, {x1 → 0.773971, x2 → 0.186029, x3 → 0., x4 → 0.}}
rez globalnim kriterijumom =
{0.0212137, {x1 → 0.378922, x2 → 0.00217096, x3 → 0.203698, x4 → 0.365209}}

c = 0.05    xtab =  $\begin{pmatrix} 0.378922 \\ 0.00217096 \\ 0.203698 \\ 0.365209 \end{pmatrix}$ 

fC[rez] = 34.0214
gN[rez] = 1.13405
C kroz N = 30.

```



```
c = 0.06
min fC = {31.4664, {x1 → 0.727943, x2 → 0.212057, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {38.766, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.70172, x4 → 0.23828}}
mingN = {1.04888, {x1 → 0.727943, x2 → 0.212057, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.9383, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.70172, x4 → 0.23828}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 36.9594$ 
rez globalnim kriterijumom =
{0.021374, {x1 → 0.352954, x2 → 0.0120774, x3 → 0.206921, x4 → 0.368048}}
c = 0.06   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.352954 \\ 0.0120774 \\ 0.206921 \\ 0.368048 \end{pmatrix}$ 
fC[rez] = 34.3656
gN[rez] = 1.14552
C kroz N = 30.
c = 0.07
min fC = {31.773, {x1 → 0.704928, x2 → 0.225072, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.1743, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.720393, x4 → 0.209607}}
mingN = {1.0591, {x1 → 0.704928, x2 → 0.225072, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.95872, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.720393, x4 → 0.209607}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 36.9883$ 
rez globalnim kriterijumom =
{0.0215316, {x1 → 0.354887, x2 → 0.0145835, x3 → 0.217905, x4 → 0.342625}}
c = 0.07   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.354887 \\ 0.0145835 \\ 0.217905 \\ 0.342625 \end{pmatrix}$ 
fC[rez] = 34.7093
gN[rez] = 1.15698
C kroz N = 30.
c = 0.08
min fC = {32.0796, {x1 → 0.681914, x2 → 0.238086, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.5827, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.739066, x4 → 0.180934}}
mingN = {1.06932, {x1 → 0.681914, x2 → 0.238086, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.97913, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.739066, x4 → 0.180934}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 37.0167$ 
rez globalnim kriterijumom =
{0.0216866, {x1 → 0.414405, x2 → 0.00160343, x3 → 0.245129, x4 → 0.258862}}
c = 0.08   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.414405 \\ 0.00160343 \\ 0.245129 \\ 0.258862 \end{pmatrix}$ 
fC[rez] = 35.0537
gN[rez] = 1.16846
C kroz N = 30.
c = 0.09
min fC = {32.3862, {x1 → 0.6589, x2 → 0.2511, x3 → 0., x4 → 0.}}
max fC = {39.991, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.75774, x4 → 0.15226}}
mingN = {1.07954, {x1 → 0.6589, x2 → 0.2511, x3 → 0., x4 → 0.}}
maxgN = {1.99955, {x1 → 0., x2 → 0., x3 → 0.75774, x4 → 0.15226}}
 $\frac{\max fC}{\min gN} = 37.0445$ 
rez globalnim kriterijumom =
{0.021839, {x1 → 0.367578, x2 → 0.0170259, x3 → 0.242567, x4 → 0.282829}}
c = 0.09   xtab =  $\begin{pmatrix} 0.367578 \\ 0.0170259 \\ 0.242567 \\ 0.282829 \end{pmatrix}$ 
fC[rez] = 35.3985
gN[rez] = 1.17995
C kroz N = 30.
```



9.8. IZJAVE AUTORA

Izjava 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom:

„Razvoj modela za integralno upravljanje organskim otpadom primenom principa cirkularne ekonomije“

koja je odbranjena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivala na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredila autorska prava, niti zloupotrebila intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu,

Potpis autora disertacije

Momčilović Ristanović Ana



Izjava 2.

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA DOKTORSKE
DISERTACIJE**

Naslov disertacije:

„Razvoj modela za integralno upravljanje organskim otpadom primenom principa cirkularne ekonomije“

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predala za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu,

Potpis autora disertacije

Momčilović Ristanović Ana



Izjava 3.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

„Razvoj modela za integralno upravljanje organskim otpadom primenom principa cirkularne ekonomije“

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)¹

U Nišu,

Potpis autora disertacije

Momčilović Ristanović Ana

¹ Autor disertacije obavezan je da izabere i označi (zaokruži) samo jednu od šest ponuđenih licenci; opis licenci dat je u nastavku teksta.

10. POPIS SLIKA

Slika 2.1 <i>Leptir dijagram</i>	16
Slika 2.2 <i>Ekonomija krofne</i>	17
Slika 2.3 <i>Poređenje linearne i cirkularne ekonomije</i>	20
Slika 2.4 <i>Faze anaerobne digestije</i>	29
Slika 2.5 <i>Šema tokova materije i energije tokom kompostiranja</i>	32
Slika 2.6 <i>Faze kompostiranja</i>	32
Slika 2.7 <i>Forme nutrijenata tokom procesa kompostiranja</i>	48
Slika 2.8 <i>Kruženje nutrijenata kroz tokove CE</i>	49
Slika 2.9 <i>Prikaz horizontalnih i vertikalnih tokova u cirkularnim lancima vrednosti</i>	51
Slika 3.1 <i>Algoritam za razvoj modela integralnog upravljanja organskim otpadom primenom principa CE</i>	57
Slika 3.2 <i>Vizualizacija fizičkog modela za IUOO primenom principa CE i osnovnih relacija u njemu</i>	60
Slika 5.1 <i>Optimalni odnos mešanja sirovina sa ograničenjem odnosa C/N 20-30 a)za maksimizaciju sadržaja ugljenika b)za minimizaciju sadržaja lignina c)u Pareto optimalnoj tački</i>	96
Slika 5.2 <i>Optimalni odnos mešanja sirovina sa ograničenjem odnosa C/N 25-30 a)za maksimizaciju sadržaja ugljenika b)za minimizaciju sadržaja lignina c)u Pareto optimalnoj tački</i>	97
Slika 5.3 <i>Poređenje prinosa biogasa pojedinačnih supstrata i optimalnih mešavina</i>	98
Slika 5.4 <i>Optimalni odnos mešanja sirovina za odnos C/N 20-30 a)za maksimizaciju sadržaja ugljenika b)za minimalni sadržaj fosfora od 1% c)u Pareto optimalnoj tački</i>	101
Slika 5.5 <i>Optimalni odnos mešanja sirovina za odnos C/N 25-30 a)za maksimizaciju sadržaja ugljenika b)za minimalni sadržaj fosfora od 1% c)u Pareto optimalnoj tački</i>	101
Slika 5.6 <i>Struktura organskog otpada u scenariju a)BS1 b)BS2 c)S1 d)S2 e)S3 f)S4 g)S5</i>	112
Slika 5.7 <i>Struktura organskog otpada u scenariju S6 a)za anaerobnu digestiju b)za kompostiranje</i>	113
Slika 5.8 <i>Struktura organskog otpada u scenariju S7 a)za anaerobnu digestiju b)za kompostiranje</i>	113
Slika 5.9 <i>Struktura organskog otpada u scenariju S8 a)za anaerobnu digestiju b)za kompostiranje</i>	113
Slika 5.10 <i>Količina tretirane organske sirovine [t/god]</i>	114
Slika 5.11 <i>Stepen uključenja organske sirovine [%]</i>	114
Slika 5.12 <i>Curenje materije [t/god]</i>	114
Slika 5.13 <i>Cirkularnost materije [%]</i>	115
Slika 5.14 <i>Cirkularnost energije [%]</i>	115
Slika 5.15 <i>Upoređenje cirkularnosti materije i energije [%]</i>	116
Slika 5.16 <i>Distribucija tretiranog otpada podeljenog prema primenjenom tretmanu [t/god]</i>	116
Slika 5.17 <i>Odnos mešanja supstrata za C/N odnos u rasponu 20-25, a)sadržaj glicerina 0%, b)sadržaj glicerina 1%, c)sadržaj glicerina 2%, d)prinos biogasa [m³/kgVS] u odnosu na sadržaj glicerina</i> ..	121
Slika 5.18 <i>Odnos mešanja supstrata za C/N odnos u rasponu 20-30, a)sadržaj glicerina 0%, b)sadržaj glicerina 1%, c)sadržaj glicerina 2%, d)prinos biogasa [m³/kgVS] u odnosu na sadržaj glicerina</i> ..	122
Slika 5.19 <i>Odnos mešanja supstrata za C/N odnos u rasponu 20-21.4, a)sadržaj glicerina 1% , b)sadržaj glicerina 1,7% , c)sadržaj glicerina 2% , d)eksperimentalni odnos mešanja organskih sirovina e)prinos biogasa [m³/kgVS] u odnosu na sadržaj glicerina</i>	123

11. POPIS TABELA

Tabela 2.1 Karakteristike organskog otpada.....	25
Tabela 2.2 Pregled sirovina pogodnih za anaerobnu digestiju	38
Tabela 2.3 Pregled pogodnih sirovina za kompostiranje	40
Tabela 3.1 Godišnje količine i karakteristike organskih sirovina na razmatranom području	64
Tabela 3.2 Raspoložive količine organskih sirovina u anaerobnoj digestiji i kompostiranju.....	70
Tabela 4.1 Vrste i količine organskog otpada dostupnog u Gradu Nišu i okolini.....	87
Tabela 4.2 Potrošnja dizel goriva za transport otpada u Nišu.....	88
Tabela 4.3 Prosečne mesečne spoljašnje temperature u Nišu	88
Tabela 4.4 Plan istraživanja	90
Tabela 5.1 Optimalni odnos supstrata za odnos C/N u rasponu 20-30.....	96
Tabela 5.2 Optimalni odnos supstrata za odnos C/N u rasponu 25-30.....	97
Tabela 5.3 Optimalni odnos supstrata za odnos C/N u rasponu 20-30.....	101
Tabela 5.4 Optimalni odnos supstrata za odnos C/N u rasponu 25-30.....	102
Tabela 5.5 Godišnji i mesečni energetski bilans zatvorene petlje	104
Tabela 5.6 Ključne karakteristike scenarija BS1	108
Tabela 5.7 Ključne karakteristike scenarija BS2.....	108
Tabela 5.8 Ključne karakteristike scenarija S1	109
Tabela 5.9 Ključne karakteristike scenarija S2	109
Tabela 5.10 Ključne karakteristike scenarija S3	109
Tabela 5.11 Ključne karakteristike scenarija S4	109
Tabela 5.12 Ključne karakteristike scenarija S5	110
Tabela 5.13 Ključne karakteristike scenarija S6	110
Tabela 5.14 Ključne karakteristike scenarija S7	110
Tabela 5.15 Ključne karakteristike scenarija S8	111
Tabela 5.16 Količine nutrijenata tokom transformacije kroz proces kompostiranja	118
Tabela 5.17 Udeo i karakteristike supstrata korišćenih u biogasnom postrojenju „Lazar“	119
Tabela 5.18 Odnos supstrata i prinos biogasa prema primenjenom modelu za odnos C/N u rasponu 20-25, sadržaj glicerina 0-2%	121
Tabela 5.19 Odnos mešanja supstrata i prinos biogasa prema primenjenom modelu za odnos C/N u rasponu 20-30, sadržaj glicerina 0-2%.....	122
Tabela 5.20 Eksperimentalni i modelovani odnos mešanja supstrata i prinos biogasa u digestiji za odnos C/N u rasponu 20-21,4, sadržaj glicerina 1-2%.....	122
Tabela 6.1 Indikatori cirkularne ekonomije za scenarije S6-S8.....	132
Tabela 9.1 Klasifikacija i elementarni sastav organskog otpada u Republici Srbiji.....	153
Tabela 9.2 Klasifikacija organskih oplemenjivača zemljišta	156
Tabela 9.3 Ključni indikatori “Circulytics” okvira.....	158
Tabela 9.4 Indikatori uspešnosti CE prema EU okvirima	159
Tabela 9.5 Karakteristike scenarija BS1-S5	166
Tabela 9.6 Karakteristike scenarija S6-S8	167

12. BIOGRAFIJA AUTORA

Ana Momčilović Ristanović rođena je 9. februara 1992. godine u Nišu, Srbija. Osnovne akademske studije završila je na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu, gde je stekla diplomu iz oblasti mašinskog inženjerstva, usmerenje Energetika i procesna tehnika. Njeno dalje akademsko usavršavanje obuhvatilo je master studije na istom fakultetu, kao i na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, smer inženjerstvo inovacija. Dodatno je završila specijalističke studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, sa fokusom na energetske efikasnost i održavanje objekata.

Trenutno je na doktorskim studijama na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu, gde istražuje razvoj modela za IUOO koristeći principe CE. Njeno istraživanje fokusira se na održiva rešenja za upravljanje otpadom i obnovu resursa u skladu sa savremenim ekološkim principima.

Profesionalnu karijeru započela je kao istraživač stipendista na Mašinskom fakultetu u Nišu. Trenutno radi kao nastavnik na Akademiji strukovnih studija Politehnika u Beogradu, gde drži nastavu iz oblasti cirkularne ekonomije i upravljanja otpadom. Takođe je stekla značajno iskustvo radeći kao specijalista za statistiku i poslovnu analitiku u Moskvi.

Ana Momčilović Ristanović govori engleski, italijanski, nemački i ruski jezik. Njene stručne veštine i sposobnosti razvijale su se i kroz učešće u međunarodnim projektima poput Erasmus+ programa i različitih COST akcija.

Pored profesionalnog angažovanja, Ana je autor brojnih naučnih radova objavljenih u međunarodnim časopisima i prezentovanih na naučnim konferencijama. Njeni radovi obrađuju teme kao što su anaerobna digestija organskog otpada, primena modela cirkularne ekonomije i razvoj održivih tehnologija za zaštitu životne sredine.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
родитеља и име
Датум и место рођења

Момчиловић Ристановић, Јован, Ана
09.02.1992, Ниш

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Примљено: 23.12.2025.

Орг.јед.	Број	Прилог	Вредности
	62-80-291/25		

Основне студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Машинско инжењерство
Инжењер машинства
2010
2013
7,79

Мастер студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Машинско инжењерство
Мастер инжењер машинства
2013
2015
9,56
Машинско инжењерство
Постројење за добијање биогаза из комуналног отпада

Мастер студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Универзитет у Нишу
Машински факултет
Инжењерски менаџмент
Мастер инжењер менаџмента
2016
2017
9,50
Инжењерски менаџмент
Повраћај нутријената из органског дела комуналног отпада применом биолошког третмана отпада

Мастер студије

Универзитет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Заједнички мастер програм - Факултет техничких наука Нови Сад, Универзитет у Новом Саду и Универзитет у Нишу
Инжењерство иновација
Мастер инжењер менаџмента
2017
2018
10,00
Инжењерски менаџмент
Техно-економска анализа постројења за термички третман отпада и издвајање киселих гасова из гасовитих производа термичког третмана отпада

Специјалистичке студије

Универзитет

Универзитет у Београду

Факултет	Грађевински факултет
Студијски програм	Енергетска ефикасност, одржавање и процена вредности објеката у високоградњи
Звање	Специјалиста инжењер енергетске ефикасности у зградарству
Година уписа	2021
Година завршетка	2023
Просечна оцена	9,8
Научна област	Грађевинско инжењерство
Наслов завршног рада	Анализа мера енергетске санације породичне куће у Нишу

Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Машинско инжењерство
Година уписа	2015
Остварен број ЕСПБ бодова	150
Просечна оцена	9,71

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	Развој модела за интегрално управљање органским отпадом применом принципа циркуларне економије
Име и презиме ментора, звање	др Гордана Стефановић, редовни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	НСВ број 8/20-01-005/21-007, 16.06.2021. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	193
Број поглавља	7
Број слика (шема, графикона)	30
Број табела	36
Број прилога	9

ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
	Momčilović A, Stefanović G, Rajković P, Stojković N, Milutinović B, Ivanović M. (2018). <i>The organic waste fractions ratio optimization in the anaerobic co-digestion process for the increasement of biogas yield</i>. Thermal Science, 22 (Suppl. 5), S1525-S1534. https://doi.org/10.2298/TSCI18S5525M	
1.	Рад се бави анализом параметара који утичу на принос биогаса у процесу анаеробне дигестије различитих врста органског отпада. У раду је примењен математички модел заснован на вишекритеријумској оптимизацији, којим је одређен оптимални однос мешања органских сировина у циљу постизања максималног приноса биогаса. Као гранични услови коришћени су однос C/N у опсезу 20-30 и од 25-30 и минималан садржај лигнина. Применом модела на примеру града Ниша одређен је оптималан састав мешавине отпада за третман и очекивани принос биогаса. Momčilović A, Stefanović G, Rajković P, Milutinović B, Savić, D. (2021). <i>Possibility of Organic Waste Inclusion and Implementation in a Closed-Loop System</i>. Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection, 18 (1), 27-37. https://doi.org/10.22190/FUWLEP2101027M	M22
2.	Рад анализира могућност укључивања различитих врста органског отпада генерисаног на једној територији у токове циркуларне економије (ЦЕ). Развијен је и примењен математички модел којим се одређују оптимални односи мешања органских фракција отпада за процесе анаеробне дигестије и компостирања. На основу дефинисаних сценарија и добијених улазно-излазних токова, извршена је процена ефикасности ЦЕ кроз материјалне и енергетске токове, уз идентификацију кључних параметара за одрживо управљање органским отпадом. Stefanović G, Milutinović B, Ivanović M, Momčilović A, <i>Utilization of organic fraction of municipal waste in accordance with the principles of circular economy - A case study</i>, Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection, 2017, Vol. 14, No. 1, pp.1-9 DOI: 10.22190/FUWLEP1701001S	M52
3.	Рад истражује примену принципа циркуларне економије на органски део комуналног отпада, са посебним фокусом на процену могућности његове материјалне и енергетске валоризације у оквиру затворених система управљања отпадом. Анализирани су потенцијали искористићења органске материје кроз биолошке процесе, као и могућности повраћаја материјалних и енергетских токова у систему. Посебна пажња посвећена је идентификацији индикатора који одражавају степен ефикасности циркуларног приступа и квантитативној оцени одрживости система управљања органским отпадом. Резултати указују на значај интегралног приступа у оптимизацији искористићења органског отпада у складу са принципима ЦЕ	M52
4.	Momčilović A, Stefanović G, Milutinović B, Ivanović M, Alsheyab M. A.T, <i>Model of organic waste management in terms of circular economy: case study city of Niš, Proceedings of 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS2017)</i>, 2.-6.7.2017, San Diego, California, USA,	M33

	У овом раду развијен је физички модел управљања органским отпадом који настаје у једном граду, применом постулата ЦЕ. Развијени модел обухвата сакупљање органског дела чврстог комуналног отпада и зеленог отпада са територије једног града, њихов третман процесом анаеробне дигестије и коришћење добијених продуката за задовољење енергетских потреба транспорта и третмана органске сировине. Истраживањем је показано да се у органском отпаду који се генерише на једној територији налази везана довољна количина хемијске енергије неопходне за његов транспорт и третман, односно да је са енергетског аспекта могућа примена принципа ЦЕ у управљању органским отпадом на нивоу једног града.	
5.	Momčilović A, Stefanović G, Savić D, Rajković P, Milutinović B, Čamagić I, Development of mathematical model for optimization of anaerobic co-digestion on the farm organic waste, Proceedings of 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2018), Guimarães, Portugal 2018 Тема овог истраживања је могућност третмана и искоришћења органског отпада који настаје на фарми. Сагледаван је процес анаеробне дигестије на фарми крава, а као доступне органске сировине препознати су крављи екскременти, кукурузна силажа, меласа, сурутка и глицерин који настаје као нуспроизвод производње биодизела. Развијен је математички модел чијим се коришћењем врши оптимизација односа мешања сировина приликом процеса анаеробне дигестије. Резултати добијени овим истраживањем су упоређени са односом мешања органских сировина приликом процеса анаеробне дигестије који се користи у самој постројењу, са циљем верификације модела.	M33
6.	Momčilović A, Stefanović G, Milutinović B, Rajković P, Utilization of organic waste in terms of circular economy, Proceedings of 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2020), ECOS 2020 Organizing Committee, vol. 1, pp. 413 - 423, ISSN: 9781713814061, Osaka, Japan, 29.6.-3.7.2020 У овом раду примењен је физички модел управљања органским отпадом на једној територији, заснован на постулатима ЦЕ, са проширеним обухватом различитих врста органских сировина и сценаријским приступом анализи система. Поред органског дела чврстог комуналног отпада и зеленог отпада, модел укључује и индустријске органске токове, као што су пивски троп и сурутка, који се сакупљају и третирају биолошким процесима. Током истраживања извршено је формирање и анализа више сценарија управљања органским отпадом, при чему је на основу материјално-енергетских биланса омогућена квантитативна оцена перформанси сваког сценарија и могућности увођења различитих органских сировина у токове ЦЕ.	M33
7.	Momčilović A, Stefanović G, Milutinović B, Savić D, Assessment of Possible Organic Waste Inclusion and Implementation in Closed Loop System, (MASING 2020) - Proceedings, Mašinski fakultet Niš, pp. 81-86, ISBN: 978-86-6055-139-1, Niš, Srbija, 9.-10.12.2020 У овом раду представљен је математички модел управљања органским отпадом на једној територији и његово увођење у токове циркуларне економије (систем затворене петље). Приликом спроведеног истраживања извршена је оптимизација односа мешања органских сировина током биолошког третмана (копостирање и анаеробна дигестија). На основу оптималног односа мешања органских сировина приликом копостирања и анаеробне дигестије и препознатих потреба унутар система могуће је израчунати материјално-енергетски биланс затворене петље и израчунати индикаторе који описују ефикасност ЦЕ.	M33
8.	Momčilović A, Stefanović G, Efficient Energy Extraction from Organic Waste in Circular Systems, Proceedings of 37th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2024), ECOS 2024 Organizing Committee ISBN: 978-3-8007-6426-6, Rodos, Grčka, 30.6.-5.7.2024 Рад се бави истраживањем могућности ефикасног добијања енергије из органског отпада применом принципа ЦЕ и биономије. Фокус је на процесу анаеробне дигестије као кључној биолошкој технологији за конверзију органске материје у биогаз. Примењени физички и математички модели који описују токове материје и енергије, оптималне услове процеса и расподелу продуката. Кроз анализу различитих врста органског отпада показан је значај оптимизације односа мешања сировина и управљања енергетским токовима. Резултати указују на висок потенцијал органског отпада као обновљивог енергетског ресурса и основу за затворени систем управљања.	M33
9.	Stefanović G, Momčilović A, Ivanović M, Milutinović B, Izbor optimalnog sadržaja sirovina za biološki tretman organskog otpada, Otpadne vode, komunalni čvrst otpad i opasan otpad, Otpadne vode, komunalni čvrst otpad i opasan otpad, pp. 153 - 159, 978-86-82931-83-6, Brzeće, 27. - 29. 3. 2018 У овом раду дат је преглед количина органских сировина које су погодне за биолошки третман на територији Србије, као и могућности њиховог искоришћења, на основу доступних званичних података. На основу карактеристика и количина органских сировина могуће је утврдити оптималан садржај сировина приликом биолошког третмана са циљем искоришћења количина које настају.	M61

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.	ДА
Кандидат Ана Момчиловић Ристановић поднела је дана 03.03.2021. године Захтев за одобравање теме докторске дисертације под насловом „Развој модела за интегрално управљање органским отпадом применом принципа циркуларне економије“ (број 612-80-25-1/2021). Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној дана 12.03.2021. године, одлуком број 612-167-9/2021 предложило, а Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу на седници одржаној 02.04.2021. године, одлуком број 8/20-01-002/21-022 именовало Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под наведеним насловом, у саставу: др Гордана Стефановић, редовни професор Машинског факултета, Универзитета у Нишу, др Драгиша Савић, редовни професор Технолошког факултета у Лесковцу, Универзитета у Нишу, др Предраг Рајковић, редовни професор Машинског факултета, Универзитета у Нишу, др Предраг Живковић, ванредни професор Машинског факултета, Универзитета у Нишу и др Александар Јововић, редовни професор Машинског факултета, Универзитета у Београду. Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној дана 25.05.2021. године, на основу Извештаја (број 612-80-53/2021) Комисије за оцену научне заснованости теме, под насловом „Развој модела за интегрално управљање органским отпадом применом принципа циркуларне економије“, одлуком број 612-258-9/2021 усвојило тему докторске дисертације и предложило др Гордану Стефановић, редовног професора Машинског факултета у Нишу, за ментора. Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу је на седници одржаној дана 16.06.2021. године, одлуком број 8/20-01-005/21-007 дало сагласност на усвајање теме докторске дисертације, а одлуком број 8/20-01-005/21-008 именовало др Гордану Стефановић за ментора за израду докторске дисертације. Кандидат Ана Момчиловић Ристановић поднела је 20.11.2025. године Захтев за формирање Комисије за оцену и одбрану докторске	

дисертације (број 612-80-153/25). Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној дана 26.11.2025. године, одлуком број 612-340-3/2025 предложило Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације, у саставу: др Гордана Стефановић, редовни професор Машинског факултета, Универзитета у Нишу, др Драгиша Савић, редовни професор Технолошког факултета у Лесковцу, Универзитета у Нишу, др Предраг Рајковић, редовни професор Машинског факултета, Универзитета у Нишу, др Предраг Живковић, редовни професор Машинског факултета, Универзитета у Нишу и др Бојана Бајић, ванредни професор Технолошког факултета Нови Сад, Универзитет у Новом Саду. Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу је на седници одржаној дана 17.12.2025.године, одлуком број 820-01-8/25-24 именовало Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у истом саставу. Кандидат Ана Момчиловић Ристановић је првопотписани аутор једног рада објављеног у часопису са SCI листе, из уже области којој припада тема докторске дисертације, као и првопотписани аутор рада објављеног у часопису Универзитета у Нишу из исте научне области. На основу наведеног, кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације, у складу са Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета Универзитета у Нишу.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

Докторска дисертација има 193 странице, 30 слика, 36 табела и 184 навода литературе, уз списак слика, списак табела и више прилога који допуњују основни текст. Рад је организован у седам поглавља:

1. Увод,
2. Теоријски део истраживања,
3. Модел интегралног управљања органским отпадом са аспекта циркуларне економије,
4. Материјали и методе,
5. Евалуација модела интегралног управљања органским отпадом,
6. Дискусија резултата,
7. Закључак,

и прате га литература, спискови слика и табела, прилози, списак коришћених ознака и кратка биографија аутора. Структура рада логички и методолошки води читаоца од теоријских поставки до финалне валидације модела и у потпуности испуњава прописане академске стандарде.

Прво поглавље представља увод у проблем интегралног управљања органским отпадом у оквиру концепта циркуларне економије (ЦЕ). У њему су дефинисани предмет и циљеви истраживања, постављене истраживачке хипотезе и дата је структура дисертације.

Друго поглавље представља теоријски део истраживања и садржи три међусобно повезане целине. У првој су изложени концепти ЦЕ. У другој целини анализирани су карактеристике органског отпада, биолошки процеси конверзије као што су компостирање и анаеробна дигестија и токови нутријената у природним, антропогеним и циркуларним системима. У трећој целини приказан је систематичан преглед општих и специфичних индикатора ЦЕ релевантних за системе управљања органским отпадом.

У *трећем поглављу* приказан је интегрални модел управљања органским отпадом, који се састоји од физичког и математичког модела. Физички модел дефинише границе система, улазне токове, трансформацију органске материје у процесима третмана и повратне токове у оквиру затворене материјално-енергетске петље. Математички модел омогућава квантитативну и квалитативну анализу односа између улазних параметара, оптималних услова биолошких процеса, материјалних и енергетских биланса и индикатора ЦЕ.

Четврто поглавље садржи опис материјала, метода и експерименталног оквира истраживања. У њему је представљена студија случаја Града Ниша, укључујући карактеризацију доступних органских сировина, дефинисање граница система и опис основних претпоставки. Дат је детаљан план експеримента, на основу кога су дефинисани и описани софтверски алати коришћени за извођење симулација. Поглавље представља методолошку основу за проверу функционисања и применљивости предложеног модела.

Пето поглавље обухвата анализу модела кроз три истраживачке фазе: експлоративну, евалуациону и валидациону. У експлоративној фази врши се провера способности модела да формира оптималне односе мешања сировина за процес анаеробне дигестије и компостирања и могућности затварања материјалних и енергетских токова у систему. Евалуациона фаза састоји се из два дела. У првом делу извршена је провера развијеног модела интегралног управљања органским отпадом кроз различите сценарије управљања отпадом, а његова ефикасност анализирана применом развијених индикатора ЦЕ. У другом делу модел је испитан са аспекта могућности задовољења нутритивних потреба одређене биљне врсте применом компоста добијеног из оптимално дефинисаних мешавина органског отпада. У валидационој фази моделиране вредности упоређене су са подацима реалног система, чиме се потврђују тачност и практична применљивост модела.

Шесто поглавље садржи дискусију резултата у складу са наведеним фазама истраживања. У њему се анализирају добијене оптималне мешавине, материјални и енергетски токови, ефикасност и одрживост различитих сценарија и индикатори ЦЕ. Резултати се тумаче у контексту принципа ЦЕ и у односу на постављене циљеве истраживања.

Седмо поглавље садржи закључке дисертације. Истакнути су кључни научни, методолошки и практични доприноси рада, валидност развијеног модела и препоруке за унапређење и проширење истраживања.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Истраживањем спроведеним у оквиру докторске дисертације кандидат је у потпуности остварио све циљеве постављене у пријави теме. Општи циљ, који се односи на анализу могућности укључивања максималних количина органских сировина у интегрални систем управљања у складу са принципима ЦЕ, у потпуности је реализован кроз развој и примену физичког и математичког модела који описују материјалне и енергетске токове у затвореном систему. Главни циљ истраживања, развој математичког модела интегралног управљања органским отпадом у затвореном систему, такође је остварен. Модел узима у обзир количине и састав локално доступних сировина и материјалне и енергетске потребе система, а његовом применом омогућено је квантитативно праћење повраћаја нутријената и енергије. Кандидат је у потпуности реализовао и све посебне циљеве: развијен је физички модел који приказује кретање материје и енергије у систему, извршен је свеобухватан преглед органских сировина и њихових карактеристика, дефинисани су индикатори ЦЕ релевантни за процену перформанси система,

а модел је валидиран кроз формирање и анализу више сценарија управљања органским отпадом, као и упоређивањем моделованих вредности са подацима биогасног постројења, потврђен као поуздан и применљив. Резултати указују на високу примењивост модела и потпуно остварење постављених циљева.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Резултати докторске дисертације представљају значајан научни и практични допринос развоју и унапређењу управљања органским отпадом применом принципа циркуларне економије. Развијени модел интегралног управљања органским отпадом, заснован на физичком разумевању токова материје и енергије, омогућава формирање оптималних смеша органског отпада које, након одговарајућих третмана, задовољавају енергетске и материјалне потребе система у оквиру затворене петље. Квалитативна и квантитативна ефикасност затворене петље оцењује се применом формираних индикатора ЦЕ. Посебан научни допринос овог истраживања огледа се у могућности формирања оптималних смеша органског отпада у којима је садржај органског фосфора такав да, кроз све фазе трансформације током процеса компостирања, обезбеђује минималне количине доступног фосфора неопходне за задовољење нутритивних потреба одређене биљне врсте. Практични значај истраживања огледа се у могућности примене развијеног модела у различитим територијалним контекстима, што га чини вредним алатом за планирање одрживих система управљања органским отпадом и развој политика заснованих на принципима ЦЕ.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидат је кроз спроведена истраживања и резултате добијене у дисертацији показао да поседује потребна и интердисциплинарно усмерена знања неопходна за израду докторске дисертације. У научно-истраживачком раду кандидат је испољио висок ниво самосталности, систематичности и инвентивности, као и способност да проблеме истраживања сагледа из више углова и приступи њиховом решавању на креативан и оригиналан начин. Резултати до којих је кандидат дошао у дисертацији верификовани су кроз континуално објављивање научних радова на међународним конференцијама и у стручним часописима, при чему је публикован један рад у часопису индексираном на SCI листи.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

Имајући у виду значај и актуелност обрађене теме, као и остварене научне резултате кандидата публиковане у референтним часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације констатују да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан допринос развоју ове научне области. С тим у вези, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу да рад кандидата **Ане Момчиловић Ристановић, спец. инж. енерг. ефик. у зградарству, маст. инж. маш.**, под насловом:

„Развој модела за интегрално управљање органским отпадом применом принципа циркуларне економије“

прихвати као докторску дисертацију и да кандидата позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовању Комисије

НСВ 820-01-8/25-24

Датум именовања Комисије

17.12.2025.

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	др Драгиша Савић, редовни професор	председник	
	Прехрамбена технологија и биотехнологија	Технолошки факултет Лесковац, Универзитет у Нишу	
	(Ужа научна област)	(Установа у којој је запослен)	
2.	др Гордана Стефановић, редовни професор	ментор, члан	
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника	Машински факултет, Универзитет у Нишу	
	(Ужа научна област)	(Установа у којој је запослен)	
3.	др Предраг Живковић, редовни професор	члан	
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника	Машински факултет, Универзитет у Нишу	
	(Ужа научна област)	(Установа у којој је запослен)	
4.	др Предраг Рајковић, редовни професор	члан	
	Математика и информатика	Машински факултет, Универзитет у Нишу	
	(Ужа научна област)	(Установа у којој је запослен)	
5.	др Бојана Бајић, ванредни професор	члан	
	Биотехнологија	Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду	
	(Ужа научна област)	(Установа у којој је запослен)	

Датум и место:

У Нишу, Новом Саду и Лесковцу, 23. 12. 2025.