

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Dinko Đurđević

**MODEL ZA ODABIR TEHNOLOGIJE
ODRŽIVOG ISKORIŠTAVANJA
OTPADNE BIOMASE I OTPADNIH VODA
U SVRHU ENERGETSKE I
MATERIJALNE OPORABE**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2026.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Dinko Đurđević

**MODEL ZA ODABIR TEHNOLOGIJE
ODRŽIVOG ISKORIŠTAVANJA
OTPADNE BIOMASE I OTPADNIH VODA
U SVRHU ENERGETSKE I
MATERIJALNE OPORABE**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Igor Wolf

Komentor: izv. prof. dr. sc. Paolo Blecich

Rijeka, 2026.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Dinko Đurđević

**TECHNOLOGY SELECTION MODEL
FOR SUSTAINABLE ENERGY AND
MATERIAL RECOVERY OF WASTE
BIOMASS AND WASTEWATER**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2026

Mentor: prof. dr. sc. Igor Wolf

Komentor: izv. prof. dr. sc. Paolo Blecich

Doktorski rad obranjen je dana _____ u/na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Tomislav Senčić, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
2. Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
3. Prof. dr. sc. Daniel Schneider, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Zahvala

Zahvaljujem....

SAŽETAK

Doktorski rad bavi se razvojem višekriterijskog modela koji omogućuje donositeljima odluka jednostavniji i učinkovitiji odabir tehnologije gospodarenja otpadom u skladu s načelima kružnog gospodarstva. Polazište istraživanja jest potreba za sustavnim pristupom upravljanju otpadnim tokovima koje se ne mogu reciklirati – digestatom iz bioplinskih postrojenja, otpadnim vodama i otpadnim muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Neuređeno gospodarenje tim tokovima otpada ima negativne posljedice na okoliš i zdravlje ljudi, pa je cilj bio razviti alat koji objektivizira proces odlučivanja.

Temeljni doprinos rada je izrada modela za odabir tehnologije energetske i/ili materijalne oporabe otpada, utemeljenog na višekriterijskoj metodi PROMETHEE. Model integrira tri skupine kriterija – tehnološke, socio-ekonomske i okolišne – te omogućuje prilagodbu parametrima konkretne lokacije. Time se postiže transparentno, usporedivo i ponovljivo vrednovanje različitih tehnoloških rješenja. Model je testiran na primjeru regije Lombardija u Italiji, gdje je analizirano više mogućih tehnologija i scenarija gospodarenja otpadom. Rezultati su pokazali da je optimalno rješenje tehnologija recirkulacije digestata u sklopu bioplinskog postrojenja, što potvrđuje njezinu energetske i ekonomsku isplativost te okolišnu prihvatljivost.

Dodatna vrijednost istraživanja proizlazi iz provedene analize osjetljivosti pomoću GAIA i *Visual Stability Intervals* alata, kojom su određeni rasponi pouzdanosti rezultata i granice stabilnosti odluka. Studija slučaja provedena na stvarnom postrojenju u Lombardiji potvrdila je točnost i praktičnu primjenjivost modela – odabrana tehnologija ostvarila je pozitivnu energetske bilancu i značajne ekonomske uštede.

Rad donosi novi doprinos znanstvenom području održivog gospodarenja otpadom, jer razvijeni model predstavlja fleksibilan, prilagodljiv i jednostavan alat za inicijalni odabir tehnologija oporabe, koji može služiti kao temelj za daljnje tehničko-ekonomske i izvedbene studije. Na taj način omogućuje racionalnije planiranje postrojenja, smanjenje troškova odlučivanja i unaprjeđenje provedbe načela kružnog gospodarstva u praksi.

Ključne riječi: kružno gospodarstvo, gospodarenje otpadom, PROMETHEE metoda, višekriterijsko odlučivanje

SUMMARY

The doctoral thesis deals with development of a multi-criteria decision model that enables decision-makers to select the most suitable waste management technology in accordance with the principles of the circular economy. The research originates from the need for a systematic approach to managing non-recyclable waste streams – digestate from biogas plants, wastewater, and sewage sludge from wastewater treatment plants. Unregulated management of these waste streams has negative effects on the environment and human health, and the goal of this research was to create a tool that objectivizes and simplifies the decision-making process.

The main contribution of the dissertation is the creation of a model for selecting technologies for energy and/or material recovery of waste, based on the PROMETHEE multi-criteria decision-making method. The model integrates three groups of criteria – technological, socio-economic, and environmental – and allows adjustment to the specific parameters of a given location. This approach enables transparent, comparable, and reproducible evaluation of different technological solutions. The model was tested on a real case in the Lombardy region (Italy), where several waste recovery technologies and management scenarios were analyzed. The results indicated that the recirculation of digestate within biogas plants represents the optimal technological solution, providing both economic and environmental benefits.

Additional value of the research arises from the GAIA and Visual Stability Intervals sensitivity analyses, which determined the robustness and stability limits of the obtained results. A case study conducted on an operational plant in Lombardy confirmed the validity and practical applicability of the model – the selected technology achieved a positive energy balance and significant cost savings.

This work contributes to the scientific field of sustainable waste management by providing a flexible, adaptable, and user-friendly model for preliminary technology selection in energy and material recovery processes. The model can serve as a foundation for further feasibility, techno-economic, and implementation studies, supporting more rational planning of waste recovery systems and more effective application of circular economy principles in practice.

Keywords: Circular economy, Waste management, PROMETHEE method, Multiple criteria decision making

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Pregled literature.....	2
1.2. Problem znanstvenog istraživanja	9
1.3. Znanstvena hipoteza	10
1.4. Ciljevi istraživanja.....	10
1.5. Očekivani znanstveni doprinos.....	11
1.6. Svrha i cilj izrade doktorskog rada	12
1.7. Struktura doktorskog rada	16
2. KRUŽNO GOSPODARSTVO	19
3. RAZVOJ MODELA POMOĆU PROMETHEE METODE.....	29
3.1. Osnovne pretpostavke i opisi tehnologija.....	30
3.2. Opis odabranih tehnologija.....	30
3.3. Višekriterijsko odlučivanje u kružnom gospodarenju otpadom.....	33
3.4. Odabir metode	34
3.5. Korištenje metode.....	37
3.6. PROMETHEE rangiranje	44
3.7. GAIA	46
3.8. Odabir kriterija	48
3.8.1. Tehnološki kriteriji	51
3.8.2. Socio-ekonomski kriteriji	53
3.8.3. Okolišni kriteriji	57
3.8.4. Granice sustava.....	59
3.9. Izrada modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe.....	65
3.9.1. Raspon vrijednosti kriterija	65
3.9.2. Postavljanje scenarija i težišta	69
3.9.3. Definiranje modela u PROMETHEE metodi	74
4. PRIMJENA MODELA NA REALNOM PRIMJERU	77
4.1. Uvodne informacije o primjeru Lombardije.....	77
4.2. Unos podataka u model	83
4.3. Rezultati primijenjenog modela: opcija a.....	91
4.3.1. Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Javnost: opcija a</i>	91

4.3.2.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Tehnički aspekt: opcija a</i>	92
4.3.3.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Okoliš: opcija a</i>	94
4.3.4.	Rezultati izrađenog modela – ukupni rezultat: opcija a	96
4.4.	Rezultati primijenjenog modela: opcija b.....	108
4.4.1.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Javnost: opcija b</i>	108
4.4.2.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Tehnički aspekt: opcija b</i>	109
4.4.3.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Okoliš: opcija b</i>	111
4.4.4.	Rezultati izrađenog modela – ukupni rezultat: opcija b	113
5.	KORIŠTENJE UMJETNE INTELIGENCIJE U ODABIRU TEHNOLOGIJA ..	123
6.	ZAKLJUČAK	125
7.	POPIS LITERATURE	131
	PRILOZI.....	147
	PRILOG I – OPIS TEHNOLOGIJA	147
	I.1. Izravna poljoprivredna uporaba digestata i mulja.....	147
	I.2. Materijalna uporaba (proizvodnja bio-gnojiva: struvit, kompost).....	149
	I.3. Recirkulacija digestata bioplinskog postrojenja	152
	I.4. Anaerobna digestija mulja	156
	I.5. Termička obrada – izgaranje.....	159
	I.6. Dizalice topline	161
	PRILOG II. ANALIZA OSJETLJIVOSTI.....	165
	Ila. Analiza osjetljivosti – opcija a.....	165
	Iib. Analiza osjetljivosti – opcija b	177
	PRILOG III. Popis tablica	185
	PRILOG IV. Popis slika	186
	PRILOG V. Popis objavljenih znanstvenih radova	188
	PRILOG VI. Životopis autora i popis objavljenih radova.....	189

Popis skraćenica

Kratika	Puni naziv
AD	Anaerobna digestija
AI	Artificial Intelligence (umjetna inteligencija)
AHP	Analytical Hierarchy Process (analitički hijerarhijski proces)
BDP	Bruto domaći proizvod
BREF	Best Available Techniques Reference Document (referentni dokument o najboljim raspoloživim tehnikama)
°C	Stupanj Celzijev
CAPEX	Capital Expenses (kapitalni troškovi)
CBA	Cost-Benefit Analysis (analiza isplativosti)
CGO	Centri za gospodarenje otpadom
CH ₄	Metan
CMUR	Circular Material Use Rate (stopa kružnog korištenja materijala)
CO ₂	Ugljikov dioksid
CO _{2eq}	Ekvivalent ugljikovog dioksida
COP	Coefficient of Performance (koeficijent učinkovitosti)
EBPR	Enhanced Biological Phosphorus Removal (pojačano biološko uklanjanje fosfora)
EK	Europska Komisija
ES	Ekvivalent stanovnika
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality (Metoda eliminacije i izbora koja odražava stvarnost)
EUR	Euro
EU	Europska unija
FAO	Food and Agriculture Organization (Organizacija Ujedinjenih naroda za prehranu i poljoprivredu)
FiT	Feed in Tariff (poticajna otkupna cijena)
g	Gram
GAIA	Geometrical Analysis for Interactive Aid (Geometrijska analiza za interaktivnu potporu odlučivanju)
GWP	Global Warming Potential (potencijal globalnog zagrijavanja)
H ₂	Vodik
HCl	Klorovodik
H ₂ S	Vodikov sulfid
HTC	Hydrothermal carbonization (hidrotermalna karbonizacija)
IFF	Implementation Feasibility Factor (faktor provedbene izvedivosti)
IRR	Internal Rate of Return (interna stopa povrata)
K	Kalij
kg	Kilogram
km	Kilometar
kWh	Kilovatsat
L	Litra
LCA	Life Cycle Assessment (procjena životnog ciklusa)
LCC	Life Cycle Cost (trošak životnog ciklusa)
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment (provjera održivosti životnog ciklusa)
m ³	Kubnih metara

Kratika	Puni naziv
MBO	Mehaničko-biološka obrada
MDCM	Multiple Criteria Decision Making (višekriterijsko odlučivanje)
MKO	Miješani komunalni otpad
Mtoe	Milijun tona naftnog ekvivalenta
MW	Megavat
N	Kemijski simbol za dušik
NIMBY	Not In My Backyard (ne u mom dvorištu)
NO _x	Dušikovi oksidi
NPV	Net Present Value (neto sadašnja vrijednost)
OIE	Obnovljivi izvori energije
OPEX	Operational expenses (operativni troškovi)
P	Kemijski simbol za fosfor
P ₂ O ₅	Fosforov (V) oksid
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation (Metoda organizacije rangiranja preferencija za višekriterijsko vrednovanje)
RRI	Regulatory Readiness Index (indeks regulatorne spremnosti)
S	Sumpor
S-LCA	Social Life Cycle Assessment (Socijalna procjena životnog ciklusa)
SNCR	Selektivna ne-katalitička redukcija
SO ₂	Sumporni oksid
ST	Suha tvar
TRL	Technology Readiness Level (razina tehnološke spremnosti)
TWh	teravatsat
UK	Ujedinjeno Kraljevstvo
UPOV	Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda
VS	Volatile solid (hlapiva kruta tvar)
WtE	Waste-to-Energy (otpad u energiju)
WRRF	Water Resource Recovery Facility (postrojenje za oporabu resursa)

1. UVOD

Zemlje širom svijeta sve se više koncentriraju na metode koje će unaprijediti upotrebu obnovljivih izvora energije (OIE) (npr. energija sunca, vjetra, biomase), kao i na postizanje čišće i učinkovitije potrošnje energije. Navedeni proces je rezultat povećanog pritiska od strane različitih inicijativa, poput poziva na energetske uštede, smanjenje emisija onečišćenja i razvoj održivih gospodarstava. Ovaj pritisak usmjerio je pažnju i prema obradi otpadnih tokova koje je moguće energetski i materijalno oporabiti, kako bi se u sklopu kružnog gospodarstva (engl. *Circular Economy*) smanjio pritisak na okoliš (u pogledu rudarenja sirovina, onečišćenja okoliša putem emisija stakleničkih plinova, ispuštanja onečišćenja u vodotoke i slično).

Procesima globalizacije, urbanizacije i podizanja životnog standarda građana, dolazi do povećanja količina komunalnog i industrijskog otpada, proizvedene otpadne vode te smanjenja slobodnog prostora unutar urbanih centara. Energetska učinkovitost i zaštita okoliša su zbog navedenog u posljednjih nekoliko godina postali vrlo značajni na globalnoj razini. Kako bi se spriječio daljnji intenzivan proces globalnog zatopljenja i emisija stakleničkih plinova, potrebna je upotreba otpadnih tokova, poput biomase i komunalnog otpada, kao novih energetskih i sirovinskih izvora.

Proizvedeni otpad se uglavnom sortira za proces recikliranja, a otpad koji nije moguće reciklirati se u visokom postotku odlaže na odlagališta ili koristi u energanama na otpad kao gorivo u svrhu proizvodnje energije. Odlaganje uzrokuje konstantno i značajno smanjenje prostora te ima negativan utjecaj na okoliš (emisije stakleničkih plinova iz otpada, kao i otpadni tokovi u vode i tlo). Jedan od najvećih problema odlaganja je biorazgradivi otpad, koji je moguće energetski oporabiti. Izvješće od strane Organizacije Ujedinjenih naroda za prehranu i poljoprivredu (FAO, eng. Food and Agriculture Organization) iz 2011. godine prikazalo je kako se odlaže najmanje 33% globalnih zaliha hrane (1,3 milijarde tona otpada od hrane) na godišnjoj razini. Ukoliko bi se taj otpad iskoristio u proizvodnji bioplina, moguće je dobiti prinos bioplina do 367 m³ po toni suhe tvari (ST), sadržaja 6,25 kWh/m³, čime bi se dobilo 894 TWh_{el} energije godišnje. Ova količina energije zadovoljavala bi potrebe električne energije 5% svjetske populacije [1]. Iako je u navedenom primjeru prikazana energetska uporaba otpadne hrane, sličan zaključak moguće je napraviti i za otpad iz proizvodnih tokova, poput otpadnog mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) i digestata iz bioplinских postrojenja, ali i izravno iz otpadnih voda. Navedeni tokovi su čak i zanimljiviji u kontekstu energetske i materijalne uporabe, iz razloga što razvojem gospodarstava, njihove količine rastu, za razliku od otpadne hrane, čiji je cilj drastično smanjenje. Također, otpadni mulj, otpadna voda i digestat sadrže znatne količine vrijednih i hranjivih tvari koje je moguće materijalno oporabiti te na taj način doprinijeti smanjenju vađenja svježih sirovina iz rudnika (npr. fosfor, kalij).

Prelazak na gospodarstvo koje je u većoj mjeri kružno i u kojem se vrijednost proizvoda, materijala i resursa što je dulje moguće zadržava u gospodarstvu, a stvaranje otpada svodi na najmanju moguću mjeru, bitan je doprinos naporima Europske unije (EU) za razvoj održivog i konkurentnog gospodarstva s niskim emisijama ugljika, u kojem se resursi iskorištavaju učinkovito. Ako se nastanak otpada ne može spriječiti ili isti nije moguće reciklirati, u većini slučajeva ga je bolje energetski i materijalno oporabiti nego odložiti na odlagalište. Stoga proizvodnja energije iz otpada i njegova materijalna uporaba mogu imati važnu ulogu pri

stvaranju sinergija s energetsom i klimatskom politikom EU, ali se taj proces mora ravnati prema načelima hijerarhije otpada.

Hijerarhijom otpada utvrđuje se redoslijed prioriteta od sprečavanja nastanka otpada, njegove pripreme za ponovnu uporabu, recikliranja i oporabe energije do odlaganja. Na taj način se ostvaruje sustav koji vraća vrijedne materijale u gospodarstvo, čime se zatvara ciklus kruženja vrijednih materijala i energije te smanjuje negativan učinak na okoliš (prvenstveno klimatske promjene). Odluka o odabiru sustava gospodarenja otpadom značajno ovisi o geografskom položaju i situaciji svake lokacije, a donositelji odluka daju konačnu riječ. Kako bi se donositeljima odluka olakšao odabir tehnologije za zbrinjavanje otpada, koja je specifična za svaku lokaciju, potrebno je izraditi model koji će im pomoći prilikom odabira, a kojim će se pokriti ključni aspekti svake tehnologije.

1.1. Pregled literature

Mnogi su radovi posvećeni tematici održivog gospodarenja otpadom. Prvotni radovi bili su orijentirani prema definiranju vrsta otpada koje se odlažu na odlagališta i njegovim karakteristikama te samom upravljanju otpadom u različitim državama. Tako su Sakai et al. [2] 1996. godine definirali pojam „hijerarhije gospodarenja otpadom“ i ustanovili kako svaka zemlja polako usvaja vlastitu inicijativu gospodarenja otpadom. Morrissey i Browne [3] su dva desetljeća kasnije istražili postojeće modele gospodarenja otpadom te prikazali njihove prednosti i nedostatke. Sličan pristup imali su i Ekvall et al. [4] u svojem radu, gdje su istražili koristi i mane pristupa analize životnog ciklusa unutar sektora gospodarenja otpadom. Problematiku različitih pristupa gospodarenju otpadom obradili su Buclet i Godard [5], koji su prikazali razlike u razvoju sustava gospodarenja otpadom u pet različitih europskih zemalja, nastavno na donošenje EU Direktive o ambalažnom otpadu, iz 1994. godine. Daljnja istraživanja proveli su i Wilson et al. [6], koji su prikazali razvoj i napredak u pogledu gospodarenja otpadom, primjenom zakonodavnih okvira i pristupa „integriranog i održivog gospodarenja otpadom“. Provedena su također brojna istraživanja koja su se bavila tematikom održivih sustava gospodarenja otpadom i njegovog razvoja u ostatku svijeta [7, 8, 9, 10].

Mnoga su istraživanja bila okrenuta prema iskorištavanju otpada u energetske svrhe, prilikom čega se uglavnom razmatrala učinkovitost postrojenja u svrhu što veće proizvodnje električne i toplinske energije: Abu-qudais i Abu-qdais [11] su prikazali energetske vrijednosti komunalnog otpada u Jordanu; Tsai i Chou [12] su proveli istraživanje na Tajvanu; dok su Zhang et al. [13] proveli pregled mogućnosti energetske oporabe komunalnog otpada u Kini. Iz radova je moguće uočiti kako se u većini slučajeva razmatrala mogućnost energetske oporabe miješanog komunalnog otpada procesima izgaranja, no razmatrana je i mogućnost energetske oporabe u sklopu drugih tehnologija (anaerobna digestija (AD), kompostiranje, piroliza, itd.) [14, 15, 16].

Međutim, razvojem tehnologija i osvještavanjem o globalnim utjecajima klimatskih promjena, fokus se preusmjerio na održivo gospodarenje otpadom sa što manjim negativnim utjecajem na okoliš. Time se povećao pritisak na istraživanja alternativnih metoda koje imaju što manji utjecaj na klimatske promjene te potražnja za novim i manje štetnim izvorima energije. U

skladu s navedenim, središta istraživanja postaju razne studije utjecaja energetske uporabe otpada na okoliš [17, 18, 19]. Recikliranje otpada i ponovna uporaba predmeta dobivaju sve više na značaju te se teži smanjenju količina nastalog miješanog komunalnog otpada. Nowak-Marchewka et al. [20] su izradili analizu primjene koncepta kružne ekonomije u Poljskoj, Nizozemskoj i Rumunjskoj, koja je istaknula različite nacionalne pristupe i ključne prepreke. Utvrđeno je da je stopa upotrebe sekundarnih sirovina u Poljskoj porasla s ~9,9% (16,6 milijuna tona) 2015. na 12,2% (21,3 milijuna tona) u 2022. zahvaljujući poboljšanju sustava recikliranja i povećanoj svijesti građana. Autori naglašavaju važnost usklađivanja nacionalnih politika s EU smjernicama te ulaganja u inovativne tehnologije za održivo upravljanje otpadom.

Međutim, i dalje je prisutan problem preostalog otpada (proizvodni, industrijski), kojeg nije moguće zbrinuti u centrima za gospodarenje otpadom, gdje se zbrinjava komunalni otpad. U ovu kategoriju pripadaju biorazgradivi otpad u obliku digestata (anaerobna digestija u bioplinskim postrojenjima) te otpadne vode i otpadni mulj s UPOV-a. Takav otpad se može smatrati obnovljivim izvorom energije te ima ključnu ulogu u tranziciji prema kružnom gospodarstvu omogućujući uspostavu modela „resurs-proizvod-obnovljivi resurs“. Aktivno uključivanje biomase u kružne energetske modele, uz odgovarajuće političke mjere, može dovesti do većeg uključivanja krajnjih korisnika kao *prosumera*¹ te povećati učinkovitost iskorištavanja resursa uz istovremeno smanjenje otpada [21]. Navedene otpadne tokove moguće je energetski i materijalno oporabiti te su se znanstvena istraživanja okrenula pronalasku optimalnih (okolišno, tehnički i ekonomski održivih) metoda kako postići što veće energetske i materijalne iskorištenje iz navedenih otpadnih tokova. Na temelju provedenih istraživanja u području energetske uporabe otpadne biomase, dokazano je kako se ista može koristiti u proizvodnji energije [22, 23], ali i za materijalnu uporabu [24, 25].

Tako su Allegrini et al. [26] proveli su procjenu životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA) kako bi analizirali okolišni utjecaj iskorištavanja pepela nastalog spaljivanjem biorazgradivog komunalnog otpada u materijalnoj uporabi, s posebnim naglaskom na primjenu u građevinskoj industriji. Pubule [27] je razvila metodologiju za čišću proizvodnju energije iz biootpada pomoću višekriterijske i regresijske analize. Tonini [28] je primijenio LCA kako bi procijenio optimalne uvjete okolišno i energetski optimalne upotrebe biorazgradivog otpada. Sva navedena istraživanja su pokazala kako je energetska primjena biorazgradivog otpada okolišno prihvatljiva te ekonomski i tehnički održiva.

Požgaj et al. [29] su definirali kako ciljevi EU u pogledu smanjenja količina otpada neće biti zadovoljeni na vrijeme te je potrebno uvesti nove tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova (naročito za biorazgradivi i plastični otpad). Međutim, kako bi se ostvarili navedeni ciljevi, potrebno je definirati koje će se tehnologije koristiti, kako bi se zadovoljili ekonomski, tehnički i okolišni uvjeti rada postrojenja. Na tu tematiku je izrađen značajan niz radova. Tsai i Chou [12] su proučavali utjecaj tehnologije spaljivanja i pirolize biorazgradivog dijela komunalnog i industrijskog otpada u svrhu smanjenja pritiska na odlagališta. Dobiveni rezultati su prikazali kako je korištenje tehnologije termalne obrade otpada u svrhu energetske uporabe imalo značajan pozitivan utjecaj na emisije stakleničkih plinova te smanjenje opterećenja na odlagalištima. Tematiku termičke obrade otpada obrađivali su i Werle i Wilk [23], koji su u svom radu istražili mogućnosti energetske uporabe otpadnog mulja s UPOV-a.

¹ Prosumer (od engl. *producer* + *consumer*) je potrošač koji istovremeno sudjeluje u proizvodnji proizvoda, usluga ili sadržaja.

Na primjeru Poljske su prikazali kako je potrebno usmjeriti zakonodavni okvir prema otvaranju mogućnosti korištenja naprednih tehnologija energetske oporabe otpada (piroliza, rasplinjavanje), u svrhu iskorištavanja potencijala otpada te smanjenja opterećenja na odlagališta i okoliš. Münster i Meibom [30] su korištenjem *Balmorel* modela na području Njemačke i skandinavskih zemalja otkrili kako je još uvijek najisplativije rješenje kogeneracijsko spaljivanje otpada, u usporedbi s drugim tehnologijama (AD, rasplinjavanje, su-spaljivanje). Slični rezultati dobiveni su i istraživanjem Schneider et al. [31], dok su Perrot i Subiantoro [32] za slučaj Novog Zelanda dobili kao najpovoljnije rješenje upotrebu procesa AD u svrhu energetske oporabe otpada. Sukladno tome, u više radova je prikazano kako je potrebno prilagoditi sustav energetske oporabe otpada zemlji i lokaciji u kojoj se ona izvršava [33, 34, 35].

U pogledu materijalne oporabe otpada koji preostaje nakon procesa recikliranja i ponovne uporabe predmeta (procesi koji prethode materijalnoj uporabi prema hijerarhiji gospodarenja otpadom), istraživanja su provedena u svrhu poboljšanja postojećih procesa. U tom pogledu, otpadni mulj s UPOV-a se pokazao kao vrlo zanimljivo područje za istraživanja i mogućnosti razvoja novih tehnologija. Appels et al. [22] proučavali su mogućnost iskorištavanja otpadnog mulja s UPOV-a u procesu AD, ali i iskorištavanje digestata nastalog tijekom procesa. Fytli i Zabaniotou [36] prikazali su mogućnost korištenja otpadnog mulja u poljoprivredi, u svrhu gnojenja. Međutim, s obzirom na spojeve koji se nalaze u otpadnom mulju, potrebno je isti obraditi prije primjene na poljoprivrednim površinama. Analiza zakonodavnog okvira za korištenje mulja na poljoprivrednom zemljištu u EU-28, koju su napravili Koumoulidis et al. [37], naglašava razlike među državama. Utvrđeno je da većina mulja u EU završi na poljima, dok trećina ide u proces izgaranja. Također, autori ističu da je Direktiva o mulju (86/278/EEZ) zastarjela te da nacionalni propisi često uvode strože limite za teške metale od EU Direktive. Sukladno navedenom, unaprjeđenje EU okvira treba ići prema strožem nadzoru mulja na tlu uz poticanje povrata kritičnih sirovina (poput fosfora) iz mulja, korištenjem naprednih tehnologija. U tom kontekstu se razvio niz znanstvenih istraživanja koja su se koncentrirala na mogućnosti uklanjanja nepogodnih spojeva koji se nalaze u mulju, a da se pritom iskoriste i njegova energetska i materijalna komponenta. Hossain et al. [38] su prikazali kako je korištenje bio-ugljena (engl. *biochar*), nastalog iz procesa rasplinjavanja otpadnog mulja, pogodan za gnojenje poljoprivrednih površina, tj. uzgoj ispitivanih kultura. Takahashi et al. [39] su razvili tehnologiju za kemijsku oporabu hranjivih tvari (fosfor) iz pepela nastalog spaljivanjem otpadnog mulja. Također su rađena ispitivanja i na digestatu iz bioplinskih postrojenja: Ibarolla et al. [40] su otkrili kako je moguće koristiti bio-ugljen dobiven rasplinjavanjem digestata u svrhu gnojenja poljoprivrednih površina, dok su Monlau et al. [41] dobili slične rezultate koristeći proces pirolize.

U novijoj literaturi otpadna voda se sve češće promatra kao sekundarni izvor energije i hranjivih tvari, a UPOV-i konceptualno se razvijaju prema postrojenjima za oporabu resursa (engl. *Water Resource Recovery Facilities*, WRRF). U tom kontekstu, razvila su se dva smjera istraživanja oporabe otpadne vode: materijalno i energetske iskorištavanje. Prvi smjer odnosi se na energetske oporabu niskotemperaturne topline iz otpadne vode, najčešće kombinacijom izmjenjivača topline i dizalice topline [42, 43]. Sustavni pregledi pokazuju da se oporaba topline može razmatrati na više razina (od pojedinačnih zgrada i dijelova kanalizacijske mreže do samog UPOV-a), pri čemu su ključni faktori raspoloživi protok i temperaturni profil te integracija s krajnjim potrošačem (npr. daljinsko grijanje). Tako su Đurđević et al. [44] prikazali da se toplina iz otpadne vode može kvantificirati i pozicionirati kao relevantan resurs za gradske

toplinske sustave. Kroz analizu za grad Rijeku prikazan je potencijal značajnijeg pokrivanja toplinskih potreba uz konceptualno povezivanje kanalizacijskih tokova i dizalica topline s daljinskim grijanjem. Chae i Ren [45] su prikazali da sustavi dizalica topline na komunalnim otpadnim vodama mogu postići stabilne vrijednosti koeficijenta učinkovitosti u rasponu tipičnom za niskotemperaturne izvore, pri čemu su u terenskim ispitivanjima zabilježene vrijednosti koeficijenta učinkovitosti (engl. *Coefficient of Performance*, COP) približno 4 za režim grijanja i oko 3,6 za režim hlađenja, uz naglašene prednosti stabilnijeg temperaturnog izvora u odnosu na vanjski zrak. Dodatno, Łokietek et al. [46] su na razini UPOV-a dokazali da se potencijal uporabe može procijeniti relativno robusno na temelju nekoliko operativnih parametara (protok, temperatura otpadne vode i zahtijevana temperatura na strani potrošača), čime se tehnologija pozicionira kao praktična mjera za dekarbonizaciju toplinske potrošnje, osobito u urbanim sustavima. No, otpadnu vodu je moguće i dodatno energetski oporabiti – u pogledu rashladne energije. Tako su Aprile et al. [47] razvili i konceptualne modele integracije uporabe topline iz kanalizacije u niskotemperaturne mreže grijanja i hlađenja, pri čemu se naglašava uloga upravljanja i optimizacije režima rada (*power-to-heat/cool*) za povećanje ukupne učinkovitosti sustava. Međutim, Golzar i Silveira [48] su u svom radu naglasili da se uporaba topline iz otpadne vode ne smije promatrati isključivo na razini pojedinačne zgrade ili izoliranog tehničkog rješenja, već kao element šireg urbanog energetskog sustava. Posebno ističu da masovna implementacija decentraliziranih sustava (npr. dizalice topline u zgradama, koje su spojene na kanalizacijski kolektor) može imati neplanirane posljedice na centralizirane sustave daljinskog grijanja i na ukupnu energetske bilancu grada.

Drugi smjer odnosi se na materijalnu uporabu hranjivih tvari iz tekuće faze, pri čemu je kristalizacija struvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) jedna od najrazvijenijih metoda za uporabu fosfora i dijela dušika, posebno iz koncentriranih povratnih tokova. Tako su Le Corre et al. [49] u svom radu detaljno i sustavno prikazali sve ključne faktore na učinkovitost uporabe i operativnu stabilnost procesa: utjecaj pH, stehiometriju magnezija, prisutnost konkurentskih iona (npr. Ca^{2+}), koncept reaktora (fluidizirani sloj, miješani reaktori) i svojstava produkta. S obzirom na to da se radi o kemijskom procesu, u radu je prikazano kako bilo kakva izmjena jednog od navedenih parametara, može doprinijeti povećanju (ili smanjenju) doprinosa struvita. Isto su potvrdili i Cornel i Schaum [50] u svojem radu. Saerens et al. [51] su potvrdili da implementacija postrojenja za proizvodnju struvita, uz uporabu dijela ulaznog fosfora, može donijeti i operativne koristi kroz smanjenje neželjenog taloženja i poboljšanje odvodnjavanja mulja. Njihovo istraživanje je također pokazalo kako se dobiveni struvit može plasirati kao sirovina za gnojiva.

Važan i noviji trend u literaturi je premještanje fokusa sa “koliko fosfora je moguće izdvojiti” prema integriranom vrednovanju tehnologija uporabe fosfora (tehnoški–okolišno–ekonomski), jer se sustavi za proizvodnju struvita u praksi uvode u postrojenja koja imaju različite konfiguracije uklanjanja fosfora (kemijsko taloženje, EBPR², kombinirani pristupi) i različite režime obrade mulja. Tako Egle et al. [52] u svojoj komparativnoj procjeni tehnologija uporabe fosfora iz komunalnih sustava naglašavaju da je otpadna voda (i/ili tokovi povezani s njom) “rezervoar” fosfora. Međutim, ostvariva stopa uporabe i troškovna struktura se bitno mijenjaju ovisno o tome iz koje se faze (tekuća faza, mulj, pepeo) fosfor izdvaja, kao i o zahtjevima za čistoću produkta i tržišnoj supstituciji primarnih gnojiva. Kako bi se izbjegli

² engl. Enhanced Biological Phosphorus Removal (pojačano biološko uklanjanje fosfora iz otpadne vode pomoću specifičnih mikroorganizama, bez (ili uz minimalnu) primjenu kemijskog taloženja).

nedostaci u proizvodnji struvita (povezani sa velikom količinom mogućih parametara), razvijaju se modeli integracije ovakvih procesa u simulacijske platforme, čime se olakšava procjena utjecaja struvit uporabe na liniju mulja i ukupnu bilancu postrojenja pri različitim pogonskim režimima [53].

Po pitanju samog digestata iz bioplinskih postrojenja, Kovačić et al. [54] su napravili pregled njegovog postupanja u EU i izvijestili da se godišnje proizvede oko 180 milijuna tona digestata, od čega je oko 120 milijuna tona poljoprivrednog podrijetla (gnojiva i energetske usjevi). Oko 46 milijuna tona potječe iz komunalnog biootpada, oko 7 milijuna tona iz odvojeno prikupljenog biootpada, a samo oko 1,7 milijuna tona iz mulja UPOV-a. Većina digestata (preko dvije trećine) direktno se koristi na poljima kao gnojivo. Digestat iz bioplinskih postrojenja najčešće se koristi kao biološko gnojivo u poljoprivredi, no ovisno o načinu primjene potrebna je odgovarajuća dorada (npr. odvajanje čvrste i tekuće faze, dehidracija, biološki ili termički postupci). Bez pravilnog tretmana, ispuštanje digestata može uzrokovati značajne negativne utjecaje na okoliš, što naglašava potrebu za adekvatnom obradom prije konačne uporabe [55]. Njihov rad pregledno opisuje i tehnologije obrade digestata (npr. kompostiranje, separacija, membrane) te navodi da su glavni ciljevi obrade smanjenje volumena i izdvajanje koncentriranih nutrijenata. Digestat predstavlja značajan sekundarni izvor hranjiva (sadrži oko 0,5–0,6 milijuna tona dušika i oko 0,4–0,5 milijuna tona fosfora godišnje u EU), a očekuje se višestruki porast do 2050. godine zbog ubrzanog povećanja broja bioplinskih postrojenja. To otvara veliki prostor za njegovo ponovno korištenje, ali uz značajne mjere opreza. Naime, studija recirkulacije krute frakcije digestata [56] pokazala je da ponovna digestija može povećati energetske iskoristivi bioplin, ali upozorava na ograničenja: akumulacija amonijaka i soli u reaktoru može inhibirati metanogenezu³ i otežati vođenje procesa. Autori navode da je ključ uspjeha pažljiva optimizacija parametara i kontrola inhibirajućih tvari. Iako je recirkulacija digestata povećala proizvodnju bioplina i biometana do ~20% u nekim slučajevima, energetska bilanca može postati nepovoljna ako proces recirkulacije troši više energije nego što dodatni bioplin donosi.

Nadalje, Zielińska i Bulkowska [57] naglašavaju da se digestat, nusprodukt bioplinskih postrojenja, može valorizirati raznim tehnologijama u kružno-gospodarskom kontekstu. Primjerice, precipitacija struvita⁴ i uklanjanje (tzv. *stripiranje*) amonijaka iz digestata izdvajaju fosfor i dušik te ih pretvaraju u gnojivo. Novije metode, poput uzgoja mikroalgi na tekućem digestatu, kompostiranja i vermikompostiranja⁵ čvrste frakcije, pirolize digestata u *biochar* (bio-ugljen) te primjene membranskih filtracija omogućuju dodatnu uporabu hranjivih tvari i organske tvari iz digestata. Integracijom tih postupaka značajno se podiže održivost procesa AD, smanjuje količina otpada i proizvode sekundarne sirovine (biološkog gnojiva), u skladu s principima kružnog gospodarstva. Mikusińska et al. [58] demonstrirali su prednosti hidrotermalne karbonizacije (engl. *Hydrothermal Carbonisation*, HTC) digestata kao metode za zbrinjavanje mokrog digestata. U procesu HTC-a digestat se pri povišenoj temperaturi i tlaku izravno pretvara u čvrsti *hydrochar* (hidro-ugljen) koji zadržava hranjive elemente (N, P, K) te se može koristiti kao gorivo ili poboljšivač tla, dok se tekuća faza može dalje obraditi. Ključno je da HTC eliminira potrebu za sušenjem ulaznog materijala i istovremeno dezinficira digestat

³ biokemijski proces nastajanja metana (CH₄) djelovanjem metanogenih mikroorganizama u anaerobnim uvjetima (bez prisutnosti kisika).

⁴ proces kemijskog taloženja fosfora iz tekućih tokova (npr. digestata ili otpadnih voda) u obliku minerala struvita: magnezijevog amonijevog fosfata heksahidrata (MgNH₄PO₄·6H₂O).

⁵ biološki proces razgradnje organske tvari uz pomoć glista i mikroorganizama.

i smanjuje njegov volumen, čineći ovu tehnologiju vrlo pogodnom za gospodarenje digestatom u bioplinskim postrojenjima.

Također, potrebno je razmotriti i integriranu obradu otpada, kombinirajući nekoliko tehnologija, kako bi se postigla maksimalna iskoristivost otpadnih tokova. Tako su Zhang et al. [59] proveli LCA analizu za četiri načina obrade biološkog otpada te utvrdili da je spoj termofilne digestije⁶ i naknadne pirolize digestata (700 °C) najpovoljniji scenarij. Ova integrirana opcija rezultirala je najnižim utjecajem na klimatske promjene i formiranje finih čestica, a uz to je pokazala i ekonomsku prednost naspram ostalih razmatranih scenarija obrade.

Navedeni otpadni tokovi se već na europskoj (ali i globalnoj) razini koriste, no prethodno su napravljene mnoge studije kojima bi se dokazala učinkovitost postrojenja energetske i materijalne uporabe otpada, a koje imaju visoku cijenu. Kako je odgovornost donositelja odluka hoće li primijeniti tehnologiju u svojoj regiji/gradu, potrebno je izraditi model koji će olakšati donošenje prvotne odluke o pristupanju izgradnji postrojenja za energetske i/ili materijalnu uporabu otpada.

Pregledom literature uočeno je kako postoje razne metode koje služe za olakšavanje odabira tehnologije, lokacije, procesa, itd., za donositelje odluka. Većina izrađenih modela prilagođena tematici otpada temelji se na obradi i zbrinjavanju komunalnog otpada. Tako su Bhander et al. [60] izradili *EASEWASTE* model kojim se identificira najvažnije parametre u pogledu obrade i zbrinjavanja otpada, na temelju kojih je moguće odabrati sustav gospodarenja otpadom. Herva i Roca [61] su otišli korak dalje i napravili model višekriterijske analize kojim je moguće rangirati tehnologije zbrinjavanja krutog miješanog komunalnog otpada, koristeći već postojeće metode: *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), potpomognute s *Geometrical Analysis for Interactive Aid* (GAIA). U području gospodarenja otpadom također se iskazala i metoda višekriterijske analize pod nazivom *ELimination and Choice Expressing Reality* (ELECTRE), u kontekstu gospodarenja otpadom [62, 63]. Metode višekriterijske analize korištene su u velikom broju radova u pogledu gospodarenja otpadom, što su prikazali i Achillas et al. [64] u svome preglednom radu. Autori su istražili širok raspon mogućnosti korištenja metoda višekriterijske analize u svrhu rješavanja problema različitih vrsta otpada: miješani komunalni otpad, građevinski otpad, otpadne vode, električni i elektronički otpad, itd. Aslan et al. [65] razmatraju ulogu tehnologija "otpada-u-energiju" u kružnom gospodarstvu. Ustanovljeno je da su metode poput AD, izgaranja, pirolize i plazma rasplinjavanja sve važnije za održivo zbrinjavanje otpada, ali njihov doprinos kružnom gospodarstvu ovisi o pravilnom planiranju i evaluaciji. Autori su stoga razvili integrirani okvir evaluacije koji objedinjuje ekološke, energetske i ekonomske aspekte (3E) pri odabiru rješenja „otpad u energiju“ (engl. *Waste-to-Energy*, WtE). Ovaj okvir, primjenom višekriterijske odluke i LCA analize, pomaže donositeljima odluka da optimiziraju WtE strategije u skladu s ciljevima kružnog gospodarstva, povećavajući povrat energije i materijala uz minimalan utjecaj na okoliš. Također, Guo et al. [66] su prikazali kako je odabir lokacije postrojenja za termičku obradu otpada suočen s izazovima NIMBY (engl. *Not in my back yard*) efekta i potencijalnim utjecajima na održivost projekta. Kako bi se donijela utemeljena odluka, razvijen je višekriterijski okvir koji kombinira neizrazitu logiku (engl. *fuzzy logic*)⁷ i PROMETHEE rangiranje za procjenu 16 potkriterija u četiri kategorije. Primjena

⁶ oblik anaerobne digestije koji se odvija pri povišenim temperaturama, najčešće između 50 i 60 °C (standardno oko 55 °C).

⁷ matematički pristup koji omogućuje modeliranje nesigurnosti i nepreciznosti u odlučivanju.

modela na studiju slučaja u Pekingu rezultirala je odabirom lokacije koja minimizira negativne utjecaje te maksimizira održivost sustava.

Međutim, navedene metode višekriterijske analize mogu se koristiti i u svrhu određivanja najprikladnijeg sustava za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora. Upravo su to napravili i Jovanović i Cvetković [67], koji su u svom radu prikazali metodologiju u PROMETHEE modelu, kojom je moguće odrediti specifični OIE, ovisno o važnosti kriterija koji su definirani. Slično istraživanje i modele izradili su i Troldborg et al. [68] te Kumar et al. [69]. No, ovakvi modeli mogući su i za izbor proizvodnje energije iz klasičnih izvora, što širi raspon njihove upotrebe [70, 71, 72].

No, potrebno je razmotriti i socio-ekonomski aspekt primjene tehnologija gospodarenja otpadom. Achillas i Vlachokostas [73] ističu da tehnološke inovacije u gospodarenju otpadom moraju biti praćene rješavanjem društvenih i ekonomskih prepreka. Oni navode kako su česti problemi nedovoljna javna svijest i sudjelovanje u odvajanju otpada (što umanjuje učinkovitost recikliranja), slaba društvena prihvaćenost nekih postrojenja (npr. spalionica otpada), zatim visoki troškovi uvođenja naprednih postrojenja i nedostatak financijskih poticaja za ulaganja, kao i neujednačena provedba propisa. Prema autorima, uklanjanje tih prepreka zahtijeva jačanje edukacije stanovništva, osiguravanje financijskih mehanizama (npr. subvencija) te bolju suradnju između vlasti, industrije i zajednice kako bi se napredne tehnologije mogle uspješno implementirati. Agaton i Santos [74] analizirali su čimbenike koji utječu na društvenu prihvatljivost postrojenja za energetske oporabu otpada. Njihovi rezultati pokazuju da osim tehničko-ekonomskih pokazatelja, na uspješnu realizaciju WtE projekata snažno utječu mišljenja i stavovi javnosti. Oni uključuju sljedeće aspekte: strah od rizika i štetnih emisija, stupanj povjerenja u nadležne institucije, svijest o koristima koje takva postrojenja donose (npr. energija, manje odlaganja), pojava sindroma NIMBY u lokalnoj zajednici, te opća informiranost građana o tehnologiji i njenim efektima. Autori naglašavaju da razumijevanje i proaktivno upravljanje ovim društvenim čimbenicima (kroz transparentno informiranje, participaciju zajednice, edukaciju) predstavlja ključ za uspješnu implementaciju WtE tehnologija.

Iz navedenog je moguće uočiti prednost višekriterijskih metoda, a naročito PROMETHEE metode, koji pokriva tematiku gospodarenja otpadom te proizvodnje energije te je vrlo prikladan za korištenje prilikom modeliranja i pojednostavljivanja problematike energetske i materijalne oporabe otpada.

1.2. Problem znanstvenog istraživanja

Unatoč značajnom napretku u području održivog gospodarenja otpadom i razvoju tehnologija energetske i materijalne uporabe, sam proces donošenja odluka i odabira tehnologije za održivo iskorištavanje otpadne biomase i otpadnih voda u svrhu energetske i materijalne uporabe nije riješen na zadovoljavajući način. Dosadašnja istraživanja i korišteni modeli odlučivanja uglavnom su se temeljili na pojedinačnim tehnologijama i jednodimenzijskim analizama.

Poseban izazov predstavljaju specifične vrste otpada poput digestata iz bioplinskih postrojenja, otpadnih voda i otpadnog mulja iz UPOV-a, koje nije moguće zbrinuti konvencionalnim pristupima kao što su recikliranje ili odlaganje [75]. Riječ je o otpadnim tokovima koje posjeduju značajan energetska i materijalni potencijal te se njihovom odgovarajućom obradom može ostvariti dodatna vrijednost u skladu s načelima kružnog gospodarstva EU [76].

Koncept kružnog gospodarstva uspostavljen je 2015. godine s ciljem smanjenja izgubljenih resursa u kružnom ciklusu materijala i energije, kako bi sustav funkcionirao na optimalan način. Glavna prednost kružnog gospodarstva je u zadržavanju dodane vrijednosti proizvoda u sustavu i smanjenje količine otpada koju je potrebno zbrinuti. Cilj EU je smanjenje odlaganja otpada za 50% do 2050. godine u usporedbi s 2000. godinom [77]. Kako bi se to postiglo, napravljen je plan koji postavlja prioritete [76]: u smislu smanjenje količina otpada, rekuperacija otpada putem recikliranja ili energetske i materijalne uporabe, te poboljšanja uvjeta obrade otpada.

Iako postoje različite tehnologije za energetska i materijalnu uporabu otpadnih tokova, njihova primjena u realnom sektoru ovisi o odlukama koje se donose na različitim razinama upravljanja, od lokalne i regionalne do nacionalne, te uključuju velik broj dionika. Donositelji odluka pritom se suočavaju s otežanim procesom donošenja odluka zbog suprotstavljajućih interesa i velikog broja kriterija koji uključuju tehničke karakteristike, ekonomske aspekte, te okolišne utjecaje i društvenu prihvatljivost [78].

Dosad razvijeni modeli za potporu u procesu odlučivanju u sektoru gospodarenja otpadom uglavnom su orijentirani na zasebne aktivnosti, poput odabira tehnologije proizvodnje energije ili definiranja optimalnog sustava gospodarenja otpadom kao cjeline. Takav pristup ne omogućuje cjelovitu analizu različitih tehnologija održivog iskorištavanja otpadnih tokova, niti uzima u obzir međusobno suprotstavljene zahtjeve različitih skupina kriterija. Kao posljedica, proces odabira tehnologije postaje subjektivan, netransparentan i teško usporediv između različitih lokacija i scenarija [79].

Stoga se kao temeljni problem ovog istraživanja nameće nedostatak objektivnog, integriranog i metodološki utemeljenog pristupa odabiru tehnologija za tretiranje otpadnih tokova. Postoji potreba za razvojem alata koji će objediniti tehnološku izvedivost, socio-ekonomsku prihvatljivost i utjecaj na okoliš te na taj način unaprijediti proces uspoređivanja različitih rješenja za obradu otpadnih tokova.

U tom kontekstu, primjena višekriterijske metode odlučivanja PROMETHEE [80] predstavlja rješenje navedenog problema, budući da omogućuje evaluaciju alternativnih tehnologija, rangiranje rješenja prema definiranim kriterijima te analizu osjetljivosti kroz GAIA i *Visual Stability Intervals*. Time se otvara mogućnost sustavnog i objektivnog pristupa odabiru tehnologija uporabe otpadnih tokova s visokim potencijalom energetske i materijalne uporabe.

1.3. Znanstvena hipoteza

Otpadna biomasa iz bioplinskih postrojenja te otpadne vode i otpadni mulj iz UPOV-a predstavljaju značajne, ali i nedovoljno vrednovane resurse u kontekstu kružnog gospodarstva. Analiza postojećih istraživanja pokazala je da se ove otpadne tokove razmatraju djelomično, kroz pojedinačne energetske, ekonomske ili okolišne pokazatelje.

U stvarnim uvjetima, odabir tehnologije ne ovisi samo o tehničkoj izvedivosti, već i o nizu drugih čimbenika, poput ekonomskih troškova, društvene prihvatljivosti, zakonodavnih okvira i utjecaja na okoliš. Ovi su kriteriji međusobno suprotstavljajući, zbog čega klasične jednodimenzionalne analize ne mogu odrediti koje je rješenje optimalno i dugoročno održivo. Višekriterijski model razvijen u okviru ovoga doktorskog rada predstavlja rješenje ovog problema.

Stoga je hipoteza postavljena s ciljem ispitivanja mogućnosti primjene višekriterijskog modela odlučivanja koji integrira tehnološke, socio-ekonomske i okolišne kriterije u proces odabira optimalne tehnologije održivog iskorištavanja otpadne biomase i otpadnih voda i glasi:

Primjenom višekriterijskog modela odlučivanja koji uključuje tehnološke, socio-ekonomske i okolišne kriterije moguće je odabrati optimalnu tehnologiju održivog iskorištavanja otpadne biomase i otpadnih voda u svrhu energetske i materijalne oporabe. Takav višekriterijski pristup predstavlja metodološki napredak u odnosu na postojeće pristupe temeljene na pojedinačnim kriterijima i jednodimenzionalnim analizama, jer omogućuje istodobnu evaluaciju međusobno suprotstavljenih kriterija te smanjuje subjektivnost u procesu donošenja odluka.

1.4. Ciljevi istraživanja

Ciljevi znanstvenog istraživanja izvedeni su iz problema znanstvenog istraživanja i postavljene znanstvene hipoteze. Ciljevi znanstvenog istraživanja mogu se podijeliti u sljedeće skupine:

1. **Definiranje sveobuhvatnog seta kriterija** koji će omogućiti objektivno vrednovanje tehnologija s obzirom na sljedeće skupine kriterija:
 - tehnološke kriterije: pouzdanost i zrelost tehnologije, energetska potrošnja i učinkovitost, potreba za zemljištem, potencijal za nadogradnjom
 - okolišne pokazatelje: emisije, mirisi, buka, ekološki otisak.
 - socio-ekonomske faktore: pravno-administrativni okvir, radna mjesta, javna prihvatljivost, kapitalni i operativni troškovi.
2. **Razvoj višekriterijskog modela** odlučivanja koji se temelji na PROMETHEE metodi. Ova metoda rangira tehnologije na temelju usporedbe po više kriterija. Za svaki se kriterij definiraju funkcije preferencije koje kvantificiraju stupanj prednosti jedne

tehnologije nad drugom. Agregiranjem parcijalnih preferencija i primjenom težinskih faktora kriterija dobiva se ukupni rang alternativa.

3. **Validacija i primjena višekriterijskog modela** na stvarnom slučaju te provjeru stabilnosti modela na stvarnim karakteristikama odabranog tehnološkog rješenja.
4. **Provedba analize osjetljivosti** s ciljem ispitivanja stabilnosti dobivenih rangiranja tehnologija u odnosu na promjene težinskih faktora kriterija. Time se utvrđuju granice unutar kojih donesena odluka ostaje nepromijenjena te se procjenjuje pouzdanost modela u uvjetima promjenjivih prioriteta donositelja odluka.

1.5. Očekivani znanstveni doprinos

Ovaj rad ispunjava znanstvenu prazninu u području održivog gospodarenja otpadom, jer sustavno objedinjuje energetske i materijalne aspekte oporabe digestata, otpadnih voda i otpadnog mulja u višekriterijski model odlučivanja. Prednosti i nedostaci višekriterijskog modela ispitani su na tehnologijama obrade otpadnih tokova poput izgaranja digestata i otpadnog mulja, recirkulacije digestata u bioplinskim postrojenjima te proizvodnje gnojiva kao oblika materijalne. Pregled dosadašnjih istraživanja pokazuje da se većina radova fokusira na pojedinačnim tehnologijama ili jednokriterijskim analizama. Još je rjeđi slučaj uključivanja materijalnog povrata u jedinstveni okvir vrednovanja, i to kao dio razumljivog alata donosiocima odluka.

Originalni znanstveni doprinos rada sastoji se u razvoju adaptivnog višekriterijskog modela odlučivanja temeljenog na PROMETHEE metodi, koji omogućava usporedbu više tehnoloških rješenja uz integraciju tri ključne skupine kriterija: tehnološka izvedivost, socio-ekonomska prihvatljivost te utjecaj na okoliš. U usporedbi s postojećim modelima, razvijeni okvir uvodi proširenu skupinu kriterija i potkriterija specifičnih pri čemu omogućava promjenu težina prema lokalnim prioritetima i različitim interesima. Model time uvodi fleksibilnost u usporedbi s postojećim jednoznačnim pristupima odlučivanja. Daljnji znanstveni doprinos proizlazi iz validacije modela na stvarnom slučaju i analize osjetljivosti čime se dokazuje upotrebljivost i vjerodostojnost razvijenog modela odlučivanja.

Rad također pridonosi razumijevanju uloge digestata i otpadnog mulja kao tokova resursne vrijednosti. Premještanjem analize iz problemskog okvira (otpad je trošak) u vrijednosni okvir (otpad je resurs), model pokazuje uvjete pod kojima se taj prijelaz može ostvariti. Time se jača veza između načela kružnog gospodarstva, tehnološke izvedivosti i energetske tranzicije.

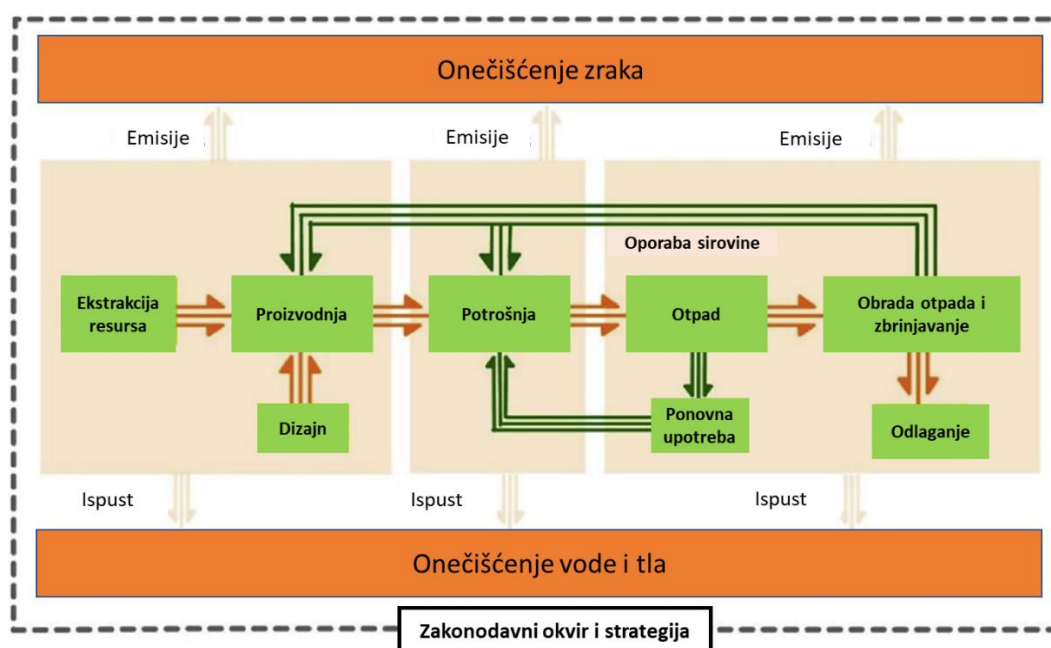
Praktična primjena doktorskog rada ogleda se u razvoju alata koji će donositeljima odluka na lokalnoj i nacionalnoj razini omogućiti bolje razumijevanje procesa odlučivanja s obzirom na različite i međusobno suprotstavljene kriterije. Razvijeni višekriterijski model moći će se koristiti kao polazište za planiranje sustava gospodarenja otpadnim tokovima, pritom smanjujući rizik od pogrešnih investicija te kao osnova za izradu detaljnih tehno-ekonomskih analiza i studija utjecaja na okoliš.

1.6. Svrha i cilj izrade doktorskog rada

Jedan od važnijih ciljeva EU je postizanje održivog razvoja u sektoru gospodarenja otpadom. Kako bi se postiglo ciljano smanjenje konačnog odlaganja otpada do 2050. godine, napravljena je strategija koja postavlja sljedeće prioritete [36]:

- Smanjenje stvaranja otpada;
- Minimizacija količine nastalog otpada;
- Rekuperacija otpada putem recikliranja i energetske i materijalne oporabe;
- Poboljšanje uvjeta obrade te
- Regulacija prijevozom.

Provedbom navedenih prioriteta, dolazi do smanjenja količina otpada koje se odlažu na odlagališta. Međutim, kako bi se to ostvarilo, potrebno je tijekom izrade životnog ciklusa proizvoda/usluge uzeti u obzir sve aspekte sustava – od same ideje/proizvodnje pa sve do kraja životnog ciklusa (Slika 1).



Slika 1. Procjena životnog ciklusa sustava nula-otpada [81]

Sukladno tome je 2015. godine uspostavljen koncept kružnog gospodarstva, čiji je cilj smanjenje izgubljenih resursa u kružnom ciklusu materijala i energije, kako bi sustav funkcionirao na optimalan način. Glavna prednost sustava kružnog gospodarstva je u zadržavanju dodane vrijednosti proizvoda i uklanjanje otpada koliko god je moguće.

Kako bi se proveli ciljevi kružnog gospodarstva i stvorio sustav „nula-otpada“, u sektoru otpada se razvila hijerarhija gospodarenja otpadom, kojom je definiran redoslijed najboljih opcija gospodarenja proizvedenim otpadom (Slika 2).



Slika 2. Hijerarhija gospodarenja otpadom [75]

Prema strateškim dokumentima EU („Okvirna direktiva o otpadu“, 2018/851), prvi korak u gospodarenju otpadom je izbjegavanje nastanka otpada. Ukoliko to nije moguće, potrebno je proizvedeni otpad ponovno uporabiti ili reciklirati.

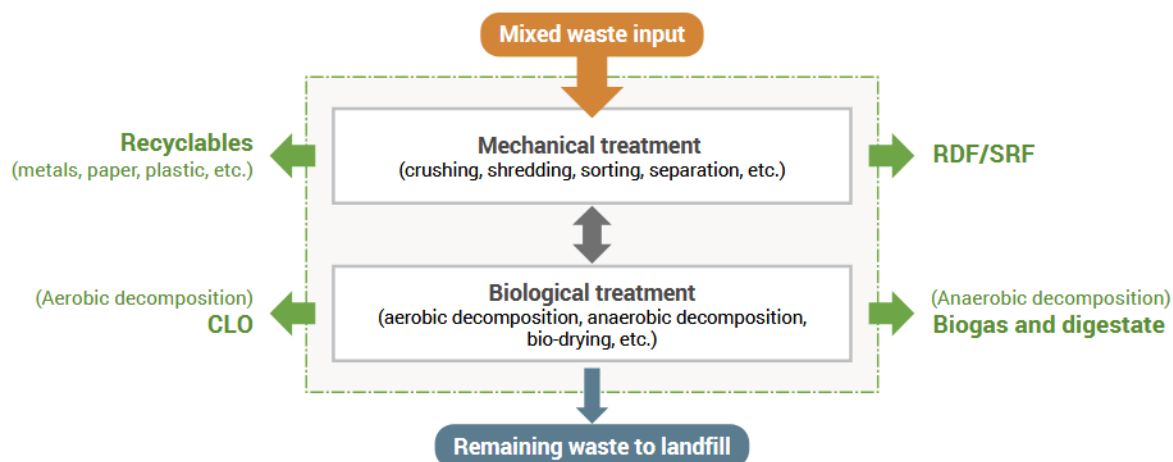
Sustav gospodarenja komunalnim otpadom u većini država članica EU temelji se na konceptu regionalnih centara za gospodarenje otpadom (CGO), koji integriraju mehaničko-biološku obradu (MBO), sortiranje, stabilizaciju te odlaganje preostalog otpada. Temeljna funkcija CGO-a jest obrada miješanog komunalnog otpada (MKO) s ciljem smanjenja mase i volumena otpada za odlaganje, izdvajanja korisnih frakcija te proizvodnje goriva iz otpada.

Međutim, tehnološka koncepcija CGO-a primarno je prilagođena heterogenim tokovima komunalnog otpada, a ne specifičnim industrijskim i procesnim tokovima poput otpadnog mulja iz UPOV-a ili digestata iz bioplinskih postrojenja. Navedeni tokovi karakterizirani su [82]:

- visokim udjelom vlage (> 70–90%),
- promjenjivim udjelom organske tvari,
- prisutnošću otopljenih hranjivih tvari (N, P, K),
- mogućom prisutnošću patogena, teških metala i mikro-onečišćenja,
- niskom ogrjevnom vrijednošću u izvornom stanju.

Iz procesno-inženjerske perspektive, CGO postrojenja nisu projektirana za obradu tokova s tako visokim udjelom vode i specifičnim fizikalno-kemijskim karakteristikama. MBO podrazumijeva drobljenje, separaciju i aerobnu stabilizaciju (Slika 3.), što nije optimalno za

tokove koji su već prošli biološki proces (npr. digestat nakon AD) ili zahtijevaju specifičnu kontrolu parametara poput pH, redoks potencijala i temperature.



Slika 3. Tipičan dijagram tijeka glavnih procesa MBO [83] (CLO = composite-like output; RDF/SRF = refuse derived fuel / solid recovered fuel)

Dodatno, u CGO-ima se ne provode ciljani procesi povrata hranjivih tvari (npr. precipitacija fosfora u obliku struvita), niti su instalirani sustavi za energetska iskorištavanje razrijeđenih organskih tokova putem dodatne AD ili naprednih termokemijskih procesa. Uvođenje takvih sustava zahtijevalo bi bitnu rekonstrukciju procesne sheme, poput: ugradnje zatvorenih reaktorskih sustava, instalacije sustava za kontrolu temperature (mezofilni ili termofilni režim), ugradnje izmjenjivača topline i sustava za recirkulaciju, implementacije sustava za obradu procesnih plinova i/ili nadogradnju sustava upravljanja procesom.

Stoga se može zaključiti da CGO-i predstavljaju infrastrukturno i tehnološki drugačiji koncept u odnosu na postrojenja za energetska i materijalnu uporabu otpadnog mulja, digestata i otpadnih voda. Njihova osnovna zadaća jest smanjenje količine komunalnog otpada za odlaganje, a ne optimizacija energetske i materijalne uporabe specifičnih procesnih tokova. U kontekstu ovog rada, razmatrane tehnologije (npr. recirkulacija digestata, AD, napredna obrada mulja, precipitacija struvita) usmjerene su na tokove koji nastaju kao nusproizvod energetske i komunalne sustava, ali koji se po svojoj prirodi ne uklapaju u operativni koncept CGO-a. Ovi tokovi zahtijevaju:

- Procesnu integraciju s postojećim postrojenjem (npr. bioplinsko postrojenje ili UPOV),
- Kontinuiranu kontrolu masenih i energetske bilanci,
- Optimizaciju retencijskog vremena i opterećenja,
- Upravljanje toplinskim tokovima (posebno u slučaju termofilnih režima),
- Posebne sustave za izdvajanje i uporabu hranjivih tvari.

Na primjer, otpadni mulj iz UPOV-a, prije eventualnog termičkog tretmana, prolazi kroz zgušnjavanje, stabilizaciju (anaerobnu ili aerobnu), dehidraciju te eventualnu sušionicu [84].

Integracija takvog toka u CGO bez prethodne specifične obrade dovela bi do destabilizacije biološkog procesa i smanjenja učinkovitosti MBO sustava.

Iz perspektive kružnog gospodarstva, CGO-i predstavljaju linearniji pristup u odnosu na integrirane energetske-materijalne sustave koji se razmatraju u ovom radu. Dok CGO teži smanjenju mase otpada i proizvodnji goriva iz otpada, model razvijen u disertaciji usmjeren je na optimizaciju povrata energije i materijala unutar zatvorenih lokalnih ciklusa, uz maksimalno očuvanje vrijednih komponenti. Zbog navedenog, centri za gospodarenje otpadom nisu razmatrani kao primarna opcija unutar modela, budući da:

- ne obrađuju specifične otpadne tokove koji su predmet istraživanja (mulj, digestat),
- ne omogućuju integrirani povrat hranjivih tvari,
- nisu projektirani za procesno upravljanje tokovima visoke vlage i niske ogrjevne vrijednosti,
- ne osiguravaju optimizaciju energetskih bilanci na razini pojedinačnog postrojenja (UPOV ili bioplinsko postrojenje).

Takvo pozicioniranje jasno diferencira koncept regionalnog CGO-a od tehnoloških rješenja analiziranih u ovom radu te dodatno opravdava fokus istraživanja na integrirane, procesno optimirane sustave oporabe otpadne biomase i otpadnih voda. Digestat s bioplinskih postrojenja (nus-proizvod AD procesa), otpadne vode te otpadni mulj s UPOV-a su upravo takve specifične vrste otpada jer je u njihovom slučaju moguće iskoristiti energetske i materijalne komponente, čime se i dalje zadovoljava hijerarhija gospodarenja otpadom („Drugi postupci oporabe“ iz Slika 2).

U ovoj doktorskoj disertaciji tehnologije su strukturirane u dvije jasno definirane skupine, ovisno o fazi otpadnog toka na koju djeluju: obradu krutih tokova i oporabu iz tekućih tokova.

Opcija a odnosi se na zbrinjavanje i valorizaciju krutih tokova, odnosno otpadnog mulja i digestata iz bioplinskog postrojenja. Unutar ove skupine razmatraju se tri temeljna procesna koncepta:

- Ia – termička obrada (energetska oporaba),
- IIa – recirkulacija digestata,
- IIIa – materijalna oporaba (npr. izdvajanje vrijednih hranjivih tvari, poput fosfora).

Sve tri tehnologije analiziraju se u odnosu na iste tipove sirovina: otpadni mulj i digestat. Ove sirovine se razmatraju u istoj kategoriji zbog sličnosti svojih fizikalno-kemijskih svojstava (visok udio vlage, organska tvar, sadržaj hranjivih elemenata). Time se osigurava usporedivost alternativa unutar iste skupine, jednake granice sustava i konzistentni kriteriji vrednovanja.

Opcija b odnosi se na oporabu iz tekućih tokova, odnosno valorizaciju same otpadne vode. Unutar ove skupine razmatraju se:

- Ib – energetska oporaba topline iz otpadne vode (primjena dizalice topline),
- IIb – materijalna oporaba hranjivih tvari iz tekuće frakcije (npr. kristalizacija struvita).

Takva podjela omogućuje razdvajanje tehnologija prema fazi otpadnog toka na koju djeluju (kruta ili tekuća faza), čime se izbjegava metodološko miješanje procesa različite prirode.

Unutar svake skupine provodi se višekriterijska usporedba tehnologija, pri čemu se alternative vrednuju u odnosu na tehnološke, socio-ekonomske i okolišne kriterije, uz jasno definirane granice sustava.

Na taj način model obuhvaća energetske (I) i materijalne (II i III) koncepte uporabe u skladu s načelima kružnog gospodarstva te omogućuje dosljednu i transparentnu usporedbu tehnologija unutar svake kategorije.

Međutim, kako bi se tehnologije energetske i materijalne uporabe mogle primijeniti u realnom sektoru, potrebno je donijeti odluku o odabiru specifične tehnologije. Tu odgovornost imaju donositelji odluka na različitim pozicijama, ovisno o tome radi li se o implementaciji tehnologije na lokalnoj, regionalnoj ili nacionalnoj razini. U svrhu olakšavanja donošenja odluke u sektoru gospodarenja otpadom, do danas su izrađeni razni modeli koji omogućavaju donositeljima odluka jednostavniji proces donošenja odluke. No, dosad izrađeni modeli su svi orijentirani na zasebne aktivnosti – određivanje najprikladnije tehnologije proizvodnje energije te određivanje najprikladnijeg sustava gospodarenja otpadom. U ovoj disertaciji koristit će se PROMETHEE metoda kao osnova za izradu modela kojim će se olakšati donositeljima odluka odabir tehnologije zbrinjavanja otpada kroz energetske i materijalnu uporabu otpadnih tokova s visokim potencijalom uporabe (digestat iz bioplinskih postrojenja i otpadni mulj i otpadna voda s UPOV-a).

1.7. Struktura doktorskog rada

Struktura doktorske disertacije je sljedeća:

Poglavlje 2: Opis principa kružnog gospodarstva te kako se sektor gospodarenja otpadom uklapa u načela kružnog gospodarstva. Definiranje otpadnih tokova kao potencijalnih izvora energije i materijala.

Poglavlje 3: Opis PROMETHEE metode i odabir kriterija za izradu modela odabira tehnologije energetske i materijalne uporabe koji će pomoći donositeljima odluka u odabiru tehnologije prikladne njihovim uvjetima. Prikaz izrađenog modela na temelju razmatranja specifičnih tehnologija (**Ia**, **IIa** i **IIIa**; **Ib** i **IIb**) te pregleda literaturnih podataka.

Poglavlje 4: U ovom poglavlju primjenjuje se razvijeni višekriterijski model te se prikazuju rezultati definiranih scenarija prilagođenih talijanskim uvjetima, s ciljem demonstracije funkcionalnosti modela i interpretacije rangiranja alternativa. Prikazuje se i studija slučaja odabrane tehnologije, kojom se potvrđuje primjenjivost modela u realnim infrastrukturnim uvjetima.

Poglavlje 5: U ovom poglavlju razmatra se primjena umjetne inteligencije kao zamjena/potpora procesu odabira tehnologija energetske i materijalne uporabe. Opisuje se potencijalne uloge AI alata u prikupljanju i obradi ulaznih podataka, procjeni neizvjesnosti, automatizaciji ažuriranja parametara te prepoznavanju nelinearnih odnosa između kriterija. Posebno se analiziraju koristi i ograničenja AI pristupa u odnosu na transparentne višekriterijske metode poput PROMETHEE, s naglaskom na interpretabilnost, sljedivost rezultata i regulatornu prihvatljivost u javnim odlukama.

Poglavlje 6: Zaključci disertacije i rezultata dobivenih u poglavlju 4.

Poglavlje 7: Popis korištene literature.

Prilog I: opisuju se tehnologije za energetske i materijalne uporabe otpadne biomase i otpadnih voda koje se koriste u višekriterijskoj analizi.

Prilog II: napravljene su analize osjetljivosti za opciju a (materijalna i energetska uporaba krutih tokova) i za opciju b (materijalna i energetska uporaba tekućih tokova).

Prilog III: daje se popis tablica koje se pojavljuju u tekstu.

Prilog IV: daje se popis slika koji se pojavljuju u tekstu.

Prilog V: daje se popis objavljenih znanstvenih radova autora.

Prilog VI: sadrži životopis autora.

2. KRUŽNO GOSPODARSTVO

Kružno gospodarstvo je model proizvodnje i potrošnje koji uključuje dijeljenje, posudbu, ponovno korištenje, popravljavanje, obnavljanje i reciklažu postojećih proizvoda i materijala što je dulje moguće, kako bi se stvorila dodatna (duža) vrijednost proizvoda [85]. Na ovaj način produljuje se životni vijek proizvoda te istovremeno smanjuje količina otpada. Krajnji cilj je „zatvoriti krug“ u proizvodnim i potrošačkim procesima, čime se čuvaju prirodni resursi i smanjuje ekološki otisak.

Zbog toga je 2015. godine izrađen plan za kružno gospodarstvo, pod nazivom „Zatvaranje kruga: akcijski plan EU-a za kružno gospodarstvo“, u kojem su navedeni ciljevi koje svaka država članica mora postići, kako bi se približili konceptu „nula-otpada“ [76]. U veljači 2021. Europski parlament usvojio je novi akcijski plan i zatražio dodatne mjere za postizanje ugljično neutralnog, ekološki održivog i potpuno kružnog gospodarstva do 2050. godine. Plan postavlja jasne ciljeve za smanjenje količina nastalog otpada i postavlja dugoročne ciljeve za upravljanje otpadom i recikliranje. Ključni elementi revidiranog prijedloga uključuje sljedeće ciljeve:

- Zajednički EU cilj za recikliranje 65% komunalnog otpada do 2030. godine;
- Zajednički EU cilj za recikliranje 75% ambalažnog otpada do 2030. godine;
- Obvezni cilj za odlagališta, na koja se može odložiti maksimalno 10% komunalnog otpada do 2030. godine;
- Zabrana odlaganja prethodno razdvojenog otpada na odlagališta otpada;
- Promoviranje ekonomskih instrumenata kako bi se obeshrabrilo odlaganje otpada;
- Pojednostavljene i poboljšane definicije i usklađena metoda izračuna stupnjeva recikliranja u EU zemljama;
- Konkretna mjera za promoviranje ponovne uporabe i poticanje industrijske simbioze – pretvaranje nus-proizvoda jedne industrije u sirovinu druge industrije;
- Ekonomski poticaji za proizvođače da stavljaju „zelene“ proizvode na tržište i potiču sheme ponovne uporabe i recikliranja.

Za razliku od linearnih modela („uzmi–proizvedi–odbaci“), kružno gospodarstvo promiče ponovnu upotrebu, popravak, recikliranje i uporabu proizvoda i materijala kako bi im se produljio životni vijek i maksimalno iskoristila ugrađena energija. Krajnji cilj je „zatvoriti krug“ u proizvodnim i potrošačkim procesima, čime se čuvaju prirodni resursi i smanjuje ekološki otisak. Napredak se prati kroz službene indikatore: stopa kružnog korištenja materijala (engl. *Circular Material Use Rate*, CMUR) EU porastao je vrlo skromno – s 10,8% (2010.) na 11,8% (2023.) [86]. To znači da samo oko 12% materijala korištenih u EU potječe iz recikliranih izvora (sekundarnih sirovina). U razdoblju 2015.–2025. godine CMUR se povećao svega 1–2 postotna boda, što ukazuje na limitiran napredak i potrebu za ubrzanjem tranzicije. EU je postavio cilj udvostručiti tu stopu do 2030. (na ~24%) kako bi se smanjio pritisak na primarne resurse.

Kružno gospodarstvo uglavnom se pojavljuje u literaturi kroz tri glavne aktivnosti, tzv. 3R princip: smanjenje, oporaba / ponovno korištenje i recikliranje (engl. *Reduction, Reuse, Recycling*) [87, 88].

Princip *smanjenja* (engl. *Reduction*) cilja prema minimizaciji korištene primarne energije, sirovina i otpada, kroz poboljšanje učinkovitosti u proizvodnji (tzv. eko-učinkovitost), i procesima potrošnje, poput uvođenja boljih tehnologija, kompaktnijih i lakših proizvoda, pojednostavljene ambalaže, itd. Eko-učinkovitost smatra se poslovnim konceptom koji se fokusira na ekonomsku i okolišnu dimenziju održivosti, a zanemaruje socijalnu dimenziju [89]. Međutim, suvremeni razvoj koncepta održivosti proširio je taj okvir. U novijoj literaturi naglašava se potreba uključivanja socijalnih aspekata [90] – poput uvjeta rada, utjecaja na lokalne zajednice, zapošljavanja i pravedne raspodjele koristi – u evaluaciju održivosti sustava. To je posebno vidljivo u razvoju koncepta procjene održivosti životnog ciklusa (LCSA), koji integrira okolišnu (LCA), ekonomsku (LCC) i socijalnu komponentu (S-LCA).

Princip *oporabe/ponovnog korištenja* (engl. *Reuse*) odnosi se na „svaki postupak čiji glavni rezultat je predmet koji je koristan jer zamjenjuje druge materijale koje bi inače trebalo upotrijebiti za tu određenu svrhu, ili otpad koji se priprema kako bi ispunio tu svrhu, u tvornici ili u širem gospodarskom smislu“ [91]. Ponovno korištenje predmeta je vrlo atraktivno u pogledu okolišnih koristi jer zahtijeva manje resursa, energije i rada u usporedbi s proizvodnjom novih proizvoda iz neobrađenih (engl. *virgin materials*), recikliranih ili odloženih materijala [92]. U ovom principu potrebno je razmotriti i segment oporabe (energetske i materijalne), koja se koristi ukoliko nije moguće smanjenje nastanka otpada, kao niti njegovo recikliranje ili ponovno korištenje, kako bi se iskoristila energetska ili materijalna vrijednost koju on sadrži.

Princip *recikliranja* (engl. *Recycle*) označava „svaki postupak obrade kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu. Recikliranje obuhvaća preradu organskog materijala, ali ne uključuje energetske oporabu i preradu u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za nasipavanje“ [91]. Recikliranje otpada omogućava koristi od upotrebljivih resursa i smanjuje količinu otpada koji je potrebno obraditi i/ili zbrinuti, čime se smanjuju negativni utjecaji na okoliš.

Količina komunalnog otpada po stanovniku u EU stagnira ili blago pada od 2015., što sugerira djelomični uspjeh mjera prevencije (*Reduction*). Stope recikliranja pak ambiciozno rastu pod pritiskom EU direktiva: npr. recikliranje komunalnog otpada doseglo je prosječno ~48% do 2020., s ciljem 55% do 2025. i 65% do 2035. godine (Direktiva 2018/851). Ponovna uporaba (*Reuse*) još se slabo kvantificira, ali se promovira kroz indikator produljenja životnog vijeka proizvoda i sve više primjera (npr. povratna ambalaža). Prema Europskoj agenciji za okoliš, udio recikliranih materijala u ukupnoj potrošnji porastao je za samo 1,1 postotni bod od 2010. do 2023. godine [86], što pokazuje izazov postizanja visoke cirkularnosti materijala. Istovremeno, potrošnja primarnih sirovina i dalje raste ~2,3% godišnje globalno, pa je ukupni utjecaj „3R“ mjera dosad ograničen.

Osim CMUR-a, prate se i drugi pokazatelji kružne tranzicije. Npr. produktivnost resursa (bruto domaći proizvod (BDP) po utrošenoj toni materijala) se blago poboljšala, ali ne dovoljno da kompenzira rast potrošnje. EU je također uveo monitoring okvir od 10 indikatora, uključujući stope recikliranja pojedinih tokova (ambalaža, elektronika, baterije), udio zelenih javnih nabava, investicije u sektore kružne ekonomije, itd. Neki rezultati:

- Stopa recikliranja ambalaže u EU: stopa u 2023. godini je bila neznatno veća (67%) od stope u 2018. godini (66%).
- CMUR u vodećim zemljama: Nizozemska ~30%, Francuska ~20%, dok neke zemlje (npr. Rumunjska) jedva ~1–2% [20] – ogroman raspon koji ukazuje na neujednačen napredak među članicama.
- Stope odlaganja otpada opadaju (od 2000. do 2020. odlaganje komunalnog otpada palo s ~55% na ~24% u prosjeku EU), što implicira pomak prema recikliranju i WtE. To direktno pridonosi “*Recycle*” cilju kružne ekonomije.

Iako se kružno gospodarstvo često identificira s principom recikliranja, potrebno je naglasiti da je to jedan od najmanje održivih opcija u usporedbi s ostalim principima (smanjenje i ponovno korištenje) [93]. Neki materijali se mogu reciklirati samo određen broj puta, dok druge u potpunosti nije moguće reciklirati (npr. neke vrste plastike se ne mogu reciklirati zbog sadržaja štetnih tvari koje se nalaze u njihovom sastavu). Integracijom različitih procesa obrade otpada postiže se njegova cjelovitija iskoristivost u vidu vrijednih kemikalija i goriva, čime se uklanjaju nedostaci zasebnih postupaka i potiče kružno gospodarstvo optimiziranim korištenjem resursa. Brunner i Morf [94] ističu da je izgaranje otpada s iskorištavanjem energije (WtE) danas ključan stup kružnog gospodarstva. Povijesno gledano, termička obrada otpada riješila je problem volumena i sanitarnih rizika otpada, a moderna WtE postrojenja dodatno su optimizirana tako da proizvode korisnu energiju iz otpada i ujedno uklanjaju opasne organske tvari iz materijalnih tokova kroz proces sagorijevanja. Najnoviji razvoj ide korak dalje – iz ostatnog pepela takvih postrojenja mogu se izdvojiti metali za recikliranje, a izgaranjem kanalizacijskog mulja omogućuje se uporaba fosfora, važnog nutrijenta. Prema tome, WtE ne služi samo za zbrinjavanje otpada, već istovremeno reciklira energiju i dio materijala, osiguravajući i konačno odlaganje onog malog preostalog, inertnog ostatka, što ga čini neizostavnim elementom održivog sustava gospodarenja otpadom. Nadalje, Begum et al. [95] u svom pregledu ističu da kombiniranje termokemijskih (npr. piroliza) i biokemijskih postupaka (npr. AD) omogućuje potpunije iskorištavanje biomase za proizvodnju goriva i kemikalija te uklanja ograničenja pojedinačnih tehnologija. Takav integrirani pristup ujedno potiče kružno gospodarstvo kroz učinkovitu uporabu resursa i smanjenje preostalog otpada. Slično istraživanje proveli su i Mediboyina i Murphy [96], koje je prikazalo da kombinacija termičke obrade biomase (šumski ostaci putem pirolize) s AD biootpada (gnojovka) rezultira manjim ukupnim okolišnim opterećenjem, nego kada se ti otpadi tretiraju odvojeno. Procjena životnog ciklusa pokazala je neto smanjenje emisija i drugih utjecaja u svim analiziranim scenarijima integriranog sustava, s time da je izbor načina korištenja dobivenog bioplina ključan faktor koji utječe na razinu ostvarenih okolišnih pogodnosti.

Gospodarenje otpadom ima središnju ulogu u kružnom gospodarstvu: njime se određuje način primjene EU-ove hijerarhije otpada u praksi (Slika 2). Ovim se načelom nastoje poticati mogućnosti kojima se postiže najbolji ukupni rezultat za okoliš. Posljedica načina na koji se prikuplja otpad i njime gospodari mogu biti visoke stope recikliranja i vraćanje vrijednih materijala u gospodarstvo ili pak nedjelotvoran sustav u kojem otpad koji se najviše može reciklirati završava na odlagalištima ili u spalionici, uz moguće štetne utjecaje na okoliš i znatne gospodarske gubitke. Za postizanje visoke razine uporabe materijala ključno je poslati dugoročne signale tijelima javne vlasti (donositeljima odluka), poduzećima i ulagačima te na razini EU-a uspostaviti odgovarajuće uvjete kojima se to omogućuje, uključujući dosljednu

provedbu postojećih obveza. Treba uzeti u obzir sav otpad, bez obzira nastaje li on u kućanstvima, industriji ili uslužnom sektoru.

Cilj kružnog gospodarstva je optimizacija upotrebe prirodnih resursa i smanjenje onečišćenja i količine otpada pri svakom koraku, koliko god je to moguće i poželjno. Kružno gospodarstvo potiče proizvodnju dobara putem zatvorene petlje toka materijala i mora pružiti ekonomski poticaj proizvoda i nakon korištenja istog, kako bi se nastali otpad mogao vratiti u proces proizvodnje (Slika 4) [97, 98]. U takvim petljama dolazi do integriranja kombinacija industrijskih aktivnosti koje djeluju sinergistički kako bi se međusobno podupirale, tj. kako bi nusproizvod (otpad) iz jedne industrije postao sirovina za drugu industriju, na način da se postigne optimalna potrošnja sirovina i energije. Na taj način se potiče gospodarski rast industrije, a pritom ne dolazi do negativnog utjecaja na okoliš i povećanja količina otpada.



Slika 4. Slikoviti prikaz koncepta kružnog gospodarstva [85]

Slijedeći koncept kružnog gospodarstva, u nastavku će biti opisane aktivnosti u specifičnim industrijskim/uslužnim sektorima, gdje je moguć napredak kako bi se ostvarila i primijenila načela kružnog gospodarstva:

1. Proizvodnja

Kružno gospodarstvo započinje na samom početku životnog vijeka proizvoda. I u fazi dizajniranja i u proizvodnim postupcima utječe se na nabavu i iskorištavanje resursa te stvaranje otpada tijekom čitavog životnog vijeka proizvoda.

Tijekom dizajna proizvoda moguće je povećati trajnost proizvoda i/ili olakšati njegov popravak, čime se osigurava njegovo dulje zadržavanje u ciklusu kruženja tvari i energije. Dizajnom se također može pomoći poduzećima za reciklažu pri rastavljanju proizvoda radi uporabe vrijednih materijala i komponenata, ali i prilikom uštede osnovnih resursa potrebnih za proces proizvodnje.

Međutim, čak i kada su proizvodi ili materijali pametno dizajnirani, zbog neučinkovitog iskorištavanja resursa u proizvodnim postupcima mogu se izgubiti poslovne prilike i stvoriti znatne količine otpada. Prilikom proizvodnih postupaka koriste se brojne primarne sirovine, čija ekstrakcija predstavlja značajan negativan utjecaj na okoliš. Svaki industrijski sektor razlikuje se u pogledu iskorištavanju resursa, stvaranju otpada i gospodarenju njime. Sukladno tome, Europska Komisija (EK) je razvila nekoliko „referentnih dokumenata o najboljim raspoloživim tehnikama“ (engl. *Best Available Techniques Reference Document*, BREF), koje države članice moraju razmotriti pri izdavanju zahtjeva za dozvole industrijskim postrojenjima, te promicati najbolje prakse u području gospodarenja otpadom. Konačni cilj korištenja BREF-ova je što manja proizvodnja otpada, ali istovremeno i što učinkovitija uporaba (energetska i materijalna) otpada, kako bi se smanjio pritisak na okoliš u pogledu rudarenja novih resursa, korištenjem otpadnih tokova koje mogu biti smatrane sekundarnim resursima.

2. Potrošnja

Odlukama koje donose milijuni potrošača može se podupirati ili ugrožavati kružno gospodarstvo. Na te odluke utječu informacije kojima potrošači imaju pristup, asortiman i cijene postojećih proizvoda te regulatorni okvir.

Cijena je ključni čimbenik koji utječe na odluke o kupnji, istovremeno u vrijednosnom lancu i za krajnje potrošače. Stoga se države članice potiču na pružanje poticaja i primjenu ekonomskih instrumenata, kao što je oporezivanje, kako bi osigurale da se u cijenama proizvoda više odražavaju troškovi povezani s okolišem. Na taj način se potiče proizvođače na dizajniranje proizvoda koji će imati oznaku zaštite okoliša (*EU Ecolabel*), koji se mogu ponovno uporabiti ili jednostavno reciklirati. Istovremeno se time motiviraju kupci da se okrenu proizvodima na tržištu koji su ekološki prihvatljivi te koji neće stvarati otpad, već ih je moguće ponovno koristiti ili jednostavno odvojiti od ostalog otpada.

Sektori ponovne uporabe i popravka radno su intenzivni te se njima pridonosi otvaranju radnih mjesta u EU i njegovu socijalnom programu. Međutim, neke vrste otpada nije moguće uporabiti. Zbog toga EU intenzivno radi na zamjeni takvih proizvoda u suradnji sa proizvođačima, koji imaju potrebu plasirati nove i tražene proizvode na tržište. No, moguće je poduzeti i druge mjere za smanjenje količina otpada na razini kućanstva, a one započinju pomoću provedbe kampanja podizanja svijesti i ekonomskih poticaja (npr. sustavi poticaja za općine ili sustavi „plati koliko si bacio“).

3. Gospodarenje otpadom

Postotak recikliranja na razini kućanstva u današnje vrijeme znatno varira, ovisno od države do države, na što znatno utječe gospodarsko stanje države koju se razmatra. Zbog toga EK konstantno radi na izradi novih zakonodavnih prijedloga o otpadu, kako bi dala dugoročnu viziju povećanja opsega recikliranja i smanjenja odlaganja komunalnog otpada na odlagališta, uzimajući u obzir razlike među državama članicama. Svojim radom i prijedlozima također

potiču izradu i primjenu novih ekonomskih instrumenata, kako bi se osigurala usklađenost nacionalnih zakonodavnih i financijskih okvira s EU-ovim.

Jedan od najvećih problema u gospodarenju otpadom predstavlja plastična ambalaža i njeno zbrinjavanje nakon korištenja. Zbog toga su uvedeni posebni ciljevi i planovi vezani za gospodarenje i zbrinjavanje otpadne ambalaže, poput papirnatih, staklene, plastične, metalne i drvene ambalaže, kako bi se povećao opseg odvojenog prikupljanja na razini kućanstava i industrije te recikliranja tih otpadnih tokova. Iako je povećanje stupnja odvojenog prikupljanja uspješno, dolazi do nastajanja novog problema – riječ je o zbrinjavanju sakupljenog otpada. Više stope recikliranja često su ograničene administrativnim kapacitetom, nedostatkom ulaganja u infrastrukturu za odvojeno prikupljanje i recikliranje te nedovoljnom primjenom ekonomskih instrumenata; veliki izazov predstavlja i prekapacitiranost infrastrukture za obradu preostalog otpada (uključujući miješani otpad).

Ako se ne može spriječiti nastanak otpada ili njegovo recikliranje, u većini slučajeva je bolje oporabiti ga energetske i/ili materijalne nego ga odložiti na odlagalište, čime se nepovratno gube njegova vrijedna svojstva. Stoga proizvodnja energije iz otpada može imati važnu ulogu pri stvaranju sinergija s energetske i klimatske politike EU, ali se taj proces mora ravnati prema načelima EU-ove hijerarhije otpada.

4. Primjena sekundarnih sirovina: Od otpada do resursa

U kružnom gospodarstvu, materijali koji se mogu reciklirati vraćaju se u gospodarstvo kao nove sirovine, čime se povećava sigurnost opskrbe. Tim sekundarnim sirovinama može se trgovati i koristiti kao i primarnim sirovinama iz tradicionalnog procesa ekstrakcije rude. Trenutno je udio oporabe materijala u EU relativno nizak, no primjenom principa navedenih u prethodnim odlomcima moguće ga je povećati.

Međutim, najveći problem primjene sekundarnih sirovina je briga oko njihove kvalitete kao novog materijala u izradi novih proizvoda. Zbog nedostatka standarda na razini EU, teško je odrediti razine nečistoća ili prikladnost za visokokvalitetno recikliranje (npr. za plastiku). Razvojem takvih standarda trebalo bi se povećati povjerenje u sekundarne sirovine i reciklirane materijale te poduprijeti tržište.

Razvoj standarda naročito je bitan u području recikliranja hranjivih tvari, koje su npr. prisutne u organskom otpadnom materijalu, poput digestata ili otpadnog mulja iz UPOV-a (N, P, K). Njihovom održivom primjenom u poljoprivredi, koja ovisi o uvozu fosfatne stijene (resursa koji je ograničen), smanjuje se potreba za mineralnim gnojivima čija proizvodnja ima negativne utjecaje na okoliš.

Jedan od ključnih čimbenika za stvaranje dinamičnog tržišta sekundarnih sirovina je dostatna potražnja, koju se potiče uporabom recikliranih materijala u proizvodima i infrastrukturi. Potražnja za određenim sirovinama (npr. papirom ili metalom) već je velika, dok je potražnja za drugim sirovinama još u razvoju. Privatni sektor ima ključnu ulogu za stvaranje potražnje i pomaganje pri oblikovanju lanaca opskrbe; niz industrijskih i gospodarskih subjekata već se javno obvezao osigurati određenu razinu recikliranog sadržaja u proizvodima koje stavljaju na tržište, radi održivosti i iz gospodarskih razloga.

5. Prioritetna područja

Zbog posebnosti svojih proizvoda ili vrijednosnih lanaca, ekološkog otiska ili ovisnosti o materijalima koji se nabavljaju izvan Europe, niz sektora suočava se s posebnim izazovima u okviru kružnoga gospodarstva. Riječ je o sljedećim sektorima:

- Plastika;
- Rasipanje hrane;
- Kritične sirovine;
- Gradnja i rušenje (građevinski sektor);
- Biomasa i proizvodi na bio-osnovi (bioekonomija).

Prelazak na kružno gospodarstvo sustavna je promjena. Pored ciljanih aktivnosti kojima se utječe na svaku fazu vrijednosnog lanca i ključne sektore, nužno je stvoriti uvjete u kojima kružno gospodarstvo može napredovati, a resursi se mogu mobilizirati.

Međutim, unatoč strateškim ciljevima, postoje brojni izazovi:

- Ekonomske i tržišne prepreke: Primarne sirovine često ostaju jeftinije od reciklata zbog neuključenih eksternih troškova. Tržište sekundarnih materijala je fragmentirano i nedovoljno razvijeno [20]. Investicije u modele kružnog gospodarstva traže visoka početna ulaganja uz neizvjesne profite.
- Tehnološke prepreke: Mnoge kružne tehnologije (npr. napredni procesi recikliranja, tehnologije za ponovnu uporabu) još su u razvoju ili nedovoljno skalirane. Razina tehnološke spremnosti (engl. *Technology Readiness Level*, TRL) za neke inovativne procese je nizak (3–6), što investitori percipiraju rizičnim. Primjerice, uporaba tekstila kemijskim recikliranjem ili biokemijska razgradnja plastike tek su pilotirane.
- Regulatorni i administrativni izazovi: Postojeći propisi ponekad otežavaju upotrebu otpada kao resursa (npr. status „kraja otpada” (engl. *end-of-waste*) kompleksan je postupak). Standardi kvalitete reciklata nisu usklađeni, pa proizvođači zaziru od njihovog korištenja zbog odgovornosti. Nedostatak podataka također koči – tek se razvijaju sustavi praćenja ponovne uporabe i popravaka.
- Socio-ekonomsko-kulturološki faktori: Potrošačke navike sporo se mijenjaju. Preferencija novog nad rabljenim, nedostatak povjerenja u rabljene proizvode, inertnost tvrtki u mijenjanju linearnih poslovnih modela. Potrebna je ekološka edukacija i svijest potrošača, što je u ovoj disertaciji naglašeno kao jedan od ključnih čimbenika.
- Infrastrukturalna ograničenja: Mnoge države (pogotovo nove članice) tek trebaju izgraditi kapacitete za odvojeno prikupljanje biootpada, reciklažne centre, logistiku povratne ambalaže, itd. Bez infrastrukture, koncept kružnog gospodarstva ostaje samo na papiru.

Hrvatska je kao članica EU također usvojila koncept kružnog gospodarstva, ali statistike pokazuju spor napredak. CMUR za Hrvatsku iznosi svega 5,2% (2020.), znatno ispod prosjeka EU (~12%). Stopa recikliranja komunalnog otpada u Hrvatskoj dosegla je ~37% u 2024. godini

[99] , što je napredak u odnosu na ~5% iz 2005., ali još daleko od cilja 55% koji je trebao biti ostvaren do 2025. Međutim, korisno je istaknuti pozitivne pomake:

- Uspostava odvojenog prikupljanja biootpada u većim gradovima: 2021.–2022. povećana je količina prikupljenog biootpada (npr. Grad Zagreb s 0 na 10 tisuća tona godišnje u dvije godine).
- Pokretanje Centara za ponovnu uporabu (npr. Čakovec, Prelog) – ovdje se popravljaju i prodaju rabljeni predmeti, što doprinosi “*Reuse*” segmentu.
- Indikatori napretka: Količina otpada po stanovniku u Hrvatskoj blago raste (455 kg u 2015. na ~490 kg 2020.), što nije povoljno, no udio odvojeno prikupljenog otpada porastao je s 18% (2015.) na ~45% (2024.). Stopa odlaganja na tijela zemlje i dalje je visoka (~58%), ali u padu. Dakle, relativni napredak postoji, iako s niske baze.

Unatoč izazovima, neke hrvatske tvrtke i sektor prednjače u primjeni kružnih načela:

- Komunalna poduzeća (otpad): Grad Prelog i okolne općine (u sklopu projekta *Zero Waste* inicijative) uspjele su smanjiti količinu miješanog otpada po stanovniku na <100 kg godišnje, uz recikliranje/kompostiranje >50%. To je rezultat jakog uključivanja građana i lokalne vlasti.
- Ambalažna industrija: Tvrtka Stražaplastika u Humu na Sutli integrirala je recikliranu plastiku u nove proizvode (npr. kante za otpad) i time zatvara petlju unutar svog poslovanja. Također, proizvođači ambalaže u Hrvatskoj (npr. Vetropack Straža za staklo) dosežu stope recikliranog sadržaja >60% u proizvodnji novih boca.
- Poljoprivreda i biootpadi: Neke bioplinke elektrane (npr. *Agro Gold* u Varvarima) uspješno koriste digestat kao gnojivo na vlastitim poljima, zatvarajući lokalni krug nutrijenata. Tvrtka Bioinput bavi se proizvodnjom organskog gnojiva iz komunalnog biootpada i digestata, prikazujući poslovni model kružnosti.
- Industrijska simbioza: Pojedini primjeri industrijske simbioze javljaju se u Hrvatskoj – npr. Luka Rijeka otpadnu toplinu pretvara u grijanje skladišta, ili cementare poput Holcima koriste otpadni mulj i otpadnu plastiku kao gorivo (su-spaljivanje), što smanjuje deponiranje i uvoz fosilnih goriva.

Iako je Hrvatska krenula u provedbu kružne ekonomije, kvantitativni indikatori (CMUR, stope recikliranja) pokazuju da je napredak spor i da zaostajemo za EU prosjekom. Glavne prepreke slične su općima u EU: nedovoljna infrastruktura, manjak investicija, slaba svijest javnosti te ekonomska isplativost. Međutim, uspješni pilot projekti i lokalne inicijative daju smjer za šire implementiranje ovih koncepata.

Kako bi se preispitali načini proizvodnje i potrošnje te otpad pretvorio u visokovrijedne proizvode, potrebne su nove tehnologije, postupci, usluge i poslovni modeli kojima će se oblikovati budućnost gospodarstva i društva. Podupiranje istraživanja i inovacija stoga je važan čimbenik poticanja tog prelaska; njime se pridonosi konkurentnosti i osuvremenjivanju industrije EU. Jedan od važnih segmenata podupiranja inovacija je i osiguravanje financijskih sredstava za provedbu projekata inovacija i primjene poboljšanih tehnologija i postupaka. Značajnu ulogu ovdje igraju fondovi za sufinanciranje, organizirani u obliku programa EU: Obzor Europa, LIFE, Interreg, COSME, i drugi.

Sukladno tome, uključivanje tehnologija za energetske i materijalne oporabe otpada ključno je za tranziciju prema kružnom gospodarstvu. Na primjer, digestat iz bioplinskih postrojenja više se ne smatra krajnjim otpadom, već sirovinom za biogoriva (sušenjem i peletiranjem nastaju peleti za loženje [100]) ili za gnojiva (izravan ili prerađen u struvit i kompost); otpadni mulj iz kanalizacije postaje sirovina za proizvodnju bioplina (kroz AD procese [22]), kogeneracijsku proizvodnju toplinske i električne energije te izvor fosfora (kroz struvit ili vađenje iz pepela [52]); otpadna voda postaje toplinsko spremište za gradske toplinske mreže. Time se zatvara krug: ono što je nekad bilo opterećenje (otpad), sada postaje resurs u novom ciklusu proizvodnje – energije, proizvoda ili materijala.

Implementacijom ovih kružnih rješenja ostvaruju se višestruke koristi: smanjuje se količina otpada za odlaganje (dulji vijek odlagališta, manje emisije metana), smanjuju se emisije stakleničkih plinova (zamjenom fosilnih goriva bio-energijom te sekvestracijom ugljika u tlu putem biougljena), te se štede prirodni resursi (zamjena mineralnih gnojiva recikliranim hranjivim tvarima, smanjenje uvoza fosfata). Dodatno, stvaraju se zelena radna mjesta u sektorima reciklaže i obnovljive energije, a lokalne zajednice mogu imati financijsku korist kroz niže troškove energije ili prodaju sekundarnih sirovina. Naravno, za odluku o tome koju tehnologiju implementirati u konkretnom slučaju, treba uzeti u obzir tehnološke, ekonomske, okolišne i društvene aspekte – upravo tu dolazi do izražaja potreba za sveobuhvatnim modelom odlučivanja opisanom u nastavku. U sljedećem poglavlju razmotrit će se modeli i metode koji se koriste za ovakve višekriterijske odluke, s posebnim naglaskom na metodu PROMETHEE koja je odabrana u ovoj disertaciji zbog svoje prilagodljivosti problemu kružnog gospodarstva otpada.

Sukladno svemu navedenom, moguće je zaključiti kako kružno gospodarstvo promovira otpornost resursa. Teži ka zamjeni tradicionalnog modela linearnog gospodarstva brze i jeftine proizvodnje i jeftinog odlaganja, proizvodnjom dugotrajnih proizvoda koji mogu biti popravljani ili jednostavno rastavljeni i reciklirani (Slika 5). Model kružnog gospodarstva pokušava simulirati procese slične onima koji se odvijaju u prirodnom okolišu: gdje se malo odlaže, a većina se oporabljuje putem drugih kanala.



Slika 5. Usporedba linearnog (lijevo) i kružnog koncepta (desno) gospodarstva [101]

3. RAZVOJ MODELA POMOĆU PROMETHEE METODE

Prilikom gospodarenja otpadom postoji problem velikog broja parametara sustava i njihovih međusobnih veza, što dovodi do nesigurnosti prilikom provedbe politika i strategija te odabira prikladnih tehnologija. Mnoge nesigurnosti mogu se pojaviti u različitim stupnjevima razvoja politike, počevši od početnog otkrivanja (probabilistički i/ili posibilistički) problema do formiranja politike i nadzora i prilagodbe postojećim politikama [102]. Zbog toga je razvijen velik broj analitičkih matematičkih metoda koje mogu poslužiti u sektoru gospodarenja otpadom kao podrška donošenju odluka uz nesigurnosti.

Pojam višekriterijsko odlučivanje (engl. *Multiple Criteria Decision Making*, MCDM) odnosi se na donošenje odluka u prisustvu mnogih, u najviše slučajeva, konfliktnih kriterija. Odluke povezane sa situacijama iz svakodnevnog ili poslovnog okruženja poput izbora strategije organizacije, određenog tehničkog rješenja, mjesta, visine i/ili dinamike ulaganja, ovise o velikom broju međusobno povezanih i često potpuno konfliktnih kriterija. Problem nastaje kada je potrebno ispravno procijeniti važnost tih faktora te kako posložiti sustav prioriteta i kriterija koji može dovesti do dobre odluke o izboru najbolje tehnologije, strategije, lokacije i slično.

Višekriterijske metode su danas postale standardne komponente u kompleksnom sustavu podrške donositeljima odluka. Postoji nekoliko metoda na temelju kojih je razvijen velik broj modela od strane raznih stručnjaka, u različite svrhe. Najčešće korištene metode su sljedeće: *Analytical Hierarchy Process* (AHP), *Elimination and Choice Expressing Reality* (ELECTRE) te *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE), uz njihove nadogradnje.

Međutim, za odabir same višekriterijske metode za izradu specifičnog modela, potrebno je definirati koja je metoda najprikladnija u tu svrhu [103]. PROMETHEE metoda je među novijim metodama u području višekriterijske analize. Nastala je iz razloga što su metode višekriterijskog odlučivanja mogle koristiti samo kvantitativne podatke i stoga se nisu mogle dobro primjenjivati u slučajevima gdje postoje kvalitativne informacije, što je čest slučaj u realnom svijetu i prilikom donošenja odluka. Kako bi se riješio taj problem, metoda se počela koristiti kod odabira nekog projekta/tehnologije, pomoću koje su se kvalitativni podaci pretvarali u numeričke, putem ordinalne mjerne ljestvice [104]. Iako su ostale navedene metode potencijalno prikladne za primjenu prilikom odabira tehnologije zbrinjavanja otpadnih tokova, u ovoj disertaciji se koristi PROMETHEE metoda iz navedenih razloga – potrebno je donijeti odluku na temelju velikog broja različitih podataka (kvantitativnih i kvalitativnih), što nije moguće kvalitetno provesti sa nekom drugom metodom.

Kao što je već navedeno u poglavlju 1, u ovoj disertaciji koristi se PROMETHEE metoda (PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE V i pripadajuća GAIA metoda) zbog prikladnosti tematici koja se obrađuje (energetska i materijalna oporaba otpada) te jednostavnosti primjene, kako bi se jednostavno približila i mogla koristiti od strane donositelja odluka.

Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE) i *Graphical Analysis for Interactive Aid* (GAIA) metode su među najčešće

korištenim višekriterijskim metodama na svijetu. PROMETHEE I i II metode rangiranja razvio je profesor Jean-Pierre Brans, 1982. godine [105]. Dvije godine nakon toga, prof. Brans i Bertrand Mareschal razvili su PROMETHEE III (rangiranje temeljeno na intervalima) te PROMETHEE IV (problemi koji zahtijevaju kontinuirano donošenje odluka) [103]. Navedene varijante metode nisu implementirane u grafičko sučelje korištene metode. 1988. godine predstavljena je GAIA, kao grafički dodatak PROMETHEE rangiranju [106]. 1992. godine predstavljen je PROMETHEE V [107], kao rješenje za probleme višestrukog odabira s ograničenjima.

Ova metoda uključuje mnogo prosudbi i percepcije ljudi čije odluke imaju dugoročan utjecaj. Ima jedinstvenu prednost kada je teško usporediti ili kvantificirati važne elemente odluke ili kada je suradnja među odjelima ili članovima tima ograničena zbog njihovih različitih specijalizacija ili stajališta. Osnovna ideja PROMETHEE metode je razmotriti preferencije donositelja odluke.

Metoda se tijekom nekoliko desetljeća raširila od prvotne primjene u zdravstvenom sektoru, na različita područja, poput bankarstva, kemijske industrije, turizma, medicine, itd. U skladu s tim, izrađeno je preko stotine radova objavljenih u znanstvenim časopisima diljem svijeta (<http://biblio.promethee-gaia.net>) [108].

3.1. Osnovne pretpostavke i opisi tehnologija

U sklopu ove disertacije analiziraju se kruti i tekući otpadni tokovi nastali u sustavima gospodarenja otpadnim vodama i proizvodnje bioplina, pri čemu su u fokusu digestat iz bioplinskog postrojenja, otpadni mulj iz UPOV-a te sama otpadna voda kao tekuća faza. Razmatraju se tehnologije koje omogućuju njihovu energetska i/ili materijalnu uporabu, ovisno o fazi toka na koju se primjenjuju.

U PRILOG I – OPIS TEHNOLOGIJA su opisane i prikazane ključne tehničke i procesne specifičnosti pojedinih tehnologija unutar definiranih skupina alternativa, koje je potrebno uzeti u obzir pri daljnjoj višekriterijskoj analizi i vrednovanju unutar modela.

3.2. Opis odabranih tehnologija

U okviru ove disertacije razmatrane su različite tehnologije upravljanja otpadnim muljem i digestatom, s ciljem procjene njihove tehničke izvedivosti, energetske i materijalne potencijala te ekonomskih i okolišnih učinaka. Analiza je provedena na temelju dostupnih znanstvenih i stručnih literaturnih izvora, uz usporedbu ključnih operativnih, energetske i regulatornih aspekata svake tehnologije. Odabrane opcije (označene rimskim brojkama **I-IIIa**, kako će ih se koristiti u daljnjem tekstu) predstavljaju relevantne scenarije daljnje obrade i uporabe, koji omogućuju usporednu evaluaciju u kontekstu tranzicije prema kružnom gospodarstvu:

Ia. Energetska uporaba digestata/otpadnog mulja

Energetska uporaba digestata i otpadnog mulja ostvaruje se termičkom obradom dehidriranih frakcija spaljivanjem pri temperaturama 850-1000 °C, što rezultira smanjenjem mase do 90%, uništenjem patogena i koncentracijom fosfora u pepelu za daljnju uporabu. Detaljna LCA analiza izgaranja, uključujući usporedbu s AD i kombiniranim sustavima, prikazana je u radovima Đurđević et al. [151, 152], gdje se potvrđuje pozitivna energetska bilanca uz smanjenje emisija u usporedbi s odlaganjem. Ova tehnologija omogućuje proizvodnju pare i električne energije, s LCA pokazateljima superiornosti kombinacije AD i izgaranje pred mono-izgaranjem sirovine s visokim udjelom hlapivih tvari (>55%).

IIa. Recirkulacija digestata/otpadnog mulja

Recirkulacija digestata i otpadnog mulja podrazumijeva vraćanje dijela frakcija u proces (u digestor, biološki reaktor ili pripremu supstrata) radi održavanja mikrobne populacije, stabilizacije procesa i poboljšanja prinosa bioplina. Model recirkulacije za povećanje bioplina i smanjenje emisija analiziran je u radu Đurđević i Hulenčić [153], a socio-ekonomski aspekti u UPOV-ima u radu Stoimenov i Jevtić [154], uz potvrdu da recirkulacija digestata/otpadnog mulja povećava CH₄ sadržaj za 10% i smanjuje troškove zbrinjavanja. Agronomska povratna uporaba zatvara hranjivi ciklus, s LCA pokazateljima poboljšanja stabilnosti procesa.

IIIa. Materijalna uporaba (struvit iz digestata/otpadnog mulja)

Materijalna uporaba ostvaruje se precipitacijom struvita iz digestata ili otpadnog mulja za uporabu fosfora, uz dodatne procese kompostiranja, sušenja i peletiranja za komercijalna gnojiva. Proces struvitne precipitacije s fokusom na fosforu uporabu i degradaciju lignoceluloznih kompleksa opisan je u radu Đurđević et al. [114], s LCA analizama koje pokazuju marginalne okolišne koristi uz poboljšano dehidriranje i smanjenje polimera. Cilj je stabilizacija materijala, smanjenje patogenog rizika te stvaranje tržišno prihvatljivog proizvoda s definiranom hranidbenom vrijednošću.

Digestat i otpadni mulj razmatraju se u tretmanu istim tehnologijama zbog visoke sličnosti sirovina u fizikalnim i kemijskim svojstvima, što omogućuje primjenu identičnih procesa energetske i materijalne uporabe. Obje sirovine karakteriziraju [155, 156, 157]:

- visoki udio organske tvari (VS/TS 50–80%),
- vlažnost 75–95%,
- sadržaj hranjivih tvari (N: 2–6%, P: 1–4%, K: 0,5–2%),
- sadržaj anorganskih spojeva,
- slična reološka ponašanja (visoka viskoznost, slaba dehidracija).

Ova sličnost potječe iz činjenice da je digestat često rezultat anaerobne digestije organskih supstrata sličnih onima u otpadnim vodama (npr. komunalni mulj), što rezultira kompatibilnošću u tretmanima poput spaljivanja (ogrjevna vrijednost 10–18 MJ/kg ST), recirkulacije (poboljšanje mikrobne aktivnosti i prinosa bioplina) i struvitne precipitacije (uporaba P kao MgNH₄PO₄·6H₂O). Dodatno, literatura pokazuje da se obje sirovine uspješno kodigektiraju u AD procesima, gdje otpadni mulj poboljšava dehidraciju i stabilnost digestata, a zajednička hidrotermalna pretretman ili piroliza povećava energetske prinose i smanjuje rizik od teških metala u proizvodima. Na taj način se izbjegava fragmentacija modela, a omogućuje

holistički pristup kružnoj uporabi u UPOV i bioplinskim postrojenjima, u skladu s LCA analizama energetske uporabe, modelima recirkulacije i struvitnom precipitacijom.

Uz tehnologije obrade krutih tokova (digestat i otpadni mulj), u okviru ove disertacije razmatraju se i tehnologije uporabe iz tekuće faze, odnosno iz same otpadne vode. Cilj je procijeniti njihov energetski i materijalni potencijal, tehničku izvedivost te okolišne i ekonomske učinke u kontekstu transformacije klasičnih UPOV-a u postrojenja za uporabu resursa. Analiza je provedena na temelju dostupnih znanstvenih i stručnih izvora, uz usporedbu operativnih parametara, energetskih bilanci i regulatornih zahtjeva. Odabrane opcije (označene rimskim brojkama **I-IIb**) predstavljaju relevantne scenarije valorizacije tekuće frakcije, koji omogućuju usporednu evaluaciju unutar višekriterijskog modela:

Ib. Energetska uporaba topline iz otpadne vode

Energetska uporaba iz tekuće faze ostvaruje se primjenom izmjenjivača topline i dizalice topline na ulaznom ili izlaznom toku UPOV-a ili unutar kanalizacijske mreže. Otpadna voda, zbog relativno stabilne temperature tijekom godine (10–20 °C), predstavlja pouzdan niskotemperaturni izvor toplinske energije. Sustavi dizalica topline omogućuju podizanje temperature na razinu prikladnu za grijanje prostora ili pripremu potrošne tople vode, pri čemu se COP u literaturi tipično kreće između 3 i 5, ovisno o temperaturnim režimima i integraciji s krajnjim potrošačem. Analiza mogućnosti energetske uporabe otpadne vode prikazana je kroz rad Đurđević et al. [44].

Primjena ove tehnologije rezultira smanjenjem potrošnje primarne energije i emisija CO₂ u sektoru grijanja, osobito u urbanim područjima s razvijenim sustavima daljinskog grijanja. Ujedno, potrebno je uzeti u obzir utjecaj izdvajanja topline na temperaturni profil dotoka u UPOV, budući da snižavanje temperature može utjecati na biološke procese nitrifikacije i ukupnu energetsku bilancu postrojenja. Stoga se energetska uporaba topline analizira ne samo kroz proizvedenu energiju (kWh/m³), već i kroz njezin sustavni učinak na rad postrojenja.

IIb. Materijalna uporaba iz otpadne vode (kristalizacija struvita i izdvajanje hranjivih tvari)

Materijalna uporaba iz tekuće faze temelji se na izdvajanja hranjivih tvari, prvenstveno fosfora i dušika, iz koncentriranih povratnih tokova ili iz glavne linije vode. Najzastupljenija tehnologija je kontrolirana kristalizacija struvita (MgNH₄PO₄·6H₂O), pri čemu se iz otpadne vode izdvajaju ortofosfati⁸ i amonij u obliku stabilnog mineralnog gnojiva.

Serens et al. [51] su najbolje prikazali kako učinkovitost uporabe ovisi o udjelu fosfora koji prelazi u tekuću fazu tijekom anaerobne digestije te o konfiguraciji postrojenja (npr. prisutnost EBPR sustava). Implementacija postrojenja za proizvodnju struvita može smanjiti nekontrolirano taloženje u cjevovodima, smanjiti potrošnju kemikalija za precipitaciju fosfora i poboljšati odvodnjavanje mulja. Također, LCA analize pokazuju da materijalna uporaba može smanjiti ukupni okolišni otisak sustava, osobito u kategorijama iscrpljivanja resursa i eutrofikacije, pod uvjetom da oporabljeni produkt stvarno supstituirá primarne sirovine na tržištu [158].

Za razliku od digestata i otpadnog mulja, koji se karakteriziraju visokim udjelom organske tvari i vlage te pogoduju termičkoj i biološkoj obradi, otpadna voda predstavlja

⁸ najjednostavniji i kemijski najreaktivniji oblik fosfata u vodenim otopinama.

disperzni medij s niskom koncentracijom suhe tvari, ali velikim ukupnim volumenskim protokom. Zbog toga su tehnologije uporabe iz tekuće frakcije primarno usmjerene na:

- izdvajanje toplinske energije iz volumena protoka,
- selektivno izdvajanje otopljenih hranjivih tvari,
- optimizaciju energetske i okolišnog učinka cijelog postrojenja.

Uključivanjem *opcije b* u model izbjegava se fragmentacija analize te se omogućuje holistički pristup uporabi resursa u UPOV-ima i bioplinskim sustavima. Time model obuhvaća cjelokupni potencijal kružnog iskorištavanja (od energetske i materijalne uporabe krutih frakcija do valorizacije tekuće frakcije), uz jasno razdvojene granice sustava i usporedive kriterije vrednovanja unutar svake skupine tehnologija.

3.3. Višekriterijsko odlučivanje u kružnom gospodarenju otpadom

Odabir optimalne tehnologije za iskorištavanje otpada kompleksan je problem koji zahtijeva uravnoteženje više ciljeva: minimiziranje troškova, maksimiziranje energetske učinkovitosti, minimiziranje utjecaja na okoliš, te uvažavanje društvenih i regulatornih ograničenja. Takvi problemi tipično spadaju u domenu višekriterijskog odlučivanja. Međutim, prije koraka samog odlučivanja, potrebno je uzeti u obzir i karakteristike i problematiku različitih vrsta otpada (tj. sirovina), koje se razmatraju u sklopu ove disertacije.

Problematika pročišćavanja otpadnih voda i zbrinjavanja nastalog otpadnog mulja vrlo je specifična, jer je teško odrediti ulazni sastav otpadne vode (zbog doba godine, padalina, stanovništva itd.), što otežava izradu univerzalnog postrojenja za obradu svih vrsta otpadnih voda i mulja. U skladu s tim, tijekom izrade modela razmatrani su općeniti kriteriji primjenjivi na sve UPOV-e i postrojenja za obradu mulja, čime se donositeljima odluka olakšava izbor tehnologije energetske i materijalne uporabe. Na temelju odabranih tehnologija – energetske uporabe digestata/otpadnog mulja (spaljivanje dehidriranih frakcija za smanjenje mase do 90% i proizvodnju energije), recirkulacije digestata/otpadnog mulja (vraćanje frakcija u proces za stabilizaciju i povećanje bioplina) te materijalne uporabe (struvitna precipitacija za fosforu uporabu i gnojiva) – moguće je identificirati ključne kriterije za obradu podataka, uključujući energetske saldo, regulatorne ograničenja i okolišne benefite. U pogledu digestata, koji predstavlja smjesu djelomično razgrađenih organskih tvari, mikrobiološke mase i anorganskih spojeva, bit će sagledana njegova uporaba kao sirovine za navedene tehnologije, jer izravna poljoprivredna primjena nije uvijek moguća zbog ograničenja Nitratne direktive [159], koja sprječava onečišćenje voda nitratima iz prekomjerne gnojidbe i nepravilnog skladištenja. Budući da digestat nije reguliran kao biogorivo, potrebno je istražiti alternative poput energetske uporabe i recirkulacije kako bi se izbjeglo prekomjerno odlaganje, uz istovremeno zatvaranje hranjivog ciklusa materijalnom uporabom.

Uzevši u obzir definirane skupine alternativa i pripadajuće tehnologije, model se temelji na jasno razgraničenim procesnim konceptima unutar dvije kategorije: obradi krutih tokova (otpadni mulj i digestat) te uporabi iz tekuće faze (otpadna voda). Unutar tih kategorija

analiziraju se reprezentativne tehnologije energetske i materijalne uporabe, koje omogućuju usporedivu evaluaciju unutar istih granica sustava i prema istim kriterijima vrednovanja.

Iako je model moguće dodatno proširiti uključivanjem većeg broja tehnoloških rješenja ili dodatnih varijanti obrade, u okviru ove disertacije fokus je stavljen na razvoj metodološki konzistentnog i hijerarhijski strukturiranog modela koji može obuhvatiti različite faze otpadnih tokova, uz jasnu podjelu na krutu i tekuću komponentu. Time je osigurana usporedivost alternativa i izbjegnuto miješanje tehnološki heterogenih rješenja unutar iste matrice odlučivanja.

Razvijeni model predstavlja temelj za daljnja istraživanja u kojima se može proširiti spektar tehnologija i uključiti dodatni scenariji uporabe. Takav pristup omogućuje postupno nadograđivanje baze znanja te pruža donositeljima odluka strukturirani okvir za vrednovanje različitih opcija upravljanja resursima u skladu s načelima kružnog gospodarstva.

3.4. Odabir metode

Među spomenutim metodama, u ovom je radu odabrana metoda PROMETHEE zbog njenih prednosti u području gospodarenja otpadom i energetike. PROMETHEE pripada grupi metoda nadjačavanja (engl. *outranking methods*). Ova metoda omogućuje rangiranje alternativnih opcija uspoređujući ih par po par prema svakom kriteriju, uz definiranje funkcija preferencije koje odražavaju stav donositelja odluke o razlikama između vrijednosti kriterija. Za razliku od AHP-a, koji se temelji na usporedbama u parovima i može imati problem sa konzistencijom matrica pri velikom broju kriterija, PROMETHEE izravno koristi vrednovanja kriterija te generira tzv. preferencijske indekse. Prednost je i u tome što PROMETHEE može lako raditi s kombinacijom kvantitativnih i kvalitativnih kriterija, raznim skalama i jedinicama mjere, te primijeniti različite tipove funkcija preferencije ovisno o prirodi kriterija (npr. linearna, stepenasta, Gaussova funkcija, itd.). Metoda je intuitivna za korisnika: rezultat je rang lista opcija prema neto preferencijskom toku (engl. *net preference flow*), koji se računa kao razlika između izlaznog toka (koliko opcija nadjačava druge) i ulaznog toka (koliko je nadjačana od drugih). Najbolja opcija ima najveći neto preferencijski tok (dominira drugim opcijama u najvećoj mjeri).

PROMETHEE omogućava i detaljniju analizu – npr. PROMETHEE I daje parcijalno (djelomično) rangiranje koje pokazuje situacije neusporedivosti (kada opcije nemaju jasnu dominaciju jedna nad drugom), dok PROMETHEE II daje potpuno rangiranje svih opcija. U kasnijim proširenjima metode, uvedeni su PROMETHEE V (za probleme uz ograničenja – odabir pod restrikcijama), PROMETHEE VI (za ugradnju ponašanja donosioca odluke u analizu), PROMETHEE GDSS (za grupne odluke), itd. U ovom radu korištena je osnovna varijanta metode (PROMETHEE II) za rangiranje tehnologija, uz korištenje GAIA plana za vizualizaciju i analizu osjetljivosti (stabilnosti rješenja). GAIA je popratni alat PROMETHEE metode koji prikazuje kriterije i opcije u obliku karte u nekoliko dimenzija – omogućuje grafički uvid u konflikte među kriterijima i doprinos svakog kriterija rangiranju. Primjerice, GAIA ravnina može pokazati grupiranje opcija prema sličnosti njihovih karakteristika te tzv. „GAIA vektor“, koji sugerira smjer preferencije – smjer u kojem su kriteriji kumulativno najviše skloni. Ukoliko je GAIA vektor poravnat blizu neke opcije, ta opcija je vrlo jaka u globalnom smislu;

ako je blizu kriterija, ti kriteriji snažno utječu na odluku. U našem slučaju, GAIA analiza pomaže razumjeti koja tehnologija otpada prednjači pod zadanim kriterijima i koje su kompromisne razlike između alternativnih rješenja.

Još jedna korisna značajka PROMETHEE okvira je analiza stabilnosti rješenja, odnosno osjetljivosti na promjenu težina kriterija. Pomoću alata kao što je *Visual Stability Intervals* moguće je utvrditi u kojem rasponu promjene težine nekog kriterija ostaje nepromijenjen poredak najboljih opcija. Time se identificiraju kriteriji na koje je odluka najosjetljivija. U poglavlju 4 prikazat će se takva analiza osjetljivosti za razmatrane scenarije, kako bi se provjerilo koliko su rezultati rangiranja robusni.

U usporedbi s AHP metodom koja se također koristi u ovom području, PROMETHEE nudi izravniji put do rangiranja bez potrebe za složenim matricama usporedbi, a istovremeno zadržava mogućnost kvalitativnih ulaza (kroz funkcije preferencije). Iako bi AHP pružio koristan uvid, prelazak na PROMETHEE u ovoj disertaciji opravdan je potrebom za lakšom integracijom različitih tipova podataka i scenarija te boljom analizom osjetljivosti. PROMETHEE spada među najčešće korištene MCDM metode na svijetu. U području gospodarenja otpadom i energetike, PROMETHEE je često odabran zbog sposobnosti da uključi i kvantitativne i kvalitativne kriterije. Primjeri:

- Troldborg et al. [68] primijenili su PROMETHEE za rangiranje opcija mulja (kompostiranje, spaljivanje, anaerobna digestija) uz ekološke i ekonomske kriterije.
- Kumar et al. [69] kombinirali su AHP i PROMETHEE za odabir obnovljivog izvora energije po regijama.
- U sektoru voda i otpadne vode, PROMETHEE se koristio za izbor najboljeg scenarija upravljanja muljem u komunalnim poduzećima (npr. ELECTRE i PROMETHEE studije u Grčkoj).

Iz ovih radova vidljivo je da se PROMETHEE posebno dobro koristi u okolnostima gdje postoji puno konflikata između kriterija (npr. ekonomski naspram okolišnih), jer omogućuje ispitivanje osjetljivosti i vizualni uvid kroz GAIA ravninu. Geometrijska analiza (GAIA) pomaže razumjeti strukturu problema.

Ukupno gledano, prednosti koje treba istaknuti uključuju [160]:

- Jednostavnost primjene i interpretacije: PROMETHEE ima relativno intuitivnu strukturu – za svaku alternativu računa se Φ^+ (prednost) i Φ^- (manjak) u odnosu na druge, te konačni Φ neto koji služi za rangiranje. Nema složenih matrica kao u AHP; korisnik lako razumije koji kriterij koliko doprinosi.
- Nije potrebna normalizacija ulaznih podataka na [0–1] unaprijed: PROMETHEE koristi funkcije preferencije koje same uzimaju u obzir skale kriterija. Time se elimira efekt različitih mjerila – npr. kg, EUR i % mogu suživjeti bez direktnog skaliranja, jer preferencijska funkcija (uz zadane q/p pragove ili slično) brine o tome. Ova značajka smanjuje rizik od distorzije podataka uslijed neprikladne normalizacije.
- Fleksibilnost u tipu podataka: Kao što je navedeno, PROMETHEE je razvijen upravo da može koristiti kvalitativne informacije. Kroz funkcije preferencije moguće je ordinalne ocjene (npr. skala 1–5 za „prilagodljivost tehnologije”) prevesti u

kvantitativne preferencije. Ostale metode, primjerice standardni TOPSIS⁹ ili raniji ORESTE¹⁰, slabije su se nosile s takvim podacima.

- Nema potrebe za konzistentnošću usporedbi parova: Za razliku od AHP-a, ne traži od korisnika da uspoređuje kriterije par-po-par i provjerava konzistentnost, što štedi vrijeme i izbjegava subjektivne inkonzistencije.
- Vizualni alati (GAIA): PROMETHEE dolazi s dodatnim alatom GAIA koji pruža grafički prikaz alternativa i kriterija u prostoru kompromisa. Ta vizualizacija je velika prednost jer se mogu uočiti konflikti i provjeriti robustnost rješenja.
- Softverska podrška: Danas postoje user-friendly softveri (Visual PROMETHEE, D-Sight) koji olakšavaju primjenu metode čak i neiskusnim korisnicima. Oni pružaju interaktivnu promjenu težina (npr. klizači ili zvjezdice) i odmah pokazuju utjecaj na rang, što je vrlo edukativno i praktično za rad s donositeljima odluka.

Međutim, iako se smatraju zanemarivima, potrebno je navesti i nedostatke primjene metode. Osnovni nedostaci su sljedeći [160]:

- Subjektivnost u odabiru težina kriterija: PROMETHEE ne nudi jasan mehanizam za dodjelu težina – prepušta to korisniku. Za razliku od AHP (koji sustavno derivira težine iz usporednih procjena), ovdje korisnik mora sam dodijeliti težine (kroz neformalni postupak ili preuzeti iz neke druge metode). To znači da su rezultati vrlo osjetljivi na izbor težina, i taj je izbor subjektivan. U praksi se to rješava konzultacijama sa stručnjacima ili interesnim stranama, ali ipak ostaje mogućnost prigovora „što ako su težine drugačije postavljene”.
- Odabir funkcija preferencije i parametara: PROMETHEE zahtijeva da se za svaki kriterij odabere oblik preferencijske funkcije (*usual*, *U-Shape*, *V-Shape*, *level*, *Gaussian*, itd.) i eventualno pragove q (indiferencije) i p (preferencije). Određivanje tih pragova može biti problematično – često nema jasnog pravila, pa se opet oslanja na stručnu procjenu ili testiranje osjetljivosti. Neiskusnim korisnicima ovo je zahtjevno: npr. kako točno odrediti da je za kriterij „CAPEX” $q=0,1$ milijuna EUR, a $p=0,5$ milijuna EUR? Pogreške u procjeni pragova mogu utjecati na rang.
- Moguć „rank reversal”: Iako *outranking* metode uglavnom izbjegavaju *rank reversal* (problemi koje ima AHP kod dodavanja/uklanjanja alternativa), PROMETHEE ipak nije imun na pojavu promjene rangova ako se doda nova alternativa ili ukloni neka postojeća u specifičnim okolnostima. To znači da je rezultat relativan – ako se naknadno uvrsti novu tehnologiju u razmatranje, moguće je da se redoslijed poremeti. Zato valja pažljivo definirati skup opcija unaprijed.
- Identifikacija slabosti alternativa: Konačni rezultati PROMETHEE (Phi neto) daju rang, ali ne pokazuju izravno po kojim kriterijima je neka alternativa najslabija ili najjača u numeričkom obliku. To se mora iščitavati iz GAIA grafova ili kroz detaljne preferencijske indekse po parovima. Drugim riječima, PROMETHEE ne daje

⁹ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.

¹⁰ Organisation, Rangement et Synthèse de données relationnelles.

automatski listu „ova alternativa je loša u kriteriju X”, već to analitičar mora zaključiti iz ulaznih podataka i parcijalnih tokova.

- Ograničenje broja kriterija: Formalno, PROMETHEE može rukovati desecima kriterija, no kognitivno opterećenje za donositelja odluke raste. Literatura navodi da je sa preko ~7 kriterija teško imati jasan pregled problema. AHP tu pomaže hijerarhijom, dok osnovni PROMETHEE nema ugrađenu hijerarhiju kriterija (iako postoji proširenje PROMETHEE strukture za to, tzv. PROMETHEE GDSS i sl.). U ovoj disertaciji, to je riješeno grupiranjem kriterija u 3 skupine (Tehnički, Socio-ekonomski, Okolišni) – što je hijerarhijski element dodan u modelu – i dodjelom težina grupama. Time je zapravo kombinirana ideja AHP (*level* kriterija) s PROMETHEE-om. No, korisniku treba pojasniti da PROMETHEE II u osnovi rangira “plosnato” bez hijerarhije, a da su ručno grupirani kriteriji radi preglednosti.
- Nedeterminiranost težina – višekriterijske analize općenito: Rezultati PROMETHEE su točni koliko i ulazne pretpostavke. Ako ulazni podaci (vrijednosti kriterija) imaju nesigurnost ili su ocjene stručnjaka, u analizu se uvlači nesigurnost. PROMETHEE nema eksplicitni mehanizam za rad s intervalima ili *fuzzy* podacima u osnovnoj verziji (postoji *Fuzzy-PROMETHEE* varijanta, ali ne u standardnoj primjeni). Stoga je nužno raditi analizu osjetljivosti – što je izrađeno u sklopu ove disertacije (*Visual Stability Intervals*). Time se provjerava koliko male promjene u težinama utječu na odluku. U radu, stabilnost odabrane tehnologije testirana je i utvrđeno je da je prilično robustna unutar određenih granica težina. To ulijeva povjerenje da se odluci može vjerovati.

3.5. Korištenje metode

Tijekom izrade modela u PROMETHEE metodi, potrebno je definirati problem koji je potrebno riješiti te sukladno tome i sljedeće parametre:

Opcija (engl. *Action*):

Opcije u modelu predstavljaju tehnološka rješenja koja se međusobno uspoređuju u postupku višekriterijskog odlučivanja. Strukturirane su prema fazi otpadnog toka na koju se primjenjuju te prema vrsti uporabe (energetska ili materijalna).

Unutar *opcije a* (obrada krutih tokova) razmatraju se tehnologije označene rimskim brojevima:

- Ia – proces izgaranja digestata/otpadnog mulja (energetska uporaba),
- IIa – recirkulacija digestata/otpadnog mulja,
- IIIa – materijalna uporaba (npr. izdvajanje fosfora).

Unutar *opcije b* (uporaba iz tekućih tokova) razmatraju se:

- Ib – energetska uporaba topline iz otpadne vode,
- IIb – materijalna uporaba hranjivih tvari iz tekuće faze (npr. kristalizacija struvita).

Svaka pojedina tehnologija karakterizira se skupom tehničkih, energetskih, okolišnih i ekonomskih parametara koji određuju njezinu izvedivost i poželjnost prema definiranim

kriterijima modela. Time se omogućuje sustavna i usporediva evaluacija alternativa unutar jasno definiranih granica sustava.

Kriteriji (engl. *Criteria*):

Kriteriji su pokazatelji ili parametri prema kojima se opcije međusobno uspoređuju. U modelu su kriteriji podijeljeni u tri glavne skupine: tehnološke (pouzdanost, zrelost tehnologije), socio-ekonomske (troškovi, javna prihvatljivost) i okolišne (emisije, ekološki otisak). Svaki kriterij ima definirani raspon vrijednosti i preferencijsku funkciju koja određuje kako se razlike između opcija na tom kriteriju tumače u smislu preferencije.

Scenariji (engl. *Scenario*):

Scenariji predstavljaju različite konfiguracije težinskih faktora kriterija koji odražavaju prioritete različitih dionika ili situacija. U ovom radu definirani su tri scenarija: „Javnost” (veći težinski faktor socio-ekonomskim kriterijima), „Tehnički aspekt” (prioritet tehnološkim kriterijima) i „Okoliš” (prioritet okolišnim kriterijima). Svaki scenarij generira zasebno rangiranje opcija, omogućujući analizu osjetljivosti rezultata na promjene prioriteta.

Pretpostavke modela (ljestvica preferenci) (engl. *Preference Function*):

Pretpostavke modela ili preferencijske funkcije određuju kako se kvantificira preferencija jedne opcije nad drugom na osnovu razlike u njihovim vrijednostima za određeni kriterij. PROMETHEE metoda koristi šest tipova preferencijskih funkcija (tip I–VI), od kojih svaka ima parametre poput praga indiferencije (q – razlika ispod koje se smatra jednakom) i praga preference (p – razlika iznad koje jedna opcija preferira drugu). Na primjer, linearna funkcija tip V koristi se za kontinuirane kriterije gdje preferencija linearno raste s povećanjem razlike između opcija.

Organizacija kriterija:

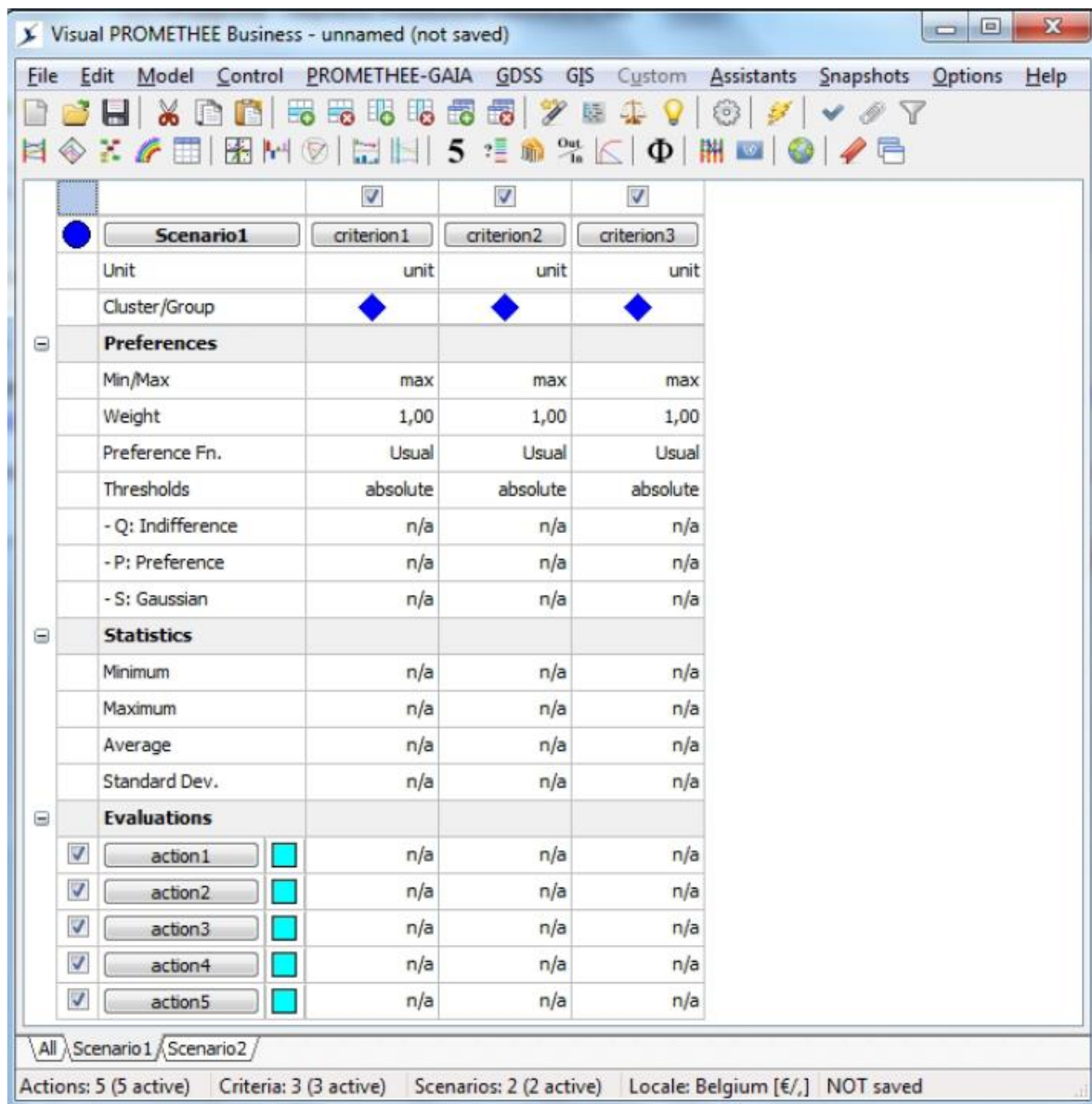
Organizacija kriterija podrazumijeva hijerarhijsku strukturu u kojoj su svi kriteriji podijeljeni u logičke skupine (tehnološki, socio-ekonomski, okolišni) radi lakšeg upravljanja i interpretacije. Unutar svake skupine kriteriji imaju relativne težine koje se agregiraju u ukupnu težinu skupine. Ova struktura omogućuje fleksibilnost – donositelj odluke može mijenjati težine pojedinačnih kriterija ili cijelih skupina prema specifičnim prioritetima, bez mijenjanja osnovnog modela.

Kriterijske težine (engl. *Weight*):

Kriterijske težine izražavaju relativnu važnost svakog kriterija u ukupnoj evaluaciji opcija. Zbroj težina svih kriterija iznosi jedan (normalizirane težine), a njihova distribucija određuje konačno rangiranje. Na primjer, ako kriterij „emisije CO₂” ima težinu 0,15, a „investicijski troškovi” 0,12, prvi kriterij ima 25% veći utjecaj na konačnu ocjenu. Težine se definiraju

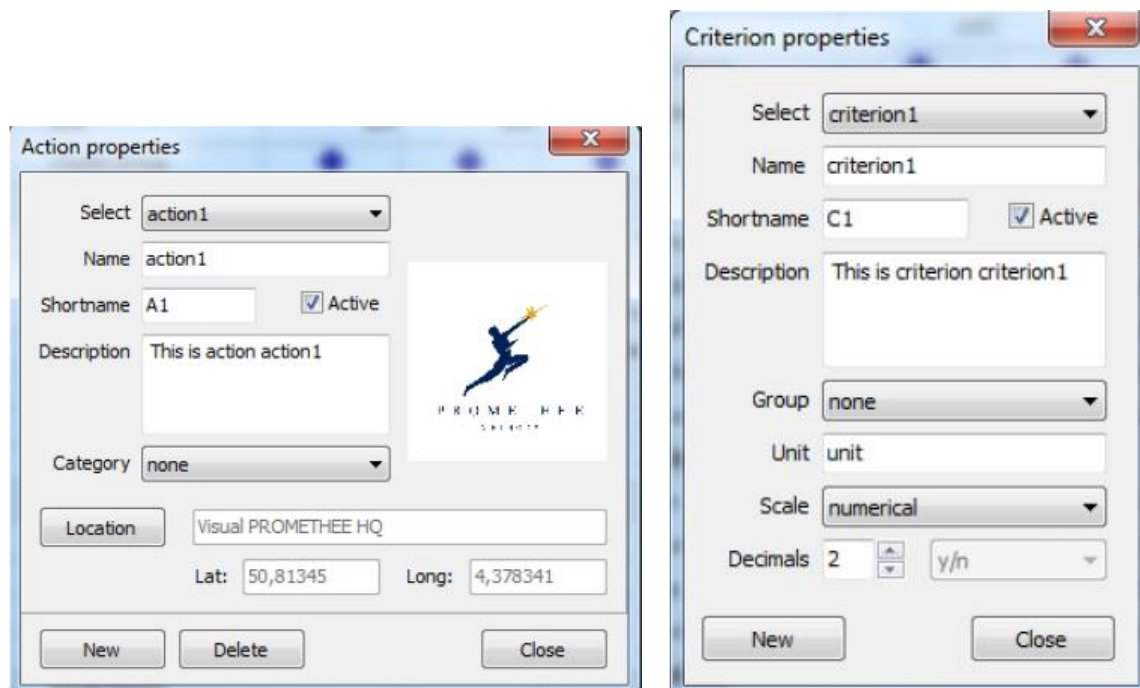
subjektivno prema prioritetima dionika ili objektivno statističkim metodama, a njihova varijacija koristi se u analizi osjetljivosti modela.

Grafički primjer postavljanja opcija, kriterija i scenarija prikazan je na Slika 6.:



Slika 6. Grafički prikaz primjera osnovnog sučelja PROMETHEE metode [108]

Definiranje aktivnosti i kriterija izvršava se u zasebnim programskom dijalogima, koji su prikazani na sljedećoj slici (Slika 7.):



Slika 7. Definiranje opcija (lijevo) i kriterija (desno) [108]

Kriterijska hijerarhija u PROMETHEE metodi organizirana je u tri razine, kako bi se olakšalo upravljanje velikim brojem kriterija i njihovo ponderiranje prema prioritetima dionika. Ova struktura vizualno je prikazana na Slika 8. i sastoji se od sljedećih razina:

Razina 1: Skupine (engl. *Cluster*)

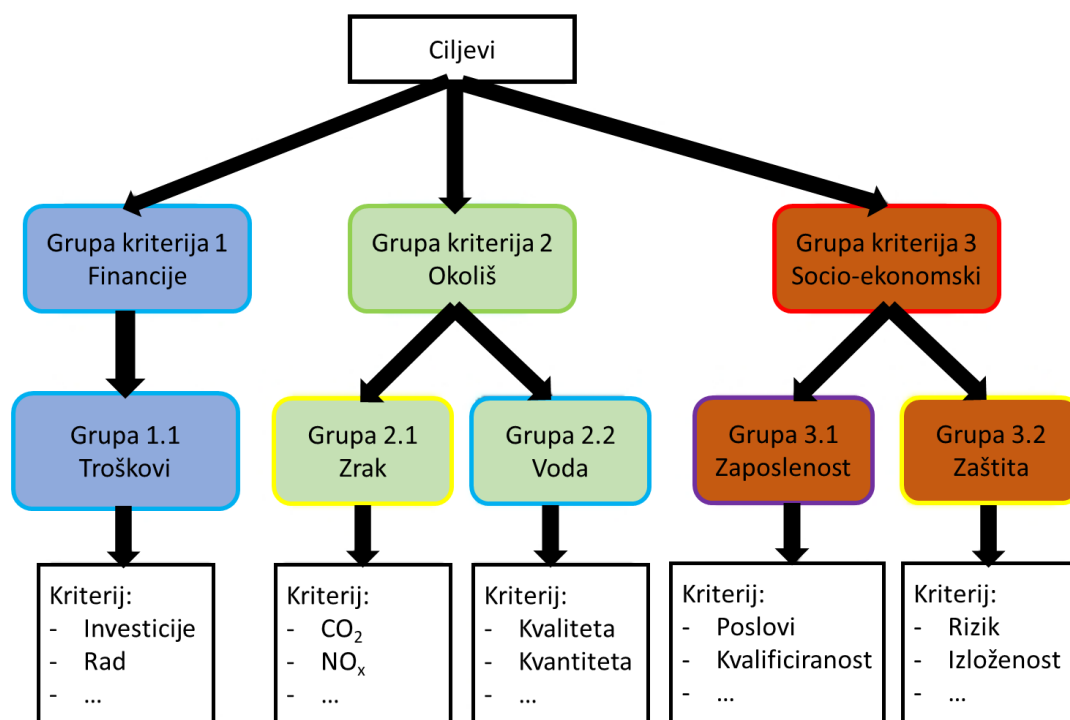
- Najviša razina hijerarhije – 3 glavne skupine kriterija
- Identificirana oblikom i bojom kojom je ispunjen oblik

Razina 2: Grupe kriterija (engl. *Group*)

- Srednja razina – podskupine unutar svake glavne skupine
- Svaka grupa pripada određenoj skupini (boja ispunjenja jednaka nadređenoj skupini). Identificirane su oblikom vlastite skupine te bojom ispune, kao i specifičnom bojom vanjske linije.

Razina 3: Pojedinačni kriteriji (engl. *Criteria*)

- Najniža razina – konkretni, mjerljivi parametri
- Svaki kriterij pripada jedinstvenoj grupi na razini 2
- Označeni su: malim brojevima i nazivom unutar svog oblika



Slika 8. Hijerarhijska raspodjela kriterija [108]

Metoda omogućava unos različitih scenarija. Svaki definirani scenarij razmatra isti skup opcija (alternativnih tehnologija zbrinjavanja) i istu strukturu kriterija (tri grupe kriterija s pripadajućim pod-kriterijima i kvalitativnim ljestvicama ocjenjivanja).

- *Skup opcija*: Ovdje se misli na skup alternativa i tipove alternativa. Ako scenarij sadrži jednake skupove opcija, znači da se u svakom scenariju rangiraju iste alternative (nisu mijenjane alternative, samo težine).
- *Grupe kriterija i sami kriteriji*: Model sadrži hijerarhiju kriterija: na vrhu su 3 grupe kriterija (Tehnički, Socio-ekonomski, Okolišni), unutar kojih se nalaze pod-kriteriji. Sve alternativne opcije evaluirane su po istim kriterijima, istim ljestvicama – kroz sve scenarije zadržava se identičan skup opcija i kriterija.

Međutim, različiti scenariji razlikuju se na temelju vrijednosti za svaku opciju te strukturu pretpostavki (ljestvice preferencija) za svaki kriterij. Težinske vrijednosti moraju biti specificirane za svaki kriterij, što uključuje i različite težinske omjere u specifičnim scenarijima. To je provedivo pomoću funkcije *Weighing Assistant* (Slika 9.).

Name	Mode: %	Lock	Hierarchical Weight
none	20,0%	☐	20%
none	20,0%	☐	20%
Power	20,0%	☐	20%
Economy	40,0%	☐	40%
ESP	20,0%	☐	20%
Price	20,0%	☐	20%
Fuel	20,0%	☐	20%
Consumption	20,0%	☐	20%
Luxury	40,0%	☐	40%
Space	20,0%	☐	20%
Habitability	20,0%	☐	20%
Comfort	20,0%	☐	20%
Comfort	20,0%	☐	20%

☒ Hierarchical
 ☐ Absolute

Slika 9. Primjer unosa podataka o težinskim kriterijima [108]

Nakon što su definirane opcije, kriteriji te parametri preferencija (ljestvica preferencija te težine kriterija), moguće je rangirati opcije koristeći se PROMETHEE metodom. To se izvršava pomoću višekriterijske tablice, koja uključuje određen broj opcija i kriterija. Matematički gledano, problem je definiran na sljedeći način [108]:

$$\max \{f_1(a), f_2(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a) \mid a \in A\}$$

gdje A označava konačan set n opcija, a f_1 do f_k su kriteriji. $f_j(a)$ je procjena opcije prema kriteriju f_j . U slučaju navedene formule, kriteriji su maksimizirani, međutim moguće ih je i minimizirati.

Procjena opcija u pogledu kriterija definira se u dvostupanjskoj višekriterijskoj tablici:

Tablica 1. Višekriterijska tablica [108]

	f_1	f_2	...	f_j	...	f_k
a_1	$f_1(a_1)$	$f_2(a_1)$	...	$f_j(a_1)$	...	$f_k(a_1)$
a_2	$f_1(a_2)$	$f_2(a_2)$	...	$f_j(a_2)$	...	$f_k(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
a_i	$f_1(a_i)$	$f_2(a_i)$	...	$f_j(a_i)$	...	$f_k(a_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
a_n	$f_1(a_n)$	$f_2(a_n)$	...	$f_j(a_n)$	...	$f_k(a_n)$

Konačni cilj za korisnika modela (donositelja odluke) je identifikacija opcije koja je najbolja (optimalna) u pogledu svih kriterija istovremeno. To je u većini slučajeva nemoguće, s obzirom na činjenicu da su kriteriji više-manje oprečni jedni drugima. Cilj višekriterijskog modela za donošenje odluka je u tom pogledu identificirati optimalni kompromis.

Kako bi se postigao navedeni cilj, potrebno je imati određene informacije o prioritetima donositelja odluka. Potrebne informacije nisu sadržane u višekriterijskoj tablici jer različiti donositelji odluka imaju različite prioritete. Sakupljanje informacija može se učiniti kroz nekoliko načina, no u ovoj disertaciji razmotrit će se opcija međusobne usporedbe.

Međutim, kako nisu poznate detaljnije informacije o prioritetima donositelja odluka u samom modelu (višekriterijskoj tablici), potrebno je postaviti određene preduvjete, kako bi model mogao funkcionirati. Za upotrebu kvalitetnog višekriterijskog modela, potrebno je uzeti u obzir sljedećih sedam preduvjeta:

1. preduvjet:

Potrebno je uzeti u obzir devijaciju amplituda između procjena opcije za svaki kriterij. Na primjer, nije jednaka razlika u dodatnoj isplati od 10 EUR ili od dodatnih 1.000 EUR.

2. preduvjet:

Kako svaki kriterij ima specifičnu ljestvicu i jedinicu mjere, trebalo bi izbjeći usporedbu kriterija s različitim jedinicama mjere.

3. preduvjet:

Kada se razmatra usporedba u parovima između dviju opcija a i b , pojavljuju se sljedeće tri situacije:

1. a je prioritetniji od b ;
2. a i b su indiferentni;
3. a i b nisu usporedivi jer su previše različiti: a je puno bolji od b u nekim kriterijima, dok je b puno bolji od a u drugim kriterijima.

4. preduvjet:

Različiti višekriterijski modeli zahtijevaju različite dodatne informacije i uključuju drukčije izračune kako bi rješenja koja predlažu bila različita. Zbog toga je ključno razviti model koji će biti razumljiv donositelju odluka. Potrebno je izbjeći učinak „crne kutije“, gdje korisnik modela ne može shvatiti kako se došlo do rezultata.

5. preduvjet:

Kvalitetan višekriterijski model ne smije uključivati tehničke parametre koji nemaju značenja za donositelja odluke. Takvi parametri mogu doprinijeti stvaranju učinka „crne kutije“.

6. preduvjet:

Kvalitetan višekriterijski model mora osigurati pristup informacijama o postojećim odnosima i oprečnostima između kriterija.

7. preduvjet:

Većina višekriterijskih modela uključuje težinske omjere kako bi definirala relativnu važnost kriterija. U većini slučajeva nije jednostavno definirati vrijednosti težina. Zbog toga je potrebno napraviti analizu osjetljivosti kako bi se definirala optimalna rješenja unutar kojih donositelj odluke može odabrati između ponuđenih opcija.

PROMETHEE metoda temelji se na usporedbi opcija u parovima (Tablica 1). Prema tome, prvi korak u modeliranju pomoću PROMETHEE metode jest međusobna usporedba opcija. To se postiže računanjem indeksa višekriterijskih prioriteta na sljedeći način:

$$\Pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j P_j(a, b)$$

gdje je

$w_j > 0$ normalizirana težina alocirana kriteriju f_j (što je važniji f_j , to je w_j veći); a

$P_j(a, b)$ označava vrijednost prioritetne funkcije za kriterij f_j kad je opcija a uspoređena s opcijom b .

Uz normalizirane vrijednosti, $\Pi(a, b)$ je broj između 0 i 1. On označava koliko je a prioritetniji od b , uzevši u obzir sve kriterije i njihove težine.

3.6. PROMETHEE rangiranje

Postoje dvije vrste rangiranja u PROMETHEE metodi, a one se temelje na postavljenim prioritetima: parcijalno i kompletno rangiranje. Prioriteti su dobiveni na temelju izračuna objedinjenih rezultata usporedbe opcija u paru i služe za rangiranje opcija od najbolje do najlošije.

Parcijalno rangiranje sastoji se od pozitivnog i negativnog rangiranja. Pozitivno rangiranje (Φ^+) mjeri koliko je opcija a prioritetnija od ostalih $n-1$. To je generalna mjera „jakosti“ opcije a . Što je $\Phi^+(a)$ veći, to je opcija bolja.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a, b)$$

Negativno rangiranje (Φ^-) mjeri koliko su ostale opcije $n-1$ prioritetnije od opcije a . To je generalna mjera „slabosti“ opcije a . Što je $\Phi^-(a)$ manji, to je opcija bolja.

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(b, a)$$

PROMETHEE I (parcijalno) rangiranje je presjek navedena dva rangiranja, tako da je opcija a prioritetnija od opcije b u ovoj vrsti rangiranja ako, i samo ako, je ona prioritetnija od b na temelju oba prioritetna rangiranja:

$$a P^I b \text{ ako i samo ako } \Phi^+(a) \geq \Phi^+(b) \text{ i } \Phi^-(a) \leq \Phi^-(b)$$

gdje P^I označava prioritet u PROMETHEE I rangiranju.

Kompletno rangiranje (Φ) predstavlja ravnotežu između pozitivnog i negativnog rangiranja:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$$

Prema tome, kompletno rangiranje uzima u obzir i akumulira „jakosti“ i „slabosti“ opcija u jednoznačan rezultat. $\Phi(a)$ može biti pozitivan ili negativan. Što je veći $\Phi(a)$, to je opcija bolja.

PROMETHEE II (kompletno) rangiranje je obuhvat usporedbe svih opcija, tijekom koje ne dolazi do neusporedivosti, čak ni u slučajevima kad je usporedba vrlo kompleksna. Rangiranje se temelji na ukupnim prioritetnim izračunima, koje kombinira parcijalna rangiranja u ukupni rezultat. Na taj način se prikazuje opcija a kao bolja od opcije b ako, i samo ako, je prioritetnija od b na temelju ukupnog prioritetnog rangiranja:

$$aP^I b \text{ ako i samo ako } \Phi(a) > \Phi(b)$$

gdje P^I označava prioritet u PROMETHEE II rangiranju.

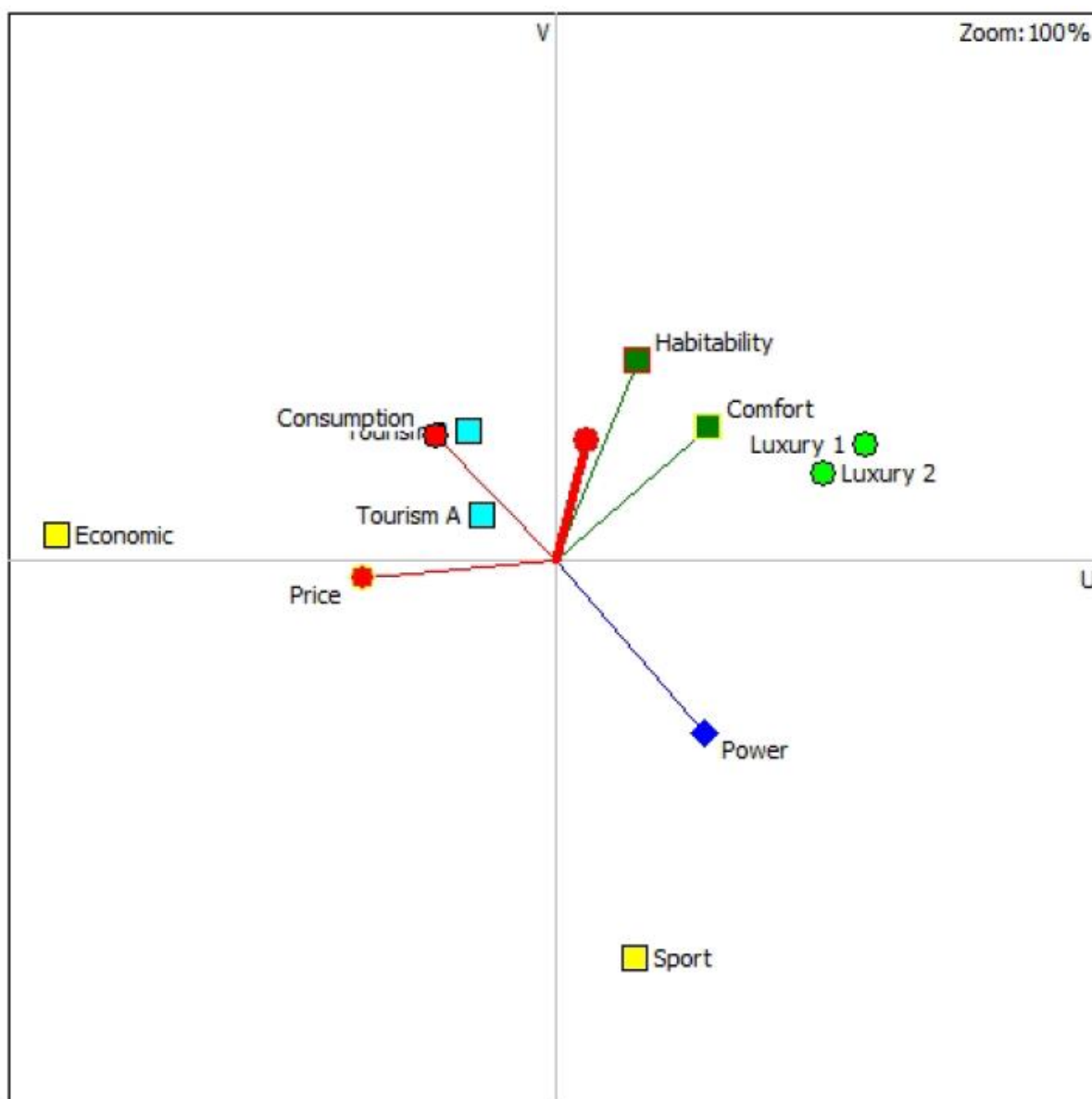
3.7. GAIA

GAIA je opisni i grafički dodatak PROMETHEE metodi i koristi se za grafički prikaz rezultata metode. Analiza koja se izvršava i prikazuje grafički temelji se na ukupnom jednokriterijskom (engl. *Unicriterion*) rezultatu, koji je sličan višekriterijskoj analizi PROMETHEE metode (Tablica 1):

Tablica 2. Jednokriterijska tablica GAIA softvera

	Φ_1	Φ_2	...	Φ_j	...	Φ_k
a_1	$\Phi_1(a_1)$	$\Phi_2(a_1)$	...	$\Phi_j(a_1)$	...	$\Phi_k(a_1)$
a_2	$\Phi_1(a_2)$	$\Phi_2(a_2)$	...	$\Phi_j(a_2)$	...	$\Phi_k(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
a_i	$\Phi_1(a_i)$	$\Phi_2(a_i)$	...	$\Phi_j(a_i)$	...	$\Phi_k(a_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
a_n	$\Phi_1(a_n)$	$\Phi_2(a_n)$	...	$\Phi_j(a_n)$	...	$\Phi_k(a_n)$

Međutim, Tablica 2. prikazuje širi opseg informacija jer uključuje prioritete definirane od strane donositelja odluka, za razliku od Tablica 1. To također znači da je svaki kriterij definiran kroz jednaku normaliziranu skalu (rezultati između -1 i +1). Svaka opcija je stoga povezana s k -dimenzionalnim profilom i može ju se definirati kao točku u k -dimenzionalnom prostoru (Slika 10).



Slika 10. Primjer GAIA prikaza rezultata modela [108]

Prema tome, očekuje se da slične opcije budu bliže jedna drugoj, a njihove lokacije u k -dimenzionalnom prostoru impliciraju koje su njihove „jakosti“ i „slabosti“. Relativna pozicija između opcija implicira i njihovu povezanost, kao i potencijalne oprečnosti između kriterija.

3.8. Odabir kriterija

Pregledom literature na temu energetske i materijalne oporabe otpada i otpadnih tokova (ali i proizvodnje energije iz drugih izvora), komunikacijom sa stručnjacima te iskustvom autora u području gospodarenja otpadom, definirani su kriteriji na temelju kojih će se vrednovati tehnologije (opcije) energetske i materijalne oporabe otpada.

Kriteriji su raspodijeljeni u tri skupine: *Tehnološki*, *Socio-ekonomski* te *Okolišni* (Slika 13).

1. *Tehnološka* skupina je podijeljena na tri grupe kriterija pod nazivima: *Tehnologija*, *Energija* i *Ostalo*.
2. *Socio-ekonomska* skupina podijeljena je na dvije grupe kriterija pod nazivima: *Pravno-administrativni okvir* te *Troškovi*.
3. *Okolišna* skupina sastoji se od jedne grupe kriterija pod nazivom: *Emisije*.

Navedenim grupama i skupinama kriterija pripada sveukupno 20 kriterija (Slika 13).

Kriteriji su definirani omjerima kvalitativno i kvantitativno. Kvantitativni prikaz će biti prikazan u sljedećim poglavljima, dok su težinski omjeri kriterija podijeljeni u dvije kvalitativne skupine: *pet-stupanjski* te *da/ne*. U slučaju pet-stupanjskog kvantitativnog težinskog omjera, napravljena je raspodjela na pet stupnjeva – od „jako loše“ (1), koji prikazuje najlošije karakteristike razmatranog kriterija (npr. najslabija pouzdanost tehnologije jer nije ispitana niti na laboratorijskoj razini), do „jako dobro“ (5), koji prikazuje najbolje karakteristike (npr. tehnologija je komercijalna i ispitana i zbog toga je dokazana njena pouzdanost), što je prikazano na Slika 11.

Level	Label	Value
1	jako loše	1
2	loše	2
3	prosječno	3
4	dobro	4
5	jako dobro	5
6		
7		
8		
9		
10		

Slika 11. Pet-stupanjski sustav ocjenjivanja kriterija (iz PROMETHEE metode)

U slučaju da/ne sustava, težinski kriteriji su definirani u pogledu binarne raspodjele, gdje „ne“ predstavlja vrijednost 0 (nije izvedivo), a „da“ predstavlja vrijednost 1 (izvedivo je). U PROMETHEE metodi je to moguće prikazati kao na Slika 12.

Qualitative Scales

×

Select

y/n

Name

y/n

Unit

y/n

Orientation

☐ Min
☒ Max

Number of levels (max 10)

2

Level	Label	Value
1	ne	0
2	da	1
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

New

Delete

Scale Builder

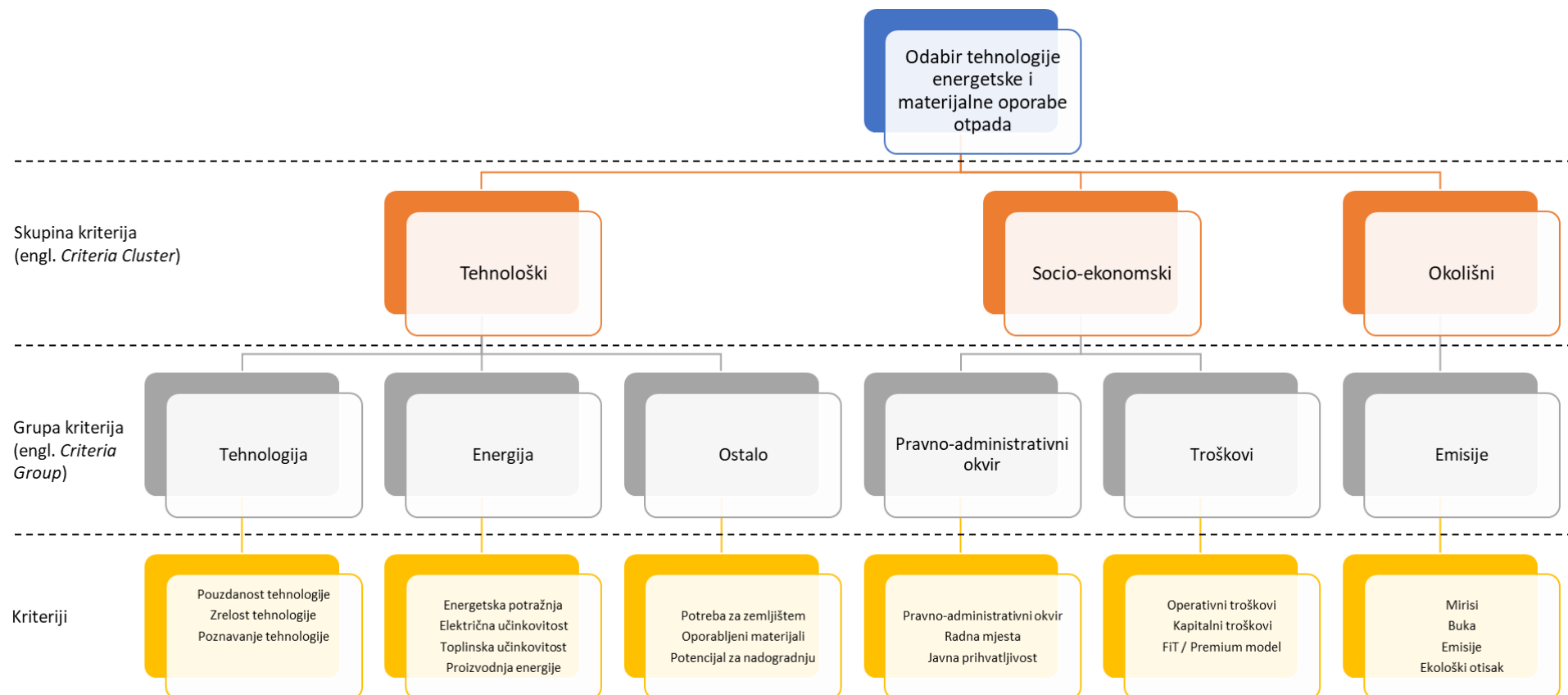
Close

Slika 12. Da/ne sustav ocjenjivanja kriterija (iz PROMETHEE metode)

Također, određene kriterije je potrebno maksimizirati, dok je druge potrebno minimizirati, kako bi se postigao optimalan rezultat i odabrala optimalna tehnologija, sukladno vrijednostima koje su zadane.

Na primjer, u slučaju kriterija *Proizvodnja energije*, isti je potrebno maksimizirati (*max*), tj. odabrati tehnologiju koja ima što veći prinos energije tijekom procesa i svog rada, čime joj se daje veći broj bodova. Na taj način navedena tehnologija, u pogledu razmatranog kriterija, ima bolji rang u usporedbi s ostalim tehnologijama. U slučaju da tehnologija proizvodi manju količinu energije tijekom svog rada, ona će biti lošije rangirana.

S druge strane, u slučaju kriterija *Energetska potražnja*, isti je potrebno minimizirati (*min*) jer se teži odabiru tehnologije koja zahtijeva što manju potrebu za vanjskim izvorom energije i koja je energetske najučinkovitija. U ovom slučaju se tehnologiji daje veći broj bodova ukoliko ona ima što nižu energetske potražnju, i manji broj bodova ukoliko ona ima višu energetske potražnju.



Slika 13. Hijerarhija kriterija za model energetske i materijalne oporabe otpada

3.8.1. Tehnološki kriteriji

Skupina kriterija *Tehnološki kriteriji* je jedna od najčešćih koje se pojavljuju u različitim radovima, znanstvenim istraživanjima, ali i komercijalnoj provedbi raznovrsnih modela. U ovom radu razmatrani su sektori gospodarenja otpadom i proizvodnje energije. Sukladno tome, literaturnim pregledom su prepoznati brojni kriteriji, od kojih su neki sljedeći:

- Pouzdanost tehnologije;
- Zrelost tehnologije;
- Varijabilnost procesnih parametara (u standardnim procesnim uvjetima);
- Modularnost;
- Dodatne emisije zbog tehnološke nadogradnje;
- Potreba za energijom tijekom rada postrojenja;
- Učinkovitost postrojenja;
- Potreba za kemikalijama i ulaznim sirovinama;
- Potrošnja vode;
- Potreba za zemljištem;
- Potencijal za nadogradnju;
- Održivost i predvidljivost (homogenost) ulaznog materijala;
- Itd.

Pregledom znanstvenih radova na temu gospodarenja otpadom, proizvodnje energije i korištenja PROMETHEE metode, uočen je obrazac ponavljanja određenih kriterija pomoću kojih se definiraju razni modeli. Modeli koji su razmatrani u slučaju ovog rada orijentirani su prema zbrinjavanju otpada i proizvodnji energije te stoga kriteriji koji se najčešće ponavljaju su prikazani u sljedećoj tablici (Tablica 3). U tablici su, uz kriterije, prikazane i jedinice koje se koriste za razmatrane kriterije, njihov pristup u pogledu optimizacije (maksimizacija ili minimizacija kriterija) te opis svakog od kriterija.

Tablica 3. Opis i pregled tehnoloških kriterija

Kriterij	Jedinica	Optimizacija	Opis
Zrelost tehnologije	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Ovaj kriterij ocjenjuje tehnologije koje se razmatraju. Zrelost tehnologije mjeri koliko je daleko tehnologija stigla u razvoju – od ideje na papiru do komercijalne primjene. Koristi se standardna 9-stupanjska TRL skala. Pouzdanost tehnologije moguće je mjeriti i na temelju broja postojećih operativnih postrojenja.
Pouzdanost tehnologije	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Kriterij koji definira broj mana i kvarova tehnologije. Pouzdanost mjeri vjerojatnost da će sustav raditi bez kvara u određenom vremenu i uvjetima. Što je manji broj nedostataka tehnologije i ista je dovoljno razvijena, to ovaj kriterij ima pozitivniji utjecaj na konačni rezultat odabira tehnologije.
Poznavanje tehnologije	Kvalitativno (da-ne)	Maksimizacija	Usklađenost izgradnje novog postrojenja i održavanja s tehnološkim znanjem lokalnih stručnjaka te lokacijom. Koliko su lokalni i nacionalni stručnjaci u području gospodarenja otpadom upoznati sa tehnologijama zbrinjavanja i energetske i/ili materijalne oporabe? Kolika je upoznatost rada tehnologija i njihovog korištenja?
Potreba za energijom tijekom rada	MWh/god.	Minimizacija	Energetska potražnja za toplinskom i električnom energijom tijekom rada postrojenja i tehnologije. Koliko električne i toplinske energije treba tehnologiji kako bi se proces energetske i/ili materijalne oporabe odvijao samostalno?
Električna učinkovitost	%	Maksimizacija	Koliko je električne energije moguće dobiti iz energetskog izvora? Omjer izlazne i ulazne energije, tj. koliko je proizvedeno energije u usporedbi s količinom dovedene energije.
Toplinska učinkovitost	%	Maksimizacija	Koliko je toplinske energije moguće dobiti iz energetskog izvora? Omjer izlazne i ulazne energije, tj. koliko je proizvedeno energije u usporedbi s količinom dovedene energije.
Potreba za zemljištem	m ²	Minimizacija	Različiti sustavi proizvodnje energije ili oporabe materijala zauzimaju određenu količinu zemljišta. Okoliš i krajolik su izravno pod utjecajem zauzetog zemljišta zbog korištenja i izgradnje sustava energetske i/ili materijalne oporabe. Iako bi ovaj kriterij potencijalno bio prikladniji u skupini <i>Okolišnih kriterija</i> , on je svrstan ovdje jer su razmatrane tehnologije uglavnom manjih dimenzija, i ne doprinose značajno okolišnom segmentu odabira.
Oporabljene materijali	Kvalitativno (da-ne)	Maksimizacija	Nastaju li prilikom korištenja tehnologije novi materijali? Materijali koji su oporabljene uporabom tehnologije iz otpadnih tokova koje se koriste kao ulaz u tehnologiju?
Proizvodnja energije	MWh/god.	Maksimizacija	Količina energije koja je proizvedena prilikom rada tehnologije. Ovaj kriterij se koncentrira na energetski segment oporabe otpadnog toka.
Potencijal za nadogradnju	Kvalitativno (da-ne)	Maksimizacija	Mogućnost daljnjeg razvoja tehnologije energetske/materijalne oporabe otpada. Koliko je tehnologija proučavana i istraživana? Postoji li mogućnost daljnjeg povećanja učinkovitosti, prinosa, itd?

3.8.2. Socio-ekonomski kriteriji

Skupina kriterija *Socio-ekonomski kriteriji* je vrlo značajna u sektorima gospodarenja otpadom i proizvodnje energije. Ovi kriteriji stvaraju podlogu i mogućnosti za primjenu tehnologija energetske i/ili materijalne uporabe otpadnih tokova.

Navedena skupina kriterija sadrži socijalni i ekonomski aspekt razmatranih tehnologija. Pregledom znanstvene literature, definirano je kako u socijalni aspekt spadaju kriteriji poput sljedećih:

- Usklađenost s pravno-administrativnim okvirom;
- Stvaranje novih radnih mjesta;
- Javna prihvatljivost;
- Politička prihvatljivost;
- Doprinos nacionalnom i lokalnom gospodarstvu;
- Doprinos javnom dobru;
- Itd.

S druge strane, ekonomski aspekt sačinjavaju kriteriji poput sljedećih:

- Kapitalni/investicijski troškovi (CAPEX);
- Operativni i troškovi održavanja (OPEX);
- Specifični troškovi električne/toplinske energije;
- Poticajne otkupne cijene (za proizvedenu energiju);
- Cijene goriva (električna energija, fosilna goriva, itd.) koja se koriste u postrojenjima;
- Neto sadašnja vrijednost (NPV);
- Razdoblje povrata investicije;
- Radni vijek postrojenja;
- Itd.

U pregledanim radovima uočen je obrazac ponavljanja određenih kriterija pomoću kojih se definiraju razni modeli. Kao i u slučaju prethodne skupine kriterija, modeli koji su razmatrani u slučaju ovog rada izrađeni su na temu gospodarenja otpadom i proizvodnje energije te su najčešće korišteni kriteriji definirani u sljedećoj tablici (Tablica 4.). U tablici su, uz kriterije, prikazane i jedinice koje se koriste za razmatrane kriterije, njihov pristup u pogledu optimizacije (maksimizacija ili minimizacija kriterija) te opis svakog od kriterija.

Međutim, u ovoj skupini kriterija je potrebno dodatno definirati specifične kriterije – riječ je o CAPEX i OPEX kriteriju, tj. kapitalnim i operativnim troškovima postrojenja. Iako su navedeni kriteriji općenito povezani sa svakom tehnologijom, potrebno je definirati o kojim se troškovima radi u svakoj zasebnoj tehnologiji.

U slučaju tehnologije izgaranja (**Ia**), CAPEX uključuje izradu infrastrukture i spremnika za digestat/otpadni mulj, sustav za izgaranje i kotao, sustav vode i pare, projektiranje i izgradnju te elektromehaničke instalacije [161]. No, u CAPEX tehnologije **Ia** je potrebno uključiti i zbrinjavanje ispušnih štetnih plinova, što dodatno uključuje sustave polusuhog postupka, vrećastih filtera i sustav selektivne ne-katalitičke redukcije (SNCR). Sve navedeno povećava OPEX postrojenja, koji se sastoji od održavanja sustava, troška zbrinjavanja lebdećeg pepela i

šljake, naknade za emisije te električne energije/prirodnog plina za pokretanje procesa izgaranja [161].

CAPEX i OPEX tehnologije **IIa** definirani su u radu Đurđević i Hulenčić [153], a povezani su s troškovima nadogradnje bioplinskog postrojenja, s ciljem recirkulacije digestata/otpadnog mulja ili proizvodnje gnojiva (struvita).

U slučaju materijalne oporabe otpadnog mulja i digestata (**IIIa**) [114], CAPEX uključuje izradu reaktora za struvitnu precipitaciju (npr. fluidizirani reaktor ili batch sustav), sustave doziranja kemikalija ($MgCl_2$, $NaOH/NH_4OH$), centrifuge ili filterske preše za odvajanje kristala, sušilicu/peletizer za finalni proizvod te elektromehaničke instalacije za integraciju u UPOV/bioplinsko postrojenje. Dodatno, potrebni su sustavi za praćenje kvalitete (pH, P, N) i certifikaciju gnojiva (teški metali, patogeni), što povećava CAPEX za 10–20% u odnosu na osnovne procese. OPEX se sastoji od kemikalija, energije za miješanje/dehidraciju, održavanja filtera i laboratorijske kontrole, uz naknade za transport i marketing gnojiva, ali s neto uštedama od zamjene sintetskih NPK.

Za tehnologije unutar *opcije b* (oporaba iz tekućih tokova) potrebno je naglasiti nekoliko specifičnih tehničko-ekonomskih i sustavnih aspekata koji ih razlikuju od tehnologija obrade krute frakcije. Za razliku od izgaranja, recirkulacije ili materijalne oporabe iz mulja/digestata, tehnologije *opcije b* djeluju na velikim volumenskim protocima s niskom koncentracijom suhe tvari, što značajno utječe na strukturu CAPEX-a, OPEX-a i na granice sustava.

U slučaju energetske oporabe otpadne vode (**Ib**), CAPEX obuhvaća izmjenjivače topline (kanalizacijski ili pločasti), sustav dizalice topline, cirkulacijske pumpe, toplinsku podstanicu, cjevovodnu infrastrukturu te elektromehaničku i upravljačku opremu [46]. Ako se toplina predaje u sustav daljinskog grijanja, CAPEX uključuje i integraciju s toplinskom mrežom (izmjenjivačke stanice, akumulaciju topline). Posebno je važno napomenuti da investicijski trošak značajno ovisi o udaljenosti potrošača i potrebi za novom toplinskom infrastrukturom.

OPEX tehnologije **Ib** dominantno čine :

- potrošnja električne energije za rad kompresora dizalice topline (ovisno o COP vrijednosti),
- troškovi održavanja kompresorskog i hidrauličkog sustava,
- periodično čišćenje izmjenjivača topline (zbog biofilma i taloženja),
- eventualni troškovi upravljanja temperaturom dotoka u UPOV.

Potrebno je dodatno naglasiti da izdvajanje topline može utjecati na biološke procese unutar UPOV-a (npr. smanjenje temperature i sporija nitrifikacija), što može indirektno povećati potrošnju energije za aeraciju. Stoga se kod opcije **Ib** mora analizirati i sustavni učinak na rad postrojenja, a ne samo proizvedena toplinska energija (kWh/m^3).

U slučaju materijalne oporabe iz tekuće faze (npr. kristalizacija struvita iz povratnih tokova) (**IIb**), CAPEX uključuje [162, 163]:

- reaktor za kristalizaciju (fluidizirani sloj ili miješani reaktor),
- sustave doziranja kemikalija ($MgCl_2$, $NaOH$),
- mjerne i upravljačke sustave (pH, ortofosfat, amonij),

- sustav za odvajanje i sušenje kristala,
- integraciju s povratnim tokovima (centrat/supernatant).

U odnosu na **IIIa** (struvit iz digestata/mulja), ovdje je važno naglasiti da je koncentracija ortofosfata u tekućoj fazi često niža, što znači da je ekonomika procesa osjetljivija na koncentraciju P i omjer Mg:N:P te na konfiguraciju UPOV-a (npr. prisutnost EBPR sustava).

OPEX tehnologije **IIb** sastoji se od:

- troškova kemikalija (Mg-sol, alkalni reagens),
- energije za miješanje i pumpanje,
- laboratorijske kontrole kvalitete,
- održavanja senzora i reaktora,
- troškova certifikacije i plasmana gnojiva.

Dodatno je potrebno napomenuti da kod *opcije b¹¹*:

- volumen tretirane vode značajno nadmašuje volumen krute frakcije,
- procesi su osjetljiviji na varijacije protoka i koncentracija,
- ekonomska održivost ovisi o tržišnoj cijeni energije (**Ib**) ili fosfornih gnojiva (**IIb**),
- okolišni učinak mora se sagledati kroz cjelokupnu bilancu postrojenja (plant-wide pristup).

U ovoj skupini kriterija, također je potrebno obratiti pozornost i na kriterij *Javna prihvatljivost* jer on u realnom svijetu ima značajan utjecaj na odabir tehnologije. Kad se sagleda odabir tehnologije na temelju postavljenog modela i unesenih postavki od strane donositelja odluka, navedeni kriterij u konačnici može biti mjerodavan kriterij. Razlog tome leži u principima demokracije, koji dozvoljavaju javnosti iznošenje vlastitog mišljenja o svojoj okolini, čime se može spriječiti izgradnja nekog od razmatranih postrojenja, unatoč tehničkoj, ekonomskoj i okolišnoj prihvatljivosti projekta.

¹¹ Ovi aspekti tehnologije nisu analizirani u disertaciji te ih je potrebno uzeti u obzir tijekom daljnje i detaljnije analize.

Tablica 4. Opis i pregled socio-ekonomskih kriterija

Kriterij	Jedinica	Optimizacija	Opis
Pravno-administrativni okvir	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Kriterij razmatra zakonodavne i administrativne okvire kojima se omogućava izgradnja i korištenje različitih tehnologija i postrojenja. Što je pravno-administrativni okvir kvalitetniji i razvijeniji, to je lakše primijeniti tehnologiju i omogućiti njen nesmetan rad.
Operativni troškovi (OPEX)	EUR/godišnje	Minimizacija	OPEX prikazuje troškove rada i održavanja postrojenja.
Kapitalni troškovi (CAPEX)	EUR	Minimizacija	CAPEX prikazuje troškove izgradnje i potrebnih investicija postrojenja.
Radna mjesta	#	Maksimizacija	Otvaranje novih radnih mjesta.
Javna prihvatljivost	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Prihvaćenost proizvodnje energije iz otpadnih tokova od strane zainteresirane javnosti.
FiT/Premium model	Kvalitativno (da-ne)	Maksimizacija	Postojanje mogućnosti korištenja <i>feed-in</i> tarife u svrhu stvaranja profita postrojenja za proizvodnju energije.

3.8.3. Okolišni kriteriji

Uz socijalni kriterij *Javna prihvatljivost*, skupina kriterija *Okolišni kriteriji* je jedna od najvažnijih kriterija koji doprinose donošenju odluka u sektorima gospodarenja otpadom i proizvodnje energije. Kao što je navedeno u uvodnom dijelu ovog rada, zaštita okoliša je u zadnjih nekoliko desetljeća poprimila na važnosti i zbog toga studije utjecaja na okoliš, koje prethode provedbi energetske projekata, postaju najznačajniji segment projekata.

Okolišni aspekt uključuje brojne stavke, ali pregledom literature ustanovljeno je kako su sljedeće jedne od zastupljenijih:

- Nastajanje i utjecaj neugodnih mirisa;
- Nastajanje i utjecaj buke;
- Nastali otpad i potreba za njegovim zbrinjavanjem;
- Emisije stakleničkih plinova i drugih čestica u atmosferu;
- Potencijal zakiseljavanja zbog nezbrinjavanja otpada;
- Mogućnost eutrofikacije zbog ispuštanja otpadnih tokova;
- Ekološki i ugljikov otisak;
- Toksičnost efluenta i emisija;
- Utjecaj na ljudsko zdravlje;
- Itd.

Pri korištenju okoliša treba štedljivo koristiti sastavnice okoliša i njima upravljati vodeći računa o mogućnostima ponovnog korištenja prirodnih i materijalnih dobara, te vodeći računa o sprječavanju onečišćivanja okoliša, mogućem nastanku šteta po okoliš i izbjegavanju stvaranja otpada, u najvećoj mogućoj mjeri. Sukladno načelima kružnog gospodarstva i bioekonomije, ukoliko otpad i nastane, potrebno ga je primjereno zbrinuti ili oporabiti.

U cilju preventivnosti, prilikom korištenja okoliša, primjenjuju se najbolje raspoložive tehnike i u svijetu priznati sustavi održavanja postrojenja. U ovom radu su prikazane tehnologije koje mogu pomoći donositeljima odluka u omogućavanju gospodarskog napretka kroz očuvanje okoliša, ukoliko se pridržavaju osnovnih komponenti zaštite okoliša, definiranih najčešćim pojavljivanjem i ponavljanjem u literaturi (Tablica 5.).

Tablica 5. Opis i pregled okolišnih kriterija

Kriterij	Jedinica	Optimizacija	Opis
Mirisi	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Stvaranje i utjecaj neugodnih mirisa tijekom rada postrojenja. Ovaj kriterij je potrebno maksimizirati jer se razmatra povećanje pozitivnog utjecaja na okoliš, tj. smanjenje pojavljivanja neugodnih mirisa zbog ispuštanja štetnih tvari u okoliš.
Buka	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Proizvodnja buke tijekom rada postrojenja. Ovaj kriterij je potrebno maksimizirati jer se razmatra povećanje pozitivnog utjecaja na okoliš, tj. smanjenje stvaranja buke od rada postrojenja, koja negativno utječe na okoliš i ljudsko zdravlje okoline u blizini postrojenja.
Emisije	t CO _{2eq}	Minimizacija	Emisije stakleničkih plinova u atmosferu. U ovom kriteriju razmotreni su svi staklenički plinovi koji nastaju tijekom rada razmatranih tehnologija. Kako bi se mogla napraviti usporedba navedenih tehnologija, korišten je potencijal globalnog zagrijavanja (GWP) svakog proizvedenog stakleničkog plina [164].
Ekološki otisak	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Ukupni utjecaj na okoliš – od izgradnje postrojenja pa do njegovog kraja radnog vijeka. Ekološki otisak je kvantitativan prikaz korištenja prirodnih resursa – u ovom modelu predstavlja skup kvantitativnih pokazatelja ukupnog utjecaja tehnologije na okoliš, izračunatih kroz cjeloviti LCA [165]. Ovaj kriterij je potrebno maksimizirati, jer veća ocjena ekološkog otiska označava manji negativan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje.

3.8.4. Granice sustava

Potrebno je naglasiti kako su razmatrani kriteriji bili odabrani i u skladu s granicama sustava koje su definirane za svaku tehnologiju:

- *Opcija a: Ia* (Slika 14), *IIa* (Slika 15) te *IIIa* (Slika 16) te
- *Opcija b: Ib* (Slika 17) te *IIb* (Slika 18).

Slike vizualno prikazuju hijerarhijski odnos tri razine granica za tehnologije energetske i materijalne uporabe digestata/otpadnog mulja i otpadne vode, gdje se:

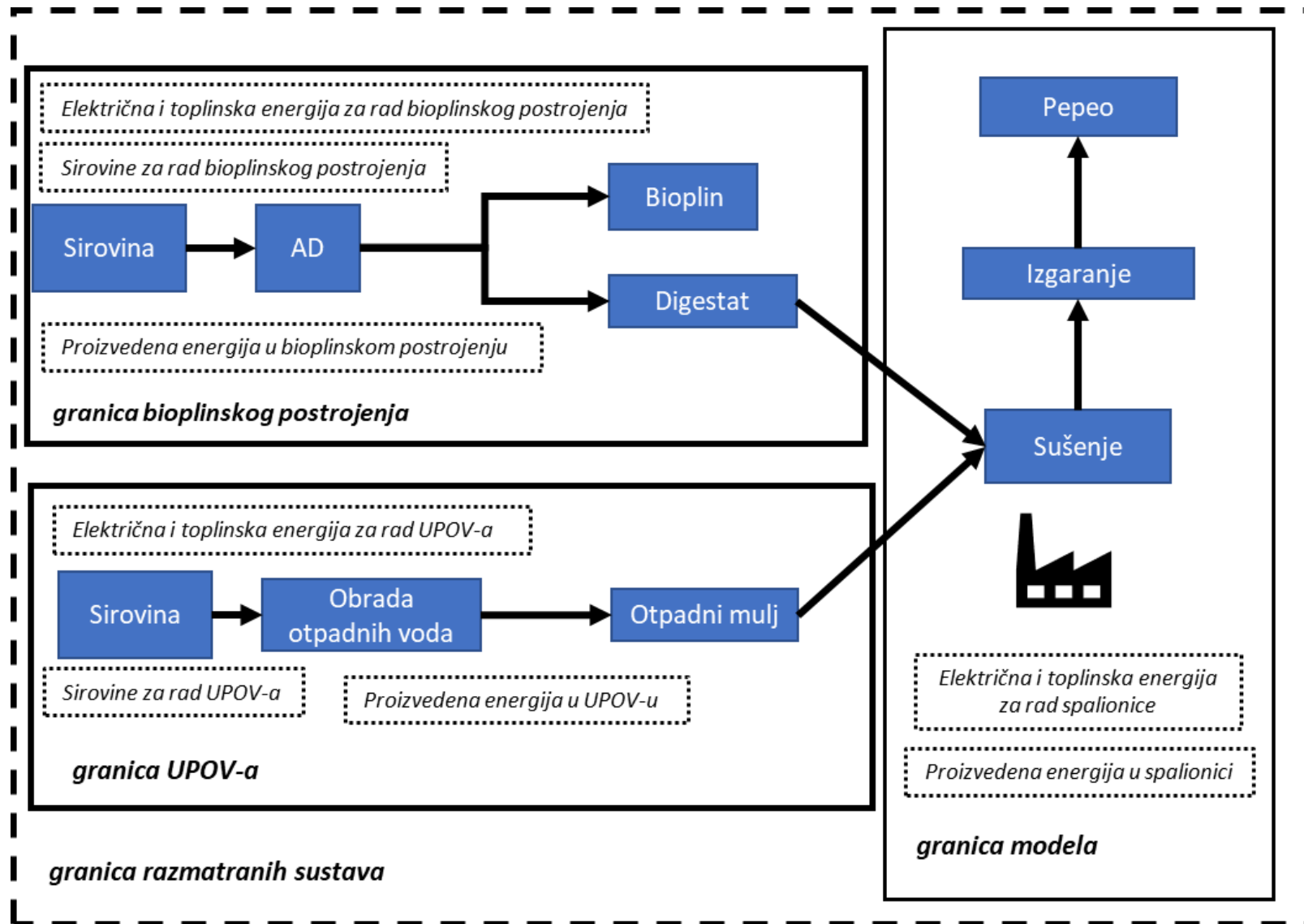
- granice tehnologije formiraju kao najuža „crna kutija“ postojećeg procesa,
- granice modela proširuju se na nadogradnju kao integrirani modul, a
- granice razmatranih sustava obuhvaćaju cjeloviti integrirani lanac s vanjskim interakcijama.

Ovaj pristup omogućuje preciznu LCA i MCDM analizu, gdje se svaka razina koristi za različite aspekte vrednovanja: tehničku dubinu, modularnu integraciju i holističku održivost sustava gospodarenja otpadom.

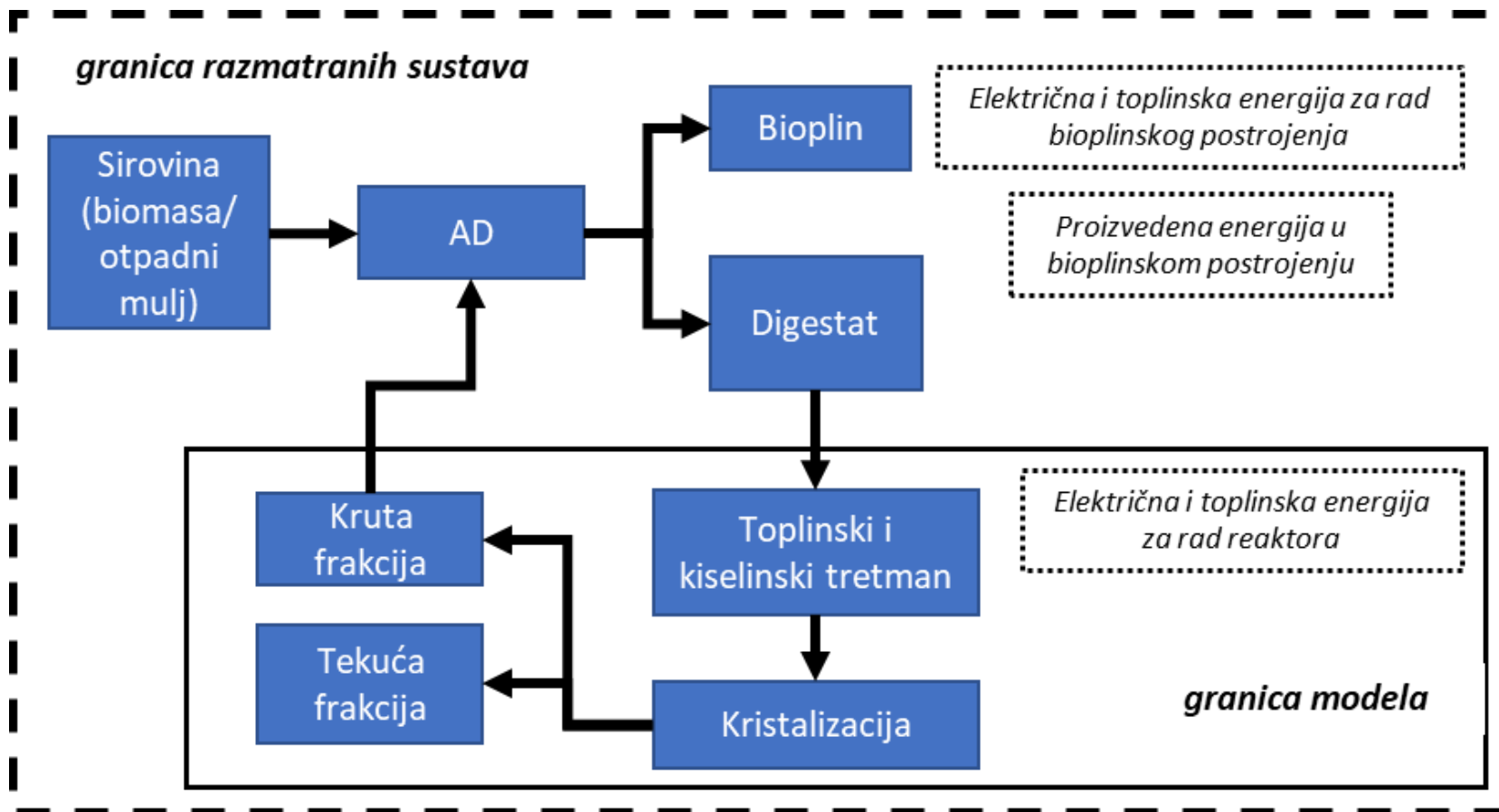
Granice tehnologije ograničene su na funkcionalni obuhvat inicijalne postojeće tehnologije prije nadogradnje, prikazane na slikama kao izolirana procesna jedinica. Na primjer, obuhvaćaju AD u bioplinskom postrojenju ili proizvodnju aktivnog mulja u UPOV-u – od ulaznih tokova sirovog supstrata/mulja, preko faza hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze, do izlaznih tokova sirovog digestata i bioplina. Međutim, ovdje nisu opisane “unutrašnjosti” tehnologije, nego njene uloge i pozicioniranje unutar šireg sustava gospodarenja otpadnim tokovima. Granice tehnologija definiraju koje se sve jedinice i tokovi uzimaju u obzir kako bi se razmatrane tehnologije unutar granica modela usporedile s alternativama na konzistentan način.

Granice modela proširuju granice tehnologije, kao analizirana nadogradnja postojeće tehnologije – nova jedinica se tretira kao modul s definiranom masenom i energetskom bilancom. Na primjer, unutar granica modela nalaze se recirkulacijska pumpa s povratom 10–30% tekuće/kruće frakcije u AD reaktor; dodatni reaktor za struvit s doziranjem potrebnih kemikalija; peletizer za gnojivo s integracijom u separaciju. Ova razina procjenjuje interne veze, sinergije s postojećom tehnologijom i performanse modula, bez širenja na vanjske tokove. Sukladno tome, modeli će se razmatrati kao konkurentne tehnologije za nadogradnju i međusobno uspoređivati pomoću PROMETHEE metode.

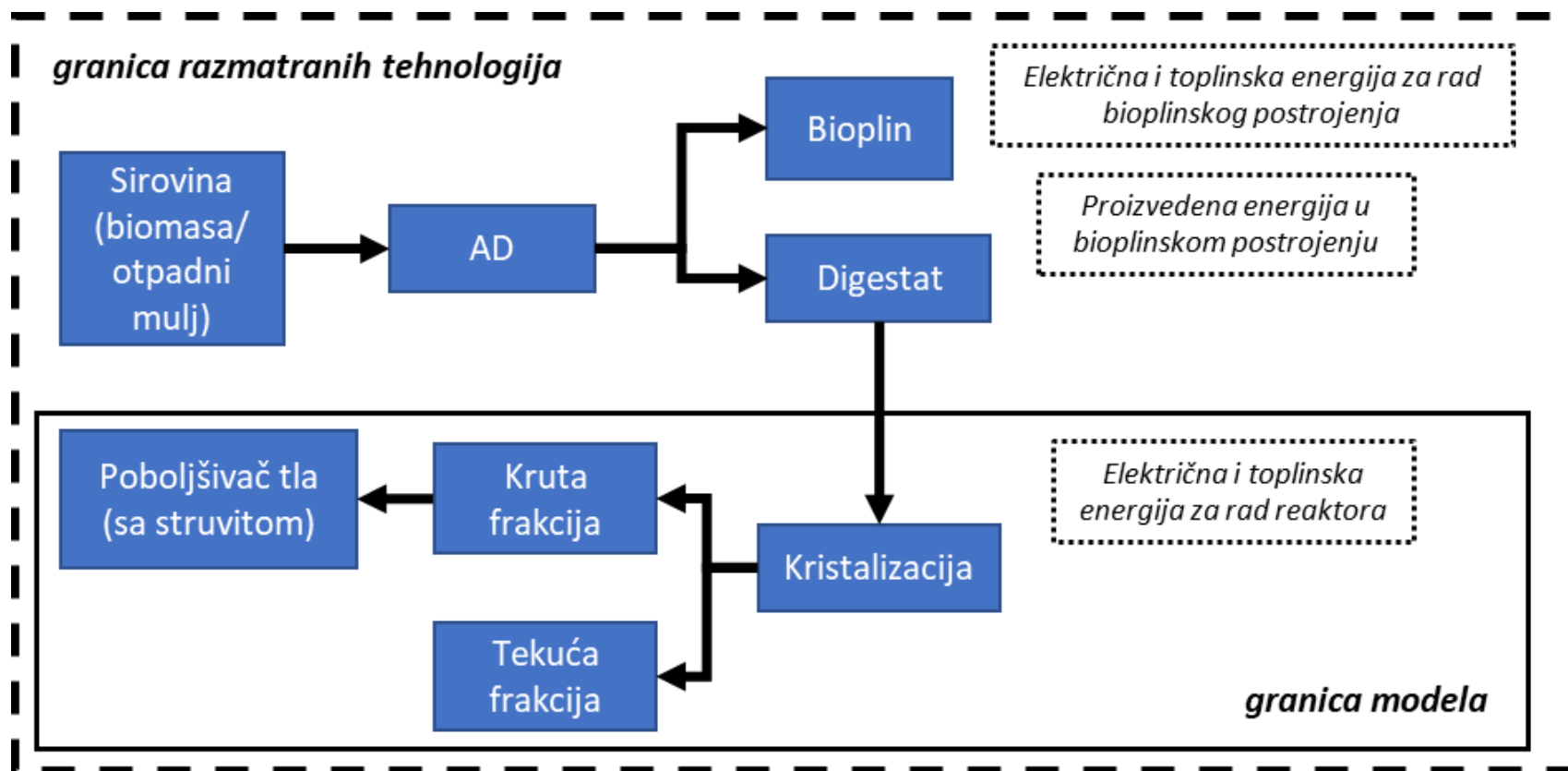
Granice razmatranih sustava najšire su i obuhvaćaju integrirani cjeloviti sustav (postojeću tehnologiju + model + vanjske interakcije), uključujući logistiku (interni transport frakcija), sinergije (toplina bioplina za sušenje mulja) i šire učinke (smanjenje eutrofikacije voda, P-ciklus). Na primjer, na slikama vidljivo proširenje na puni UPOV/bioplinsko postrojenje s izlaznim certificiranim gnojivom koje se može dalje koristiti u poljoprivredi, smanjenim N/P ispuštanjem i ukupnim GWP smanjenjem. Ova razina omogućuje holističku procjenu ključnu za MCDA u kružnoj ekonomiji. Cjelokupno razmatrani sustavi su prikazani kako bi se pozicioniralo rezultate modela unutar sustava – oni neće biti ukupno razmatrani zbog prevelikog broja faktora koje PROMETHEE ne može obuhvatiti, ali ih je potrebno spomenuti kako bi se prikazala cjelokupna, holistička slika sustava.



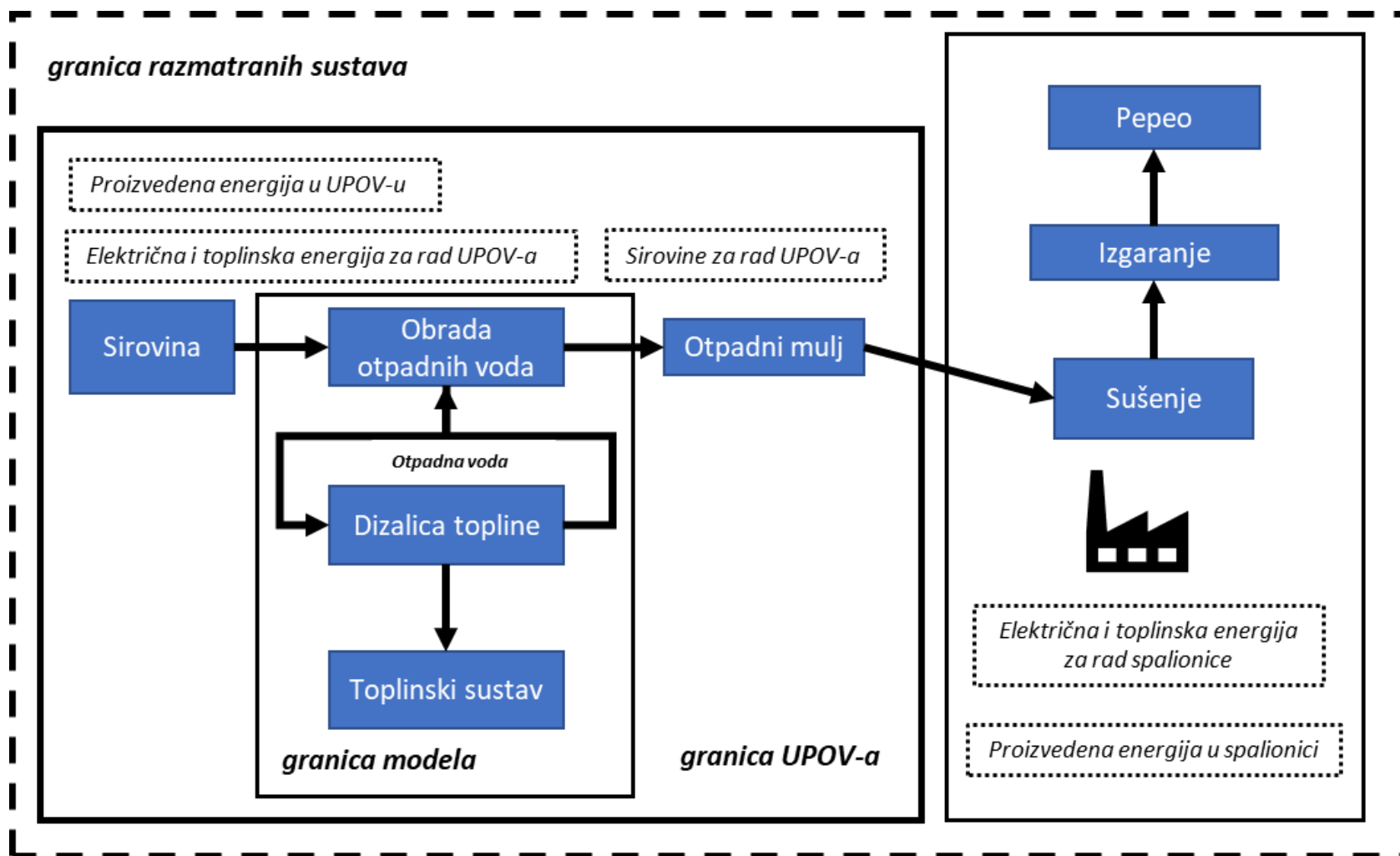
Slika 14. Granica modela za tehnologiju 1a (izgaranje digestata/otpadnog mulja)



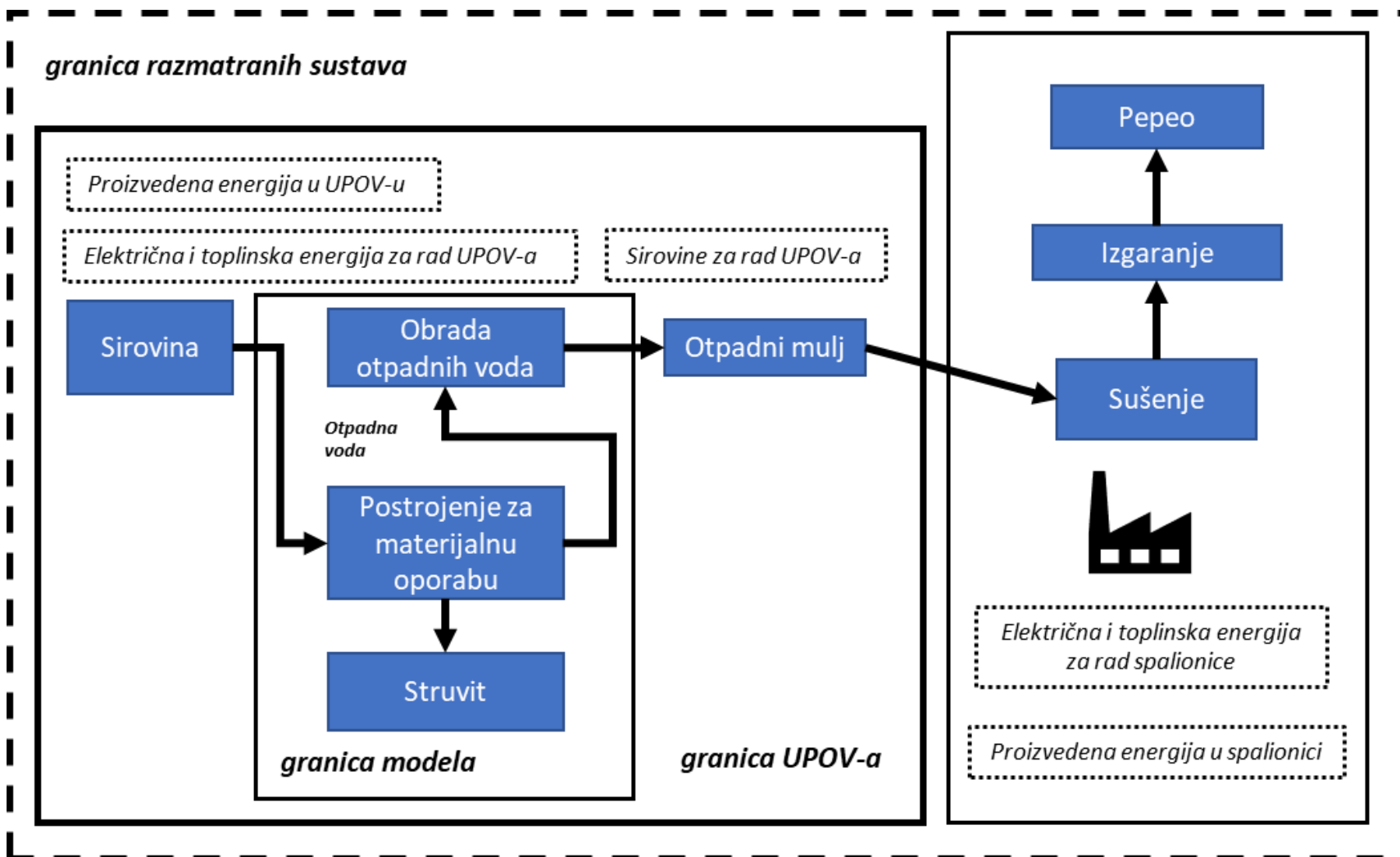
Slika 15. Granica modela za tehnologiju IIa (recirkulacija digestata/otpadnog mulja)



Slika 16. Granica modela za tehnologiju IIIa (materijalna uporaba)



Slika 17. Granica modela za tehnologiju **Ib** (energetska uporaba)



Slika 18. Granica modela za tehnologiju **IIB** (materijalna uporaba)

3.9. Izrada modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe

Nakon definiranja kriterija, potrebno je definirati raspon kriterija unutar kojeg model funkcionira, opcije (tehnologije) te scenarije u kojima će se one proučavati. U ovoj disertaciji koristit će se PROMETHEE metoda za izradu modela odabira tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova – digestata te otpadnog mulja.

Da bi odluke dobivene PROMETHEE metodom bile pouzdane, moraju biti zadovoljeni uvjeti:

1. Kvaliteta podataka o tehnologijama: Sve tehnologije trebaju biti procijenjene po svim kriterijima na temelju vjerodostojnih izvora (literatura, mjerenja, stručnost). U ovoj disertaciji je to osigurano razmatranjem literaturno kompiliranih vrijednosti za sve razmatrane tehnologije. Bitno je da su ti podaci usporedivi i relevantni za konkretan slučaj (regiju). U slučaju disertacije, svi brojevi su prilagođeni na jednake uvjete (npr. za 0,5 MW_{el} bioplinsko postrojenje, 40.000 ekvivalent stanovnika (ES) UPOV-a, itd.) kako bi usporedba bila ravnopravna.
2. Logičan odabir kriterija i preferencijskih funkcija: Kriteriji moraju obuhvatiti sve bitne aspekte odluke (tehničke, ekonomske, okolišne). Također, preferencijske funkcije trebaju prikazivati stvarne preferencije korisnika. Npr. ako je razlika od 5% u učinkovitosti zanemariva za odluku, tad prag indiferencije q treba biti barem 5% u funkciji. Ako je to krivo postavljeno (npr. $q=0$ pa i mala razlika prelazi u prednost), vrednovanje i rangiranje može biti iskrivljeno. Dakle, pouzdanost zahtijeva da je modeliranje preferencija ispravno kalibrirano.
3. Transparentnost i participacija: U realnim odlukama, poželjno je uključiti više dionika u definiciju težina i kriterija – tada odluka ima legitimitet i manje je pristrana. PROMETHEE ne nudi direktno grupno odlučivanje, ali se može ponoviti analiza s različitim perspektivama (kao što je napravljeno za scenarije „Javnost”, „Tehnički”, „Okoliš”). Ako sve te perspektive daju sličan rezultat, to jača povjerenje u odluku.
4. Analiza osjetljivosti: Prikaz stabilnosti rangiranja u razumnom rasponu promjena težina ključan je korak. Rezultati osjetljivosti unutar disertacije pokazuju da je odabrana tehnologija robusna unutar određenog intervala težine kriterija tehnologija i energije.

3.9.1. Raspon vrijednosti kriterija

Tehnologije (opcije) koje će se razmatrati unutar modela su definirane u poglavlju 3.5. Podaci uneseni u model temelje se na znanstvenim radovima, tehničkim izvješćima i analizama komercijalnih i pilot postrojenja, uzimajući u obzir stvarne radne uvjete UPOV-a u EU. Iako su pregledani podaci većinski teorijski, navedeni scenariji osvrću se na realno stanje u Italiji (analiza postrojenja u Lombardiji), zbog dostupnosti podataka i postojećih postrojenja.

Podaci su raspodijeljeni u dvije tablice:

- Tablica 6.: prikaz podataka za tehnologije razmatrane unutar opcije a
- Tablica 7.: prikaz podataka za tehnologije razmatrane unutar opcije b.

Tablica 6. Literaturni pregled raspona kriterija za svaku od tehnologija *opcije a* ¹²

Kriterij		Proces izgaranja	Recirkulacija	Materijalna uporaba	Jedinica	Izvor
1	Pouzdanost tehnologije	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	[166, 167]
2	Zrelost tehnologije	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	[166, 167]
3	Poznavanje tehnologije	ne – da (2 stupnja)			/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora
4	Energetska potražnja	3.000 – 9.700	900 – 5.000	190 – 2.600	MWh/god.	[168, 152, 169, 170, 171, 172, 173]
5	Električna učinkovitost	20 – 35	30 – 35		%	[171, 174, 151, 175, 176]
6	Toplinska učinkovitost	35 – 60	40 – 70		%	[171, 174, 151, 177, 175]
7	Proizvodnja energije	5.000 – 65.000	1.600 – 14.000	1.000 – 6.000	MWh/god.	[170, 171, 169, 151, 177, 178, 176, 179]
8	Potreba za zemljištem	5.000 – 50.000	1.500 – 3.500		m²	[100, 180, 181, 182, 183]
9	Oporabljjeni materijali	ne – da (2 stupnja)			/	[166, 167, 184, 185]
10	Potencijal za nadogradnju	ne – da (2 stupnja)			/	[166, 167, 185]
11	Pravno-administrativni okvir	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	[186, 187, 188, 189, 190]
12	Radna mjesta	24	6 – 20	10 – 22	#	[161, 191, 192]
13	Javna prihvatljivost	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	[193, 194, 195, 196, 173, 197, 190]

¹² Kako bi se pojednostavio prikaz u tablici, teorijski podaci su zaokruženi na veći/manji cijeli broj.

Kriterij		Proces izgaranja	Recirkulacija	Materijalna uporaba	Jedinica	Izvor
14	Operativni troškovi	0,1 – 2 mil.	60.000 – 500.000	80.000 – 100.000	EUR/god	[169, 152, 161, 47, 172, 191, 198, 153, 199]
15	Kapitalni troškovi	1,5 – 7 mil.	0,5 – 4 mil.	0,5 – 4 mil.	EUR	[169, 152, 161, 47, 172, 191, 153, 200, 201, 202]
16	Fit/Premium model	ne – da (2 stupnja)			/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora
17	Mirisi	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	[169, 200, 203, 173, 204, 205, 206]
18	Buka	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	[205, 206, 200, 207]
19	Emisije	2.000 – 9.000	150 – 3.000	2.000 – 3.600	t CO _{2eq}	[169, 200, 168, 203, 207, 42, 177, 173] [206, 208, 193, 209, 198]
20	Ekološki otisak	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)			/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora

Tablica 7. Literaturni pregled raspona kriterija za svaku od tehnologija *opcije b* ¹³

Kriterij		Materijalna uporaba (rekuperacija struvita)	Dizalica topline	Jedinica	Izvor
1	Pouzdanost tehnologije	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	[210, 211, 182, 162, 47, 44, 43]
2	Zrelost tehnologije	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	[210, 182, 162, 44, 47, 181, 43]
3	Poznavanje tehnologije	ne – da (2 stupnja)		/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora
4	Energetska potražnja	1.000,00 – 3.500,00	634,00 – 2.500,00	MWh/god.	[168, 170, 211, 212, 213]
5	COP ¹⁴	/	2 – 3,5	/	[47, 44, 45, 181]
6	Proizvodnja energije	/	880,00 – 1.760,00	MWh/god.	[211, 47, 44, 45, 46]
7	Potreba za zemljištem	500 – 1.000	500 – 1.000	m ²	[214, 182, 47, 45, 181]
8	Oporabljeni materijali	ne – da (2 stupnja)		/	[215, 216, 182]
9	Potencijal za nadogradnju	ne – da (2 stupnja)		/	[215, 216, 47, 44]
10	Pravno-administrativni okvir	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	[215, 216, 211, 47, 45]
11	Radna mjesta	24	4 – 30	#	[214, 214, 44, 47, 46]
12	Javna prihvatljivost	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	[210, 213, 47, 46]
13	Operativni troškovi	0,1 – 2 mil.	42.000,00 – 220.000,00	EUR/god	[183, 211, 182, 214, 44, 45, 47]
14	Kapitalni troškovi	1,5 – 7 mil.	2,6 – 5,8 mil.	EUR	[211, 214, 44, 47, 181, 46]
15	Fit/Premium model	ne – da (2 stupnja)		/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora
16	Mirisi	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	[214, 213, 47, 46]
17	Buka	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	[214, 213, 47, 46]
18	Emisije	2.000 – 9.000	234,58 – 8.124,00	t CO _{2eq}	[183, 211, 214, 213, 44, 47, 181]
19	Ekološki otisak	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)		/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora

¹³ Kako bi se pojednostavio prikaz u tablici, teorijski podaci su zaokruženi na veći/manji cijeli broj.

¹⁴ U slučaju dizalice topline (energetska uporaba otpadne vode) razmatra se COP, umjesto električne i toplinske učinkovitosti.

3.9.2. Postavljanje scenarija i težišta

Navedene tehnologije razmotrene su kroz tri scenarija: *Javnost* (Slika 19.), *Tehnički aspekt* (Slika 20.) i *Okoliš* (Slika 21.). Prikazana tri scenarija su odabrana nastavno na literaturni pregled već postojećih modela, izrađenih za sektore gospodarenja otpadom i proizvodnje energije. Također, moguće je zaključiti kako se radi o tri značajna segmenta, koja mogu najviše utjecati na odabir određene tehnologije.

U praksi, inicijalne težine kriterija određuju se ekspertno ili dogovorno. Vrijedi spomenuti da u praktičnim odlukama industrijski korisnici i političari rijetko eksplicitno koriste PROMETHEE metodologiju – no, načela višekriterijskog vrednovanja svakako su prisutna. PROMETHEE pronalazi put uglavnom kroz formalne studije (savjetodavne ili akademske) koje onda služe kao podloga za odluku donositeljima. Važno je naglasiti: taj početni odabir nikad nije „objektivan odraz stvarnosti”, već odraz preferencija ili vrijednosnih sudova onih koji model postavljaju. U realnom sektoru, ne postoji jedna „istinita” težina kriterija – različiti dionici dali bi različite. Stoga se težine često biraju:

- metodom anketiranja donositelja odluka (npr. pitaju se stručnjaci da raspodjele 100 bodova na kriterije),
- ili pretpostavkom jednakih težina kad se želi neutralnost (pa se kasnije radi osjetljivost),
- ili korištenjem neke metode poput AHP-a, SMART¹⁵ i sl. da se izgradi konsenzus težina.

Kroz literaturu je vidljivo da se PROMETHEE uglavnom koristi u:

- Akademskim studijama (istraživačke analize slučaja, doktorske disertacije, EU projekti koji testiraju metodologije).
- Savjetodavnim studijama (npr. Joint Research Centre ili konzultantske kuće – ponekad primijene PROMETHEE za evaluaciju politika).
- Razvoju alata za podršku odluka: Primjer je D-Lab Decision softver koji zapravo implementira PROMETHEE u pozadini – koristi se primjerice u nekim belgijskim općinama za prostorno planiranje.

U svakodnevnom poslovanju, korisnici češće koriste jednostavnije alate (Excel s ponderiranim sumama, itd.). PROMETHEE se smatra prilično naprednim pristupom i uglavnom ga promoviraju ljudi upoznati s operacijskim istraživanjima. Ipak, vrijedno je istaknuti:

- Postoje primjeri gradova koji su uz pomoć znanstvenika koristili PROMETHEE za rangiranje investicija u zaštitu okoliša.
- Neki industrijski sustavi donošenja odluka (npr. izbor dobavljača, portfelj projekata) integrirali su multi-kriterijsko ocjenjivanje, koji je ekvivalent PROMETHEE-a (iako ga možda ne nazivaju tako).

Težine kriterija u ovome radu inicijalno su odabrane sukladno autorovoj procjeni i literaturnim smjernicama, a naknadno su testirane analizom osjetljivosti. U scenariju *Javnost* težište je

¹⁵ Simple Multi-Attribute Rating Technique

usmjereno prema prihvatljivosti od strane javnosti (i djelomično okolišnoj prihvatljivosti). To znači da su veće težine orijentirane na *Socio-ekonomsku* skupinu kriterija te se razmatra javno mnijenje i mišljenje zainteresiranih dionika o primjeni navedenih tehnologija. Sukladno korištenju opcije *Weighing Assistant*, prikazanom u poglavlju 3.5 (Slika 9), na Slici 19. su prikazane težine za scenarij *Javnost*, korištenjem načina „zvijezda“. Iako je na slici vidljivo kako hijerarhijske težine i dalje ima *Tehnička* skupina kriterija (kumulativne dvije zvijezde), koncentracija u ovom scenariju je na socio-ekonomskim kriterijima (gotovo pet zvijezda). Razlog tome leži u hijerarhijskoj raspodjeli kriterija, gdje prevladavaju tehnički kriteriji zbog njihove količine, u usporedbi s ostalim kriterijima – što znači da u trenutnom modelu nije moguće u potpunosti staviti kompletnu težinu (svih pet zvijezda) na *Socio-ekonomsku* skupinu kriterija (kako niti na *Pravno-administrativnu*, ni *Okolišnu*).

Težine kriterija određene su uz pomoć softvera Visual PROMETHEE: svakom kriteriju dodijeljena je ocjena važnosti (tzv. *weights* u obliku zvijezda), nakon čega su one normalizirane. Zato, primjerice, grupa „Tehnički“ ima 46% ukupne težine iako je korisnik dodijelio tek dvije zvjezdice po kriteriju – grupa sadrži tri kriterija, pa je zbroj njihovih bodova rezultirao većom agregiranom težinom. Korisnik nema direktnu kontrolu nad postotkom pojedinog kriterija osim kroz broj zvjezdica; no zato se koristi analiza osjetljivosti za provjeru utjecaja težina.

Kao što je već navedeno, javnost i dionici mogu biti mjerodavan čimbenik primjene određene tehnologije energetske i materijalne oporabe otpada jer svojim djelovanjem mogu utjecati na nastavak ili gašenje projekata vezanih uz sektor gospodarenja otpadom. Sukladno tome je potrebno postaviti ovakvu vrstu scenarija, gdje se može otkriti koliko točno javnost može imati utjecaj na odabir određene tehnologije.

Weighing Assistant

	Name	Mode: stars	Lock	Hierarchical Weight
+	none	★★★★★		0%
-	Tehnički	★★★☆☆		45%
+	Tehnologija	★☆☆☆☆		17%
+	Energija	★☆☆☆☆		14%
+	Ostalo	★☆☆☆☆		14%
-	Socio-ekonomski	★★★★★		31%
+	Pravno-administrativni	★☆☆☆☆		19%
+	Troškovi	★☆☆☆☆		13%
-	Okolišni	★☆☆☆☆		23%
+	Emisije	★☆☆☆☆		23%

☒ Hierarchical
 ☐ Absolute

Slika 19. Weighing Assistant prikaz za scenarij Javnost

U scenariju *Tehnički aspekt* veće težine kriterija su usmjerene prema *Tehnološkoj* skupini kriterija, gdje se razmatra sama tehnologija – njena dostupnost, zrelost te energija (proizvodnja, učinkovitost i ostalo). U ovom scenariju je težište manje usmjereno prema mišljenju javnosti jer se razmatra prvenstveno razvijenost tehnologije. Kriteriji vezani uz okoliš također imaju manju važnost jer se pretpostavlja kako će tehnološki naprednije opcije već imati razmotrenu i razvijenu okolišnu komponentu, gdje će negativan utjecaj na okoliš biti minimalan.

Nastavno na pristup korištenja *Weighing Assistant* opcije prikazane za slučaj scenarija *Javnost*, u nastavku su prikazane težine za scenarij *Tehnički aspekt* (Slika 20).

Weighing Assistant ✕

	Name	Mode: stars	Lock	Hierarchical Weight
-	none	★★★★★		0%
-	none	★★★★★		0%
-	Tehnički	★★★★★		64%
+	Tehnologija	★☆☆☆☆		22%
+	Energija	★☆☆☆☆		29%
+	Ostalo	★☆☆☆☆		13%
-	Socio-ekonomski	★☆☆☆☆		20%
+	Pravno-administrativni	☆☆☆☆☆		9%
+	Troškovi	★☆☆☆☆		11%
-	Okolišni	★☆☆☆☆		16%
+	Emisije	★☆☆☆☆		16%

☒ Hierarchical
 ☐ Absolute

Slika 20. Weighing Assistant prikaz za scenarij Tehnički aspekt

U zadnjem scenariju, pod nazivom *Okoliš*, težište je usmjereno prema utjecaju na okoliš. Pritom se misli na ukupni ekološki otisak koje tehnologije imaju na okoliš, ali i emisije koje nastaju tijekom samog rada svakog pojedinog postrojenja.

Na Slika 21. su prikazane težine za slučaj scenarija *Okoliš*, sukladno prethodno prikazanim slučajevima za *Tehnički aspekt* i *Javnost*.

Weighing Assistant

	Name	Mode: stars	Lock	Hierarchical Weight
+	none	★★★★★		0%
-	Tehnički	★★★☆☆		44%
+	Tehnologija	★☆☆☆☆		10%
+	Energija	★☆☆☆☆		13%
+	Ostalo	★☆☆☆☆		20%
-	Socio-ekonomski	★☆☆☆☆		20%
+	Pravno-administrativni	★☆☆☆☆		10%
+	Troškovi	★☆☆☆☆		10%
-	Okolišni	★★★★★		36%
+	Emisije	★★★☆☆		36%

☒ Hierarchical
 ☐ Absolute

Slika 21. Weighing Assistant prikaz za scenarij Okoliš

U prethodnim poglavljima, u kojima su definirane osnove za izradu modela, koristili su se objektivni podaci, definirani na temelju prethodnih istraživanja, postojećih komercijalnih postrojenja, komunikacije sa stručnjacima i iskustva autora u području rada ovog istraživanja.

Međutim, prilikom postavljanja težina kriterija i uporabe opcije *Weighing Assistant*, dolazi do izražaja subjektivnost metode, uzrokovane uključenjem korisnika (donositelja odluka). Korisnik postavlja težinske vrijednosti u izrađeni model, sukladno svojim preferencijama i potrebama okoline. No, iako se radi o relativno subjektivnom pristupu, PROMETHEE se više oslanja na kvalitativne ili kvantitativne podatke koji su dani za svaki kriterij i alternativu.

Kako bi se što više smanjila subjektivnost izrađenog modela, u ovom istraživanju su prikazana navedena tri scenarija sa maksimalnim mogućim težinama za svaku skupinu kriterija, te kako bi se jednostavnije prikazao utjecaj svakog od kriterija u daljnjim poglavljima.

3.9.3. Definiranje modela u PROMETHEE metodi

Nastavno na prethodna poglavlja, definirane su postavke PROMETHEE metode za izradu modela energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova. Grafički prikaz konfiguracije modela prikazan je na Slika 22. i

Slika 23.

Strukturni elementi modela (označeni crvenim okvirom na slici) obuhvaćaju:

- skup opcija (tehnologije **I-IIIa** i **I-IIb**);
- skup kriterija, organiziran u tematske skupine;
- jedinice mjere definirane za svaki kriterij;
- raspon vrijednosti pojedinog kriterija (minimalne i maksimalne vrijednosti) automatski se određuje na temelju unesenih evaluacijskih podataka za opcije unutar pojedinog scenarija te služi za prikaz i interpretaciju rezultata u sučelju programa.

U korištenoj Demo verziji softvera Visual PROMETHEE nije omogućeno ručno definiranje minimalnih i maksimalnih vrijednosti kriterija (identificiranih u sklopu Tablica 6. i Tablica 7.). Sukladno tome, raspon pojedinog kriterija automatski se generira na temelju unesenih evaluacijskih vrijednosti alternativa unutar analiziranog scenarija. Drugim riječima, minimalna i maksimalna vrijednost kriterija odgovaraju najmanjoj i najvećoj vrijednosti iz matrice odlučivanja.

Važno je naglasiti da PROMETHEE algoritam u svojoj matematičkoj strukturi ne koristi izravno minimalne i maksimalne vrijednosti kriterija, već se temelji na razlikama performansi između alternativa. Automatski generirani raspon služi prvenstveno za:

- grafički prikaz rezultata,
- normalizaciju u GAIA projekciji,
- interpretaciju relativnog položaja alternativa,
- definiranje vizualne skale kriterija.

Stoga, iako raspon nije ručno definiran, konačno rangiranje alternativa (PROMETHEE II kompletno rangiranje) ostaje metodološki valjano jer se temelji na parcijalnim preferencijama i agregiranim preferencijskim tokovima, a ne na apsolutnim granicama kriterija. U modelu su korištene konkretne kvantitativne i kvalitativne vrijednosti kriterija, temeljene na:

- dostupnim tehničkim podacima,
- literaturnim izvorima,
- postojećim komercijalnim postrojenjima,
- stručnim procjenama.

Time je osigurano da su razlike između alternativa realno reprezentirane i da model odražava stvarne tehničke, okolišne i socio-ekonomske uvjete. Budući da PROMETHEE vrednuje razlike među alternativama, korištenje konkretnih brojčanih podataka omogućuje objektivniju usporedbu u odnosu na isključivo kvalitativne ocjene. Automatski definirani raspon ne umanjuje pouzdanost rezultata, jer su sve alternative evaluirane unutar istog referentnog prostora po svakom kriteriju.

U punoj verziji softvera moguće je ručno definirati minimalne i maksimalne vrijednosti kriterija. Takav pristup omogućio bi:

- Definiranje referentne domene problema neovisno o konkretnim alternativama.
- Stabilnost modela pri dodavanju novih alternativa.
- Usporedivost rezultata između različitih studija slučaja.
- Uvođenje regulatornih ili tehnoloških granica (npr. emisijski limiti, tehnički kapaciteti).
- Konzistentnije definiranje relativnih pragova preferencije (q i p) ako su izraženi u odnosu na raspon kriterija.

Primjerice, kod kriterija emisije CO₂ mogao bi se definirati raspon 0-1,000 kg CO₂/t, iako aktualne alternative imaju vrijednosti 200-400 kg CO₂/t. Time bi se model stabilizirao i omogućila usporedba s budućim scenarijima.

U ovoj disertaciji korišten je automatski generirani raspon kriterija, što je u skladu s tehničkim ograničenjima korištene verzije softvera. Budući da se PROMETHEE II rangiranje temelji na diferencijalnim preferencijama između alternativa, a ne na apsolutnim granicama kriterija, ova okolnost ne utječe na matematičku ispravnost modela. Međutim, u budućim proširenjima modela preporučuje se definiranje unaprijed određenih raspona kriterija radi veće robusnosti i usporedivosti rezultata.

Korisnik modela unosi sljedeće parametre (označene **plavim** okvirom na slici):

- težinske koeficijente kriterija, kojima se izražava relativna važnost pojedinog kriterija u konkretnom scenariju odlučivanja;
- kvantitativne i kvalitativne vrijednosti kriterija za svaku alternativu, sukladno dostupnim podacima i lokalnim uvjetima.

Na temelju unesenih podataka PROMETHEE automatski izračunava:

- parcijalne funkcije preferencije po kriteriju,
- agregirane indekse preferencije između parova opcija (tehnologija),
- pozitivne i negativne tokove preferencije,
- preferencije koje služe za konačno rangiranje alternativa (PROMETHEE II).

Time je osigurano da su svi rezultati rangiranja izravna posljedica definirane strukture kriterija, odabranih funkcija preferencije i težinskog sustava.

Preostale vrijednosti vidljive na slici PROMETHEE sam izračuna na temelju unesenih podataka u model.

All	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uè...	Toplinska uèi...	Potreba za z...	Oporabljjeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit	5-point	5-point	MWh	%	%	m2	y/n	MWh	y/n	y/n	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/n	5-point	5-point	t CO2eq	5-point
Cluster/Group																				
Preferences																				
Min/Max	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Weight	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Preference Fn.	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Thresholds	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics																				
Minimum	4,00	3,00	2500,00	20,00	60,00	1500,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	700000,00	200000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	3,00	1400,00	3,00
Maximum	5,00	5,00	3500,00	35,00	65,00	10000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	1500000,00	425000,00	24,00	4,00	1,00	5,00	5,00	2230,00	5,00
Average	4,33	3,89	3000,00	30,00	63,33	4500,00	0,67	3300,00	0,33	1,00	3,00	1066666,67	281666,67	20,67	3,67	0,67	4,22	4,00	1710,00	4,33
Standard Dev.	0,47	0,74	408,25	7,07	2,36	3894,44	0,47	2459,00	0,47	0,00	0,82	329983,16	101680,33	2,49	0,47	0,47	0,92	0,82	369,95	0,94
Evaluations																				
Izgaranje		(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)
Recirkulacija		(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)
Materijalna opor...		(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)

Slika 22. Prikaz univerzalnog modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova (opcija a)

All	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	COP	Toplinska uèi...	Potreba za z...	Oporabljjeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit	5-point	5-point	MWh		%	m2	y/n	MWh	y/n	y/n	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/n	5-point	5-point	t CO2eq	5-point
Cluster/Group																				
Preferences																				
Min/Max	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Weight	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Preference Fn.	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Thresholds	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics																				
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	60,00	800,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	700000,00	82000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	3,00	530,00	3,00
Maximum	5,00	5,00	3500,00	35,00	65,00	10000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	5400000,00	452000,00	24,00	4,00	1,00	5,00	5,00	2230,00	5,00
Average	4,33	4,00	2835,00	18,83	62,50	4133,33	0,83	2950,00	0,50	0,83	2,83	2366666,67	304000,00	21,67	3,67	0,50	4,00	3,67	1615,00	4,33
Standard Dev.	0,47	1,00	470,24	13,73	2,50	4155,99	0,37	2950,00	0,50	0,37	0,69	1843607,57	138191,90	2,43	0,47	0,50	0,82	0,94	572,62	0,94
Evaluations																				
Dizalica topline		(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)
Materijalna opor...		(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)	(all)

Slika 23. Prikaz univerzalnog modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova (opcija b)

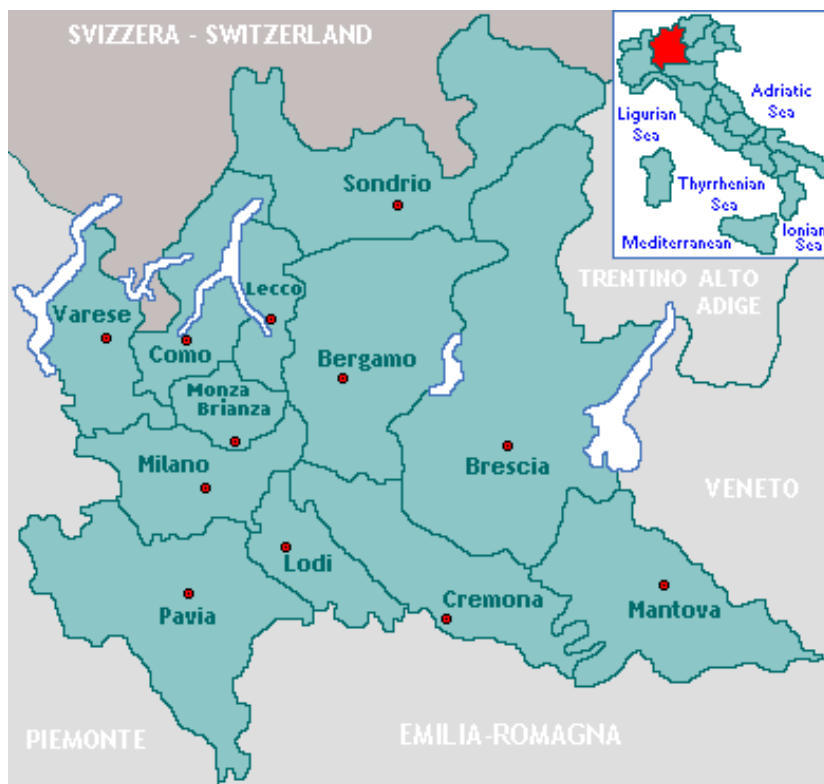
4. PRIMJENA MODELA NA REALNOM PRIMJERU

Kako bi se prikazao rad modela, isti je primijenjen na realnom primjeru – potrebe za donošenjem odluke o tehnologiji energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova. Iako su podaci na kojima se temelji ova disertacija teorijski i literaturni, model je primijenjen na primjeru Italije, konkretnije regije Lombardija. Italija je odabrana jer se na nacionalnoj razini već primjenjuju komercijalna postrojenja sa tehnologijama korištenima u ovom radu, te je zbog toga moguće prikazati dokaz primjenjivosti modela. Sukladno tome, razmatrani su uvjeti na razini regije Lombardija, ali upotrebom podataka sa nacionalne razine, kako bi tehnologije bile razmatrane u sklopu zakonodavnih, socio-ekonomskih i gospodarskih okvira Italije.

4.1. Uvodne informacije o primjeru Lombardije

Italija je zanimljiv primjer jer se suočava s rastućom količinom otpada i otpadnog mulja, zahvaljujući investicijama u infrastrukturu (što je pozitivan okolišni pomak), ali istovremeno ima izazove u zbrinjavanju tog otpada zbog ograničenih kapaciteta i strožih propisa o odlaganju. Prema izvješću [188], Italija je još uvijek relativno daleko od zatvaranja kruga recikliranja nutrijenata iz mulja – većina mulja završava na odlagalištima ili se koristi u poljoprivredi uz minimalnu obradu. Stoga su vlasti i industrija zainteresirane za nove održive tehnologije (spaljivanje, rasplinjavanje, AD, precipitacija fosfora) kako bi uskladili praksu s kružnim gospodarstvom. U ovoj studiji slučaja polazi se od pretpostavke da treba odabrati optimalnu tehnologiju za zbrinjavanje dodatnih 20.000 tona suhog mulja godišnje (što odgovara porastu prerađenih otpadnih voda nakon proširenja mreže). Lokacijski uvjeti su takvi da je moguće izgraditi novo postrojenje na regionalnoj razini.

Regija Lombardija je sjeverozapadna regija u Italiji, koja ima površinu od otprilike 23.877 km² te graniči sa Švicarskom te talijanskim regijama Trentino-Alto Adige/Südtirol, Veneto, Emilia-Romagna i Piemonte (Slika 24). Najnaseljenija je regija Italije (više od 10 milijuna stanovnika), a glavni grad regije je istovremeno i drugi najveći grad Italije: Milano.



Slika 24. Smještaj i okruženje regije Lombardija u Italiji [217]

Regija je također najbogatija regija u Italiji, ali i jedna od najbogatijih cijeloj EU, sa 26% višim bruto domaćim proizvodom po stanovniku od nacionalnog i EU prosjeka [218]. Riječ je o industrijski najrazvijenijoj regiji Italije, koja teži konstantom razvoju kroz Strategiju pametne specijalizacije (S3), u kojoj je naglasak stavljen na sljedeća područja od interesa:

- Zrakoplovno-svemirska industrija;
- Poljoprivredno-prehrambeni sektor;
- Ekološka industrija;
- Kreativna i kulturna industrija;
- Zdravstvena industrija;
- Napredna proizvodnja;
- Održiva mobilnost.

Regija je poznata po velikom broju bioplinskih postrojenja, sa više od 360 postrojenja, kapaciteta preko 250 MW [219]. Lanac proizvodnje bioplina iz poljoprivrednih ostataka rangiran je kao najveći u cijeloj Italiji. Uzevši u obzir visoku industrijsku razvijenost regije, bioplin daje doprinos povezivanju visoko razvijenog tehnološkog poslovanja primarnog sektora s industrijom proizvodnje na međunarodnoj razini, koja uključuje značajan doprinos istraživačkog sektora.

Iz navedenog je moguće zaključiti kako će tehnologije energetske/materijalne oporabe otpadnih tokova, razmatrane u ovoj disertaciji, u ovom slučaju biti orijentirane prema oporabi digestata iz bioplinskih postrojenja.

Kao što je slučaj sa većinom EU država gdje se primjenjuje Nitratna direktiva, tako i u Italiji postoji problem zbrinjavanja digestata, nastalog u bioplinskom postrojenju. Također, prisutan je i problem njegova skladištenja jer ga nije moguće izravno primijeniti u poljoprivredi zbog zakonodavnih okvira vezanih uz stupanj stabilizacije, faze rasta biljaka i vrstu tla.

Skladištenje digestata nije prihvatljiva dugoročna opcija jer dolazi do emisija bioplina nastalog post-digestijom u atmosferu, čime dolazi do negativnog utjecaja na učinkovitost bioplinskog postrojenja i povećanju utjecaja na klimatske promjene.

Stoga su od ključne važnosti za operatere bioplinskih postrojenja bile nove mogućnosti korištenja digestata, kako bi smanjili gubitke u poslovanju, a istovremeno imali i što manji negativan utjecaj na okoliš. Stoga je razmotreno sljedeće rješenje: Balsari et al. [220] su predložili recirkulaciju tretiranog digestata u proces AD. Prema njihovim izračunima, takva opcija bi mogla smanjiti proizvodnju emisija stakleničkih plinova, istovremeno poboljšavajući energetske i okolišne iskoristivosti procesa AD. Đurđević et al. [114] su također proveli istraživanje i izradili koncept recirkulacije digestata uz korištenje otpadnih tokova na bioplinskom postrojenju, u svrhu tretmana digestata, kako bi se isti moglo koristiti kao zamjena sirovine u procesu AD.

Tehnologija recirkulacije digestata primijenjena je na postrojenju u regiji Lombardija u sjevernoj Italiji (Slika 25). Postrojenje razmatrano u ovom slučaju je snage 0,98 MW te se sastoji od: 2 digestora, 1 post-fermentora i 1 skladišnog spremnika. Proces AD u digestoru je mezofilnog tipa, sa radnom konstantnom radnom temperaturom od 43 °C i retencijskim vremenom zadržavanja od 36 dana, a kao sirovina se koriste svinjska gnojovka, kukuruzna silaža, otpad iz maslinarske industrije, goveđa gnojovka te gnojovka od peradi [179]. Digestat nastao u procesu proveden je kroz prešu s vijcima, kako bi se izdvojila kruta od tekuće frakcije, da se kruta frakcija može dalje obrađivati.



Slika 25. Prikaz bioplinskog postrojenja s recirkulacijom digestata [221]

Prije izgradnje postrojenja i stavljanja u operativno stanje, provedeno je nekoliko ispitivanja, s ciljem određivanja obrade digestata koja će dati najviši prinos. Na slici (Slika 26) su prikazani:

- utjecaji prinosa bioplina za recirkulirani digestat (A) bez tretmana (DIG NT), s enzimatskim (DIG ENZ), termalnim (DIG 80 °C) te alkalnim (DIG NaOH) tretmanom te
- recirkuliranu separiranu krutu frakciju digestata (B) bez tretmana (SS NT), s enzimatskim (SS ENZ), termalnim (SS 80 °C) te alkalnim (SS NaOH) tretmanom.

Moguće je uočiti kako je prinos metana u slučaju separirane frakcije digestata (B) viši nego u slučaju obrade cjelokupnog digestata (A), što je uzrokovano višim sadržajem humusnih tvari u tekućoj frakciji digestata, koja je manje razgradiva u usporedbi s lignoceluloznom tvari (dolazi do izražaja u slučaju separirane frakcije).

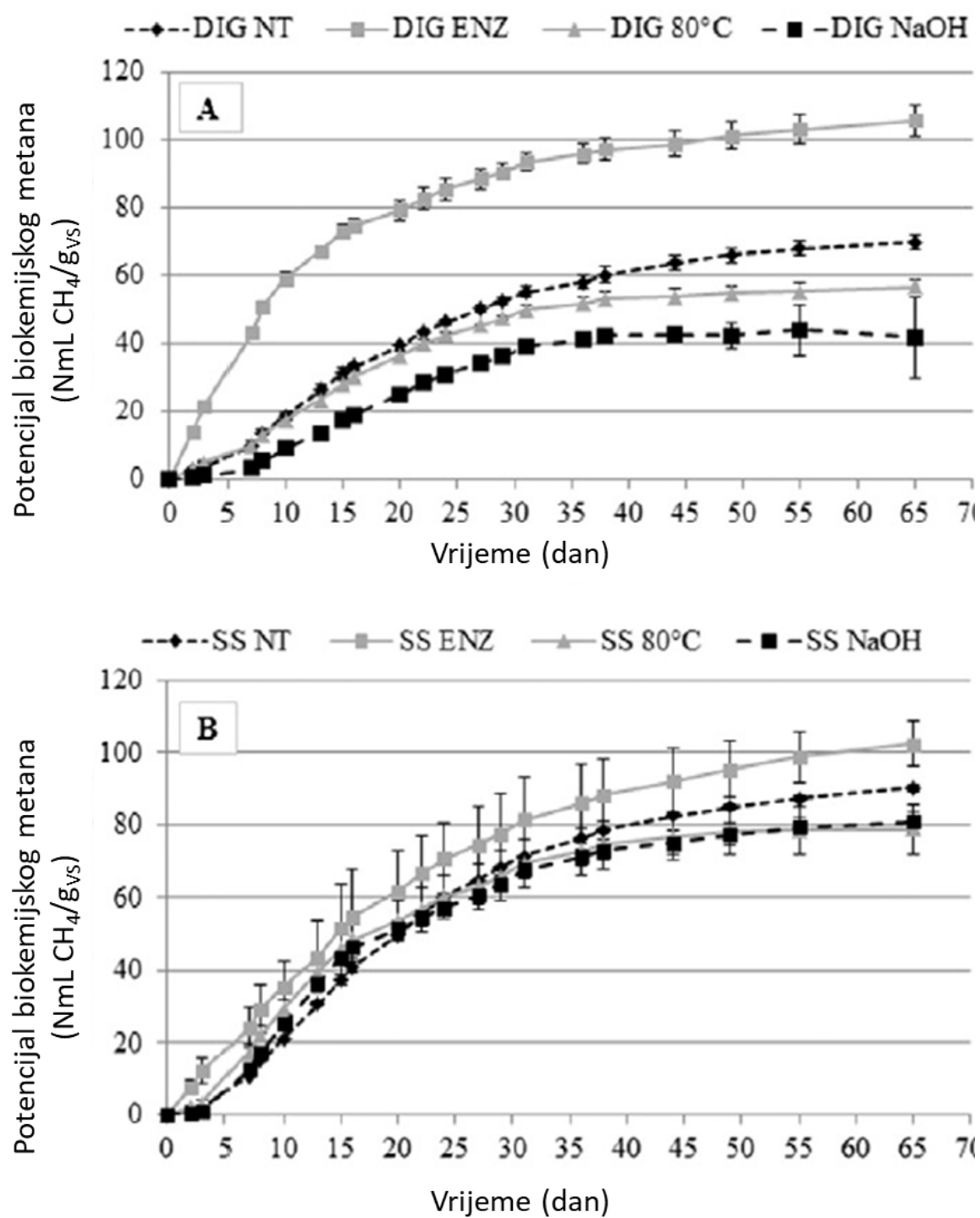
Također je moguće uočiti kako prilikom određivanja prinosa separirane krute frakcije (B), jedino enzimatski obrađeni uzorak ima viši prinos od neobrađenog uzorka. Uzrok tome je potencijalno nastajanje toksičnih spojeva u AD procesu, uzrokovanih raspadom lignocelulozne biomase tijekom termo-kemijske predobrade [222].

Međutim, ukoliko se napravi usporedba između recirkulirane frakcije neobrađenog digestata (u A prikazu: DIG NT) i separirane kiselinski obrađene frakcije (u B prikazu: SS NaOH), moguće je uočiti kako kiselinski tretman ima viši prinos. Ovaj podatak potvrđuje istraživanje Đurđević et al. [114], na temelju kojega se razmatra navedena tehnologija i koja je uvrštena u model.

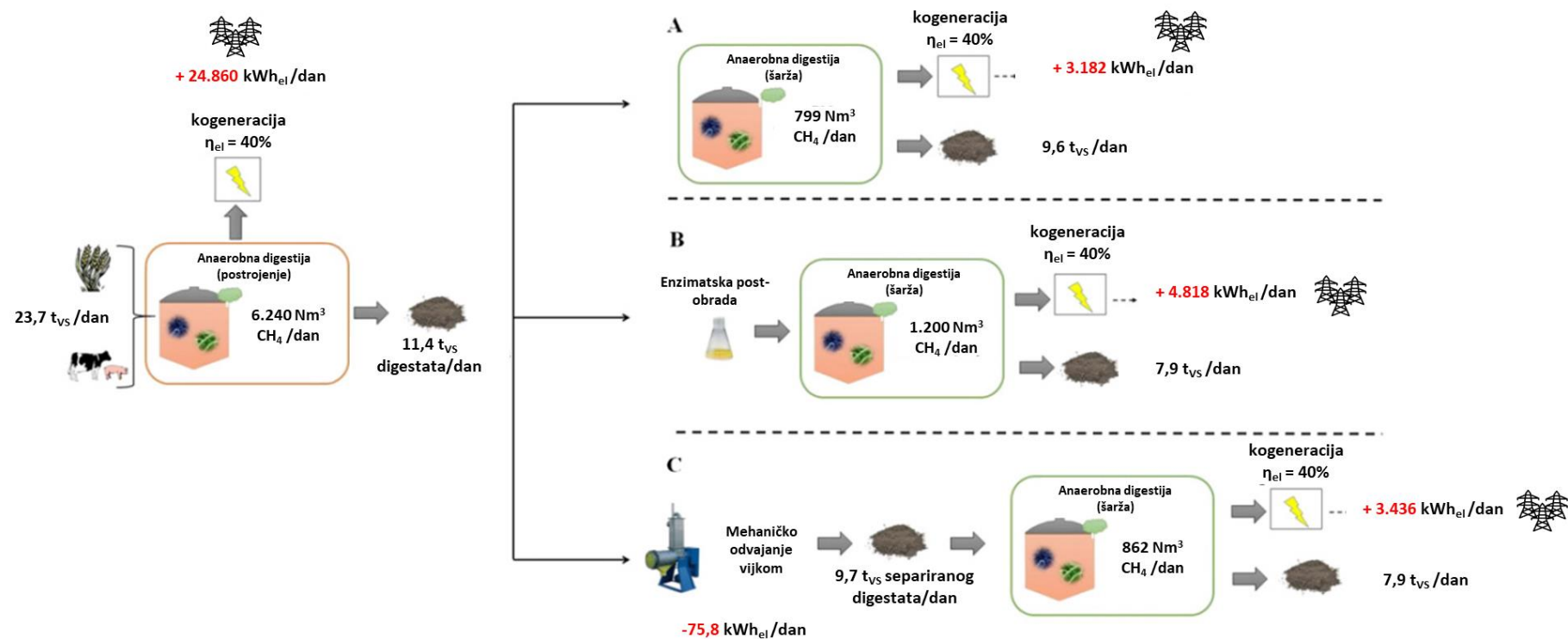
No, kako je enzimatska obrada separirane krute frakcije digestata pokazala najviši prinos bioplina, operater postrojenja se odlučio za tu opciju. Sukladno prinosu bioplina, na sljedećoj slici (Slika 27) su prikazane količine dodatne proizvodnje energije, ovisno o vrsti obrade koja se koristila prije procesa recirkulacije, gdje se vidi:

- A. Proizvodnja dodatnih 3.182 kWh_{el} po danu, ako se primjenjuje recirkulacija neobrađenog digestata;
- B. Proizvodnja dodatnih 4.818 kWh_{el} po danu, ako se primjenjuje recirkulacija enzimatski obrađene separirane krute frakcije digestata;

Proizvodnja dodatnih 3.436 kWh_{el} po danu, ako se primjenjuje recirkulacija neobrađene separirane krute frakcije digestata.



Slika 26. Kumulativni prinos metana pri uvjetima normalne temperature i tlaka neobrađenog i obrađenog digestata (A) te separirane krute frakcije (B) [179]



Slika 27. Energetska bilanca proizvodnje dodatne energije uz recirkulaciju: A) neobrađenog digestata, B) enzimatski obrađene separirane krute frakcije digestata te C) neobrađene separirane krute frakcije digestata [179]

Nastavno na povećanje proizvodnje električne energije, napravljena je ekonomska analiza gdje je definirano kako se tehnologijom recirkulacije digestata može ostvariti dodatni prihod od 891 do 941 EUR po danu za operatera bioplinskog postrojenja [179], uz korištenje poticajne cijene FiT sustava u Italiji. Također, uz povećanje ekonomske učinkovitosti, dolazi i do pozitivnog utjecaja na okoliš, gdje se smanjuje potreba za skladištenjem digestata te smanjenja emisija stakleničkih plinova i negativnog utjecaja na klimatske promjene.

Naravno, treba uzeti u obzir i geografski kontekst. U zemljama poput Njemačke, Nizozemske ili Danske, spaljivanje mulja (često uz obavezan povrat fosfora iz pepela) već je široko implementirano – dijelom zbog stroge regulative (npr. Njemačka regulativa zahtijeva P-oporavak do 2029. godine za velika postrojenja), dijelom zbog ograničenog prostora za rasipanje mulja (visoka gustoća stočarstva i nitrati u tlu). Također, javnost u tim zemljama ima veće povjerenje da će spaljivanje biti kontrolirano i da će se okolišne koristi (poput P-rekuperacije) ostvariti, pa postoji manji otpor prema spalionicama. Nasuprot tome, u Italiji i većem dijelu južne Europe tradicionalno se mulj više koristio u poljoprivredi. Mentalitet i navike igraju ulogu – poljoprivrednici u Italiji vjerojatnije prihvataju mulj/digestat kao gnojivo, dok bi u Nizozemskoj to izazvalo zabrinutost zbog zagađenja tla, kao i činjenica da Nizozemska ima višak stajnjaka pa korištenje mulja postaje nepotrebno.

Također, zemlje s visokom ekološkom sviješću ranije su prepoznale problem onečišćenja tragovima iz mulja (npr. farmaceutici, mikroplastika) i uvele restrikcije – npr. Švicarska je 2006. godine zabranila primjenu mulja na tlo. Italija još nije takve mjere uvela i vjerojatno više vjeruje u agronomski pristup (obraditi mulj i vratiti u tlo pod kontrolom). Također, povjerenje u institucije i politička volja su faktori: u državama s učinkovitom kontrolom, ljudi su skloniji prihvatiti spalionicu u susjedstvu jer vjeruju da će raditi po propisima. U državama gdje je povjerenje manje, lakše prolaze rješenja koja su disperzirana (npr. pomalo mulja na puno polja, umjesto jedna velika spalionica).

Iz tih razloga, navedena analiza je donekle kontekstualna. Da je analiza rađena pod perspektivom njemačkog zakonodavca, vjerojatno bi neka druga tehnologija bila odabrana (npr. proces izgaranja, s P-rekuperacijom). U razmatranom slučaju (Lombardija, Italija), recirkulacija digestata bolje odgovara lokalnom pristupu i prioritetima (više obnovljive energije, manja ovisnost o odlagalištima, korištenje postojeće mreže bioplinskih postrojenja).

4.2. Unos podataka u model

Prateći korake izrade modela i definiranja vrijednosti i težina kriterija (u ovom slučaju će biti korištene težine kriterija prikazane u poglavlju 3.9.2), u nastavku su navedene konkretne vrijednosti specifične za talijanske uvjete iz prethodnog poglavlja. Uz navedene kvalitativne skupine (Slika 11. i Slika 12.), za određene kriterije bilo je moguće definirati kvantitativne (numeričke) vrijednosti. Navedene vrijednosti koje su potencijalno nedostajale iz primjera, definirane su pomoću dodatnih literaturnih podataka sa komercijalnih i pilot postrojenja, a sve su skupno prikazane u sljedećoj tablici (Tablica 8.).

Pri izradi modela za Lombardiju bilo je nužno jasno definirati referentni kapacitet razmatranih postrojenja kako bi usporedba alternativa bila tehnički i energetski utemeljena. Za tehnologiju koja je u Lombardiji stvarno implementirana razmotrena je stvarna instalirana toplinska/energetska snaga bioplinskog postrojenja, odnosno projektirani kapacitet obrade supstrata i pripadajuća proizvodnja energije ($0,98 \text{ MW}_{el}$). Time je model zadržao realne tehničke parametre konkretnog postrojenja (nazivni kapacitet, ulazni tok materijala, projektiranu energetske bilancu).

S druge strane, za potrebe usporedbe s tehnologijama vezanima uz sustav UPOV-a, uveden je referentni kapacitet od 40.000 ES. Ova vrijednost predstavlja tipičan kapacitet srednje velikog UPOV-a u europskom kontekstu te omogućuje realnu procjenu količine generiranog mulja ($\approx 800 \text{ t ST}$ godišnje, uz pretpostavku 20 kg ST/ES/god). Odabir 40.000 ES nije proizvoljan, već je metodološki opravdan iz sljedećih razloga:

- predstavlja realan i tehnički čest raspon kapaciteta u praksi,
- omogućuje energetsku usporedivost s razmatranim postrojenjem u Lombardiji,
- osigurava usporedivu veličinu materijalnih i energetskih tokova,
- omogućuje normalizaciju rezultata po jedinici suhe tvari ili proizvedene energije.

Time je osigurano da se usporedba ne provodi na temelju apsolutnih investicija (koje snažno ovise o veličini postrojenja), već na temelju energetskog i materijalnog ekvivalenta.

Kod modeliranja je naglašeno da se usporedba alternativa ne temelji isključivo na instaliranoj snazi, već na:

- količini obrađenog materijala (t/god),
- količini proizvedene energije (MWh/god),
- specifičnim troškovima po jedinici ST,
- specifičnim emisijama po jedinici energije ili mase.

Na taj način je izbjegnuta metodološka pogreška usporedbe postrojenja različitih razmjera bez normalizacije podataka. Drugim riječima, studija slučaja Lombardije reflektira realnu snagu i kapacitet implementirane tehnologije, dok je za UPOV scenarij korišten referentni kapacitet 40.000 ES kako bi se osigurala energetski prikladna i tehnički usporediva analiza.

Važno je naglasiti da razlike u apsolutnim investicijskim vrijednostima između tehnologija prvenstveno proizlaze iz razlika u kapacitetu i skali postrojenja. Stoga je u modelu korišten pristup normalizacije (po toni ST i po proizvedenoj jedinici energije), čime je omogućena objektivna usporedba neovisno o nominalnoj snazi sustava.

Sukladno tome, u sljedećoj tablici su prikazani podaci za svaku pojedinačnu tehnologiju (**I-IIIa** i **I-IIb**), a koji prikazuju podatke unutar granica razmatranih sustava (Slika 14. – Slika 18).

Tablica 8. Prikaz podataka za unos u model – opcija a

	Proces izgaranja	Recirkulacija	Materijalna uporaba	jedinica
pouzdanost tehnologije	jako dobro	dobro	dobro	/
zrelost tehnologije	dobro	dobro	prosječno	/
poznavanje tehnologije	da	ne	ne	/
energetska potražnja	3.500	3.000	2.500	MWh/god.
električna učinkovitost	20	35	35	%
toplinska učinkovitost	60,00	65,00	65,00	%
proizvodnja energije	5.900	4.000	n/a ¹⁶	MWh/god.
potreba za zemljištem	10.000	2.000	1.500	m ²
oporabljeni materijali	da	ne ¹⁷	da	/
potencijal za nadogradnju	da	da	da	/
pravno-administrativni okvir	prosječno	dobro	loše	/
radna mjesta	24	18	20	#
javna prihvatljivost	prosječno	dobro	dobro	/
operativni troškovi	425.000	200.000	220.000	EUR/god.
kapitalni troškovi	1.500.000	1.000.000	700.000	EUR
FiT/premium model	da	da	ne	/
mirisi	prosječno	jako dobro	jako dobro	/
buka	prosječno	dobro	jako dobro	/
emisije	2.230	1.400	1.500	t CO _{2eq}
ekološki otisak	prosječno	jako dobro	jako dobro	/
literatura	[173, 177, 174, 199]	[179, 223, 114, 178, 172]	[114, 179, 224, 182]	/

¹⁶ Nije primjenjivo – u modelu se pripisuje iznos nula (0).

¹⁷ Kriterij „Oporabljeni materijali“ ovdje označava proizvodi li tehnologija koristan materijal koji se može plasirati ili koristiti izvan sustava kao zamjena za neku sirovinu. Recirkulacija digestata dobiva ocjenu *NE* jer ne generira novi materijal – sav digestat se vraća u proces i na kraju će ipak morati biti zbrinut (najčešće kao gnojivo, ali to se odvija izvan granica sustava promatrane tehnologije). Drugim riječima, recirkulacija ne pretvara digestat u oporabljeni proizvod, već samo povećava energetske učinkovitost postrojenja. Opcija običnog bioplinskog postrojenja s korištenjem digestata na poljoprivredi također formalno ne „proizvodi materijal“, premda se digestat koristi kao gnojivo; u definiranoj klasifikaciji unutar disertacije, to se smatra oblikom neposredne uporabe otpada, dok se kriterij „oporabljeni materijal“ odnosi na slučajeve gdje nastaje novi tržišni proizvod (npr. suho peletirano organsko-mineralno gnojivo u opciji III).

Tablica 9. Prikaz podataka za unos u model – opcija b

	Materijalna uporaba (recirkulacija struvita)	Dizalica topline	jedinica
pouzdanost tehnologije	dobro	dobro	/
zrelost tehnologije	dobro	jako dobro	/
poznavanje tehnologije	da	da	/
energetska potražnja	2.500	2.510	MWh/god.
COP	n/a	3	%
proizvodnja energije	n/a ¹⁸	880	MWh/god.
potreba za zemljištem	800	1.000	m ²
oporabljeni materijali	da	ne ¹⁹	/
potencijal za nadogradnju	da	ne	/
pravno-administrativni okvir	prosječno	dobro	/
radna mjesta	24	18	#
javna prihvatljivost	dobro	dobro	/
operativni troškovi	452.000	82.000	EUR/god.
kapitalni troškovi	4,4	5,4	mil. EUR
FiT/premium model	ne	da	/
mirisi	dobro	dobro	/
buka	prosječno	prosječno	/
emisije	530	1.700	t CO _{2eq}
ekološki otisak	Jako dobro	jako dobro	/
literatura	[211, 224, 114, 179]	[44, 47, 181]	/

¹⁸ Nije primjenjivo – u modelu se pripisuje iznos nula (0).

¹⁹ Kriterij „Oporabljeni materijali“ ovdje označava proizvodi li tehnologija koristan materijal koji se može plasirati ili koristiti izvan sustava kao zamjena za neku sirovinu. Recirkulacija digestata dobiva ocjenu *NE* jer ne generira novi materijal – sav digestat se vraća u proces i na kraju će ipak morati biti zbrinut (najčešće kao gnojivo, ali to se odvija izvan granica sustava promatrane tehnologije). Drugim riječima, recirkulacija ne pretvara digestat u oporabljeni proizvod, već samo povećava energetske učinkovitost postrojenja. Opcija običnog bioplinskog postrojenja s korištenjem digestata na poljoprivredi također formalno ne „proizvodi materijal“, premda se digestat koristi kao gnojivo; u definiranoj klasifikaciji unutar disertacije, to se smatra oblikom neposredne uporabe otpada, dok se kriterij „oporabljeni materijal“ odnosi na slučajeve gdje nastaje novi tržišni proizvod (npr. suho peletirano organsko-mineralno gnojivo u opciji III).

Kriteriji poput energije i troškova u modelu su razmatrani za referentne veličine postrojenja, čime je osigurana usporedivost. Drugim riječima, sve opcije dimenzionirane su za slične kapacitete. Time specifična usporedivost (npr. EUR/t, MWh/t) implicitno postoji. Alternativno, analiza se mogla provesti i u potpunosti specifičnim pokazateljima; to bi potencijalno smanjilo utjecaj same veličine postrojenja na rang. U ovom radu odabrane su apsolutne veličine uz pretpostavku jednake ulazne količine za sve opcije, što je ekvivalentno specifičnom pristupu.

Valja istaknuti da uspoređivanje tehnologija različitog kapaciteta može uvesti pristranost prema većim sustavima. Idealno bi bilo koristiti specifične jedinice (npr. EUR/tona, MWh/tona) za kriterije troška, energije i dr. U izrađenom modelu, za pojednostavljenje, korištene su ukupne godišnje vrijednosti za zadani tipični kapacitet svake tehnologije, uzimajući u obzir da donositelj odluke promatra implementaciju svake tehnologije u optimalnoj razini (npr. centralizirana spalionica u usporedbi s decentraliziranim bioplinskim postrojenjem). U budućim analizama, posebno za usporedbu sustava različitih razmjera, preporuča se uvesti normalizaciju po funkcionalnoj jedinici.

Ocjene koje su dane zadanim kriterijima određene su na temelju literaturnog pregleda stanja u Italiji i razgovara sa stručnjacima u specifičnim područjima (proizvodnja energije, zbrinjavanje i energetska i materijalna uporaba otpada) te iskustva autora u tematici uporabe otpada.

Kad se podaci prikazani u prethodnim tablicama unesu u model, dobiva se prikaz podataka u pet scenarija – Slika 28. – Slika 33.

Bitno je napomenuti kako su dane ocjene temeljene na situaciji na regionalnoj razini – u kontekstu nacionalne, lokalne ili neke druge razine, donositelj odluka može dati drukčije težine i vrijednosti te prilagoditi model specifičnim uvjetima, ovisno o situaciji koja je prisutna u promatranom okruženju.

javnost	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uè...	Toplinska uèi...	Potreba za z...	Oporabljjeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit	5-point	5-point	MWh	%	%	m2	y/n	MWh	y/n	y/n	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/n	5-point	5-point	t CO2eq	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences																				
Min/Max	max	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max
Weight	5,71	5,71	3,57	3,57	3,57	5,71	5,71	3,57	5,71	2,86	3,57	5,00	5,00	7,14	7,86	2,86	7,14	7,14	5,00	3,57
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics																				
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	0,00	1500,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	700000,00	200000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	3,00	1400,00	3,00
Maximum	5,00	5,00	3500,00	35,00	65,00	10000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	1500000,00	425000,00	24,00	4,00	1,00	5,00	5,00	2230,00	5,00
Average	4,33	4,00	3000,00	18,33	41,67	4500,00	0,67	3300,00	0,33	1,00	3,00	1066666,67	281666,67	20,67	3,67	0,67	4,00	4,00	1710,00	4,33
Standard Dev.	0,47	0,82	408,25	14,34	29,53	3894,44	0,47	2459,00	0,47	0,00	0,82	329983,16	101680,33	2,49	0,47	0,47	0,82	0,82	369,95	0,94
Evaluations																				
Izgaranje	very good	very good	3500,00	20,00	60,00	10000,00	yes	5900,00	yes	yes	average	1500000,00	425000,00	24,00	average	yes	average	average	2230,00	average
Recirkulacija	good	good	3000,00	35,00	65,00	2000,00	no	4000,00	no	yes	good	1000000,00	200000,00	18,00	good	yes	good	good	1400,00	very good
Materijalna opor...	good	average	2500,00	0,00	0,00	1500,00	yes	0,00	no	yes	bad	700000,00	220000,00	20,00	good	no	very good	very good	1500,00	very good

Slika 28. Prikaz težinskih omjera za scenarij Javnost (opcija a)

tehnički aspekt	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uè...	Toplinska uèi...	Potreba za z...	Oporabljjeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit	5-point	5-point	MWh	%	%	m2	y/n	MWh	y/n	y/n	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/n	5-point	5-point	t CO2eq	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences																				
Min/Max	max	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max
Weight	7,86	7,14	7,14	7,14	7,14	4,29	3,57	7,14	7,14	5,00	3,57	3,57	3,57	2,86	2,86	3,57	3,57	3,57	3,57	5,71
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics																				
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	0,00	1500,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	700000,00	200000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	3,00	1400,00	3,00
Maximum	5,00	5,00	3500,00	35,00	65,00	10000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	1500000,00	425000,00	24,00	4,00	1,00	5,00	5,00	2230,00	5,00
Average	4,33	4,00	3000,00	18,33	41,67	4500,00	0,67	3300,00	0,33	1,00	3,00	1066666,67	281666,67	20,67	3,67	0,67	4,33	4,00	1710,00	4,33
Standard Dev.	0,47	0,82	408,25	14,34	29,53	3894,44	0,47	2459,00	0,47	0,00	0,82	329983,16	101680,33	2,49	0,47	0,47	0,94	0,82	369,95	0,94
Evaluations																				
Izgaranje	very good	very good	3500,00	20,00	60,00	10000,00	yes	5900,00	yes	yes	average	1500000,00	425000,00	24,00	average	yes	average	average	2230,00	average
Recirkulacija	good	good	3000,00	35,00	65,00	2000,00	no	4000,00	no	yes	good	1000000,00	200000,00	18,00	good	yes	very good	good	1400,00	very good
Materijalna opor...	good	average	2500,00	0,00	0,00	1500,00	yes	0,00	no	yes	bad	700000,00	220000,00	20,00	good	no	very good	very good	1500,00	very good

Slika 29. Prikaz težinskih omjera za scenarij Tehnički aspekt (opcija a)

okolis	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uè...	Toplinska uèi...	Potreba za z...	Oporabljeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit	5-point	5-point	MWh	%	%	m2	y/h	MWh	y/h	y/h	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/h	5-point	5-point	t CO2eq	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences																				
Min/Max	max	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max
Weight	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	6,72	7,56	3,36	3,36	5,88	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	9,24	9,24	9,24	8,40
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics																				
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	0,00	1500,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	700000,00	200000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	3,00	1400,00	3,00
Maximum	5,00	5,00	3500,00	35,00	65,00	10000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	1500000,00	425000,00	24,00	4,00	1,00	5,00	5,00	2230,00	5,00
Average	4,33	4,00	3000,00	18,33	41,67	4500,00	0,67	3300,00	0,33	1,00	3,00	1066666,67	281666,67	20,67	3,67	0,67	4,33	4,00	1710,00	4,33
Standard Dev.	0,47	0,82	408,25	14,34	29,53	3894,44	0,47	2459,00	0,47	0,00	0,82	329983,16	101680,33	2,49	0,47	0,47	0,94	0,82	369,95	0,94
Evaluations																				
Izgaranje	very good	very good	3500,00	20,00	60,00	10000,00	yes	5900,00	yes	yes	average	1500000,00	425000,00	24,00	average	yes	average	average	2230,00	average
Reciklacija	good	good	3000,00	35,00	65,00	2000,00	no	4000,00	no	yes	good	1000000,00	200000,00	18,00	good	yes	very good	good	1400,00	very good
Materijalna opor...	good	average	2500,00	0,00	0,00	1500,00	yes	0,00	no	yes	bad	700000,00	220000,00	20,00	good	no	very good	very good	1500,00	very good

Slika 30. Prikaz težinskih omjera za scenarij Okoliš (opcija a)

javnost	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	COP	Toplinska uèi...	Potreba za z...	Oporabljeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit	5-point	5-point	MWh		%	m2	y/h	MWh	y/h	y/h	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/h	5-point	5-point	t CO2eq	5-point
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences																				
Min/Max	max	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max
Weight	5,71	5,71	3,57	3,57	3,57	5,71	5,71	3,57	5,71	2,86	3,57	5,00	5,00	7,14	7,86	2,86	7,14	7,14	5,00	3,57
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics																				
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	60,00	800,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	4400000,00	82000,00	18,00	4,00	0,00	4,00	3,00	530,00	5,00
Maximum	4,00	5,00	2510,00	3,00	65,00	1000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	5400000,00	452000,00	24,00	4,00	1,00	4,00	3,00	1700,00	5,00
Average	4,00	4,00	2505,00	1,50	62,50	900,00	0,50	2950,00	0,50	0,50	3,50	4900000,00	267000,00	21,00	4,00	0,50	4,00	3,00	1115,00	5,00
Standard Dev.	0,00	1,00	5,00	1,50	2,50	100,00	0,50	2950,00	0,50	0,50	0,50	500000,00	185000,00	3,00	0,00	0,50	0,00	0,00	585,00	0,00
Evaluations																				
Dizalica topline	good	very good	2510,00	3,00	60,00	1000,00	no	5900,00	yes	no	good	5400000,00	82000,00	18,00	good	yes	good	average	1700,00	very good
Materijalna opor...	good	average	2500,00	0,00	65,00	800,00	yes	0,00	no	yes	average	4400000,00	452000,00	24,00	good	no	good	average	530,00	very good

Slika 31. Prikaz težinskih omjera za scenarij Javnost (opcija b)

tehnički aspekt	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	COP	Toplinska uči...	Potreba za z...	Oporabljeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak	
Unit	5-point	5-point	MWh		%	m2	y/h	MWh	y/h	y/h	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/h	5-point	5-point	t CO2eq	5-point	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences																					
Min/Max	max	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	
Weight	7,86	7,14	7,14	7,14	7,14	4,29	3,57	7,14	7,14	5,00	3,57	3,57	3,57	2,86	2,86	3,57	3,57	3,57	3,57	5,71	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics																					
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	60,00	800,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	4400000,00	82000,00	18,00	4,00	0,00	4,00	3,00	530,00	5,00	
Maximum	4,00	5,00	2510,00	3,00	65,00	1000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	5400000,00	452000,00	24,00	4,00	1,00	4,00	3,00	1700,00	5,00	
Average	4,00	4,00	2505,00	1,50	62,50	900,00	0,50	2950,00	0,50	0,50	3,50	4900000,00	267000,00	21,00	4,00	0,50	4,00	3,00	1115,00	5,00	
Standard Dev.	0,00	1,00	5,00	1,50	2,50	100,00	0,50	2950,00	0,50	0,50	0,50	500000,00	185000,00	3,00	0,00	0,50	0,00	0,00	585,00	0,00	
Evaluations																					
Dizalica topline	■	good	very good	2510,00	3,00	60,00	1000,00	no	5900,00	yes	no	good	5400000,00	82000,00	18,00	good	yes	good	average	1700,00	very good
Materijalna opor...	■	good	average	2500,00	0,00	65,00	800,00	yes	0,00	no	yes	average	4400000,00	452000,00	24,00	good	no	good	average	530,00	very good

Slika 32. Prikaz težinskih omjera za scenarij Tehnički aspekt (opcija b)

okolis	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	COP	Toplinska uci...	Potreba za z...	Oporabljeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otisak	
Unit	5-point	5-point	MWh		%	m2	y/h	MWh	y/h	y/h	5-point	EUR	EUR/y	#	5-point	y/h	5-point	5-point	t CO2eq	5-point	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences																					
Min/Max	max	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	
Weight	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	6,72	7,56	3,36	3,36	5,88	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	9,24	9,24	9,24	8,40	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics																					
Minimum	4,00	3,00	2500,00	0,00	60,00	800,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	4400000,00	82000,00	18,00	4,00	0,00	4,00	3,00	530,00	5,00	
Maximum	4,00	5,00	2510,00	3,00	65,00	1000,00	1,00	5900,00	1,00	1,00	4,00	5400000,00	452000,00	24,00	4,00	1,00	4,00	3,00	1700,00	5,00	
Average	4,00	4,00	2505,00	1,50	62,50	900,00	0,50	2950,00	0,50	0,50	3,50	4900000,00	267000,00	21,00	4,00	0,50	4,00	3,00	1115,00	5,00	
Standard Dev.	0,00	1,00	5,00	1,50	2,50	100,00	0,50	2950,00	0,50	0,50	0,50	500000,00	185000,00	3,00	0,00	0,50	0,00	0,00	585,00	0,00	
Evaluations																					
Dizalica topline	■	good	very good	2510,00	3,00	60,00	1000,00	no	5900,00	yes	no	good	5400000,00	82000,00	18,00	good	yes	good	average	1700,00	very good
Materijalna opor...	■	good	average	2500,00	0,00	65,00	800,00	yes	0,00	no	yes	average	4400000,00	452000,00	24,00	good	no	good	average	530,00	very good

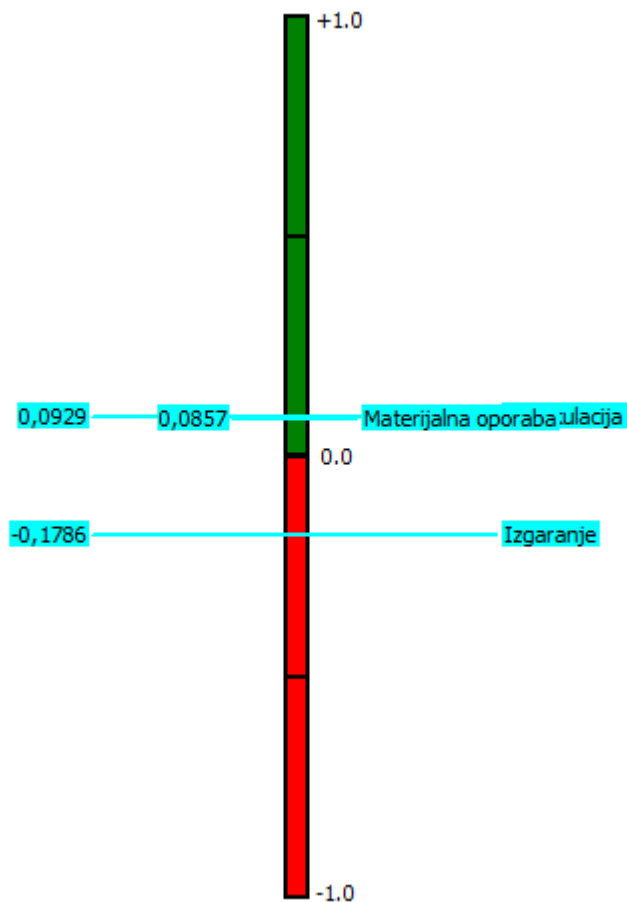
Slika 33. Prikaz težinskih omjera za scenarij Okoliš (opcija b)

4.3. Rezultati primijenjenog modela: opcija a

4.3.1. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Javnost: opcija a*

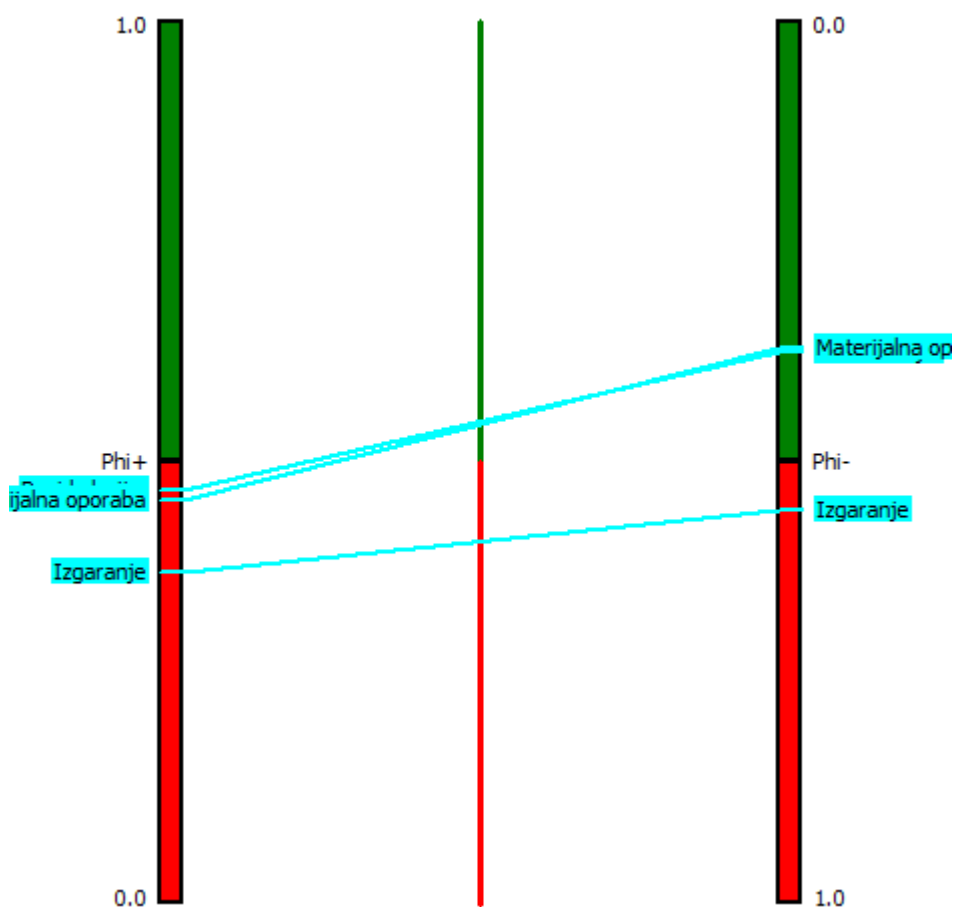
Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju (3.9), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najpogodnija tehnologija materijalne uporabe otpada, na temelju tehnološkog procesa **IIIa**. Za navedenom tehnologijom slijede recirkulacija (**IIa**) te energetska uporaba (**Ia**).

Iz kompletnog rangiranja (Slika 34.), vidljivo je kako su materijalna uporaba i recirkulacija u zelenom području, tj. njihove ukupne „jakosti“ su bolje rangiranje i prevladavaju njihove ukupne „slabosti“. Kao što je već navedeno, kriteriji vezani za javnost vrlo su povezani s javnim mišljenjem i administrativnim sektorom gospodarenja otpadom. U Italiji je potrebno istaknuti kako je bilo kakva vrsta termičke obrade otpada vrlo nepoželjna te je već ovdje moguće zaključiti kako tehnologije koje planiraju koristiti takvu vrstu uporabe neće imati previše šanse zaživjeti u operativnom smislu.



Slika 34. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija a

Iz parcijalnog rangiranja (Slika 35.) moguće je vidjeti kako se „jakosti“ i „slabosti“ tehnologija recirkulacije i materijalne uporabe relativno blizu, čime se ukazuje na visok stupanj konkurentnosti tih tehnologija na talijanskom tržištu.



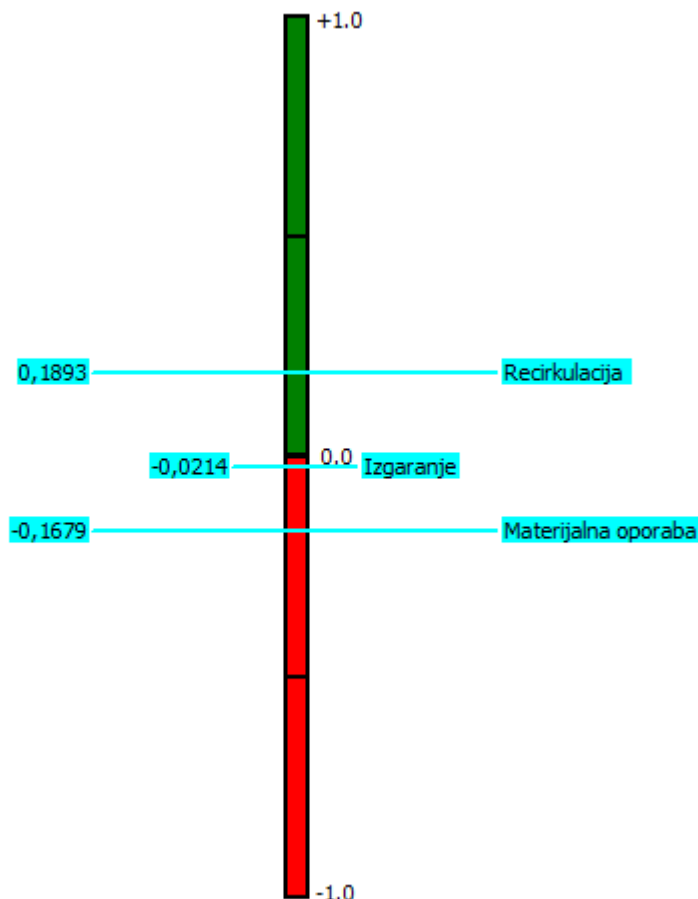
Slika 35. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija a

4.3.2. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Tehnički aspekt: opcija a*

Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju (3.9), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najpogodnija tehnologija recirkulacije (**IIa**). Drugo rangirana tehnologija je materijalne uporabe (**IIIa**), za kojom slijedi proces izgaranja (**Ia**) (Slika 36).

Gledano s tehničkog aspekta, svaka od istraživanih tehnologija u Italiji predstavlja veliko opterećenje na lokalno znanje i *know-how*. Iako se većina tehnologija primjenjuje na europskoj i globalnoj razini, njihova primjena u Italiji, gdje su sustavi energetske i materijalne uporabe otpada postojeći, ali u niskom stupnju komercijalizacije, zahtijeva izuzetne napore – s tehničke i financijske strane. Međutim, ovim modelom je prikazano kako se u jednostavnosti primjene (s tehničkog gledišta), najjednostavnije može primijeniti tehnologija recirkulacije digestata/otpadnog mulja. Uzevši u obzir tehničko znanje i podloge razmatrane talijanske regije, kao i stručnost u gospodarenju digestatom i otpadnim muljem, navedena tehnologija je vrlo jednostavna za primjenu.

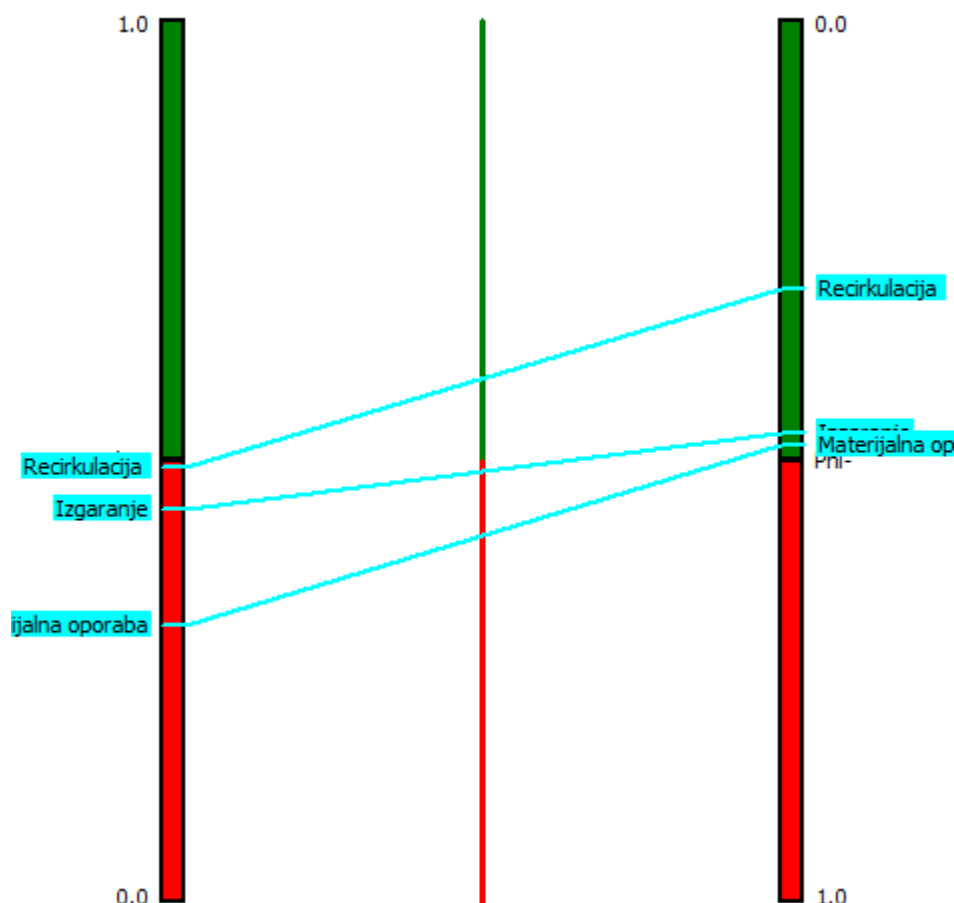
Iako su tehnologije termičke obrade već dugi niz godina komercijalne i tehnologija koja stoji iza ovog procesa naveliko poznata, zanimljivo je uočiti kako su i u ovom slučaju one neprihvatljiva opcija, tj. njihove „slabosti“ su izraženije od „jakosti“. To je moguće povezati sa neophodnom potrebom za procesima pročišćavanja otpadnih plinova, ali i potrebe za zbrinjavanjem sekundarnog otpada (pepeo nastao u procesu). Također, utjecaj imaju i visoke cijene izgradnje postrojenja te visoki operativni troškovi, u slučaju da se otpad ne zbrinjava u dovoljno velikim količinama (većina spalionica je isplativa tek ukoliko obrađuje više od 100.000 tona otpada na godišnjoj razini [225]).



Slika 36. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) - opcija a

U parcijalnom rangiranju (Slika 37.) u ovom slučaju je moguće vidjeti razlog zašto tehnologija recirkulacije prednjači u ukupnom rangiranju – jedina se sa svojim „slabostima“ nalazi blizu pozitivne zone Φ^+ , što znači da ima najmanje nedostataka gledano s tehničkog aspekta.

Također je moguće uočiti zanimljivost u pogledu tehnologije materijalne uporabe. Iako tehnologija ima mnogo pozitivnih strana, ona također ima mnogo nedostataka koji joj ograničavaju upotrebu u realnom svijetu. To je moguće najjednostavnije povezati sa zrelošću tehnologije i njenom inovativnom pristupu, koji dosad nije dovoljno primijenjen u praksi.



Slika 37. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) – opcija a

4.3.3. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Okoliš: opcija a*

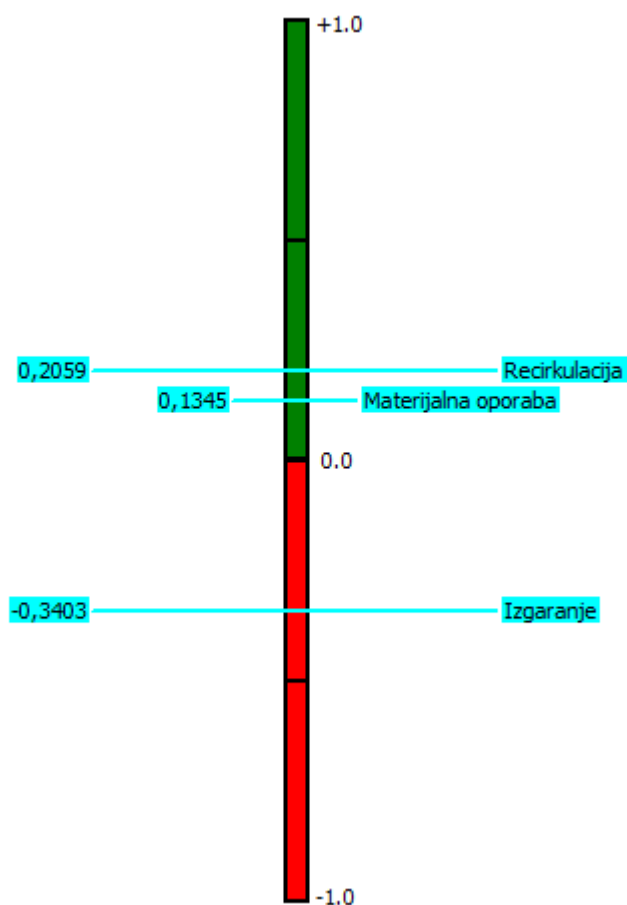
EU ima neke od najviših ekoloških standarda na svijetu, koje je razvio tijekom nekoliko posljednjih desetljeća. Zahvaljujući politici u području okoliša, gospodarstvo EU-a postaje okolišno prihvatljivije, štiti prirodne resurse Europe te čuva zdravlje i dobrobit ljudi koji žive u EU.

Zaštita okoliša je tijekom godina sve više dobila na važnosti, zbog čega se ona stavlja u fokus ove disertacije i postavlja kao prioritetni kriterij tijekom ocjenjivanja svake od tehnologija. Proizvodnja energije iz fosilnih goriva je u prošlosti bila osnova gospodarskog razvoja svake zemlje, no danas se sve više naglasak stavlja na obnovljive izvore energije i proizvodnju energije sa što manjim utjecajem na okoliš.

Kako bi se zatvorio ciklus kruženja tvari i energije u prirodi, potrebno je iskoristiti sve faktore u tom ciklusu, kako bismo smanjili pritisak na okoliš, a pritom stvorili gospodarski napredak. Navedeno predstavlja velik izazov u zemljama EU, ali i na globalnoj razini te je zbog toga fokus postavljen na okolišnu komponentu svake tehnologije.

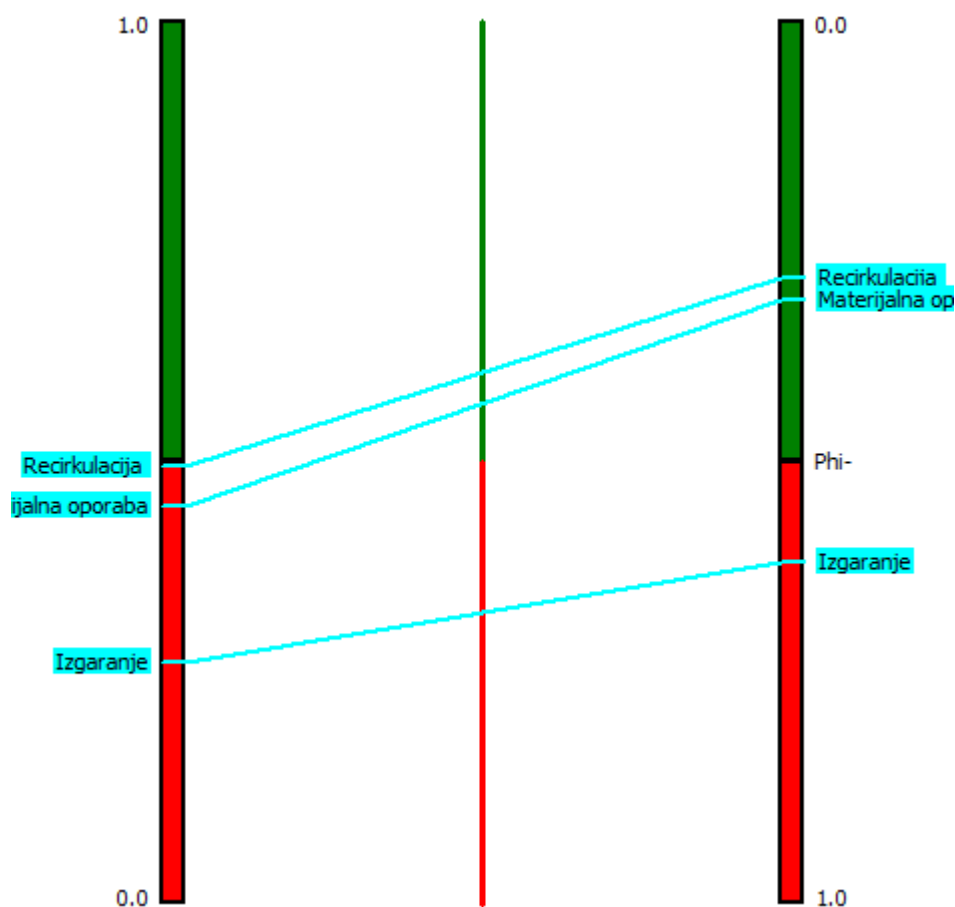
Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju, dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najprikladnija tehnologija materijalne oporabe (III). Drugo rangirana tehnologija je recirkulacija (II), za kojom slijedi proizvodnja energije iz procesa izgaranja (I). Kao što je bilo i za očekivati, tehnologije izgaranja su manje poželjne i one su rangirane kao zadnje (Slika 38).

Procesi termičke obrade iz okolišne perspektive sami po sebi nisu prihvatljivi jer dolazi do nastajanja različitih štetnih emisija, ovisno o sirovini koja se koristi u procesu. U pogledu sirovina koje se razmatraju u ovoj disertaciji, digestat i otpadni mulj s UPOV-a svakako spadaju u kategorije nepoželjnih sirovina koje imaju visok potencijal za stvaranje negativnog utjecaja na klimatske promjene, zbog širokog raspona tvari koje se u njima nalaze (farmaceutici, dioksini, furani, itd.). U ovom slučaju je ponovno moguće vidjeti paralelnost između tehnologija spaljivanja, koja je uzrokovana istim razlozima kao i u prethodnom slučaju (4.3.2).



Slika 38. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija a

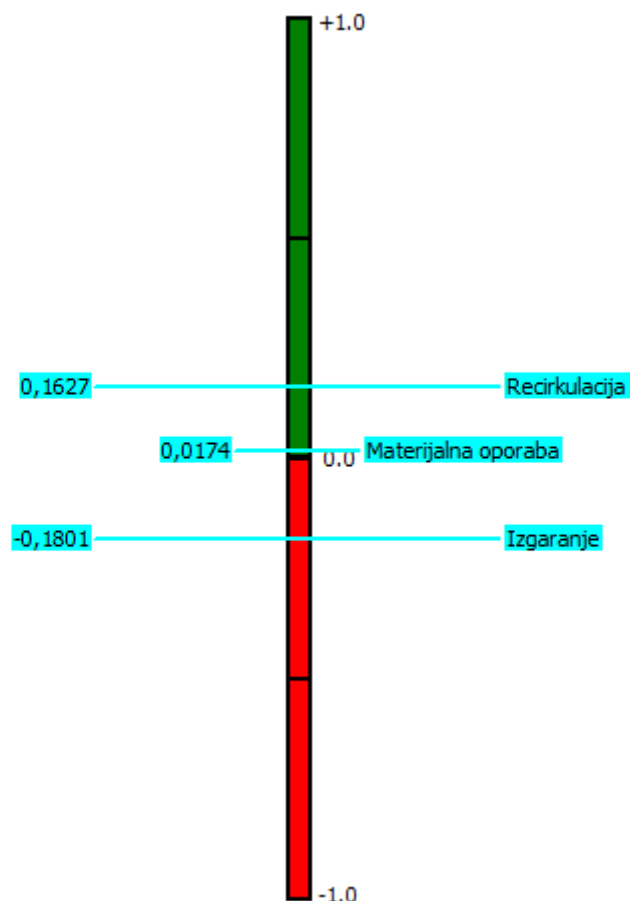
S druge strane, tehnologije koje su u parcijalnom rangiranju (Slika 39.) prikazane kao „pozitivne“ nemaju prevelik utjecaj na klimatske promjene, tj. tijekom njihovog rada ne dolazi do emisija. Upravo suprotno, pokušava se izbjeći stvaranje bilo kakvih emisija u okoliš, tako da se koristi otpad kao novi proizvod, odnosno sirovina. U ovom slučaju je bitno napomenuti kako se radi o (relativno) inovativnim tehnologijama, gdje se spaja više rješenja u jednom te tako postižu viši stupnjevi učinkovitosti, a smanjuje utjecaj na okoliš.



Slika 39. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija a

4.3.4. Rezultati izrađenog modela – ukupni rezultat: opcija a

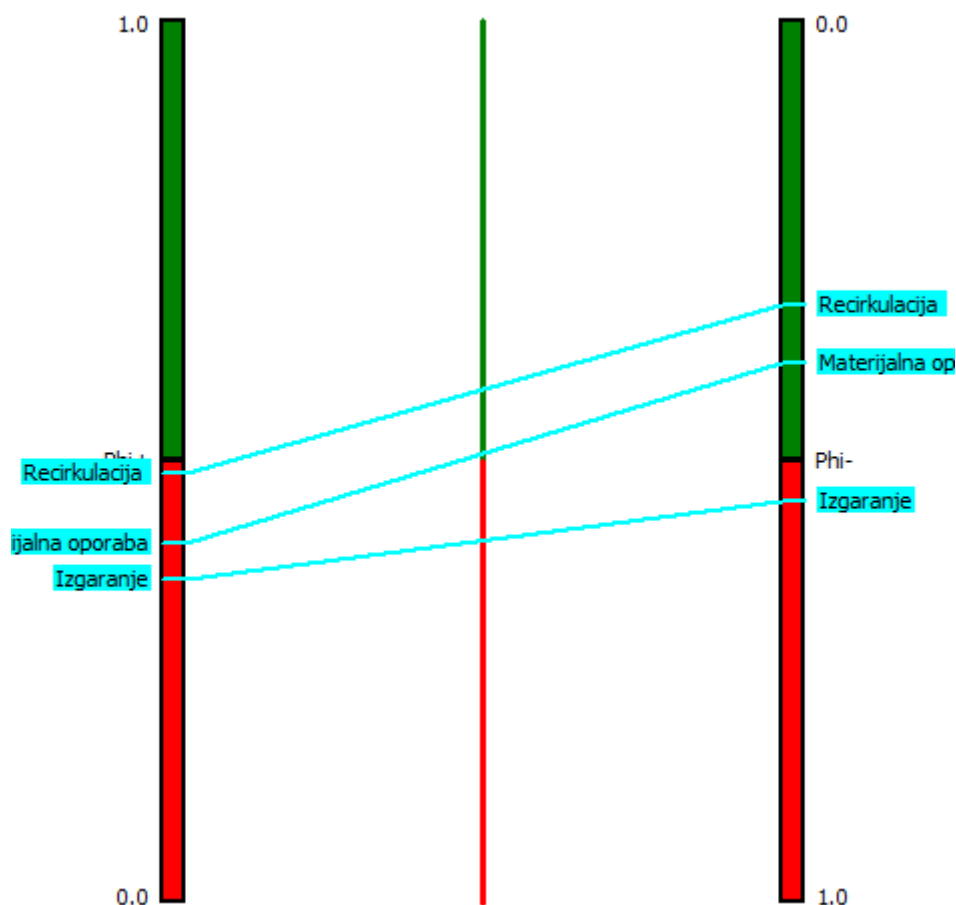
Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju (4.3.3), važnost utjecaja na okoliš prilikom odabira tehnologije energetske i materijalne uporabe otpada je neizbježna. Zbog toga su rezultati ukupnog scenarija, u kojem se sagledavaju svi aspekti s tehnološke, socio-ekonomske i okolišne strane, vrlo slični onima koji su dobiveni u scenariju *Okoliš: materijalna uporaba (III)* je optimalna tehnologija, za kojom slijedi recirkulacija (II) te na kraju proces izgaranja (I) (Slika 40).



Slika 40. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija a

No, ovdje je moguće vidjeti razlike u redoslijedu prihvatljivosti, u usporedbi sa scenarijem *Okoliša*, a to je prvenstveno povezano s komercijalnom naravi tehnologije recirkulacije te njihovom korisnošću i praktičnosti.

U parcijalnom rangiranju (Slika 41.) je zanimljivo skoro preklapanje prve dvije prihvatljive tehnologije, što je uzrokovano specifičnim „slabostima“ i „jakostima“ svake tehnologije. U svakom slučaju, u navedenim tehnologijama ističe se vrlo nizak utjecaj na okoliš, ali i mogućnosti korištenja kao ponora ugljika (engl. *carbon sink*).



Slika 41. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija a

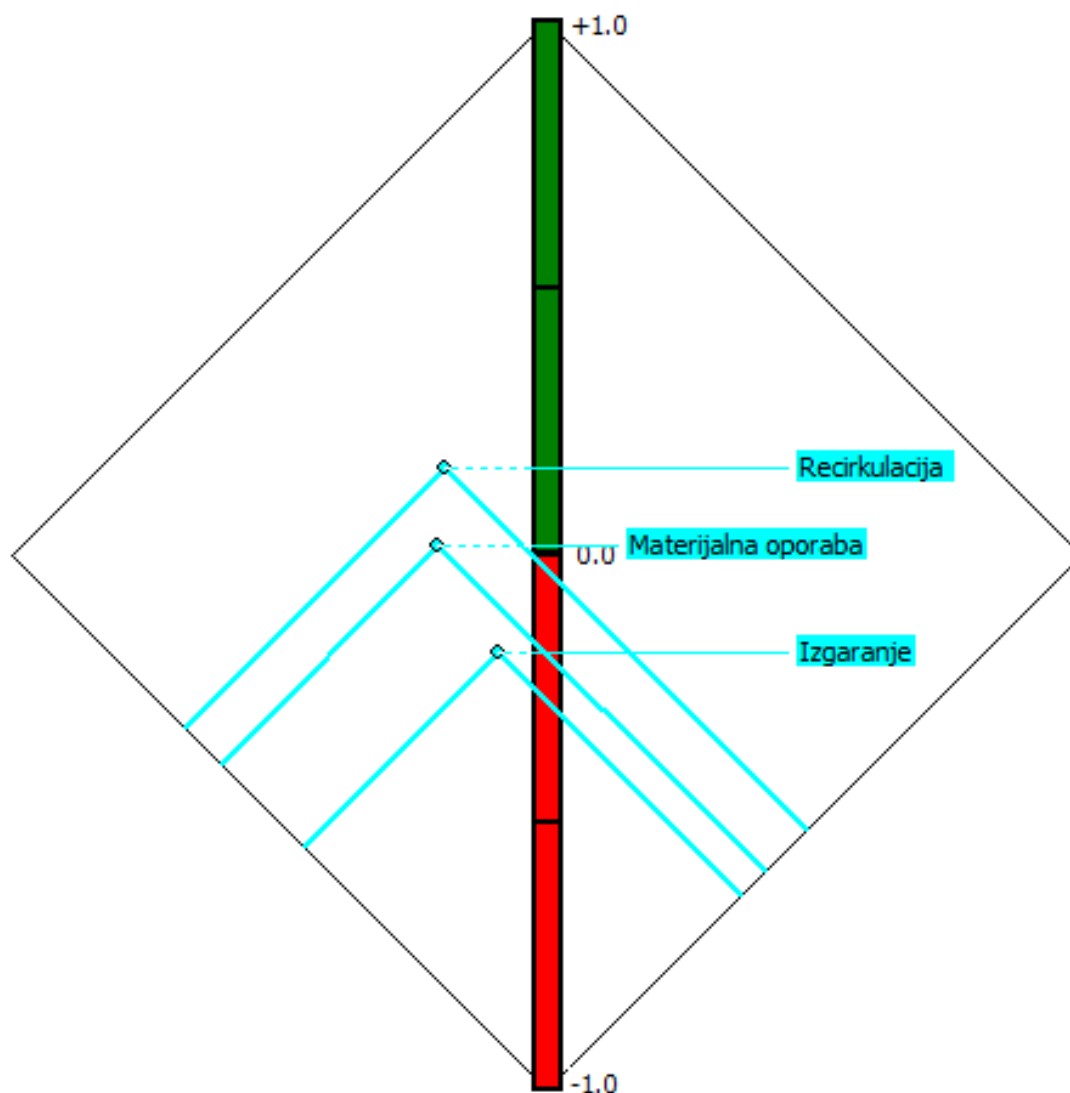
U slučaju recirkulacije (**IIa**) dolazi do smanjenja emisija tako da se otpad koristi kao nova sirovina, vraćajući time vrijedne hranjive tvari u sustav i zatvarajući time ciklus kruženja hranjivih tvari, čime se umjesto nekontroliranog ispuštanja digestata u okoliš putem odlaganja, vrijedne tvari i ugljik (glavni izvor emisija) stavljaju u tlo putem primjene digestata kao vrijednog gnojiva. No, razlog za njihovim niskim Φ_i leži u inovativnosti navedenih tehnologija te nedostatku komercijalnih postrojenja.

Razmatranjem tehnologije izgaranja (**Ia**), ponovno je prisutno ispreplitanje „slabosti“ i „jakosti“ povezanih s javnim mišljenjem o sirovinama koje se koriste u procesima. Međutim, bitno je naglasiti visoku razinu „slabosti“ koja se primjećuje kod tehnologija spaljivanja, koja je uzrokovana iz više razloga (visoki operativni i kapitalni troškovi, potreba za zbrinjavanjem ispušnih plinova i sekundarnog otpada), ali prvenstveno zbog mišljenja javnosti, koje ima negativnu predodžbu prema tehnologijama spaljivanja.

Slika 42. također prikazuje prednosti i nedostatke svake od tehnologija, u obliku PROMETHEE *Diamond* alternativnog prikaza. PROMETHEE *Diamond* skupno prikazuje rezultate parcijalnog i kompletnog rangiranja tehnologija, putem dvodimenzionalnog opisa.

Ovom vrstom prikaza moguće je prikazati prednost jedne tehnologije nad drugom, na način da se njezin „čunj“ (engl. *Cone*) nalazi iznad čunja druge tehnologije. Ukoliko ne dolazi do preklapanja čunjeva, to znači da su tehnologije međusobno usporedive.

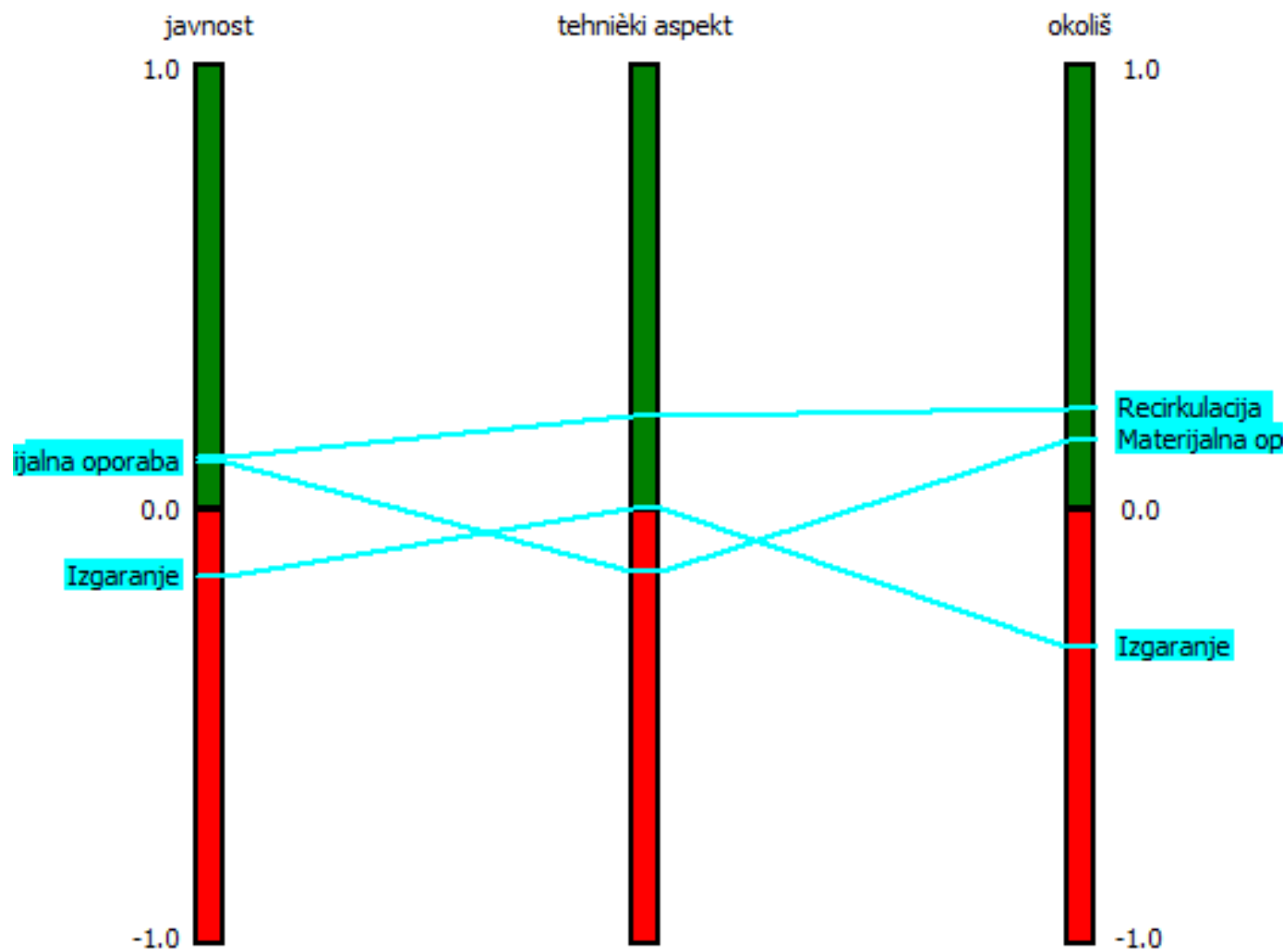
Preklapanje u kontekstu PROMETHEE *Diamond* prikaza označava neusporedivost tehnologija, no u pogledu različitih kriterija. To bi značilo da je jedna tehnologija bolja u nekim kriterijima (npr. *emisije*), dok je druga tehnologija bolja u drugim kriterijima (npr. *energetska potražnja*). Međutim, to ne znači da tehnologije nije moguće međusobno usporediti sa ciljem odabira optimalne tehnologije, već da je potrebna dodatna količina informacija kako bi se od navedenih tehnologija sa većom sigurnošću mogla donijeti bolja odluka [226]. Sukladno tome, pomoću ovog prikaza je moguće uočiti kako prethodno prikazani grafovi mogu samo opisati svaku tehnologiju na temelju njihovih ocjena kriterija.



Slika 42. PROMETHEE Diamond prikaz tehnologija svih scenarija – opcija a

Ovakva shema može donositelju odluka zadati značajne probleme, ukoliko se pokaže da su tehnologije koje se razmatraju neusporedive. Sljedeći mogući koraci su prikupljanje dodatnih podataka ili odabir tehnologije na temelju parcijalnih i kumulativnih rezultata koje su tehnologije prikazale na svakom kriteriju, prilikom svakog scenarija. Iako je konačna odluka na donositelju odluka, svakako se preporuča prvotni korak, tj. pregled rezultata kroz druge vrste prikaza u PROMETHEE-u.

U PROMETHEE metodi je također moguće prikazati i međusobnu usporedbu svih scenarija, što je prikazano na Slika 43. Iako se različito ponašaju u različitim scenarijima, iz prikaza je vidljivo kako materijalna oporaba i recirkulacija i dalje prevladavaju nad procesima izgaranja otpadnog mulja i digestata. Moguće je uočiti kako se tehnologija izgaranja u skupini kriterija *Tehnički aspekt* prikazuje relativno blizu ostalih opcija (u usporedbi, s ostalim scenarijima, zbog jednostavnosti tehničke provedbe, pouzdanosti te zrelosti tehnologije), no, u Italiji su još uvijek primjerenije i prikladnije tehnologije u kojima se izbjegava termička oporaba otpadnih tokova. Prvenstveno tu veliku ulogu imaju socio-ekonomski aspekt te javno mišljenje, koje se aktivno protivi takvim tehnologijama.



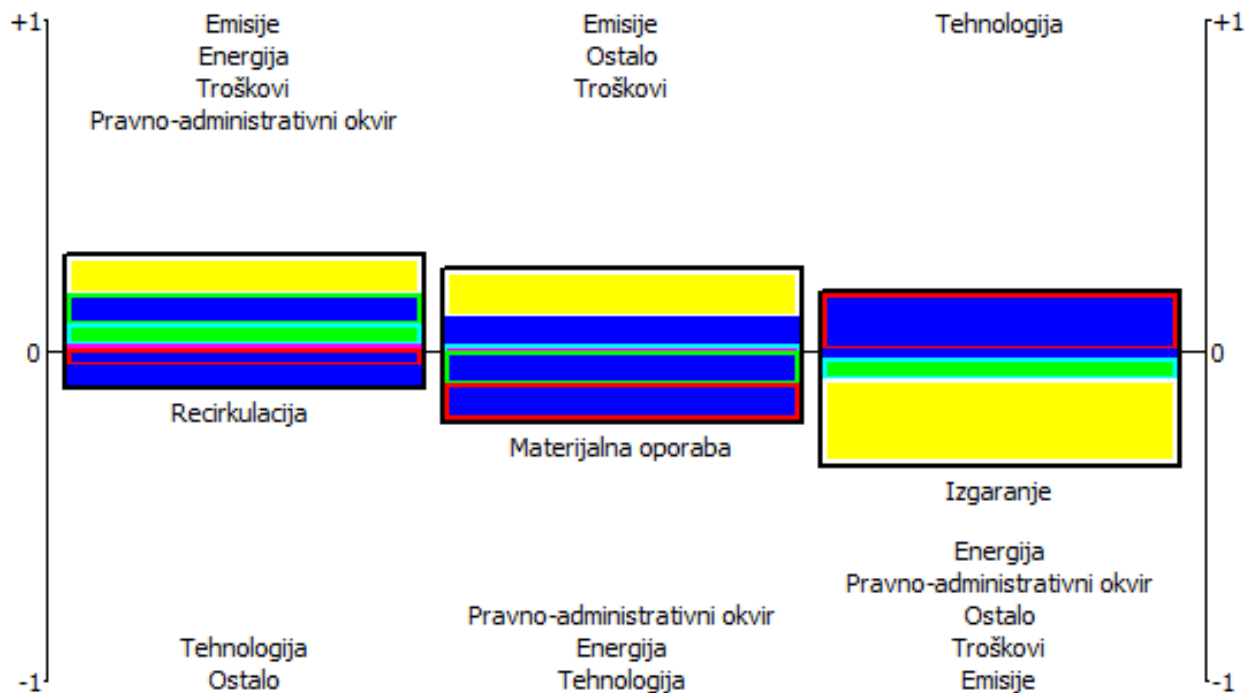
Slika 43. Medusobna usporedba svih scenarija – opcija a

Kako bismo prikazali utjecaj svakog od kriterija u konačnom rezultatu, koristi se PROMETHEE *Rainbow* grafički prikaz (Slika 44). U ovakvom prikazu, za svaku tehnologiju definiran je po jedan stupac. Različiti dijelovi svakog stupca obojeni su prema specifičnoj boji kriterija (definirano na Slika 28). Svaki od tih dijelova proporcionalno je velik razini doprinosa svakog kriterija (vrijednost kriterija i njegova težina) naspram potpunom rangiranju opcija. Pozitivni (gornji) dijelovi stupaca odgovaraju dobrim karakteristikama („jakostima“) kriterija, dok negativni (donji) dijelovi stupaca odgovaraju lošim karakteristikama („slabostima“) kriterija. Na ovaj način, ravnoteža između pozitivnih i negativnih dijelova stupaca odgovara vrijednostima potpunog rangiranja te je moguće uočiti koji kriteriji doprinose konačnom odabiru tehnologije, sukladno bojama kojima su označeni:

- Skupina kriterija *Tehnički kriteriji* označena je **plavom** bojom;
- Skupina kriterija *Socio-ekonomski kriteriji* označena je **zelenom** bojom;
- Skupina kriterija *Okolišni kriteriji* označena je **žutom** bojom.

Tehnologije su poredane s lijeva na desno, na temelju potpunog rangiranja u PROMETHEE II rangiranju.

Iz ovakvog prikaza također je moguće vidjeti kako dvije konkurente tehnologije (materijalna uporaba i recirkulacija) imaju „jakosti“ u području većine kriterija, tj. kriterijima koji su od okolišne, tehnološke, ali i socio-ekonomske važnosti. Zbog toga poprilično odskoču od ostalih tehnologija te su dobar izbor za donositelja odluke u ovom slučaju.



Slika 44. PROMETHEE Rainbow prikaz tehnologija svih scenarija – opcija a

Navedeno je također prikazano i u GAIA prikazu po kriterijima i scenarijima. GAIA analiza je prikazana pomoću standardne 2D (U, V) analize. Analiza započinje od višedimenzionalnog prikaza problema koji se pokušava riješiti, sa brojem dimenzija koliko ima i tehnologija (opcija). Nastavno, koristi se metoda „Analize glavnih komponenti“ (engl. *Principal Components Analysis*), pomoću koje se smanjuje broj dimenzija, istovremeno smanjujući količinu izgubljenih informacija. U analizi se mogu prikazati tri dimenzije:

- U je primarna glavna komponenta, koja sadrži maksimalnu moguću količinu informacija;
- V je sekundarna glavna komponenta, koja pruža maksimalnu količinu informacija ortogonalno na U;
- W je tercijarna glavna komponenta, koja pruža maksimalnu količinu informaciju ortogonalno na U i V istovremeno.

Prikaze je moguće mijenjati, sukladno traženom i željenom 2D modelu, tako da postoje tri pregleda:

- U-V: najbolji mogući 2D prikaz (do 90% količine informacija);
- U-W: u odnosu na U-V prikaz, promatran je sa strane (W je ortogonalan na U i V), i daje prikaz niže kvalitete (do 70% količine informacija);
- W-V: u odnosu na U-V pogled, promatran je sa vrha te zbog toga daje najnižu kvalitetu (do 40% količine informacija).

U promatranom prikazu tehnologije (opcije) su prikazane kvadratićima, kriteriji osima, a težine kriterija i PROMETHEE II rangiranje putem osi odluke (engl. *Decision Axis*, podebljana crvena linija), pomoću koje je moguće definirati usmjerenje kompletnog rangiranja te prikazati koji su kriteriji u skladu s kompletnim rangiranjem, a koji ne. Sukladno tome, tehnologije koje su međusobno slične postavljene su blizu jedne drugima, dok su različite tehnologije prikazane udaljeno jedna od druge.

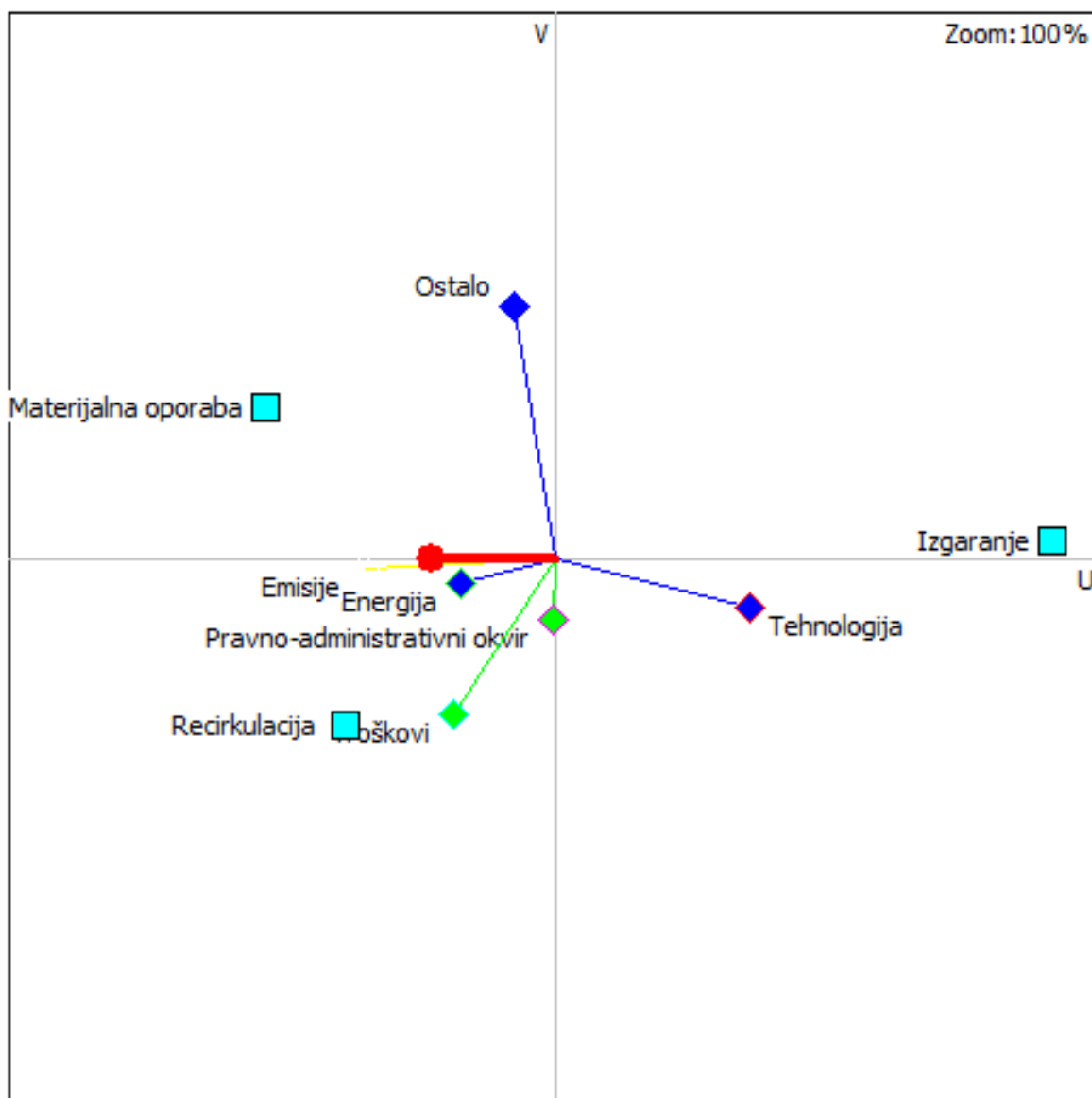
U pogledu kriterija, kriteriji koji imaju slične prioritete orijentirani su svojim osima u sličnom smjeru (npr. kriteriji *Mirisi* i *Buka*), dok su oni različitih prioriteta orijentirani u različitim smjerovima (npr. *FiT/Premium model* i *Buka*). Duljina nekog kriterija u određenoj osi predstavlja njegovu „jakost“ u usporedbi s ostalim kriterijima u istoj osi te se na temelju toga mogu odrediti „jakosti“ kriterija koji se nalaze u istoj osi, tj. imaju sličnosti.

Međutim, potrebno je uzeti u obzir i različitosti u kriterijima te potencijalnu neusporedivost određenih kriterija, ali također i velik broj kriterija. Štoviše, čim u modelu postoji više od dva ili tri kriterija, rezultate je grafički teže prikazati, što se iskazuje postotkom „količine informacija“. Što je navedeni postotak viši, to znači da je uzet u obzir veći broj informacija koji se međusobno uspoređuje. Stoga je prethodno dobivene rezultate moguće prikazati grafički, što je prikazano na sljedećoj slici, gdje je postotak količine informacija u rasponu 34,1-78,2%:

- 34,1% za W-V prikaze,
- 69,4% za U-W prikaz i
- 78,2% za U-V prikaz (Slika 45).

Pozicija tehnologija u odnosu na osi prikazuje koliko tehnologija ima pozitivan utjecaj u kontekstu određenog kriterija. Os odluke je vrlo korisna za donositelja odluka jer je moguće otkriti koji su kriteriji više, a koji manje težinski opterećeni, tj. koji imaju više, a koji manje

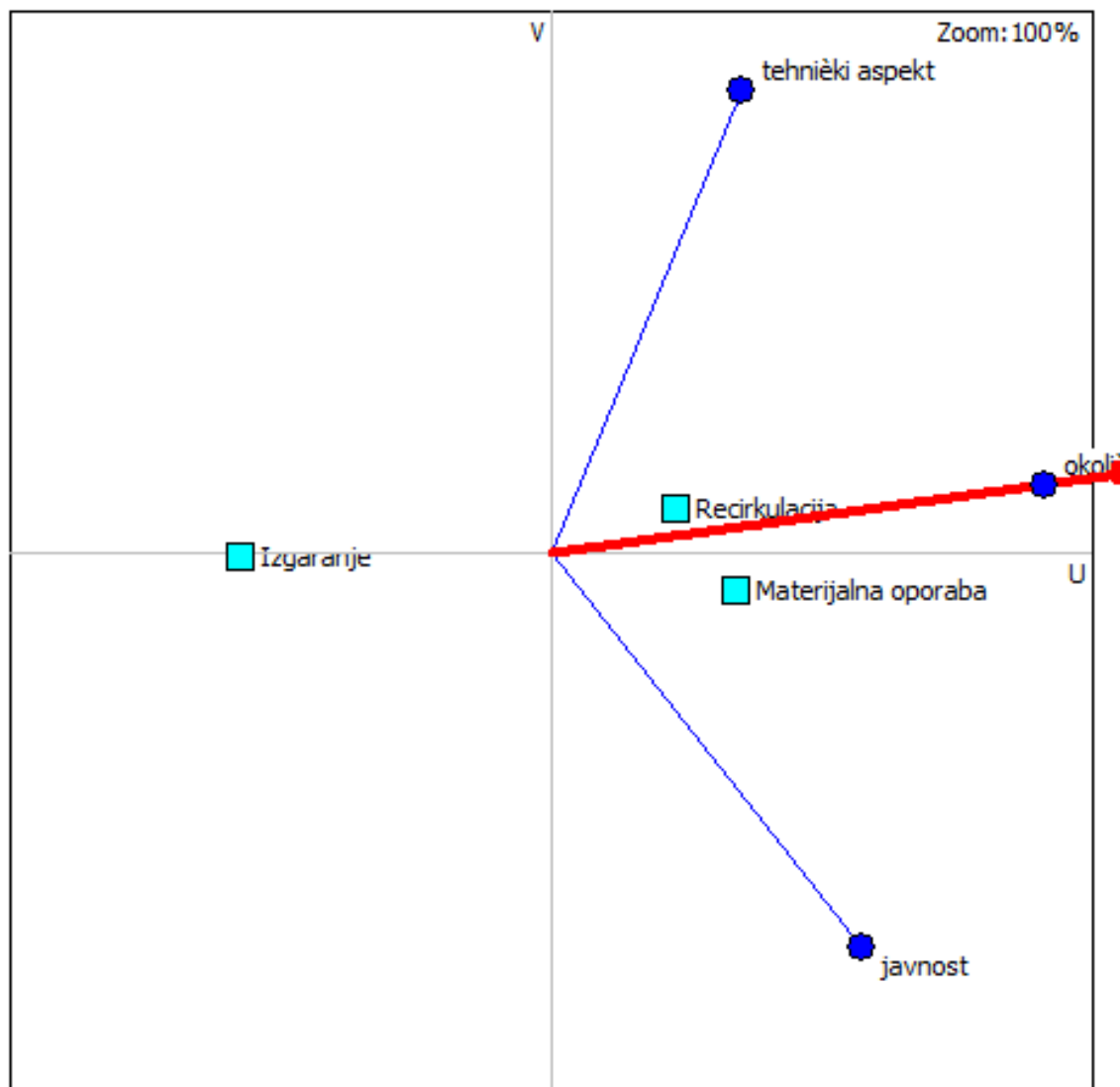
težine. Na temelju rezultata i prikaza na Slika 45, vidljivo je kako su odabrane tehnologije koje su dobre na temelju socio-ekonomske i okolišne skupine kriterija. Ukoliko donositelj odluka odluči da je potrebno težine prebaciti na druge kriterije u skladu sa svojim prioritetima, ovdje može uočiti kojoj će tehnologiji konačna odluka težiti (*Walking Weights* opcija u PROMETHEE metodi [108]).



Slika 45. Ukupni GAIA prikaz po kriterijima – opcija a

Također je moguće prikazati i usporedbu težinskih omjera kriterija putem scenarija (Slika 46). Princip prikaza je sličan kao i u prikazu po kriterijima. Os odluke u ovom slučaju usmjerena je prema scenariju *Okoliš*, što je u skladu s navedenim pretpostavkama u prethodnim poglavljima, gdje se navodi važnost, tj. težina kriterija koji se ističu u tim scenarijima.

Kako su u ovom slučaju uzeti u obzir cjelokupni scenariji, tj. rezultati prikazanih kriterija, tako je i postotak količine informacija puno veći, i iznosi 100%.



Slika 46. GAIA prikaz po scenarijima – opcija a

Iz svega navedenog, moguće je uočiti kako (i zašto) su dobiveni rezultati kojima se odabire tehnologija materijalne uporabe (**IIIa**).

Naravno, prilikom odabira tehnologije za specifičnu lokaciju (nacionalna, regionalna, lokalna razina), svaki donositelj odluka će unijeti informacije i težinske vrijednosti koje su njemu bitne, s obzirom na situaciju koja je prisutna na razmatranoj lokaciji. U ovom slučaju, odabrana je tehnologija recirkulacije digestata kao optimalna tehnologija za upotrebu na razini Italije, iako je model prikazao opciju materijalne uporabe kao bolje rješenje.

S obzirom na prikazane rezultate, ali i navedena ograničenja tehnologije, postavlja se ključno pitanje: Zašto je u ovom radu preferirana opcija bioplinskog postrojenja s recirkulacijom digestata u odnosu na klasično postrojenje gdje bi se digestat možda koristio kao gnojivo? Odgovor se djelomično nazire iz konteksta disertacije i lokalnih uvjeta:

- **Fokus na energetskej oporabi:** Disertacija je orijentirana na pronalaženje optimalne tehnologije energetske/materijalne uporabe za određene otpadne tokove. Izravna primjena digestata na tlo, premda najjednostavnija i najjeftinija, nije tehnologija uporabe energije nego oblik recikliranja hranjiva. Stoga je ta opcija isključena iz detaljnog razmatranja jer se već široko koristi kao *business as usual*. Dakle, svrha modela je bila evaluirati inovativnije ili naprednije opcije naspram tog status quo. Recirkulacija digestata javljala se kao noviji pristup povećanja energetskeg izlaza bioplinskog postrojenja, što se uklapa u cilj disertacije da maksimizira energetske iskoristivost otpada (digestata u ovom slučaju).
- **Lokalni propisi i ograničenja:** U nekim regijama (u ovom slučaju Lombardija), primjena digestata može biti limitirana preko godine zbog ograničenja skladištenja i Nitratne direktive. Ona ne zabranjuje potpuno gnojidbu digestatom, ali strogo regulira tu praksu – u nitratno osjetljivim područjima ograničava se unos organskog dušika na 170 kg N/ha godišnje iz stajnjaka/digestata. Također postoje nacionalni (ponekad stroži od EU razine) pravilnici (u Italiji i dr.) koji traže određenu kvalitetu digestata: npr. sanitarna ispravnost, niže razine teških metala, zabranu primjene u zimskom razdoblju itd. Iako digestat smije ići na poljoprivredna zemljišta, u praksi polja već imaju dovoljno stajnjaka (npr. u Lombardiji s razvijenom stočarskom proizvodnjom), pa je kapacitet tla za dodatni dušik ograničen. Recirkulacija digestata u postrojenju može biti način da se odgodi ili smanji potreba za zbrinjavanjem viška digestata na poljima, posebno u periodima kada to nije dozvoljeno (zimi) ili kada bi se premašile kvote dušika. Također treba spomenuti da Direktiva o mulju (86/278/EEZ) i nacionalni propisi ne zabranjuju digestat na tlu, već postavljaju kriterije (npr. <1.000 CFU/g *Salmonella*, ograničenja za Cd, Pb itd.) koje digestat obično zadovoljava jer potječe od biomase/gnojiva. Međutim, dozvoljena količina za korištenje digestata po hektaru često je glavni limitator.
- **Maksimizacija bioplina uz postojeću infrastrukturu:** Ako je cilj operatora postrojenja (ili lokalne politike) povećati proizvodnju obnovljive energije, recirkulacija digestata nudi relativno brzu dobit bez nabavke nove sirovine – koristi se vlastiti otpadni tok. Đurđević et al. [114] pokazali su da recirkulacija određene frakcije digestata može povećati proizvodnju električne energije za ~3,4–4,8 MWh dnevno (ovisno o tretmanu digestata), što je značajno. U konkretnom slučaju (Lombardija), to je donosilo 891–941 EUR dnevno dodatnog prihoda uz poticajnu tarifu. Takve brojke motiviraju odabir recirkulacije unatoč tehničkim izazovima. Jednostavno rečeno, tehnologija recirkulacije digestata se u modelu iskazala optimalnom jer je najviše pridonosila ciljevima (energetska dobit, ekonomska isplativost) u danim uvjetima.

Međutim, vrlo je važno naglasiti da recirkulacija nije zatvoreni ciklus u kojem se digestat u potpunosti zbrinjava i prestaje biti problem. Digestat se generira kontinuirano – čak i uz recirkulaciju dijela toka, višak digestata mora se povremeno ukloniti iz sustava kako bi se održao masena ravnoteža. U praksi, operateri koji recirkuliraju digestat primjenjuju kombinaciju mjera:

- Obično se recirkulira samo jedan dio toka (npr. samo kruta ili samo tekuća frakcija), dok se ostatak i dalje koristi na poljoprivredi ili obrađuje na drugi način. U literaturi se spominje recirkulacija tekuće frakcije kao dobar kompromis – krutu frakciju (bogatu fosforom i organskom tvari) se iznese na polje, a tekuću (bogatu amonijakom) se vraća u reaktor radi povećanja prinosa bioplina. Time se smanjuje volumen koji ide na zemljište (rješava problem viška N), a zadržava se dio nutritivne vrijednosti za tlo (kruta frakcija).
- Čak i kad se recirkulira cijeli digestat, mora postojati sustav za konačno zbrinjavanje: nakon nekoliko ciklusa, digestat postaje „iskorišten” (niski VS, visoke razine soli) te ga je potrebno ukloniti (npr. odvesti na kompostiranje ili na polje). Neke tehnologije predviđaju stalno ispuštanje malog dijela digestata iz recirkulacijskog kruga kako ne bi došlo do akumulacija – taj dio se onda odlaže ili koristi kao gnojivo uz obradu.
- Konačna „sudbina“ digestata: U EU se velika većina digestata, pa i onog iz postrojenja s recirkulacijom, na kraju iskoristi na zemljištu. Recirkulacijom se dodatno povećalo njegovu energetske iskoristivost prije te finalne primjene, kao i smanjilo volumen i dobilo stabilniji oblik za transport i odlaganje.

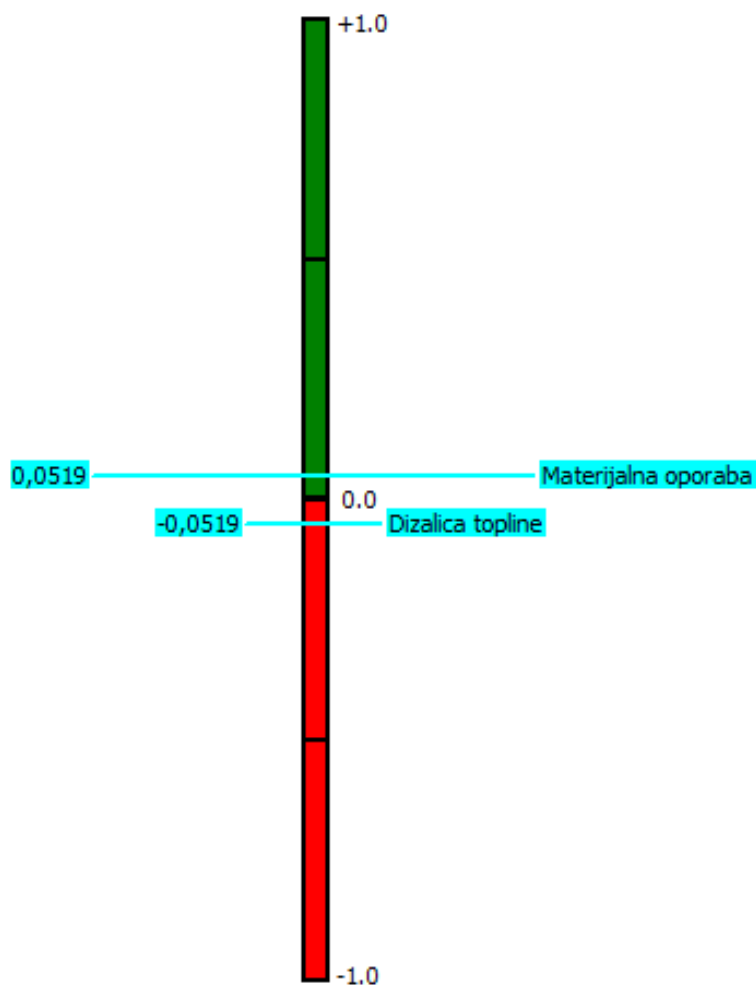
No, razmatrajući rezultate modela, potrebno je istražiti osjetljivost istoga, kako bi se moglo ustanoviti koje su granice unutar kojih je određena odluka donesena. U *Ila. Analiza osjetljivosti* – *opcija a* je prikazana analiza osjetljivosti modela za *opciju a* modela.

4.4. Rezultati primijenjenog modela: opcija b

4.4.1. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Javnost: opcija b*

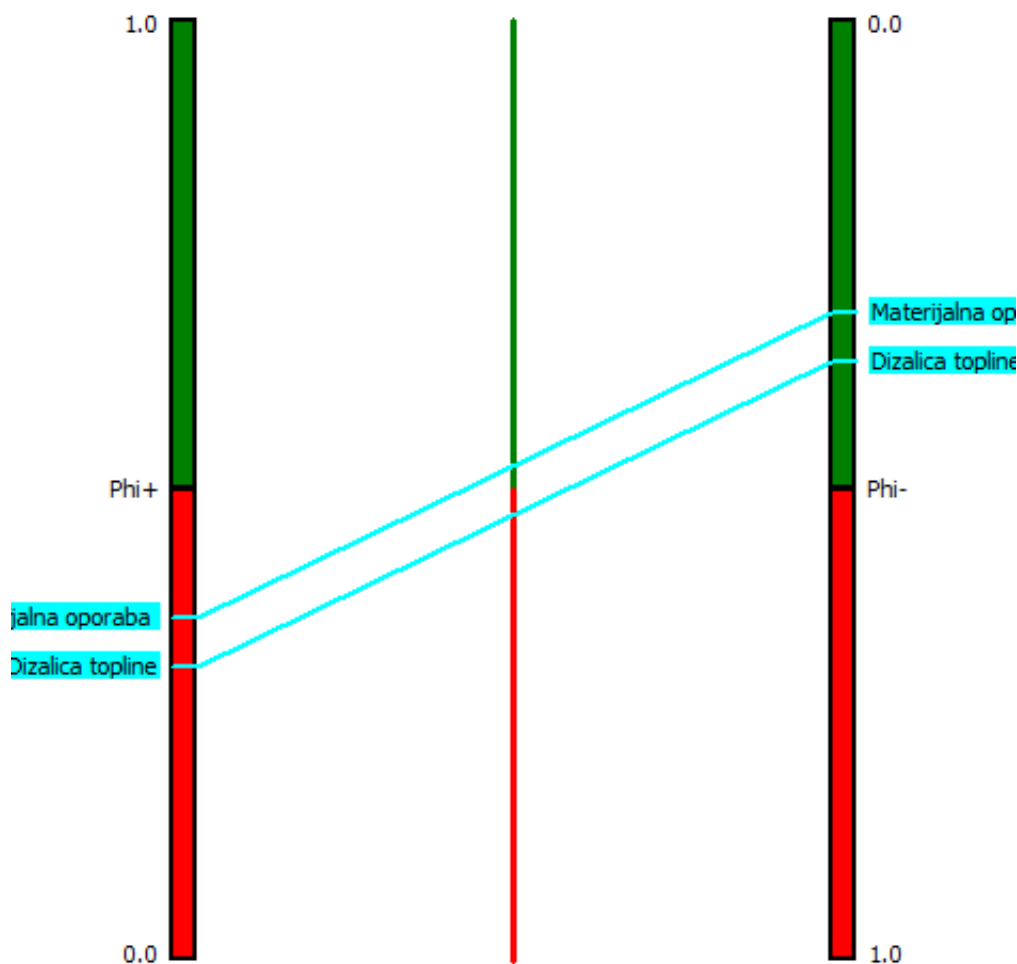
Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju (3.9), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najpogodnija tehnologija materijalne uporabe, na temelju tehnološkog procesa **I**ib****, za kojom slijedi dizalica topline (**Ib**).

Iz kompletnog rangiranja (Slika 34), vidljivo je kako je materijalna uporaba u zelenom području, tj. njezina ukupna „jakost“ je bolje rangiranje i prevladavaju njihove ukupne „slabosti“. Kao što je već navedeno, kriteriji vezani za javnost vrlo su povezani s javnim mišljenjem i administrativnim sektorom gospodarenja otpadom. U Italiji je potrebno istaknuti kako je materijalna uporaba od velikog značaja za gospodarstvo jer se primjenjuje koncept kružnog gospodarstva te su ljudi osvijestili da je dobro ponovno koristiti materijale iz otpadnih tokova.



Slika 47 Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija b

Iz parcijalnog rangiranja (Slika 48) moguće je vidjeti kako se „jakosti“ i „slabosti“ tehnologija dizalica topline i materijalne uporabe relativno blizu, čime se ukazuje na visok stupanj konkurentnosti tih tehnologija na talijanskom tržištu.



Slika 48. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija b

4.4.2. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Tehnički aspekt: opcija b*

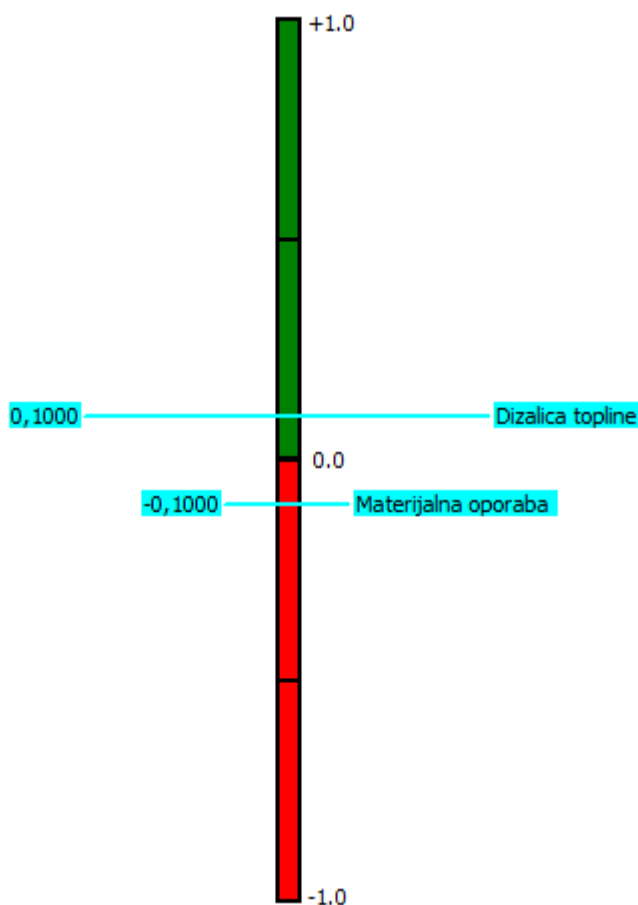
Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju (3.9), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najpogodnija tehnologija dizalica topline (**Ib**). Drugo rangirana tehnologija je proces materijalne uporabe (**Iib**) (Slika 49).

Lokalno znanje i *know-how* predstavljaju jedan od ključnih čimbenika pri implementaciji tehnologija uporabe iz otpadnih voda. Iako se sustavi rekuperacije topline iz otpadnih voda i kristalizacije struvita primjenjuju na europskoj i globalnoj razini, njihova razina implementacije u pojedinim talijanskim regijama još je uvijek ograničena te zahtijeva dodatna tehnička, organizacijska i financijska ulaganja. Posebno je naglašena potreba za integracijom novih

sustava u postojeću infrastrukturu UPOV-a, uz istodobno osiguranje stabilnosti osnovnog procesa pročišćavanja.

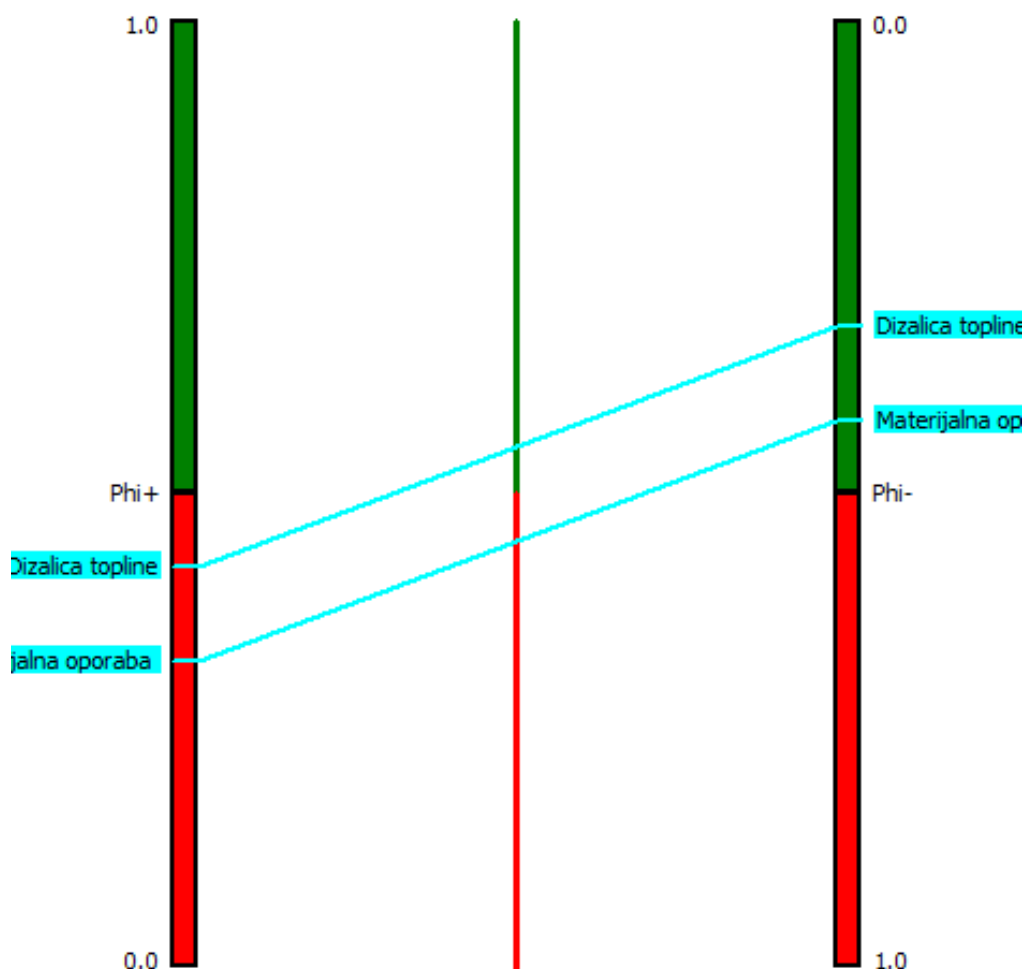
U kontekstu tehničke jednostavnosti i razine lokalne stručnosti, dizalice topline koje koriste otpadnu vodu kao izvor energije pokazuju se kao izrazito pogodna tehnologija za primjenu. Riječ je o komercijalno zreloj tehnologiji s visokom razinom pouzdanosti i standardiziranim komponentama, čija se integracija može ostvariti bez značajnih zahvata u osnovni proces pročišćavanja. U regijama s razvijenim sustavima daljinskog grijanja ili postojećom energetsom infrastrukturu, implementacija dizalice topline dodatno je olakšana. Tehnološki rizik je nizak, operativna kontrola je jednostavna, a sustav je modularan i skalabilan, što omogućuje postupno povećanje kapaciteta. U tom smislu, dizalica topline (**Ib**) predstavlja tehnološki i organizacijski najmanje disruptivno rješenje, uz istodobno značajan potencijal smanjenja emisija i povećanja energetske samodostatnosti postrojenja.

Za razliku od termičkih tehnologija obrade, koje zahtijevaju visoke investicijske izdatke, kompleksne sustave pročišćavanja dimnih plinova i ekonomiju razmjera, dizalice topline karakterizira znatno niži investicijski prag i veća fleksibilnost primjene. One ne generiraju sekundarni kruti otpad, ne zahtijevaju obradu dimnih plinova te ne podliježu strogoj regulativi vezanoj uz emisije izgaranja. Upravo zbog toga, u uvjetima srednje velikih postrojenja (npr. 40.000 ES), dizalice topline predstavljaju tehnički, okolišno i organizacijski racionalnije rješenje u odnosu na kapitalno intenzivne termičke procese.



Slika 49. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) – opcija b

U parcijalnom rangiranju (Slika 50.) u ovom slučaju je moguće vidjeti da dizalica topline i materijalna uporaba imaju paralelne „slabosti“ i „jakosti“.



Slika 50. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) – opcija b

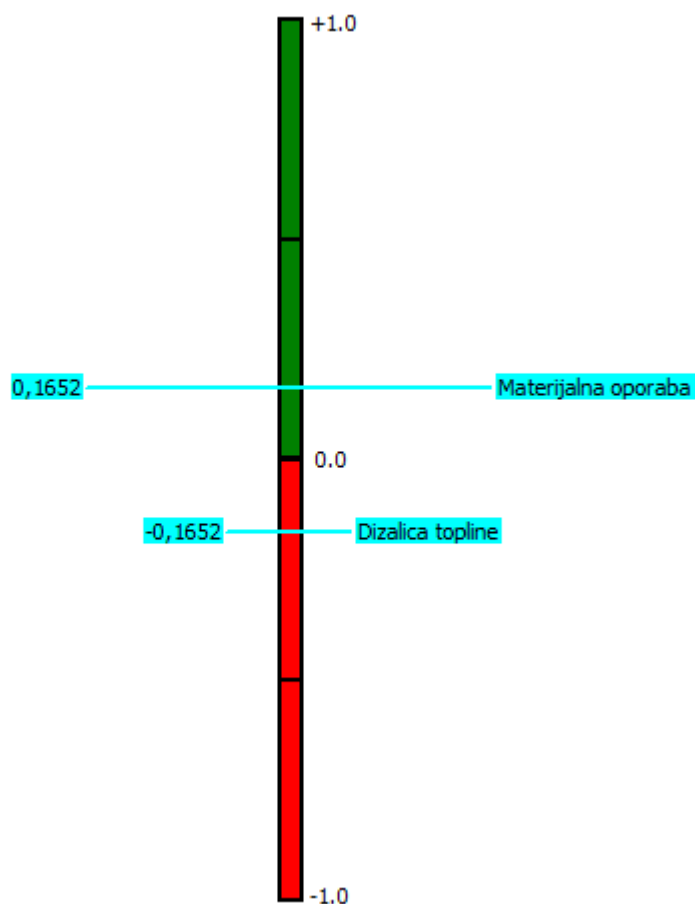
4.4.3. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Okoliš: opcija b*

EU ima neke od najviših ekoloških standarda na svijetu, koje je razvio tijekom nekoliko posljednjih desetljeća. Zahvaljujući politici u području okoliša, gospodarstvo EU-a postaje okolišno prihvatljivije, štiti prirodne resurse Europe te čuva zdravlje i dobrobit ljudi koji žive u EU.

Zaštita okoliša je tijekom godina sve više dobila na važnosti, zbog čega se ona stavlja u fokus ove disertacije i postavlja kao prioritetni kriterij tijekom ocjenjivanja svake od tehnologija. Proizvodnja energije iz fosilnih goriva je u prošlosti bila osnova gospodarskog razvoja svake zemlje, no danas se sve više naglasak stavlja na obnovljive izvore energije i proizvodnju energije sa što manjim utjecajem na okoliš.

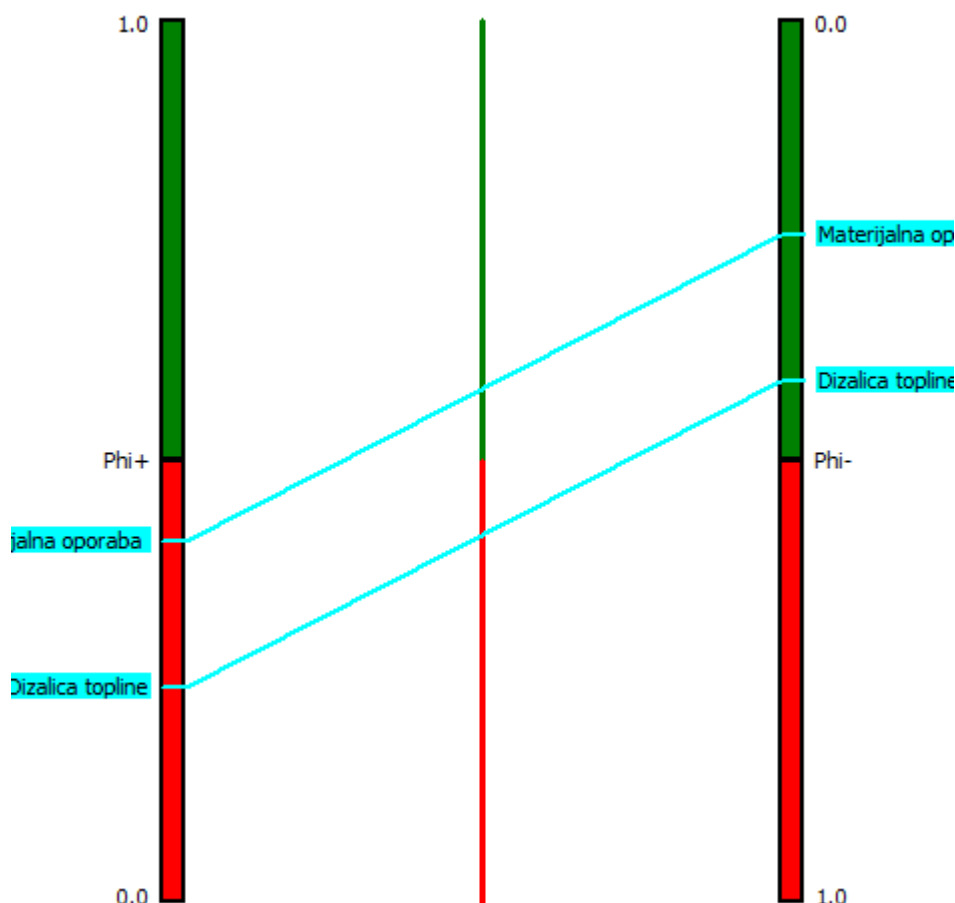
Kako bi se zatvorio ciklus kruženja tvari i energije u prirodi, potrebno je iskoristiti sve faktore u tom ciklusu, kako bismo smanjili pritisak na okoliš, a pritom stvorili gospodarski napredak. Navedeno predstavlja velik izazov u zemljama EU, ali i na globalnoj razini te je zbog toga fokus postavljen na okolišnu komponentu svake tehnologije.

Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju, dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najprikladnija tehnologija materijalne uporabe (**IIb**). Drugo rangirana tehnologija je dizalice topline (**Ib**) (Slika 51).



Slika 51. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija b

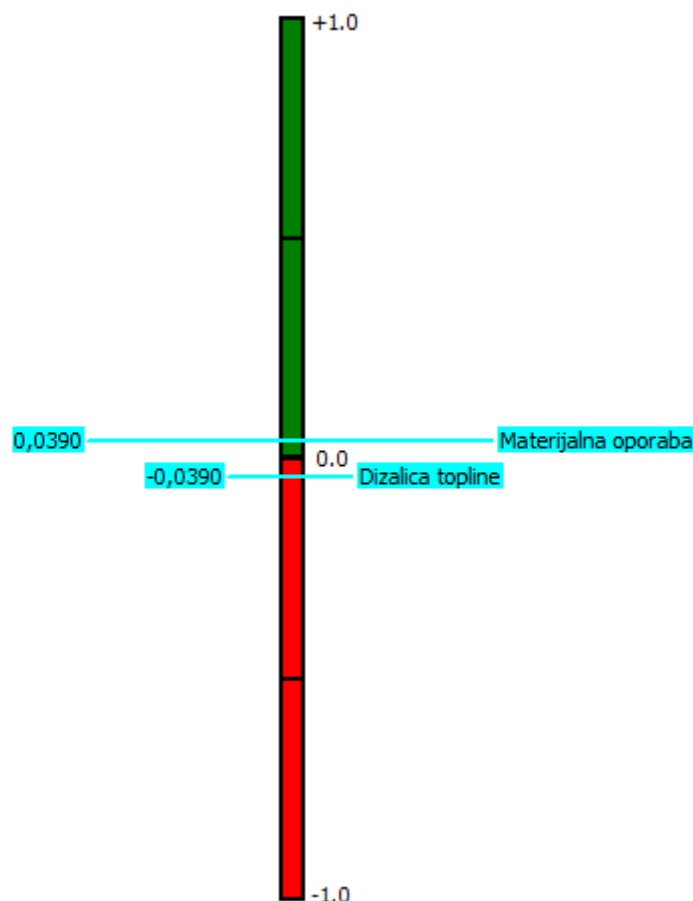
S druge strane, u parcijalnom rangiranju (Slika 52.) se može vidjeti kako su obje tehnologije „pozitivne“ na okoliš, no zbog tehničkog aspekta imaju negativan rezultat, tj. izražene „slabosti“. U ovom slučaju je bitno napomenuti kako se radi o (relativno) inovativnim tehnologijama, gdje se spaja više rješenja u jednom te tako postižu viši stupnjevi učinkovitosti, a smanjuje utjecaj na okoliš.



Slika 52. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija b

4.4.4. Rezultati izrađenog modela – ukupni rezultat: opcija b

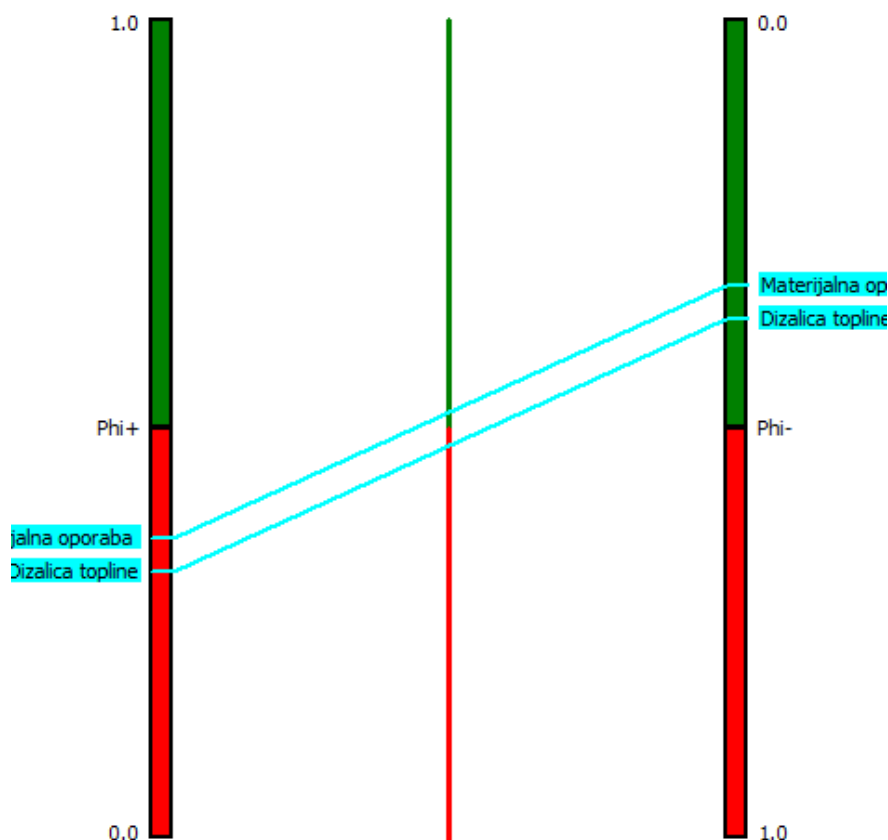
Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju (4.3.3), važnost utjecaja na okoliš prilikom odabira tehnologije energetske i materijalne uporabe otpada je neizbježna. Zbog toga su rezultati ukupnog scenarija, u kojem se sagledavaju svi aspekti s tehnološke, socio-ekonomske i okolišne strane, vrlo slični onima koji su dobiveni u scenariju *Okoliš*: materijalna uporaba (**IIb**) je optimalna tehnologija, za kojom slijedi dizalica topline (**Ib**) (Slika 53).



Slika 53. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija b

No, ovdje je moguće vidjeti razlike u redoslijedu prihvatljivosti, u usporedbi sa scenarijem *Okoliša*, a to je prvenstveno povezano s komercijalnom naravi tehnologije recirkulacije te njihovom korisnošću i praktičnosti.

U parcijalnom rangiranju (Slika 54.) je zanimljivo kako specifične „slabosti“ svake tehnologije pozicioniraju ih u negativnom dijelu skale. U svakom slučaju, u navedenim tehnologijama ističe se vrlo nizak utjecaj na okoliš, ali i mogućnosti korištenja kao ponora ugljika (engl. *carbon sink*).



Slika 54. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija b

U slučaju materijalne uporabe hranjivih tvari, poput kristalizacije struvita (**IIb**), dolazi do izravnog smanjenja emisija i okolišnog opterećenja kroz izdvajanje fosfora i dijela dušika iz tekuće faze te njihovu ponovnu uporabu u obliku tržišno prihvatljivog gnojiva. Na taj način se zatvara ciklus hranjivih tvari unutar sustava, smanjuje potreba za proizvodnjom primarnih mineralnih gnojiva te ograničava rizik eutrofikacije vodnih tijela. Umjesto da fosfor ostane u otpadnoj vodi ili se nekontrolirano taloži unutar sustava, on se transformira u stabilan i kontroliran proizvod. Unatoč tim prednostima, relativno niži prioritet u određenim evaluacijama može biti posljedica percepcije veće procesne kompleksnosti i ovisnosti o tržišnim uvjetima za plasman proizvoda, a ne stvarnih okolišnih slabosti same tehnologije.

Kod tehnologije dizalica topline (**Ib**) naglasak je prvenstveno na energetskej valorizaciji niskotemperaturnog izvora. Iako je riječ o tehnološki zreloj, pouzdanoj i modularnoj opciji s jasnim doprinosom smanjenju emisija CO₂ u odnosu na fosilne izvore grijanja, njezin učinak ostaje unutar energetskog sektora i ne doprinosi izravno zatvaranju materijalnih tokova. Drugim riječima, dizalica topline smanjuje emisije kroz supstituciju energije, ali ne rješava problem gubitka hranjivih tvari niti doprinosi kruženju fosfora i dušika u sustavu.

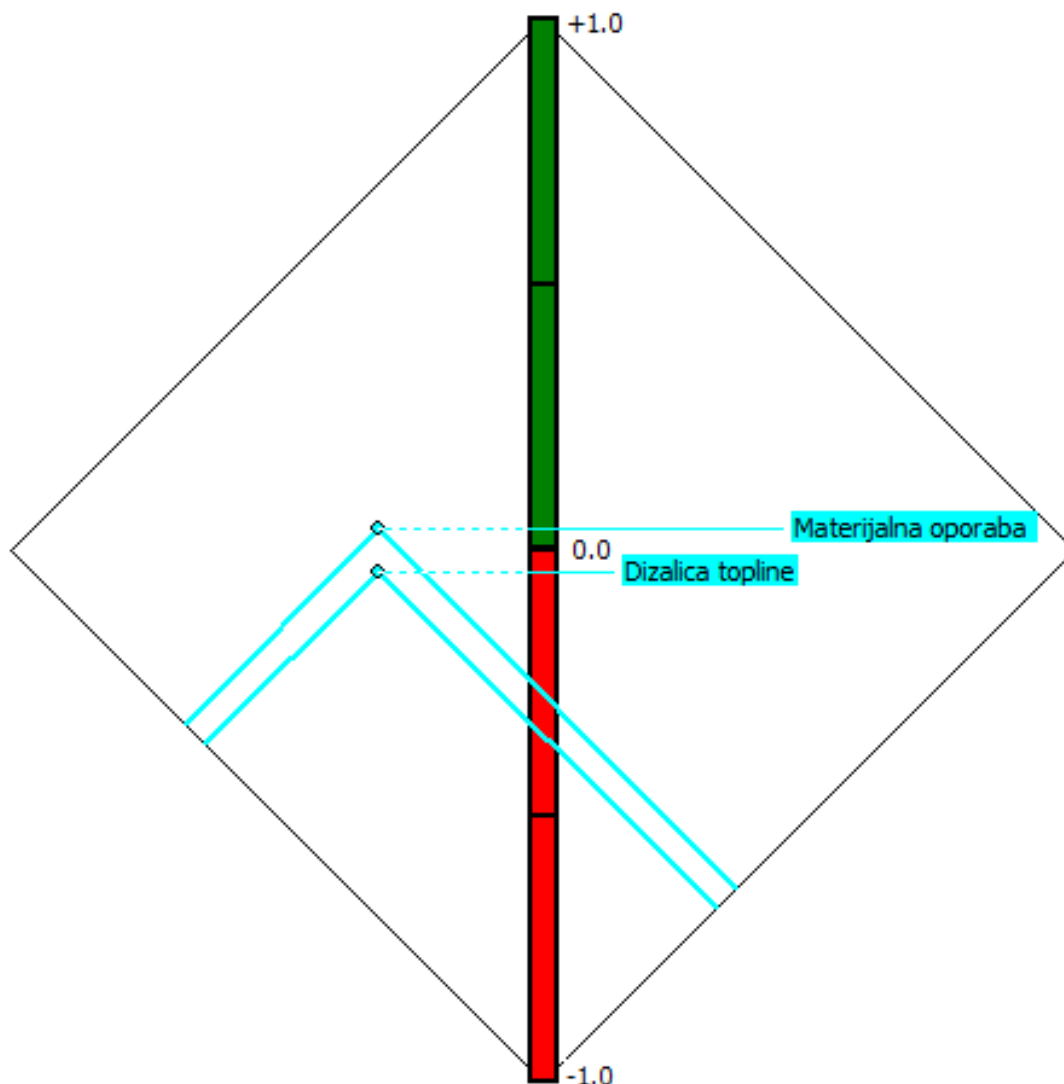
U usporedbi s energetskej uporabom topline, materijalna uporaba kroz rekuperaciju struvita ima širi kružni učinak jer istodobno smanjuje opterećenje na postrojenje, sprječava nekontrolirane precipitacije, smanjuje povratno opterećenje fosforom te stvara sekundarnu sirovinu s agronomskom vrijednošću. U kontekstu dugoročne tranzicije prema kružnom gospodarstvu i sigurnosti opskrbe fosforom kao kritičnom sirovinom, materijalna uporaba pokazuje veću stratešku vrijednost u odnosu na isključivo energetskej valorizaciju topline.

Slika 55. prikazuje usporedni položaj tehnologija kroz PROMETHEE Diamond prikaz, koji objedinjuje rezultate parcijalnog i potpunog rangiranja u dvodimenzionalnom prostoru. Ovakav prikaz omogućuje vizualnu interpretaciju relativne dominacije alternativa, pri čemu se tehnologija čiji se „čunj“ nalazi iznad drugog smatra povoljnijom u ukupnom vrednovanju.

U promatranom slučaju, materijalna uporaba (rekuperacija struvita) pokazuje izraženiju ukupnu prednost u odnosu na dizalice topline, što je vidljivo kroz njezin dominantniji položaj u dijagramu. Iako obje tehnologije ostvaruju pozitivne učinke u određenim skupinama kriterija, materijalna uporaba ostvaruje snažnije rezultate u kriterijima vezanim uz kružno gospodarstvo, uporabu resursa, dugoročnu stratešku vrijednost fosfora te smanjenje okolišnog opterećenja kroz zatvaranje hranidbenog ciklusa.

Ukoliko dolazi do djelomičnog preklapanja čunjeva, to upućuje na činjenicu da dizalice topline pokazuju prednost u određenim energetske i operativnim aspektima (npr. jednostavnost integracije i tehnološka zrelost), dok materijalna uporaba nadmašuje energetske alternativu u kriterijima vezanim uz uporabljene materijale, doprinos sigurnosti opskrbe kritičnim sirovinama te dugoročni okolišni učinak. Međutim, izostanak potpunog preklapanja i viši položaj čunja materijalne uporabe ukazuju na njezinu ukupnu superiornost unutar definiranog skupa kriterija.

Stoga PROMETHEE Diamond prikaz ne služi samo kao vizualna potvrda rangiranja, već jasno pokazuje da, unatoč određenim komplementarnim prednostima dizalica topline, materijalna uporaba predstavlja robusnije rješenje u kontekstu višekriterijskog vrednovanja i ciljeva kružnog gospodarstva.

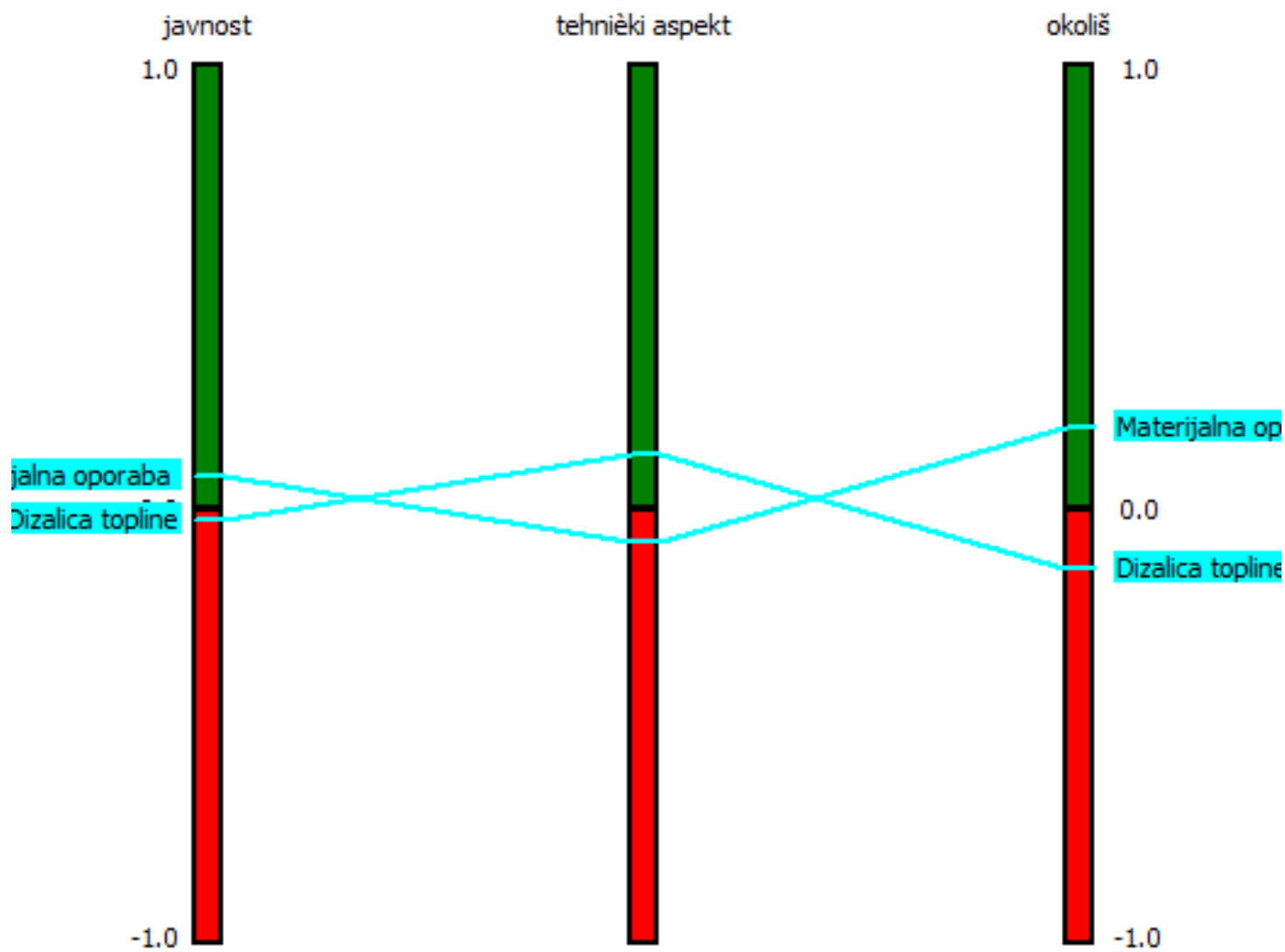


Slika 55. PROMETHEE Diamond prikaz tehnologija svih scenarija – opcija b

Iako se tehnologije različito pozicioniraju ovisno o scenariju i ponderima kriterija, iz prikaza (Slika 56.) je vidljivo da materijalna uporaba ostvaruje povoljniji ukupni rezultat u odnosu na dizalice topline. Dok obje opcije doprinose održivosti sustava, njihovi učinci se razlikuju u naravi i strateškoj vrijednosti.

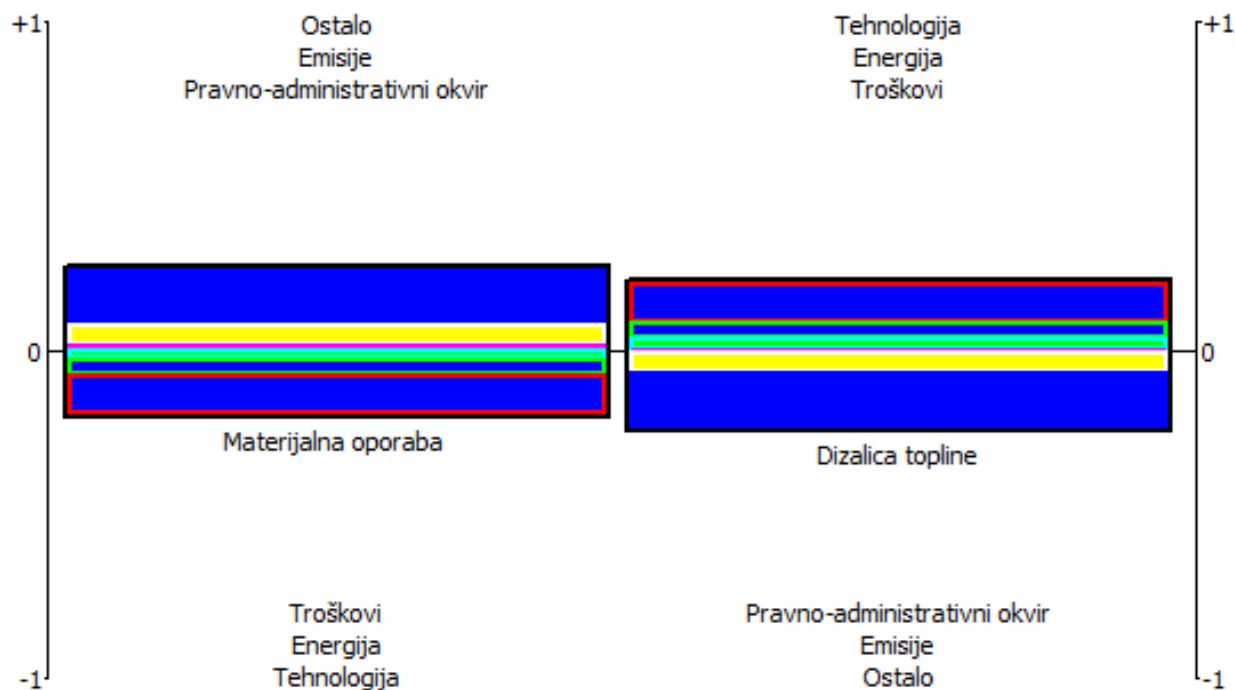
Dizalice topline pokazuju vrlo dobar rezultat unutar tehničkih kriterija, osobito u pogledu tehnološke zrelosti, pouzdanosti i jednostavnosti integracije u postojeću infrastrukturu. Riječ je o komercijalno zreloj i operativno stabilnoj tehnologiji s relativno predvidivim performansama i niskim tehnološkim rizikom.

Međutim, materijalna uporaba, kroz rekuperaciju struvita, pokazuje snažniji učinak u kriterijima vezanim uz kružno gospodarstvo, uporabu resursa i dugoročnu sigurnost opskrbe fosforom kao kritičnom sirovinom. Osim smanjenja opterećenja sustava i sprječavanja nekontroliranih precipitacija, ova tehnologija izravno zatvara hranidbeni ciklus i generira tržišno primjenjiv proizvod. U kontekstu strateških ciljeva održivosti i resursne učinkovitosti, takav doprinos nadilazi isključivo energetske valorizacije topline..



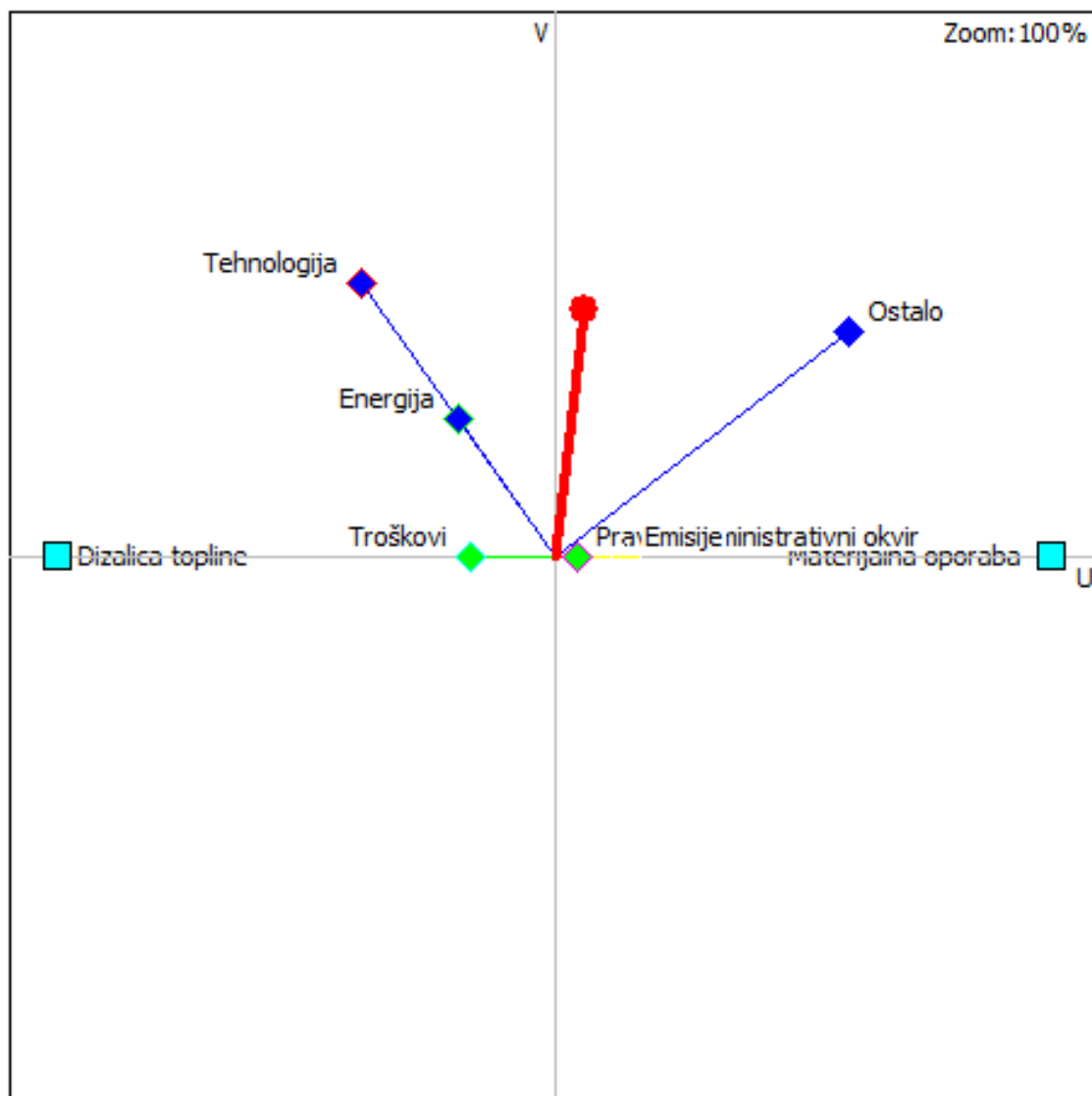
Slika 56. Međusobna usporedba svih scenarija – opcija b

Iz PROMETHEE *Rainbow* prikaza (Slika 57.) također je moguće vidjeti kako dvije konkurentne tehnologije (materijalna uporaba i dizalice topline) imaju „jakosti“ u području većine kriterija, tj. kriterijima koji su od ekološke, tehnološke, ali i socio-ekonomske važnosti.



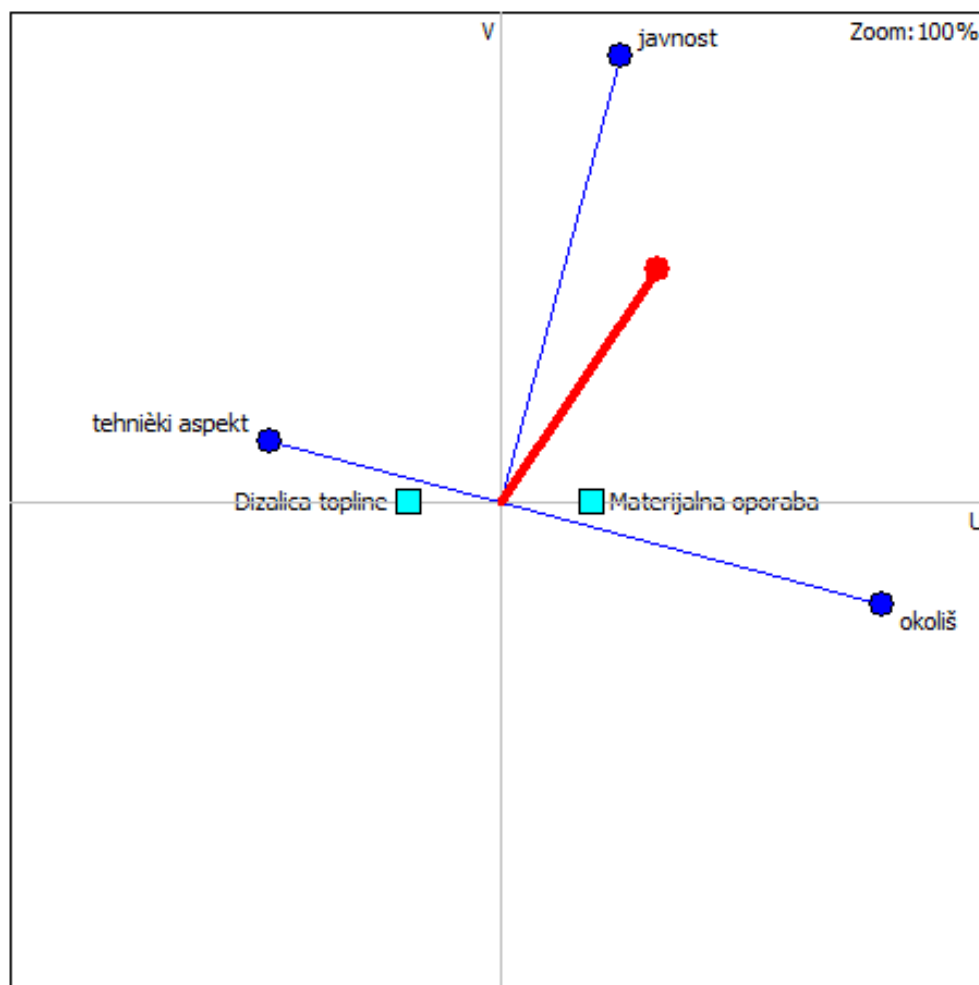
Slika 57. PROMETHEE Rainbow prikaz tehnologija svih scenarija – opcija b

Navedeno je također prikazano i u GAIA prikazu (Slika 58.) po kriterijima i scenarijima, gdje je postotak količine informacija u rasponu 0-100% (razmatranje dviju tehnologija).



Slika 58. Ukupni GAIA prikaz po kriterijima – opcija b

Prikazana je i usporedba težinskih omjera kriterija putem scenarija (Slika 59). Princip prikaza je sličan kao i u prikazu po kriterijima. Os odluke u ovom slučaju usmjerena je prema scenariju *Javnost*, što je u skladu s navedenim pretpostavkama u prethodnim poglavljima, gdje se navodi važnost, tj. težina kriterija koji se ističu u tim scenarijima.



Slika 59. GAIA prikaz po scenarijima – opcija b

Iz svega navedenog, moguće je uočiti kako (i zašto) su dobiveni rezultati kojima se odabire tehnologija materijalne uporabe (**IIb**).

U *IIb. Analiza osjetljivosti – opcija b* prikazana je analiza osjetljivosti modela za *opciju b* modela.

5. KORIŠTENJE UMJETNE INTELIGENCIJE U ODABIRU TEHNOLOGIJA

Razvoj digitalnih alata i umjetne inteligencije (AI) u posljednjem desetljeću značajno je transformirao pristupe analizi i upravljanju kompleksnim tehničkim sustavima. Umjetna inteligencija danas se sve češće primjenjuje u sustavima odlučivanja koji uključuju veliki broj varijabli, nelinearne odnose i nesigurnosti, uključujući energetske, okolišne i infrastrukturne sustave. Mnoge studije ukazuju na to da AI alati omogućuju sofisticirane analize i predikcije, ali da je njihova transparentnost ograničena bez dodatnih interpretacijskih metoda, što predstavlja izazov za praktičnu primjenu u strateškim odlukama [227, 228].

Primjena umjetne inteligencije u odabiru tehnologija može se realizirati kroz razne metodološke pristupe. Modeli strojnog učenja (regresija, klasifikacija) omogućuju predviđanje investicijskih i operativnih troškova, emisijskih profila ili energetske performansi na temelju povijesnih podataka. Evolucijski algoritmi i *multi-objective* optimizacija mogu istodobno optimirati više ciljeva, primjerice minimizaciju emisija i troškova uz maksimizaciju energetske učinkovitosti. U mnogim suvremenim studijama [229, 230] kombiniraju se AI algoritmi s tradicionalnim višekriterijskim metodama kako bi se poboljšala interpretabilnost i prihvatljivost rezultata, osobito u složenim problemima odlučivanja gdje se moraju uravnotežiti objektivni i subjektivni kriteriji.

Jedna od ključnih prednosti AI modela jest sposobnost modeliranja nelinearnih i kompleksnih međuovisnosti između varijabli, što značajno proširuje analitičke mogućnosti u odnosu na klasične linearne modele. Umjetna inteligencija može identificirati obrasce koji nisu intuitivno vidljivi u jednostavnim modelima i omogućiti prediktivnu analizu u uvjetima visoke varijabilnosti ulaznih parametara. Studije su pokazale da posebnu pažnju zahtijeva integracija AI s višekriterijskim odlukama jer interpretabilnost ostaje ključni zahtjev prilikom donošenja odluka o implementaciji tehnologija u stvarnom svijetu [227, 228, 231].

Međutim, primjena umjetne inteligencije u strateškom odabiru tehnologija ima značajna ograničenja. Najvažniji izazov odnosi se na transparentnost i interpretabilnost modela. Mnogi napredni AI algoritmi, osobito oni temeljeni na dubokom učenju, funkcioniraju kao “crne kutije” (*black-box* modeli), što otežava donošenje odluka koje se temelje na razumljivim i verificiranim pretpostavkama. U kontekstu infrastrukturnih i javnih investicija, gdje je nužno osigurati metodološku transparentnost i mogućnost revizije procesa odlučivanja, takav pristup ostavlja otvoren prostor za sumnju u valjanost i stabilnost odluka, posebno kod višekriterijskih problema gdje se vrednuju i kvalitativni faktori.

U usporedbi s umjetnom inteligencijom, višekriterijske metode odlučivanja poput PROMETHEE metode predstavljaju strukturirani i transparentni okvir donošenja odluka. PROMETHEE je jedan od dobro poznatih *outranking* pristupa koji omogućuje jasnu i reproducibilnu agregaciju parcijalnih preferencija i interpretabilno rangiranje alternativa kroz funkcije preferencije i analizu osjetljivosti [228, 232]. U literaturi je PROMETHEE prepoznat kao metoda koja dobro integrira kvantitativne i kvalitativne kriterije u jedinstveni model odlučivanja, a istovremeno omogućava vizualnu interpretaciju rezultata (npr. GAIA projekcija) te normativnu kontrolu težinskih koeficijenata. Prednost PROMETHEE metode leži u tome što svaki kriterij, njegova funkcija preferencije i težina ostaju eksplicitni u modelu, čime se

omogućuje jasna dokumentacija odluka i njihova analiza osjetljivosti prema promjeni ulaznih parametara. Ove karakteristike čine PROMETHEE metodološki pogodnim za donošenje odluka o složenim tehnološkim rješenjima koja imaju višestruke kriterije učinka, rizika i održivosti.

Ipak, PROMETHEE metoda ima svoja ograničenja. Specifično, ona ne modelira automatski nelinearne međuovisnosti među kriterijima te je osjetljiva na subjektivnost u određivanju težinskih koeficijenata i pragova funkcioniranja. Iz tog razloga u znanstvenoj literaturi sve se više razmatra integracija AI i MCDM pristupa – gdje AI služi za generiranje i optimizaciju ulaznih parametara, a klasični MCDM modeli ostaju temelj za rangiranje alternativa na interpretabilan način [230, 233].

Sa stručne perspektive, umjetna inteligencija pruža snažne analitičke i prediktivne mogućnosti, osobito u uvjetima velikih i složenih skupova podataka, dok PROMETHEE metoda osigurava visoku razinu interpretabilnosti i metodološke transparentnosti. U kontekstu strateškog odabira tehnologija energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova, gdje odluke imaju dugoročne financijske, okolišne i društvene implikacije, transparentnost i mogućnost stručne kontrole predstavljaju ključne zahtjeve. Stoga je najprikladniji pristup danas hibridni model koji kombinira AI za analitičku podršku s klasičnim MCDM metodama kao stabilnom osnovom za donošenje odluka.

Zaključno, iako umjetna inteligencija danas predstavlja snažan alat za modeliranje i optimizaciju kompleksnih sustava, u kontekstu višekriterijskog i normativno uvjetovanog odabira tehnologija ne može u potpunosti zamijeniti transparentne metode odlučivanja poput PROMETHEE. Umjetna inteligencija se, međutim, preporučuje koristiti kao komplementarni alat za generiranje podataka, optimizaciju scenarija i prediktivnu analizu, uz jasno definirane granice primjene, validaciju modela i stručnu kontrolu interpretacije rezultata.

6. ZAKLJUČAK

Europska Komisija je 2015. godine donijela novi ambiciozni paket o kružnom gospodarstvu za poticanje prijelaza Europe na kružno gospodarstvo čime će se ojačati njezina globalna konkurentnost i održivi gospodarski rast te otvoriti nova radna mjesta. Od tada je koncept kružnog gospodarstva postao dominantni globalni razvojni smjer.

Postavljanjem hijerarhije gospodarenja otpadom, velik broj država se okrenuo težnji da pojača aktivnosti u području sprječavanja nastanka otpada, njegovoj ponovnoj uporabi te recikliranju. Doneseni su brojni zakoni, provedene brojne inicijative, održane edukacije i izrađeni i provedeni projekti, kako bi se smanjio negativan utjecaj otpada na ljudsko zdravlje i okoliš, te istovremeno iskoristio njegov potencijal, koji se gubi običnim odlaganjem na odlagališta otpada.

Navedeno je kroz brojne inicijative na nacionalnoj, regionalnoj i međunarodnoj razini i ostvareno. Međutim, još je mnogo rada potrebno kako bi se provedene aktivnosti povećale i primijenile u velikim razmjerima (na EU i globalnu razinu), u potpunosti zatvorio ciklus kruženja tvari i energije te „ubrali“ rezultati i prednosti nastale konkurentnosti uzrokovane novim tehnologijama i uslugama. Komunikacija s različitim dionicima upućuje kako postoje još brojna područja koja je potrebno istražiti, a unutar kojih postoji ogroman potencijal za potpuno zatvaranje i provedbu kružnog (ali i održivog) koncepta.

Gospodarenje otpadom u EU trebalo bi poboljšati i pretvoriti u održivo gospodarenje materijalima s ciljem zaštite, očuvanja i poboljšanja kvalitete okoliša, zaštite zdravlja ljudi, osiguranja učinkovitog i racionalnog korištenja prirodnih resursa, promicanja načela kružnoga gospodarstva, poboljšanja korištenja energije iz obnovljivih izvora, povećanja energetske učinkovitosti, smanjenja ovisnosti EU o uvoznim resursima te pružanja novih gospodarskih prilika i doprinošenja dugoročnoj konkurentnosti. Kako bi gospodarstvo bilo zaista kružno, potrebno je poduzeti dodatne mjere u pogledu usredotočenosti na cijeli životni vijek proizvoda tako da se očuvaju resursi i zatvori krug kružnog gospodarstva. Neke od tih mjera potrebno je povezati s energetskom i materijalnom oporabom otpada, s obzirom na činjenicu da je većina aktivnosti gospodarenja otpadom orijentirana prema selektivnom razdvajanju otpada i njegovom recikliranju.

Otpadna biomasa (poput digestata) i otpadne vode (mulj, otpadna toplina) posjeduju značajan potencijal za energetske i materijalne oporabe. Pregled literature (Poglavlje 2) pokazao je da prelazak s linearnog modela na kružni donosi mjerljive koristi: smanjenje emisija stakleničkih plinova, odlagališnog prostora i uvoza sirovina te povrat vrijednih materijala (npr. fosfora) natrag u sustav. Tehnologije poput anaerobne digestije, termičke obrade otpada, precipitacije struvita i korištenja otpadne topline prelaze iz domene istraživanja u realnu primjenu, potaknute politikama EU i nacionalnim strategijama za kružno gospodarstvo. Međutim, odabir najprikladnije tehnologije značajno ovisi o lokalnim uvjetima i kriterijima održivosti, što opravdava potrebu za formalnim modelom odlučivanja koji je razvijen u ovom radu.

Sukladno tome, u radu je jasno definirana razlika između granica tehnologije i granica modela. Granice tehnologije obuhvaćaju procesne, masene i energetske tokove unutar pojedinog postrojenja, dok granice modela uključuju širi sustavni kontekst (UPOV, bioplinsko

postrojenje, regulatorni i tržišni okvir). Takvo razgraničenje omogućuje metodološki ispravnu usporedbu alternativa u realnim infrastrukturnim uvjetima.

Tehnologije za energetska i materijalna oporaba navedenih otpadnih tokova postoje – one su razvijane u zadnjih nekoliko desetljeća te već postoji nekoliko komercijalnih postrojenja koja rade na principima termo-kemijske obrade (piroliza, AD, izgaranje, uplinjavanje, itd.). Zbog toga su u ovoj disertaciji razmotrene tehnologije koje primjenjuju principe energetske i materijalne oporabe otpadnih tokova – digestata, otpadnih voda i mulja s UPOV-a: sa raspodjelom na *opciju a* (energetska i materijalna oporaba otpadnog mulja i digestata) te *opciju b* (energetska i materijalna oporaba otpadnih voda).

Međutim, da bi došlo do konkretne primjene ovih tehnologija, potrebno je donijeti odluku o korištenju istih, tj. koju tehnologiju primijeniti sukladno lokaciji koju se razmatra. Takvim odlukama bave se donositelji odluka na regionalnoj, nacionalnoj ili lokalnoj razini. Kako bi im se ovaj proces olakšao i kako bi mogli dobiti prvotni uvid u mogućnost korištenja određene tehnologije na razmatranoj lokaciji i razini, u ovoj disertaciji je izrađen model koji im omogućava provedbu navedenog, pomoću PROMETHEE metode.

Iako postoji velik broj metoda, temeljenih na višekriterijskih analizama, koji bi mogao poslužiti u ovu svrhu, korištenje PROMETHEE metode pokazalo se pogodno – metoda je fleksibilna (podržava kvantitativne i kvalitativne kriterije, više scenarija, analizu osjetljivosti) i posebno primjenjiva u području gospodarenja otpadom i energetike. Kroz Poglavlje 3 model je detaljno definiran, a odabir kriterija i njihovih težina potkrijepljen je recentnim znanstvenim radovima (uključujući i radove autora disertacije).

Model postavljen u ovoj disertaciji temeljen je na literaturnom pregledu dosad objavljenih radova, u kojima je uočeno ponavljanje određenog broja kriterija. Ovi kriteriji su definirani kao najčešće primjenjivi u sektoru gospodarenja otpadom – odabrano je 20 kriterija, koji su svrstani u šest skupina kriterija, raspodijeljenih u tri grupe kriterija. Posebno su integrirani socio-ekonomski kriteriji (npr. društvena prihvatljivost, radna mjesta, trošak po korisniku), čime model nadilazi čisto tehničko-ekonomsku analizu i uzima u obzir širi kontekst održivosti, što je često presudno za uspješnu implementaciju projekata. Također su definirana tri scenarija (*Javnost*, *Tehnički aspekt* i *Okoliš*), gdje u svakom postoji težište na određenoj skupini kriterija. Navedeni scenariji su definirani također na temelju literaturnog pretraživanja, što ukazuje na učestalost ponavljanja načina razmatranja sektora gospodarenja otpadom.

Model je ispitan na primjeru Italije, kako bi se prikazala njegova funkcionalnost. Italija je uzeta kao primjer iz razloga što na nacionalnoj razini postoji svaka od razmatranih tehnologija u komercijalnom obliku. Također, Italija je zemlja članica EU, što znači da je zakonodavni okvir zemlje usklađen sa zakonodavnim okvirom EU. Time Italija služi kao dobar referentan primjer za ostale zemlje članice, koje također imaju usklađen zakonodavni okvir na nacionalnoj razini s onim na EU razini. Za potrebe tehnički usporedive analize korišten je referentni kapacitet UPOV-a od 40.000 ES, čime je osigurana energetska i infrastrukturno realna usporedba tehnologija. Procjena količine suhe tvari, energetskog potencijala i potrebne instalirane snage temeljena je na tipičnim specifičnim vrijednostima proizvodnje mulja po ES, čime je model dobio dodatnu inženjersku utemeljenost.

Unosom podataka, model je odabrao tehnologiju recirkulacije digestata kao optimalni izbor za sustav gospodarenja razmatranih otpadnih tokova na nacionalnoj razini, u slučaju *opcije a*. U

slučaju *opcije b*, model je pokazao da materijalna uporaba iz tekuće faze (rekuperacija struvita) ostvaruje povoljniji ukupni rezultat u odnosu na dizalice topline, ponajprije zbog jačeg doprinosa uporabi resursa i zatvaranju hranidbenog ciklusa, uz stabilnu poziciju u većini raspona težina grupa kriterija. Time se potvrdilo da rješenja koja zatvaraju kružni tok (ponovno korištenje vrijednih hranjivih tvari, ali i proizvodnja energije) imaju prednost u održivosti nad isključivo energetske ili isključivo materijalnim rješenjima. Kriteriji koji su najviše doprinijeli ovom rezultatu su vezani za socio-ekonomski i okolišni aspekt, što je vrlo čest slučaj kad se razmatra energetska i materijalna uporaba otpadnih tokova. Tehnologije koje možda nisu najisplativije na papiru mogu dobiti prednost jer imaju snažne društvene i okolišne benefite – AD u kombinaciji sa proizvodnjom struvita je nešto skuplja opcija od spaljivanja, ali donosi radna mjesta u lokalnoj bioekonomiji, manji rizik neprihvatanja lokalne populacije i uklapa se u EU ciljeve (što može otvoriti i financijske poticaje). Stoga, integracija socio-ekonomskih aspekata u model rezultirala je odabirom rješenja koje je sveobuhvatno najodrživije, a ne nužno onog s najnižim neposrednim troškom ili najvišim energetske učinkom. Ovaj zaključak podržava tezu da održivi razvoj traži balans tri stupa – zanemarivanjem ijednog stupa (društvo, okoliš, ekonomija) riskiramo suboptimalnu ili neodrživu odluku.

Zanimljivo je primijetiti da je model u *opciji a* odabrao recirkulaciju digestata premda ta opcija ne daje oporabljeni materijal (gnojivo) za tržište, dok opcija klasičnog bioplinskog postrojenja pruža digestat za gnojidbu. Ovo sugerira da kriteriji koji preferiraju recirkulaciju (npr. energetska dobit, smanjene emisije skladištenja) imaju veći ukupni značaj u modelu nego kriterij materijalne uporabe. U praksi, kombinacija obje opcije mogla bi biti optimalna – recirkulirati dio digestata radi energije, a ostatak kvalitetno iskoristiti kao gnojivo – što razrađeni model nije eksplicitno razmatrao, ali bi mogao uz daljnju razradu. Analogno tome (u *opciji b*), za otpadne vode moguće je razmotriti integrirani pristup u kojem se energetska uporaba topline (dizalice topline) kombinira s rekuperacijom struvita, čime bi se istodobno ostvarile energetske i materijalne koristi, iako takav kompozitni scenarij nije bio predmet usporedbe unutar postojećeg skupa alternativa.

Također je provedena i analiza osjetljivosti dobivenih rezultata, pomoću opcije u PROMETHEE metodi pod nazivom *Visual Stability Intervals*, gdje je uočeno kako optimalna opcija ostaje takva samo u vrlo kratkom rasponu težinskih vrijednosti razmatranih kriterija – u slučaju kad se razmatraju sve tehnologije. Ukoliko dođe do promjene težinskih vrijednosti određenih kriterija za 5-10%, dolazi i do promjene odabira optimalne tehnologije za energetske/materijalnu uporabu. Međutim, ukoliko se razmatra stabilnost samo optimalne tehnologije, raspon se širi, čime se dokazuje njezina stabilnost. Što tehnologija ima veću stabilnost, to znači da donositelj odluke može biti sigurniji u njezin odabir i da će puno manji broj faktora imati utjecaja na donesenu odluku.

Kako bi se dokazali dobiveni rezultati modela, razmotrena je studija slučaja – napravljen je pregled navedenih tehnologija u talijanskoj regiji Lombardija, koja je vrlo industrijski razvijena te gdje je moguće izgraditi postrojenje, s bilo kojom od razmotrenih tehnologija u ovome radu. Kako u regiji već postoji značajan broj bioplinskih postrojenja, moguće je bilo zaključiti kako će se konačan odabir usmjeriti prema tehnologiji bioplinskih postrojenja. Studijom slučaja prikazano je kako se radi o tehnologiji recirkulacije digestata, gdje je dobivena dodatna količina proizvedene energije, ali i dodatni prihodi zbog sustava poticanja (FiT). Na taj način je dokazan rad i funkcionalnost modela, koji je moguće primijeniti sukladno potrebama donositelja odluka.

Provedbom razvijenog modela i analizom rezultata može se zaključiti da su polazne hipoteze rada potvrđene. Višekriterijski pristup pokazao je da je primjenom PROMETHEE metode moguće istodobno uzeti u obzir tehnološke, okolišne i socio-ekonomske kriterije te na toj osnovi odabrati tehnologiju koja je cjelovito najpovoljnija. Time se potvrđuje da je razvijeni višekriterijski model odlučivanja metodološki napredak u odnosu na ranije, većinom jednodimenzionalne ili jednokriterijske pristupe, koji su promatrali pojedine aspekte i time povećavali rizik donošenja parcijalnih i suboptimalnih odluka. Model omogućuje transparentno rangiranje alternativa, smanjenje subjektivnosti procesa odlučivanja te jasnu interpretaciju rezultata različitim skupinama dionika, što ga čini praktično primjenjivim alatom za donositelje odluka na lokalnoj i nacionalnoj razini.

Istovremeno, istraživanje je ukazalo na određena ograničenja razvijenog modela, što otvara prostor za daljnja istraživanja. Model se oslanja na dostupnost i kvalitetu ulaznih podataka te pretpostavlja relativnu stabilnost kriterija, dok se u praksi okruženje dinamički mijenja. Dio potencijalno relevantnih pokazatelja (npr. detaljniji financijski indikatori i društveni učinci) mogao bi se dodatno razviti. Buduća istraživanja trebala bi se stoga usmjeriti na proširenje skupa tehnologija i otpadnih tokova, ugradnju scenarijske i probabilističke analize te jaču vezu s rezultatima analiza životnog ciklusa (LCA), kako bi se dodatno ojačala robusnost i primjenjivost modela u različitim kontekstima odlučivanja.

Međutim, potrebno je uzeti u obzir da se radi o izrazito subjektivnom modelu, gdje donositelj odluka definira parametre koji su mu potrebni, kako bi uskladio kriterije koji su u skladu s njegovom situacijom i lokacijom. Zbog toga se težilo objektiviziranju cijelog modela na način da se koristi literaturni pregled komercijalnih postrojenja, pilot postrojenja te svih modela koji su korisni i primjenjivi u realnom svijetu, tj. izvan granica istraživanja, ali također i u komunikaciji sa stručnjacima i iskustvom autora u području gospodarenja otpadom.

Također je potrebno naglasiti kako se model temelji na provedenim istraživanjima od strane autora disertacije. Sukladno tome, nije bilo moguće napraviti temeljit pregled ostalih potencijalnih tehnologija za zbrinjavanje razmatranih otpadnih tokova (dodatne tehnologije i mogućnost za energetske i materijalne uporabe otpadnih voda, kao niti dodatne opcije za zbrinjavanje otpadnog mulja). Zbog navedenog, ovaj model daje samo okvirni pregled razmatranih tehnologija, ali, na temelju pregleda literature, i dalje predstavlja velik korak u ocjenjivanju i olakšavanju donošenja odluke među različitim tehnologijama, a u skladu sa razmatranim uvjetima (lokalnim/regionalnim/nacionalnim).

Istraživanja i praksa su pokazali sljedeće:

- PROMETHEE odlično radi u problemima kao što su: rangiranje tehnologija zaštite okoliša, izbor lokacije postrojenja, određivanje prioriteta u investiranju – gdje ima više kriterija različite prirode. U tim slučajevima pomaže vizualizirati kompromise i dati jasnu rang-listu koju je lako komunicirati. Također, dobar je u scenarijskim analizama, što je korišteno u ovoj disertaciji (jedan skup alternativa rangirane prema 4 skupa težina – i dalje su dobiveni konzistentni uvidi). Sukladno tome, metoda je vrlo primjenjiva u raznim područjima od bankarstva do kemijske industrije, turizma, medicine, upravo zbog prilagodljivosti.
- PROMETHEE nije idealan u situacijama kada:

- Ima veoma mnogo alternativa – npr. ako bi se pokušalo rangirati 100 mogućih projekata, matrica preferencija postaje ogromna i teško ju je interpretirati, iako ju softver može izračunati. Tada se koriste PROMETHEE izvještaji ili grupiranja.
- Kriteriji su zavisni ili hijerarhijski složeni – osnovni PROMETHEE pretpostavlja nezavisnost kriterija (kao i većina MCDM). Ako postoji jaka korelacija (npr. kriterij „CO₂ emisije” i „energetska učinkovitost” su povezani), mogu se dvojako računati utjecaji. Neke studije preferiraju AHP u takvim slučajevima jer mogu modelirati strukturu korelacija.
- Donositelji odluka nisu voljni prihvatiti formalnu metodu – u realnom sektoru (industrija, politika) često se koriste jednostavniji alati ili *ad hoc* ocjene. Iako postoji softver, ponekad PROMETHEE ostaje ograničen na akademske krugove. U praksi, metode poput *Cost-Benefit* Analize (CBA) ili *multi-attribute rating* su češće zbog svoje jednostavnosti. PROMETHEE se koristi uglavnom kada postoji tim analitičara koji podržava odluku (npr. konzultanti izrade studiju – oni će rado koristiti PROMETHEE). No, neki veliki sustavi (infrastrukturni projekti EU) koristili su PROMETHEE kroz prethodno izrađene i prilagođene alate. Zbog toga, iako je PROMETHEE široko rasprostranjen u literaturi, njegova primjena u korporativnom i javnom sektoru često dolazi posredstvom konzultanata ili istraživača. U svakodnevnom odlučivanju menadžeri nerijetko pribjegavaju jednostavnijim modelima ili iskustvenim ocjenama. To ne umanjuje vrijednost PROMETHEE metode, ali upućuje da je potrebno ulagati napore u njeno približavanje krajnjim korisnicima (primjerice, kroz prilagođene softverske alate i edukacije).

Iako dosta robustan, ovaj model može poslužiti kao osnova donositeljima odluka za odabir optimalne tehnologije energetske i/ili materijalne uporabe otpadnih tokova koje su razmatrane. Naravno, rezultati ovoga modela se ne mogu shvatiti kao konačno rješenje za donošenje konačnih odluka o izboru tehnologije. U tu svrhu je potrebno provesti studije izvodljivosti, tehničko-ekonomske analize, sociološka ispitivanja i ispitivanja tržišta, kako bi se pružili konkretni i detaljniji podaci o mogućnostima primjene optimalno odabrane tehnologije pomoću modela.

Originalan doprinos ovog istraživanja očituje se u sljedećim stavkama:

(1) Razvoju integriranog modela koji jednako vrednuje energetske i materijalne uporabu otpada, što u literaturi dosad nije istraživano – većina studija fokusirala se ili na jedno ili na drugo.

(2) Uvođenju PROMETHEE metode u ovu specifičnu domenu kao glavnog alata – dosad su češći bili AHP ili jednostavnije analize; ovo istraživanje demonstrira prednosti PROMETHEE-a (bolja obradivost konflikata kriterija, GAIA vizualizacija) i potiče njezinu širu primjenu u problemima gospodarenja otpadom.

(3) Usporedivoj analizi scenarija s jasno definiranim profilima dionika (javnost, stručnjaci, regulatori) – to omogućuje komunikaciju rezultata različitim interesnim skupinama. Primjerice, donositeljima politike možemo pokazati: “Ako vam je najvažniji okoliš – rješenje X je najbolje;

ako gledate samo trošak – Y; ali kompromis za sve ciljeve je Z.” Takav pristup povećava transparentnost i legitimnost procesa planiranja.

(4) Korištenju najnovijih znanstvenih spoznaja: npr. uključivanje koncepta proizvodnje struvita i valorizacije digestata temeljenih na znanstvenim istraživanjima, ali i komercijalnim slučajevima, daje ovom istraživanju aktualnost. Prikazano je kako se rezultati eksperimentalne bioekonomije (poput razgradnje digestata i proizvodnje struvita) mogu integrirati u model višeg reda i utjecati na strateške odluke.

Iako je ovaj model temeljen na pregledu brojnih radova sa sličnom tematikom, radova na temu gospodarenja otpadom, proizvodnje energije i materijalne uporabe materijala, njegova izrada otvara prostor za daljnja istraživanja, prvenstveno u pogledu dodatne objektivizacije kriterija i težinskih vrijednosti istih.

Kao i svaki model, i ovaj ima svoja ograničenja. Rezultati ovise o kvaliteti ulaznih podataka – za neke novije tehnologije (poput rasplinjavanja mulja) podaci su još okvirni, pa je i ocjena podložna reviziji kako nove informacije postanu dostupne. Također, model ne izračunava eksplicitno financijske pokazatelje (NPV, IRR), već radi sa komparativnim ocjenama; stoga se za konačne investicijske odluke treba provesti detaljna financijska analiza odabrane tehnologije. Nadalje, u modelu je pretpostavljeno da će se svaki kriterij linearno ponašati unutar promatranog raspona – u praksi mogu postojati nelinearni efekti (npr. ekonomija obujma drastično smanjuje trošak po jedinici kod vrlo velikih postrojenja). Za budući rad, moglo bi biti korisno integrirati analizu osjetljivosti na veličinu postrojenja ili napraviti hibridni model koji kombinira višekriterijsku analizu s optimizacijom (npr. prvo suziti izbor PROMETHEE-om, zatim optimirati točnu veličinu i lokaciju postrojenja). Širenje modela na druge tokove otpada (npr. ostaci poljoprivredne biomase, komunalni biootpad) bilo bi vrijedno – time bi se mogao kreirati jedinstveni sustav odlučivanja za bioresurse, u kojem bi se razmotrio najbolji smjer za specifičan otpadni tok (npr. da li kuhinjski biootpad u AD ili u kompost, i sl.). Uz navedeno, postoji i potreba za dodatnom objektivizacijom kriterija i težinskih vrijednosti istih, s obzirom da su oni podosta subjektivni i prvenstveno ovise o odlukama korisnika.

Također, model ne uključuje automatizirane analitičke sustave temeljene na umjetnoj inteligenciji. Iako suvremeni AI alati omogućuju obradu velikih količina podataka i modeliranje nelinearnih odnosa, izazovi vezani uz transparentnost, interpretabilnost i regulatornu prihvatljivost čine višekriterijske metode poput PROMETHEE i dalje prikladnijima za javne infrastrukturne odluke. Budući razvoj može uključivati hibridni pristup u kojem AI služi kao analitička podrška, dok konačno rangiranje ostaje u okviru transparentnog višekriterijskog modela.

Unatoč navedenim ograničenjima, već sada se mogu povući jasne smjernice: tehnologije koje maksimiziraju povrat resursa uz proizvodnju energije su put naprijed, dok one koje samo eliminiraju otpad bez povrata korisnih komponenti zaostaju u poretku održivosti. Ova disertacija dala je kvantitativnu podlogu za takve tvrdnje i pružila alat koji se može koristiti pri planiranju održivih sustava gospodarenja otpadnom biomasa i muljem. Time se nastoji doprinijeti ubrzanju tranzicije prema kružnom gospodarstvu – gdje otpad postaje vrijedna sirovina, a odluke o tehnologijama donose se na temelju sveobuhvatnih, znanstveno utemeljenih kriterija, u skladu s načelima održivosti i dobrobiti šire društvene zajednice.

7. POPIS LITERATURE

- [1] N. Curry i P. Pillay, »Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment,« *Renewable Energy*, svez. 41, pp. 200-209, 2012.
- [2] S. Sakai, S. Sawell, A. Chandler, T. T. Eighmy, D. Kosson, J. Vehlow, H. v. d. Slood, J. Hartlen i O. Hjelm, »World trends in municipal solid waste management,« *Waste Management*, svez. 16, br. 5-6, pp. 341-350, 1996.
- [3] A. Morrissey i J. Browne, »Waste management models and their application to sustainable waste management,« *Waste Management*, svez. 24, pp. 297-308, 2004.
- [4] T. Ekvall, G. Assefa, A. Björklund, O. Eriksson i G. Finnveden, »What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management,« *Waste Management*, svez. 27, br. 8, pp. 989-996, 2007.
- [5] N. Buclet i O. Godard, »The Evolution of Municipal Waste Management in Europe: how Different are National Regimes,« *Journal of Environmental Policy and Planning*, svez. 3, pp. 303-317, 2001.
- [6] D. Wilson, C. Velis i L. Rodic, »Integrated sustainable waste management in developing countries,« *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, svez. 166, br. 2, pp. 52-68, 2013.
- [7] M. Sharholy, K. Ahmad, R. Vaishya i R. Gupta, »Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India,« *Waste Management*, svez. 27, br. 4, pp. 490-496, 2007.
- [8] L. Manaf, M. Samah i N. Zukki, »Municipal solid waste management in Malaysia: practices and challenges,« *Waste Management*, svez. 29, br. 11, pp. 2902-2906, 2009.
- [9] A. Shekdar, »Sustainable solid waste management: an integrated approach for Asian countries,« *Waste Management*, svez. 29, br. 4, pp. 1438-1448, 2009.
- [10] A. Pires, G. Martinho i N. Chang, »Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques,« *Journal of Environmental Management*, svez. 92, br. 4, pp. 1033-1050, 2011.
- [11] M. Abu-qudais i H. Abu-qdais, »Energy Content of Municipal Solid Waste in Jordan and Its Potential Utilization,« *Energy Conversion and Management*, svez. 41, pp. 983-991, 2000.
- [12] W. Tsai i Y. Chou, »An overview of renewable energy utilization from municipal solid waste (MSW) incineration in Taiwan,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 10, br. 5, pp. 491-502, 2006.
- [13] D. Zhang, G. Huang, Y. Xu i G. Gong, »Waste-to-Energy in China: Key Challenges and Opportunities,« *Energies*, svez. 8, br. 12, pp. 14182-14196, 2015.
- [14] S. Consonni, M. Giugliano i M. Grosso, »Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste - Part A: Mass and energy balances,« *Waste Management*, svez. 25, br. 2, pp. 123-135, 2005.
- [15] A. Papageorgiou, A. Karagiannidis, J. Barton i E. Kalogirou, »Municipal solid waste management scenarios for Attica and their greenhouse gas emission impact,« *Waste Management & Research*, svez. 27, br. 9, pp. 928-937, 2009.

- [16] H. Merrild, A. Larsen i T. Christensen, »Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: The importance of efficient energy recovery and transport distances,« *Waste Management*, svez. 32, br. 5, pp. 1009-1018, 2012.
- [17] M. Leme, M. Rocha, E. Lora, O. Venturini, B. Lopes i C. Ferreira, »Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil,« *Resources, Conservation and Recycling*, svez. 87, pp. 8-20, 2014.
- [18] H. Arafat, K. Jijakli i A. Ahsan, »Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 105, pp. 233-240, 2015.
- [19] V. Ibáñez-Forés, M. Bovea, C. Coutinho-Nóbrega, H. d. Medeiros-García i R. Barreto-Lins, »Temporal evolution of the environmental performance of implementing selective collection in municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study,« *Waste Management*, svez. 72, pp. 65-77, 2018.
- [20] K. Novak-Marchewka, E. Osmolska i M. Stoma, »Progress and Challenges of Circular Economy in Selected EU Countries,« *Sustainability*, svez. 17, br. 1, p. 320, 2025.
- [21] C. Hsiao i J. Hu, »Biomass and Circular Economy: Now and the Future,« *Biomass*, svez. 4, br. 3, pp. 720-739, 2024.
- [22] L. Appels, J. Baeyens, J. Degreè i R. Dewil, »Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge,« *Progress in Energy and Combustion Science*, svez. 34, br. 6, pp. 755-781, 2008.
- [23] S. Werle i R. Wilk, »A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective,« *Renewable Energy*, svez. 35, br. 9, pp. 1914-1919, 2010.
- [24] P. Weiland, »Biomass Digestion in Agriculture: A Successful Pathway for the Energy Production and Waste Treatment in Germany,« *Engineering in Life Sciences*, svez. 6, br. 3, pp. 302-309, 2006.
- [25] R. Mohedano, R. Costa, F. Tavares i P. Filho, »High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds,« *Bioresource Technology*, svez. 112, pp. 98-104, 2012.
- [26] E. Allegrini, C. Vadenbo, A. Boldrin i T. Astrup, »Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash,« *Journal of Environmental Management*, svez. 151, pp. 132-143, 2015.
- [27] J. Pubule, »Cleaner production in biowaste management,« Riga Technical University, 2014.
- [28] D. Tonini, »Environmental assessment of energy production from waste and biomass,« DTU Environment, 2013.
- [29] Đ. Požgaj, P. Korica, N. Golubovac, M. Kišević i I. Gudelj, »Assessment of separate collection of recyclable municipal waste in Croatian municipalities and determination of potential for material recovery,« *Proceedings of 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management "ATHENS 2017"*, svez. 1, br. 2, pp. 1-14, 2017.
- [30] M. Münster i P. Meibom, »Optimization of use of waste in the future energy system,« *Energy*, svez. 36, pp. 1612-1622, 2011.

- [31] D. Schneider, M. Kirac i A. Hublin, »Cost-effectiveness of GHG emission reduction measures and energy recovery from municipal waste in Croatia,« *Energy*, svez. 48, pp. 203-211, 2012.
- [32] J.-F. Perrot i A. Subiantoro, »Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand,« *Sustainability*, svez. 10, br. 9, pp. 1-12, 2018.
- [33] B. Ribić, N. Voća i B. Ilakovac, »Concept of sustainable waste management in the City of Zagreb: Towards the implementation of circular economy approach,« *Journal of Air & Waste Management Association*, svez. 67, br. 2, pp. 241-259, 2017.
- [34] I. Kliopova i J. Staniškis, »Application of Waste Energy Utilization Techniques in Lithuanian Industry,« *Environmental research, engineering and management*, svez. 1, br. 35, pp. 32-42, 2006.
- [35] I. Stanic-Maruna i J. Fellner, »Solid waste management in Croatia in response to the European Landfill Directive,« *Waste Management & Research*, svez. 30, br. 8, pp. 825-838, 2012.
- [36] D. Fytili i A. Zabaniotou, »Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - a review,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, br. 12, pp. 116-140, 2008.
- [37] D. Koumoulidis, I. Varvaris, Z. Pittaki i D. Hadjimitsis, »Sewage Sludge in Agricultural Lands: The Legislative Framework in EU-28,« *Sustainability*, svez. 16, br. 24, p. 10946, 2024.
- [38] M. Hossain, V. Strezov, K. Chan i P. Nelson, »Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*),« *Chemosphere*, svez. 78, pp. 1167-1171, 2010.
- [39] M. Takahashi, S. Kato, H. Shima, E. Sarai, T. Ichioka, S. Hatyakawa i H. Miyajiri, »Technology for recovering phosphorus from incinerated wastewater treatment sludge,« *Chemosphere*, svez. 44, br. 1, pp. 23-29, 2001.
- [40] R. Ibarrola, S. Shackley i J. Hammond, »Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment,« *Waste Management*, svez. 32, br. 5, pp. 859-868, 2012.
- [41] F. Monlau, C. Sambusiti, N. Antoniou, A. Barakat i A. Zabaniotou, »A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process,« *Applied Energy*, svez. 148, br. C, pp. 32-38, 2015.
- [42] X. Hao, J. Li, M. v. Loosdrecht, H. Jiang i R. Liu, »Energy recovery from wastewater: Heat over organics,« *Water Research*, svez. 161, pp. 74-77, 2019.
- [43] H. Nagpal, J. Spriet, M. Murali i A. McNabola, »Heat Recovery from Wastewater—A Review of Available Resource,« *Water*, svez. 13, br. 9, p. 1274, 2021.
- [44] D. Đurđević, D. Balić i B. Franković, »Wastewater heat utilization through heat pumps: The case study of City of Rijeka,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 231, pp. 207-213, 2019.
- [45] K.-J. Chae i X. Ren, »Flexible and stable heat energy recovery from municipal wastewater treatment plants using a fixed-inverter hybrid heat pump system,« *Applied Energy*, svez. 179, pp. 565-574, 2016.

- [46] T. Łokietek, W. Tuchowski, D. Leciej-Pirczewska i A. Glowacka, »Heat Recovery from a Wastewater Treatment Process—Case Study,« *Energies*, svez. 16, br. 1, p. 44, 2023.
- [47] M. Aprile, R. Scoccia, A. Dénarié, P. Kiss, M. Dombrowszky, D. Gwerder, P. Schuetz, P. Elguezabal i B. Arregi, »District Power-To-Heat/Cool Complemented by Sewage Heat Recovery,« *Energies*, svez. 12, br. 3, pp. 364-385, 2019.
- [48] F. Golzar i S. Silveira, »Impact of wastewater heat recovery in buildings on the performance of centralized energy recovery – A case study of Stockholm,« *Applied Energy*, svez. 297, p. 117141, 2021.
- [49] K. L. Corre, E. Valsami-Jones, P. Hobbs i S. Parsons, »Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review,« *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, svez. 39, br. 6, pp. 433-477, 2009.
- [50] P. Cornel i C. Schaum, »Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs,« *Water Science and Technology*, svez. 59, br. 6, pp. 1069-1076, 2009.
- [51] B. Saelens, S. Geerts i M. Weemaes, »Phosphorus recovery as struvite from digested sludge – experience from the full scale,« *Journal of Environmental Management*, svez. 280, p. 111743, 2021.
- [52] L. Egle, H. Rechberger, J. Krampe i M. Zessner, »Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies,« *Science of The Total Environment*, svez. 571, pp. 522-542, 2016.
- [53] H. Yoshida, Z. Li, G. Forstner i R. Goel, »Full Scale Implementation of AirPrex Phosphorus Recovery and the Development of a Mechanistic Process Model in GPS-X™,« u *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2018.
- [54] Đ. Kovačić, Z. Lončarić, J. Jović, D. Samac, B. Popović i M. Tišma, »Digestate Management and Processing Practices: A Review,« *Applied Sciences*, svez. 12, br. 18, p. 9216, 2022.
- [55] M. Dinca, M. Ferdes, B. Zabava, M. Ionescu, G. Molceanu i G. Paraschiv, »Effective Valorization of Anaerobic Digestate—A Sustainable Approach to Circular Economy,« *Applied Sciences*, svez. 15, br. 16, p. 8939, 2025.
- [56] C. Romio, M. W. Kofoed i H. Moller, »Digestate Post-Treatment Strategies for Additional Biogas Recovery: A Review,« *Sustainability*, svez. 13, br. 16, p. 9295, 2021.
- [57] M. Zielinska i K. Bulkowska, »Sustainable Management and Advanced Nutrient Recovery from Biogas Energy Sector Effluents,« *Energies*, svez. 17, br. 15, p. 3705, 2024.
- [58] J. Mikusinska, M. Kuznia, K. Czerwinska i M. Wilk, »Hydrothermal Carbonization of Digestate Produced in the Biogas Production Process,« *Energies*, svez. 16, br. 14, p. 5458, 2023.
- [59] Q. Zhang, S. Wang, H. Sun, S. Arhin, Z. Yang, G. Liu, Y. Tong, H. Tian i W. Wang, »Anaerobic digestion + pyrolysis integrated system for food waste treatment achieving both environmental and economic benefits,« *Energy*, svez. 288, br. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129856>, 2024.
- [60] G. Bhandar, T. Christensen i M. Hauschild, »EASEWASTE—life cycle modeling capabilities for waste management technologies,« *The International Journal of Life Cycle Assessment*, svez. 15, br. 4, pp. 403-416, 2010.

- [61] M. Herva i E. Roca, »Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis,« *Ecological Indicators*, svez. 25, pp. 77-84, 2013.
- [62] M. Herva i E. Roca, »Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 39, pp. 355-371, 2013.
- [63] J. Hokkanen i P. Salminen, »Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis,« *European Journal of Operational Research*, svez. 98, pp. 19-36, 1997.
- [64] C. Achillas, N. Moussiopoulos, A. Karagiannidis, G. Banias i G. Perkoulidis, »The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review,« *Waste Management & Research*, svez. 31, br. 2, pp. 115-129, 2013.
- [65] N. Aslan, O. Salman, R. Konacki i A. Akan, »Circular economy approach to promote sustainable energy from waste,« *Sustainable Futures*, svez. 10, p. 101238, 2025.
- [66] F. Guo, H. Men i W. Chen, »Waste-to-energy incineration site selection framework based on heterogeneous fuzzy regret-PROMETHEE model considering life-cycle carbon emissions,« *Environmental Science and Pollution Research*, svez. 31, pp. 3722-3744, 2023.
- [67] D. Jovanović i D. Cvetković, »Multiple Decision Making Criteria in the Implementation of Renewable Energy Sources,« *Technical Gazette*, svez. 25, br. 5, pp. 1492-1496, 2018.
- [68] M. Troldborg, S. Heslop i R. Hough, »Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 39, pp. 1173-1184, 2014.
- [69] A. Kumar, B. Sah, A. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar i R. Bansal, »A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 69, pp. 596-609, 2017.
- [70] C. Kahraman i I. Kaya, »A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives,« *Expert Systems with Applications*, svez. 37, pp. 6270-6281, 2010.
- [71] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang i J.-H. Zhao, »Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 13, pp. 2263-2278, 2009.
- [72] J. Oberschmidt, J. Geldermann, J. Ludwig i M. Schmehl, »Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies,« *International Journal of Energy Sector Management*, svez. 4, br. 2, pp. 183-212, 2010.
- [73] C. Achillas i C. Vlachokostas, »Integrated Waste Management in the Circular Economy Era: Insights from Research and Practice,« *Energies*, svez. 18, br. 3, p. 728, 2025.
- [74] C. Agaton i M. Santos, »Social Acceptability of Waste-to-Energy: Research Hotspots, Technologies, and Factors,« *Clean Technologies*, svez. 7, br. 3, p. 63, 2025.
- [75] Croatian Agency for Environment and Nature, "Waste Management," 14 12 2017. [Online]. Available: <http://www.haop.hr/hr/tematska-podrucja/otpad-i-registri-oneciscavanja/gospodarenje-otpadom/o-otpadu-i-propisima>. [Accessed 16 10 2018].

- [76] Europska Komisija, »Zatvaranje kruga — akcijski plan EU-a za kružno gospodarstvo,« Bruxelles, 2015.
- [77] Europska komisija, »A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe,« Europska komisija, Brussels, 2020.
- [78] G. Garcia-Garcia, »Using Multi-Criteria Decision-Making to optimise solid waste management,« *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, svez. 37, p. 100650, 2022.
- [79] J. Gutierrez-Lopez, R. McGarvey, C. Costello i D. Hall, »Decision Support Frameworks in Solid Waste Management: A Systematic Review of Multi-Criteria Decision-Making with Sustainability and Social Indicators,« *Sustainability*, svez. 15, br. 18, p. 13316, 2023.
- [80] M. Moreira, C. Gomes, M. d. Santos, A. d. Silva i I. d. A. Costa, »Sensitivity Analysis by the PROMETHEE-GAIA method: Algorithms evaluation for COVID-19 prediction,« *Procedia computer science*, svez. 199, pp. 431-438, 2022.
- [81] A. Zaman, »A comprehensive review of the development of zero waste management: lessons learned and guidelines,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 91, pp. 12-25, 2015.
- [82] H. Kominko, K. Gorazda i Z. Wzorek, »Sewage sludge: A review of its risks and circular raw material potential,« *Journal of Water Processing Engineering*, svez. 63, p. 105522, 2024.
- [83] T. Ishigaki i C. Liu, »CCET guideline series on intermediate municipal solid waste treatment technologies: Mechanical-Biological Treatment,« UN Environment Programme, 2020.
- [84] C. Velis, P. Longhurst, G. Drew, R. Smith i S. Pollard, »Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering,« *Bioresource Technology*, svez. 100, br. 11, pp. 2747-2761, 2009.
- [85] Europski Parlament, »Kružno gospodarstvo: Definicija, vrijednosti i korist,« 02 12 2015. [Mrežno]. Available: <http://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/economy/20151201STO05603/kruzno-gospodarstvo-definicija-vrijednosti-i-korist>. [Pokušaj pristupa 15 05 2019].
- [86] Europska okolišna agencija, »Circular Material Use Rate,« EEA, 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/circularity/thematic-metrics/materialsandwaste/circular-material-use-rate#:~:text=11.8,accelerate%20the%20transition%20to%20circularity>. [Pokušaj pristupa 9 11 2025].
- [87] L. Lett, »Global threats, waste recycling and the circular economy concept,« *Revista Argentina de Microbiología*, svez. 46, br. 1, pp. 1-2, 2014.
- [88] F. Zhijun i Y. Nailing, »Putting a circular economy into practice in China,« *Sustainability Science*, br. 2, pp. 95-101, 2007.
- [89] D. Ness, »Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure systems,« *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, svez. 15, br. 4, pp. 288-301, 2008.
- [90] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. Bocken i E. Hultink, »The Circular Economy – A new sustainability paradigm?,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 143, pp. 757-768, 2017.

- [91] European Parliament, »DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives,« 19 11 2008. [Mrežno]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>. [Pokušaj pristupa 21 9 2017].
- [92] V. Castellani, S. Sala i N. Mirabella, »Beyond the throwaway society: A life cycle-based assessment of the environmental benefit of reuse,« *Integrated Environmental Assessment and Management*, svez. 11, br. 3, pp. 378-382, 2015.
- [93] W. Stahel, »Reuse is the key to the Circular Economy,« Europska Komisija, 14 9 2014. [Mrežno]. Available: https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/experts-interviews/reuse-is-the-key-to-the-circular-economy_en. [Pokušaj pristupa 21 9 2017].
- [94] P. Brunner i L. Morf, »Waste to energy, indispensable cornerstone for circular economy: A mini-review,« *Water Management and Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, svez. 43, br. 1, pp. 26-38, 2024.
- [95] Y. Begum, S. Kumari, S. Jain i M. Garg, »A review on waste biomass-to-energy: integrated thermochemical and biochemical conversion for resource recovery,« *Environmental Science: Advances*, svez. 3, pp. 1197-1216, 2024.
- [96] M. Mediboyina i F. Murphy, »Environmental Assessment of a Waste-to-Energy Cascading System Integrating Forestry Residue Pyrolysis and Poultry Litter Anaerobic Digestion,« *Energies*, svez. 17, br. 7, p. 1511, 2024.
- [97] Y. Geng i B. Doberstein, »Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development',« *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, svez. 15, br. 3, pp. 231-239, 2008.
- [98] G. Souza, »Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research,« *Decision Sciences*, svez. 44, br. 1, pp. 7-38, 2012.
- [99] Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, »Nacionalno izvješće o komunalnom otpadu za 2024. godinu,« MZOZT, Zagreb, 2025..
- [100] T. A. Saedi, D. Rutz, H. Prassl, M. Kottner, T. Finsterwalder, S. Volk i R. Janssen, Priručnik za bioplin, Intelligent Energy Europe, 2008.
- [101] S. Sauve, S. Bernard i P. Sloan, »Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research,« *Environmental Development*, br. 17, pp. 48-56, 2016.
- [102] J. Wardekker, J. v. d. Sluijs, P. Janssen, P. Kloprogge i A. Petersen, »Uncertainty communication in environmental assessments: views from the Dutch science-policy interface,« *Environmental Science and Policy*, svez. 11, br. 7, pp. 627-641, 2008.
- [103] J. Brans, B. Mareschal i P. Vincke, »PROMETHEE - a new family of outranking methods in multicriteria analysis,« u *Operational Research IFORS 84*, Amsterdam, 1984.
- [104] J. Klanac, J. Perković i A. Krajnović, »Primjena AHP i PROMETHEE metode na problem diverzifikacije,« *Oeconomica Jadertina*, svez. 3, br. 2, pp. 3-27, 2013.
- [105] J. Brans, »L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision, La méthode PROMETHEE,« u *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*, Québec, Presses de l'Université Laval, 1982, pp. 183-213.

- [106] T. P. m. f. MCDM i G. a. B. A. s. the PROMCALC, »J.P. Brans; B. Mareschal,« u *Readings in multiple criteria decision aid*, Bana e Costa, Springer Verlag, 1990, p. 660.
- [107] J. Brans i B. Mareschal, »PROMETHEE V – MCDM problems with segmentation constraints,« *INFOR*, svez. 30, br. 2, pp. 85-96, 1992.
- [108] VPSolutions, »Visual PROMETHEE 1.4 Manual,« VPSolutions, 2013.
- [109] C. Corden, K. Bougas, E. Cunningham, D. Tyrer, J. Kreissig, E. Zetti, E. Gamero, R. Wildey and M. Crookes, "Digestate and compost as fertilisers: Risk assessment and risk management options," Wood Environment & Infrastructure Solutions, London, 2019.
- [110] M. Domini, G. Bertanza, R. Vahidzadeh i R. Pedrazzani, »Sewage Sludge Quality and Management for Circular Economy Opportunities in Lombardy,« *Applied Sciences*, svez. 12, br. 20, p. 10391, 2022.
- [111] Ministarstvo poljoprivrede, »Nacrt Strategije biogospodarstva do 2035. godine,« Zagreb, 2026.
- [112] B. Mickan, A.-T. Ren, C. Buhlmann, A. Ghadouani, Z. Solaiman, S. Jenkins, J. Pang i M. Ryan, »Closing the circle for urban food waste anaerobic digestion: The use of digestate and biochar on plant growth in potting soil,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 347, p. 131071, 2022.
- [113] Europska okolišna agencija, »Sludge Treatment and Disposal: Management Approaches and Experiences,« EOA, Copenhagen, 1997.
- [114] D. Đurđević, I. Hulenčić i B. Kulišić, »Degradation of Lignocellulosic Complex Through Production of Struvite from Digestate,« *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1-8, 2019.
- [115] S. Shaddel, T. Grini, S. Ucar, K. Azrague, J.-P. Andreassen i S. Østerhus, »Struvite crystallization by using raw seawater: Improving economics and environmental footprint while maintaining phosphorus recovery and product quality,« *Water Research*, svez. 173, p. 115572, 2020.
- [116] BioRefine CLuster Europe, »The suitability of recycling derived phosphorus fertilizer struvite to replace synthetic phosphorus fertilizers in horticulture,« 22 07 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.biorefine.eu/news/the-suitability-of-recycling-derived-phosphorus-fertilizer-struvite-to-replace-synthetic-phosphorus-fertilizers-in-horticulture/#:~:text=,will%20harmonise%20the%20EU>. [Pokušaj pristupa 28 04 2025].
- [117] M. Muys, R. Phukan, G. Brader, A. Samad, M. Moretti, B. Haiden, S. Pluchon, K. Roest, S. Vlaemick i M. Spiller, »A systematic comparison of commercially produced struvite: Quantities, qualities and soil-maize phosphorus availability,« *Science of The Total Environment*, svez. 756, p. 143726, 2021.
- [118] A. Magri, E. Company, M. Farres, J. Ferrer, E. Gonzales, F. Domingo i J. Colprim, »Recovery of Potassium-Rich Struvite in a Pig Farm Downstream a Nitrogen Removal Treatment Plant: Technological, Agricultural and Economic Assessment,« *Waste and Biomass Valorization*, svez. 16, pp. 2327-2337, 2025.
- [119] P. Talboys, J. Heppell, T. Roose, J. Healey, D. Jones i P. Withers, »Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management?,« *Plant and Soil*, svez. 401, pp. 109-123, 2016.

- [120] T. Neamhom, P. Yakam, C. Bathbumrung, W. Tachavarong, V. Kosaisavee i Y. Pinatha, »Pilot-scale phosphorus recovery from mobile toilet wastewater in Bangkok, Thailand,« *Scientific Reports*, svez. 15, p. 3477, 2025.
- [121] D.-J. Kok, S. Pande, J. Lier, A. Ortigara, H. Savenije i S. Uhlenbrook, »Global phosphorus recovery from wastewater for agricultural reuse,« *Hydrology and Earth System Sciences*, svez. 22, br. 11, pp. 5781-5799, 2018.
- [122] H. Kominko, K. Gorazda, Z. Wzorek i K. Wojtas, »Sustainable Management of Sewage Sludge for the Production of Organo-Mineral Fertilizers,« *Waste and Biomass Valorization*, svez. 9, pp. 1817-1826, 2017.
- [123] Y. Wei, Y. Fan i M.-J. Wang, »A cost analysis of sewage sludge composting for small and mid-scale municipal wastewater treatment plants,« *Resources Conservation and Recycling*, svez. 33, br. 3, pp. 203-216, 2001.
- [124] M. Domini, A. Abba i G. Bertanza, »Analysis of the variation of costs for sewage sludge transport, recovery and disposal in Northern Italy: a recent survey (2015–2021),« *Water Science and Technology*, svez. 85, br. 4, pp. 1167-1175, 2022.
- [125] U. Brémond, A. Bertrandias, R. d. Buyer, E. Latrille, J. Jimenez, R. Escudié, J.-P. Steyer, N. Bernet i H. Carrere, »Recirculation of solid digestate to enhance energy efficiency of biogas plants: Strategies, conditions and impacts,« *Energy Conversion and Management*, svez. 231, p. 113759, 2021.
- [126] J. Yang, J. Zhang, X. Du, T. Gao, Z. Cheng, W. Fu i S. Wang, »Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste: a review,« *International Journal of Environmental Science and Technology*, svez. 22, pp. 3927-3942, 2024.
- [127] Y. Han, Y. Zhuo, D. Peng, Q. Yao, H. Li i Q. Qu, »Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation characteristics of high solid anaerobic digestion,« *Bioresource Technology*, svez. 244, br. 1, pp. 836-843, 2017.
- [128] V. Motola, N. Scarlat, O. Hurtig, M. Buffi, A. Georgakaki, S. Letout, A. Mountraki, R. Salvucci and A. Schmitz, "Clean Energy Technology Observatory: Bioenergy in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets," JRC, Brussels, 2023.
- [129] S. Xue, L. Qiu, X. Guo and Y. Yao, "Effect of liquid digestate recirculation on biogas production and enzyme activities for anaerobic digestion of corn straw," *Water Science and Technology*, vol. 82, no. 1, pp. 144-156, 2020.
- [130] Stručna agencija za obnovljive resurse (FNR), »Priručnik o biogasu: Od proizvodnje do korišćenja,« FNR, Berlin, 2016.
- [131] L. Egle, R. Marschinski, A. Jones, F. Y. Mezquita, C. Schillaci i D. Huygens, »Feasibility study in support of future policy developments of the Sewage Sludge Directive (86/278/EEC),« Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.
- [132] V. Vutai, C. Ma i M. Lu, »The Role of Anaerobic Digestion in Wastewater Management,« *EM Magazine*, pp. 12-16, 2016.
- [133] A. Rabii, A. Sayed, A. Ismail, S. Aldin, Y. Dahman i E. Elbeshbishy, »Optimizing the Mixing Ratios of Source-Separated Organic Waste and Thickened Waste Activated Sludge in Anaerobic Co-Digestion: A New Approach,« *Processes*, svez. 12, br. 4, p. 794, 2024.

- [134] W. Chow, S. Chong, J. Lim, Y. Chan, M. Chong, T. Tiong, J. Chin i G.-T. Pan, »Anaerobic Co-Digestion of Wastewater Sludge: A Review of Potential Co-Substrates and Operating Factors for Improved Methane Yield,« *Processes*, svez. 8, br. 1, p. 39, 2020.
- [135] A. Elsayed, F. Kakar, A. Abdelrahman, N. Ahmed, A. AlSayed, M. Zagloul, C. Muller, K. Bell, D. Santoro, J. Norton, A. Marcus i E. Elbeshbishy, »Enhancing anaerobic digestion Efficiency: A comprehensive review on innovative intensification technologies,« *Energy Conversion and Management*, svez. 320, p. 118979, 2024.
- [136] N. Scarlat, J.-F. Dallemand i F. Fahl, »Biogas: Developments and perspectives in Europe,« *Renewable Energy*, svez. 129, br. Part A, pp. 457-472, 2018.
- [137] B. Radetic, Cogeneration in Anaerobic Sludge Digestion, Biogas Pretreatment, Desulfurization, and Utilization, Springer, 2022.
- [138] I. Ferret, F. Passos, E. Romero, F. Vazquez i X. Font, »Optimising sewage sludge anaerobic digestion for resource recovery in wastewater treatment plants,« *Renewable Energy*, svez. 224, p. 120123, 2024.
- [139] O. Gretschel, T. Schmitt, J. Hansen, K. Siekmann i J. Jakob, »Sludge digestion instead of aerobic stabilisation - a cost benefit analysis based on experiences in Germany,« *Water Science and Tehnology*, svez. 69, pp. 430-437, 2013.
- [140] R. Schröder, T. Wolf, G. Scharte i D. Joorman, »Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba,« *Građevinar*, svez. 53, br. 04, pp. 211-232, 2001.
- [141] I. Lanko, L. Flores, M. Garfi, V. Todt, J. Posada, P. Jenicek i I. Ferrer, »Life Cycle Assessment of the Mesophilic, Thermophilic, and Temperature-Phased Anaerobic Digestion of Sewage Sludge,« *Water*, svez. 12, br. 11, p. 3140, 2020.
- [142] Z. Ma, »Development and Trend of Sewage Sludge Incineration Technology,« *Applied and Computational Engineering*, svez. 124, pp. 54-60, 2025.
- [143] X. Liu, L. Duan, Z. Zhou i M. Zhou, »NO/SO₂/HCl emissions from solid waste combustion via oxygen-carrier-aided combustion in rotary kiln,« *Fuel*, svez. 357, br. Part C, p. 129902, 2024.
- [144] S. Balogh i Y. Nollet, »Mercury mass balance at a wastewater treatment plant employing sludge incineration with offgas mercury control,« *The Science of The Total Environment*, svez. 389, br. 1, pp. 125-131, 2008.
- [145] A. Anders, H. Cakir, F. Ohnemuller, H. Platen, U. Kornhaas i H. Weigand, »Phosphorus recovery from municipal sewage sludge using bio-based re-dissolution with acetate and precipitation as calcium phosphate on dolomite seed grains – A pilot-scale study under real-world conditions,« *Process Safety and Environmental Protection*, svez. 195, p. 106707, 2025.
- [146] A. Hepbasli, E. Biyik, O. Ekren, H. Gunerhan i M. Araz, »A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems,« *Energy Conversion and Management*, svez. 88, pp. 700-722, 2014.
- [147] D. Cecconet, J. Raček, A. Callegari i P. Hlavinec, »Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy,« *Sustainability*, svez. 12, br. 1, p. 116, 2020.
- [148] S. S. Matus, M. Sevilla, D. Fernandez, A. Montanez, E. Blanco, L. Naranjo, A. Llavona i N. Sarmanto, »The circular economy opportunities for wastewater treatment systems in

- Latin America and the Caribbean,« Economic Commission for Latin America and the Caribbean, Santiago, 2025.
- [149] A. Held, B. Pfluger i M. Ragwitz, »Evaluation of Heat Pump Applications in Europe,« Fraunhofer ISI, 2019.
- [150] G. Panayiotou, S. Kalogirou i S. Tassou, »Design and simulation of a PV and PV/T system for a building in Cyprus,« *Energy and Buildings*, svez. 42, br. 4, pp. 543-552, 2010.
- [151] D. Đurđević, P. Blečić i Ž. Jurić, »Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia,« *Energies*, svez. 12, br. 10, pp. 1927-1946, 2019.
- [152] D. Đurđević, P. Blečić i K. Lenić, »Energy Potential of Digestate Produced by Anaerobic Digestion in Biogas Power Plants: The Case Study of Croatia,« *Environmental Engineering Science*, svez. 35, br. 12, pp. 1286-1293, 2018.
- [153] D. Đurđević i I. Hulenčić, »Anaerobic Digestate Treatment Selection Model for Biogas Plant Costs and Emissions Reduction,« *Processes*, svez. 8, br. 2, pp. 142-157, 2020.
- [154] S. Stoimenov i P. Jevtić, »Circular economy and processing of sludge from wastewater treatment plants,« *Ecologica*, svez. 30, br. 110, pp. 307-312, 2023.
- [155] F. Tambone, B. Scaglia, G. D'Imporzano, A. Schievano, V. Orzi, S. Salati i F. Adani, »Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost,« *Chemosphere*, svez. 81, br. 5, pp. 577-583, 2010.
- [156] F. Tambone i F. Adani, »Nitrogen mineralization from digestate in comparison to sewage sludge, compost and urea in a laboratory incubated soil experiment,« *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, svez. 180, pp. 355-365, 2017.
- [157] C. Fang, R. Huang, C. Dykstra, R. Jiang, S. Pavlostathis i Y. Tang, »Energy and Nutrient Recovery from Sewage Sludge and Manure via Anaerobic Digestion with Hydrothermal Pretreatment,« *Environmental Science and Technology*, svez. 54, br. 2, pp. 1147-1156, 2020.
- [158] M. Pradel i L. Aissani, »Environmental impacts of phosphorus recovery from a "product" Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers,« *Science of The Total Environment*, svez. 656, pp. 55-69, 2019.
- [159] Europska Komisija, »Direktiva Vijeća od 12. prosinca 1991. o zaštiti voda od onečišćenja uzrokovanog nitratima iz poljoprivrednih izvora,« EU, Bruxelles, 1991.
- [160] H. Taherdoost i M. Madanchian, »Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures,« *Iris Journal of Economics and Business Management*, svez. 1, br. 1, 2023.
- [161] D. Schneider, D. Lončar i Ž. Bogdan, »Cost Analysis of Waste-to-Energy Plant,« *Strojarstvo*, svez. 52, br. 3, pp. 369-378, 2010.
- [162] Q. Guan, Y. Li, Y. Zhong, W. Liu, J. Zhang, X. Yu, R. Ou i G. Zeng, »A review of struvite crystallization for nutrient source recovery from wastewater,« *Journal of Environmental Management*, svez. 344, p. 118383, 2023.
- [163] J. Canas, S. Alvarez-Torrellas, B. Hermana i J. Garcia, »Phosphorus Recovery from Sewage Sludge as Struvite,« *Water*, svez. 15, br. 13, p. 2382, 2023.

- [164] Greenhouse Gas Protocol, »Global Warming Potential Values,« 31 12 2019. [Mrežno]. Available: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf. [Pokušaj pristupa 15 02 2020].
- [165] L. Čuček, J. Jaromír, K. Klemeš i Z. Kravanja, »Chapter 5 - Overview of environmental footprints,« u *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*, Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 131-193.
- [166] Joint Research Centre, »Waste Incineration,« Europska Komisija, 12 2018. [Mrežno]. Available: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/wi.html>. [Pokušaj pristupa 17 12 2019].
- [167] Joint Research Centre, »Waste Treatment,« Europska Komisije, 2018. [Mrežno]. Available: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/wt.html>. [Pokušaj pristupa 17 10 2019].
- [168] L. Lombardi, C. Nocita, E. Bettazzi, D. Fibbi i E. Carnevale, »Environmental comparison of alternative treatments for sewage sludge: An Italian case study,« *Waste Management*, svez. 69, pp. 365-376, 2017.
- [169] D. Gardoni i M. Guarino, »Drying and combustion of an anaerobic digestate: Results and economical evaluation of a demonstrative-scale plant,« *International Journal Of Engineering Research and General Science*, svez. 2, br. 8, pp. 148-155, 2016.
- [170] V. Krstulović, Ž. Plantić, I. Ivić, D. Đurđević i B. Kulišić, »Studija masenih i energetske bilanci proizvoda iz PoC_1_181: Degradacija kompleksa lignoceluloze kroz proizvodnju struvita iz digestata radi povećanja ekonomske i tehničke učinkovitosti bioplinskog postrojenja,« Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2017.
- [171] D. Rutz, R. Mergner i R. Janssen, Održivo korištenje toplinske energije iz bioplinskih postrojenja, München: WIP Renewable Energies, 2012.
- [172] M. Carlini, E. Mosconi, S. Castellucci, M. Villarini i A. Colantoni, »An Economical Evaluation of Anaerobic Digestion Plants Fed with Organic Agro-Industrial Waste,« *Energies*, svez. 10, br. 8, pp. 1165-1180, 2017.
- [173] M. Kratzeisen, N. Starcevic, M. Martinov, C. Maurer i J. Müller, »Applicability of biogas digestate as solid fuel,« *Fuel*, svez. 89, br. 9, pp. 2544-2548, 2010.
- [174] H. Li, J. Lindmark, E. Nordlander, E. Thorin, E. Dahlquist i L. Zhao, »Using the Solid Digestate from a Wet Anaerobic Digestion Process as an Energy Resource,« *Energy Technology*, svez. 1, br. 1, pp. 94-101, 2013.
- [175] A. Scheivano, G. D'Imporzano, G. Orzi i F. Adani, »On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part II): new approaches in monitoring and evaluating process efficiency,« *Bioresource Technology*, svez. 102, br. 19, pp. 8814-8819, 2011.
- [176] S. Achinas, V. Achinas i G. Euverink, »A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste,« *Engineering*, svez. 3, br. 3, pp. 299-307, 2017.
- [177] S. Pedrazzi, G. Allesina, T. Belló, C. Rinaldini i P. Tartarini, »Digestate as bio-fuel in domestic furnaces,« *Fuel Processing Technology*, svez. 130, pp. 172-178, 2015.
- [178] A. Schievano, G. D'Imporzano, S. Salati i F. Adani, »On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance,« *Bioresource Technology*, svez. 102, pp. 7737-7744, 2011.

- [179] C. Sambusiti, F. Monlau, E. Ficara, A. Musatti, M. Rollini, A. Barakat i F. Malpei, »Comparison of various post-treatments for recovering methane from agricultural digestate,« *Fuel Processing Technology*, svez. 137, pp. 359-365, 2015.
- [180] The World Bank, »Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration,« The World Bank, Washington D.C., 2000.
- [181] N. Funamizu, M. Iida, Y. Sakakura i T. Takakuwa, »Reuse of heat energy in wastewater: Implementation examples in Japan,« *Water Science & Technology*, svez. 43, br. 10, pp. 277-285, 2001.
- [182] N. Martí, L. Pastor, A. Bouzas, J. Ferrer i A. Seco, »Phosphorus recovery by struvite crystallization in WWTPs: Influence of the sludge treatment line operation,« *Water Research*, svez. 44, br. 7, pp. 2371-2379, 2010.
- [183] R. Ravi, M. Beyers, S. Bruun i E. Meers, »Life cycle assessment of struvite recovery and wastewater sludge end-use: A Flemish illustration,« *Resources, Conservation and Recycling*, svez. 182, p. 106325, 2022.
- [184] M. Smol, J. Kulczycka i Z. Kowalski, »Sewage sludge ash (SSA) from large and small incineration plants as a potential source of phosphorus - Polish case study,« *Journal of Environmental Management*, svez. 184, br. Part 3, pp. 617-628, 2016.
- [185] H. Lin, J. Gan, A. Rajendran, C. Reis i B. Hu, »Phosphorus Removal and Recovery from Digestate after Biogas Production,« u *Biofuels - Status and Perspective*, Intech Open, 2015, pp. 517-546.
- [186] EurEau, »Water and the EU's Circular Economy,« 2 10 2018. [Mrežno]. Available: <http://www.eureau.org/resources/briefing-notes/3010-briefing-note-on-water-and-the-circular-economy-package/file>. [Pokušaj pristupa 18 10 2019].
- [187] C. Rizzardini i D. Goi, »Considerations About European Directives and Italian Regulation on Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plants: Current Status and Future Prospective,« *The Open Waste Management Journal*, svez. 2, pp. 17-26, 2009.
- [188] M. Papa, P. Foladori, L. Guglielmi i G. Bertanza, »How far are we from closing the loop of sewage resource recovery? A real picture of municipal wastewater treatment plants in Italy,« *Journal of Environmental Management*, svez. 198, br. Part 1, pp. 9-15, 2017.
- [189] Europska Komisija, »Disposal and recycling routes for sewage sludge,« DG Environment, 10 2001. [Mrežno]. Available: https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/sludge_disposal2.pdf. [Pokušaj pristupa 18 10 2019].
- [190] F. Kemausuor, M. Adaramola i J. Morken, »A Review of Commercial Biogas Systems and Lessons for Africa,« *Energies*, svez. 11, br. 11, pp. 2984-3005, 2018.
- [191] B. Kulišić i I. Ivić, »Studija ekonomske izvodljivosti komercijalizacije proizvoda iz PoC6_1_181: Degradacija kompleksa lignoceluloze kroz proizvodnju struvita iz digestata radi povećanja ekonomske i tehničke učinkovitosti bioplinskog postrojenja,« Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2017.
- [192] R. Raven i K. Gregersen, »Biogas plant in Denmark: successes and setbacks,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 11, br. 1, pp. 116-132, 2007.
- [193] V. Paolini, F. Petracchini, M. Segreto, L. Tomassetti, N. Naja i A. Cecinato, »Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge,« *Journal of*

Environmental Science and Health, Part A - Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, svez. 53, br. 10, pp. 899-906, 2018.

- [194] F. Kemausuor, A. Addo i L. Darkwah, »Technical and Socioeconomic Potential of Biogas from Cassava Waste in Ghana,« *Biotechnology Research International*, 2015.
- [195] BiogasWorld, »Social Acceptability: For a Biogas Project Supported by Population,« 11 10 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.biogasworld.com/news/social-acceptability-biogas-project-supported-population/>. [Pokušaj pristupa 18 10 2019].
- [196] M. Soland, N. Steimer i G. Walter, »Local acceptance of existing biogas plants in Switzerland,« *Energy Policy*, svez. 61, pp. 802-810, 2013.
- [197] F. Kretschmer, G. Neugebauer, G. Stoeglehner i T. Ertl, »Participation as a Key Aspect for Establishing Wastewater as a Source of Renewable Energy,« *Energies*, svez. 11, br. 11, pp. 3232-3249, 2018.
- [198] W. Budzianowski i D. Budzianowska, »Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations,« *Energy*, svez. 88, pp. 658-666, 2015.
- [199] H. Xiao, K. Li, D. Zhang, Z. Tang, X. Niu, L. Yi, Z. Lin i M. Fu, »Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge management alternatives based on incineration,« *Journal of Environmental Management*, svez. 321, p. 115848, 2022.
- [200] Victoria State Government, »Turning waste into energy: Join the discussion,« The State of Victoria Department of Environment, Land, Water and Planning, Victoria, 2017.
- [201] Intecus, »Preparation for decision-making in the field of sewage sludge disposal: Recommended proceedings for WWTP operators,« German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2013.
- [202] A. Musluoğlu, R. Dereli, O. Arıkan, H. Guven i K. Maçın, »Techno-economic assessment of digestate management for full-scale continuous dry anaerobic digestion plant,« *Bioresource Technology*, svez. 420, p. 132131, 2025.
- [203] E. Levlin, »Sustainable and integrated sewage and organic waste handling with global warming impact, a case study of Åland and energy recovery by SCWO or anaerobic digestion,« 2004.
- [204] A. Mucha, S. Dragisa, I. Dror, M. Garuti, E. v. Hullebusch, S. K. Repinc, J. Muñoz, S. Rodriguez-Perez, B. Stres, S. Ust'ak i C. Almeida, »Chapter 7: Re-use of digestate and recovery techniques,« u *Trace Elements in Anaerobic Biotechnologies*, London, IWA Publishing, 2019, pp. 181-205.
- [205] V. Lapčik i M. Lapčikova, »Biogas stations and their environmental impact,« *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, svez. 23, pp. 9-14, 2011.
- [206] REC, »Air Quality, Odour, Noise and Ecological Assessment for AD Plant,« 7 3 2016. [Mrežno]. Available: <https://www.recltd.co.uk/casestudy/air-quality-odour-noise-and-ecological-assessments-for-ad-plant/>. [Pokušaj pristupa 18 10 2019].
- [207] B. Wiechmann, C. Dienemann, C. Kabbe, S. Brandt, I. Vogel i A. Roskosch, »Sewage sludge management in Germany,« Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015.
- [208] A. Kasap, R. Aktas i E. Dulger, »Economic and Environmental Impacts of Biogas,« *Journal of Agricultural Machinery Science*, svez. 8, br. 3, pp. 271-277, 2012.

- [209] D. Turley, L. Hopwood, C. Burns i D. Maio, »Assessment of digestate drying as an eligible heat use in the Renewable Heat Incentive,« The Bioeconomy Consultants NNFCC, York, 2016.
- [210] X. Zhang, S. Sun, X. Han i S. Shu, »Optimizing struvite recovery from wastewater treatment: insights from machine learning models,« *Journal of Water Process Engineering*, svez. 77, p. 108520, 2025.
- [211] M. Faragò, A. Damgaard, J. Madsen, J. Andersen, D. Thornberg, M. Andersen i M. Rygaard, »From wastewater treatment to water resource recovery: Environmental and economic impacts of full-scale implementation,« *Water Research*, svez. 204, p. 117554, 2021.
- [212] C. Funani, S. Khune, J. Kabuba, P. Osifo, G. Ochieng i B. Otieno, »Modelling of struvite recovery from anaerobically digested waste-activated sludge using response surface methodology,« *MRS Advances*, 2025.
- [213] A. Santos, L. Mendes, P. Alvarenga, L. Gando-Ferreira i M. Quina, »Nutrient Recovery via Struvite Precipitation from Wastewater Treatment Plants: Influence of Operating Parameters, Coexisting Ions, and Seeding,« *Water*, svez. 16, br. 12, p. 1675, 2024.
- [214] Y. Yan, N. Kallikazarou, O. Nisiforou, Q. Shang, D. Fu, M. Antoniou i I. Fotidis, »Phosphorus recovery through struvite crystallization from real wastewater: Bridging gaps from lab to market,« *Bioresource Technology*, svez. 427, p. 132408, 2025.
- [215] Z. Wang, S. Guan, Y. Wang, W. Li, K. Shi, J. Li i Z. Xu, »High Purity Struvite Recovery from Hydrothermally-Treated Sludge Supernatant Using Magnetic Zirconia Adsorbent,« *International Journal of Environmental Research and Public Health*, svez. 19, br. 20, p. 13156, 2022.
- [216] A. Moulessehoul, D. H. D. Gallart-Mateu, M. d. l. Guardia i M. Kameche, »Phosphorus removal and recovery from water and wastewater by the struvite crystallization,« *Desalination and Water Treatment*, svez. 320, p. 100902, 2024.
- [217] Enchanting Italy, »Lombardy Region, Italy,« 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.enchantingitaly.com/regions/lombardia/>. [Pokušaj pristupa 20 02 2020].
- [218] Europska Komisija, »Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - Lombardy,« [Mrežno]. Available: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/regional-innovation-monitor/base-profile/lombardy>. [Pokušaj pristupa 20 02 2020].
- [219] Cremonafiere, »The Lombardy region hosts 361 biogas plants. Cremona occupies the first place with 137 plants,« [Mrežno]. Available: <http://www.cremonafiere.it/en/2013/12/10/the-lombardy-region-hosts-361-biogas-plants-cremona-occupies-the-first-place-with-137-plants>. [Pokušaj pristupa 21 10 2019].
- [220] P. Balsari, S. Menardo, F. Gioelli i E. Dinuccio, »Il Progetto Europeo Eu Agro Biogas: finalità, obiettivi e primi risultati ottenuti,« u *IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria - Ricerca e innovazione nell'ingegneria dei biosistemi agro-territoriali*, Ischia, 2009.
- [221] BTS, »The latest news concerning BTS Biogas and the biogas sector,« BTS, [Mrežno]. Available: The latest news concerning BTS Biogas and the biogas sector. [Pokušaj pristupa 21 10 2019].

- [222] B. Du, L. Sharma, C. Becker, S. Chen, R. Mowery, G. V. Walsum i C. Chambliss, »Effect of varying feedstock–pretreatment chemistry combinations on the formation and accumulation of potentially inhibitory degradation products in biomass hydrolysates,« *Biotechnology and Bioengineering*, svez. 107, br. 3, pp. 430-440, 2010.
- [223] D. Pezzolla, F. D. Maria, C. Zadra, L. Massaccesi, A. Sordi i G. Gigliotti, »Optimization of solid-state anaerobic digestion through the percolate recirculation,« *Biomass and Bioenergy*, svez. 96, pp. 112-118, 2017.
- [224] S. Geerts, A. Marchi i M. Weemaes, »Full-scale phosphorus recovery from digested wastewater sludge in Belgium - part II: economic opportunities and risks,« *Water Science and Technology*, svez. 71, br. 4, pp. 495-502, 2015.
- [225] Ž. Bogdan, »Analiza tehnologija za energetska iskorištavanje krutog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [226] J. Brans i B. Mareschal, »Promethee Methods,« u *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, New York, Springer, 2005, pp. 163-186.
- [227] M. Matejova i J. Paralič, »A Multi-Criteria Decision-Making Approach for the Selection of Explainable AI Methods,« *Machine Learning and Knowledge Extraction*, svez. 7, br. 4, p. 158, 2025.
- [228] N. Azhar, N. Radzi, W. Munirah i W. Ahmad, »Multi-criteria Decision Making: A Systematic Review,« *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering*, svez. 14, br. 8, p. 23, 2021.
- [229] J. Černevičienė i A. Kabašinskas, »Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Finance Using Explainable Artificial Intelligence,« *Frontiers in Artificial Intelligence*, svez. 5, 2022.
- [230] R. Ali, A. Hussain, S. Nazir, S. Khan i H. Khan, »Intelligent Decision Support Systems—An Analysis of Machine Learning and Multicriteria Decision-Making Methods,« *Applied Sciences*, svez. 13, br. 22, p. 12426, 2023.
- [231] C. Shi i Y. Yao, »Explainable multi-criteria decision-making: A three-way decision perspective,« *International Journal of Approximate Reasoning*, svez. 187, p. 109528, 2025.
- [232] Z. Wang, S. Nabavi i G. Rangaiah, »Multi-Criteria Decision Making in Chemical and Process Engineering: Methods, Progress, and Potential,« *Processes*, svez. 12, br. 11, p. 2532, 2024.
- [233] A. Abdulla i G. Baryannis, »A hybrid multi-criteria decision-making and machine learning approach for explainable supplier selection,« *Supply Chain Analytics*, svez. 7, p. 100074, 2024.

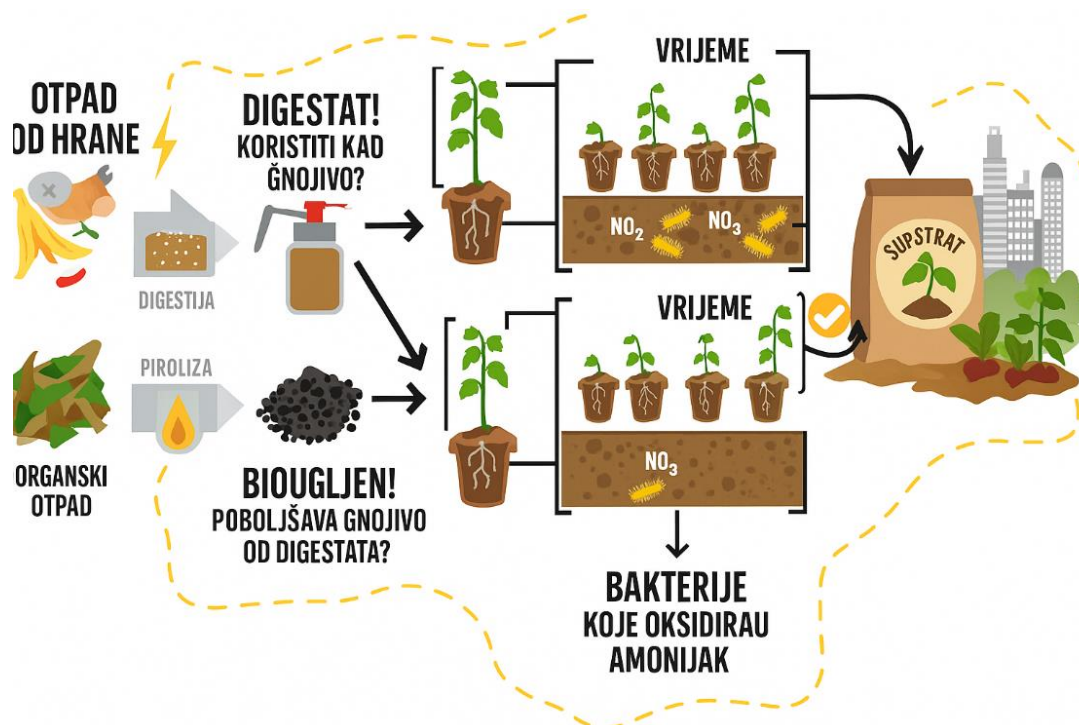
PRILOZI

PRILOG I – OPIS TEHNOLOGIJA

I.1. Izravna poljoprivredna uporaba digestata i mulja

Iako neće biti primijenjena i razmatrana kao tehnologija za odabir u sklopu disertacije, bitno je naglasiti ovaj pristup zbrinjavanju otpadnih tokova jer se danas i dalje učestalo koristi kao najjednostavnije i najjeftinije rješenje. U EU, izravna primjena digestata iz bioplinskih postrojenja vrlo je raširena, osobito u zemljama s razvijenom bioplinskom proizvodnjom. Procjenjuje se da EU godišnje proizvede oko 180 milijuna tona digestata, od čega se velika većina (pretežito iz gnojiva i energetskih usjeva) izravno koristi kao gnojivo [109]. Primjerice, Njemačka (koja generira gotovo polovicu ukupnog EU digestata) većinu tog digestata vraća na poljoprivredna zemljišta u sklopu održivog upravljanja hranjivima. Slično, u Italiji i Francuskoj digestat iz biorazgradivog otpada standardizirano se raspršuje po oranicama.

Što se tiče otpadnog mulja iz komunalnih uređaja, oko 48% ukupnog mulja u EU plasira se na poljoprivredna tla, dok se oko 27% šalje u spalionice [110]. Međutim, postoje velike razlike među državama. Na primjer, u UK i Španjolskoj tradicionalno se veći dio stabiliziranog mulja koristi u poljoprivredi, dok zemlje poput Nizozemske i Švicarske ograničavaju tu praksu (Švicarska je zabranila odlaganje mulja na tlo i usmjerila sav mulj u spaljivanje još 2006. godine) [37]. Hrvatska, primjerice, trenutno manji dio mulja koristi na poljima zbog ograničenja i traženja alternativa – jedna od tih alternativa prikazana je na Slika 60. [111].



Slika 60. Primjer sheme korištenja digestata za poljoprivredne svrhe (modificirano iz [112])

Izravna primjena digestata ili pročišćenog otpadnog mulja na poljoprivrednim površinama podrazumijeva korištenje ovih materijala kao gnojiva i poboljšivača tla. Digestat je tekući ili polukruti ostatak nakon procesa AD biomase (npr. iz bioplinskih postrojenja), bogat hranjivim tvarima kao što su dušik, fosfor i kalij. Otpadni mulj (engl. *biosolid*) nusproizvod je pročišćavanja otpadnih voda, koji nakon odgovarajuće obrade (stabilizacije) također sadrži značajne količine biljnih hranjiva. Ova tehnologija izravno iskorištava nutritivnu vrijednost digestata/mulja za gnojenje tla, čime se organski i mineralni sastojci vraćaju u kružni tok u poljoprivredi.

Princip izravne uporabe temelji se na razlaganju organske tvari u tlu i dostupnosti hranjiva biljkama. Digestat obično sadrži dušik većim dijelom u amonijskom obliku, koji je biljkama brže dostupan u odnosu na organski N prisutan u svježem (nedigestiranom) stajskom gnoju. Mulj iz UPOV-a obično se prije poljoprivredne primjene stabilizira (npr. AD, kompostiranjem ili vapnenjem) radi smanjenja patogena i mirisa. Nakon aplikacije na tlo, mikroorganizmi dalje razgrađuju organsku tvar, oslobađajući hranjiva (N, P, K) koja uzimaju usjevi. Organska tvar doprinosi poboljšanju strukture i plodnosti tla (povećanje humusa). Tehnički, primjena se izvodi raspršivanjem tekuće frakcije digestata ili razbacivanjem dehidriranog mulja po površini, uz eventualno zaoravanje. Ključna je kontrola doze – ne smije se prekoračiti količina koja bi dovela do ispiranja nitrata ili akumulacije teških metala. Zbog toga se provode analize sastava digestata/mulja (npr. sadržaj hranjiva, teških metala, suhe tvari) i plan gnojidbe prilagođava potrebama usjeva i važećim propisima.

Najveća prednost izravne uporabe jest što reciklira hranjive tvari natrag u tlo, čime se smanjuje potreba za mineralnim gnojivima. Korištenje digestata ili mulja poboljšava sadržaj organske tvari u tlu, poboljšava strukturu tla i vodni kapacitet te može dugoročno povećati plodnost tla. Također, to je često najjeftiniji način zbrinjavanja – izbjegavaju se visoki troškovi alternativnih obrada (sušenje, spaljivanje). Za proizvođače otpada (komunalna poduzeća, bioplinske tvrtke), predaja digestata/mulja poljoprivredi može značiti i prihod ili uštedu (poljoprivrednici ponekad plaćaju manju naknadu za gnojivo, ili barem preuzmu materijal besplatno). Dodatno, vraćanje fosfora iz mulja/digestata u tlo od strateškog je značaja jer EU nema mnogo prirodnih fosfatnih ruda – ovime se jača kružno gospodarstvo fosfora. U okolišnom smislu, pravilna primjena smanjuje potrebu za energetske intenzivnom proizvodnjom umjetnih gnojiva i time posredno smanjuje emisije stakleničkih plinova.

Međutim, glavni su nedostaci potencijalni rizici od zagađenja. Otpadni mulj može sadržavati teške metale, organska onečišćenja (npr. ostatke farmaceutika), mikroplastiku i patogene organizme [37]. Iako stabilizacija i higijenizacija (npr. AD, kompostiranje ili termička sušenja) značajno smanjuju patogene, neki spori patogeni, jaja parazita ili rezidualne kemikalije mogu opstati. Postoji također potencijalna problematika akumulacije teških metala u tlu kroz dugogodišnje apliciranje mulja – primjerice, kadmij i živa u mulju mogu ograničiti dugoročnu primjenjivost ako su razine blizu graničnih. Također, višak hranjivih tvari (posebno dušika i fosfora) iz prekomjerne primjene digestata može dovesti do ispiranja nitrata u podzemne vode ili eutrofikacije površinskih voda. U EU su zato propisane maksimalne doze dušika iz organskih gnojiva (170 kg N/ha godišnje prema Nitratnoj direktivi) kako bi se zaštitile vode od onečišćenja nitratima. Operativno gledano, primjena tekućeg digestata zahtijeva skladišne kapacitete i opremu za raspršivanje – potrebna su ulaganja u cisterne, crpke i injektore, a raspodjela je ograničena na sušna razdoblja kada je tlo pristupačno i usjevi mogu primiti hranjiva. Nadalje, javna percepcija može biti negativna: stanovništvo ponekad izražava

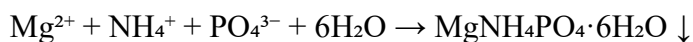
zabrinutost zbog mogućeg smrada ili straha od onečišćenja hrane, što može dovesti do ograničenja ili zabrana lokalnim propisima. Za digestat specifično, jedan nedostatak je relativno visok udio vode (obično 90–95%), što znači da je ekonomski opravdano koristiti ga u blizini mjesta nastanka; transport na veće udaljenosti nije isplativ zbog volumena.

Ekonomski gledano, izravna poljoprivredna uporaba često je najisplativija opcija zbrinjavanja digestata/mulja. Troškovi obično uključuju samo skladištenje, rukovanje i transport do polja, što je znatno manje od, primjerice, troškova izgradnje i pogona spalionice ili sušare. Prema studijama, trošak obrade mulja kroz poljoprivrednu uporabu može iznositi otprilike 150–400 EUR po toni mulja (na 20% ST), uključujući transport i analize, što je često niže od drugih metoda [113]. Neki poljoprivrednici dobivaju mulj/digestat besplatno ili uz minimalnu naknadu, dok proizvođač otpada pokriva logistiku – ipak, to je i dalje povoljnije nego alternativno zbrinjavanje. Dodatna korist je što se smanjuju troškovi nabave mineralnih gnojiva na farmi (zamjena dijela dušičnih ili fosfornih gnojiva digestatom).

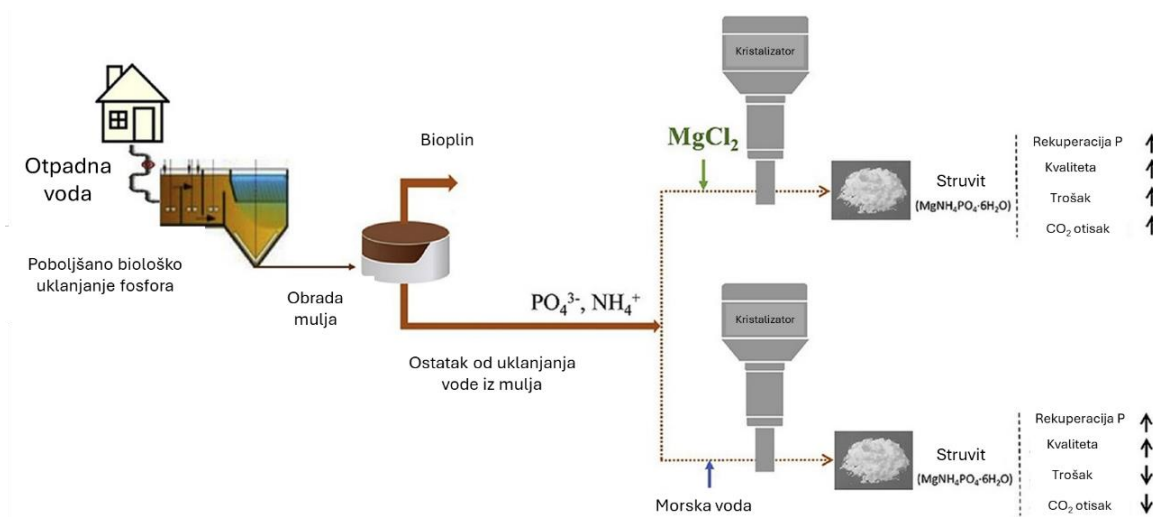
I.2. Materijalna uporaba (proizvodnja bio-gnojiva: struvit, kompost)

Proizvodnja bio-gnojiva iz otpadnog mulja i digestata obuhvaća procese kojima se iz tih materijala dobivaju stabilniji, koncentriraniji ili specifičniji proizvodi za poboljšanje tla i ishranu biljaka. Dva istaknuta primjera su struvit i kompost. Struvit je mineralni kristal (magnezijev amonijev fosfat, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) koji se može izdvojiti iz tekućih tokova bogatih amonijakom i fosforom, poput koncentrata digestata ili otpadnih voda, postupkom kontrolirane kristalizacije. To rezultira krutim gnojivom bogatim fosforom i dušikom u obliku sporo topivog minerala. Kompostiranje je biološki aerobni proces razgradnje organske tvari pri čemu se otpadni mulj ili digestat miješa s drugim organskim materijalima (npr. zelenim otpadom, drvnim ostacima), kako bi nastalo stabilizirano organsko gnojivo – kompost. Obje tehnologije ciljaju pretvoriti “sirovi” otpad u lakše rukovodive i prihvatljivije oblike gnojiva, s reduciranim patogenim sadržajem i mirisom.

Tehnički princip proizvodnje struvita je kemijska precipitacija ili taloženje (Slika 61.):



U praksi, tekuća faza digestata ili otpadne vode (obično nakon AD mulja, gdje je oslobođen fosfor) tretira se u reaktoru gdje se namješta alkalnost ($\text{pH} \sim 8-9$) i dodaje izvor magnezija (npr. MgO ili MgCl_2). U tim uvjetima, fosfatni ioni, amonijevi ioni i magnezijevi ioni spajaju se i formiraju kristale struvita koji se talože. Proces se odvija u posebnim reaktorima za precipitaciju struvita, uz kontrolirano miješanje koje pospješuje rast kristala. Dobiveni kristali ili granulati struvita se sakupljaju, isperu i osuše. Rezultat je granulirano gnojivo s oko 12-13% P_2O_5 (oko 5-6% P), 5-6% dušika i 10% magnezija [114]. Struvit je teško topljiv, što znači da u tlu polako otpušta fosfor i dušik, što je pogodno za biljnu ishranu tijekom duljeg perioda. Tehnički izazovi uključuju optimizaciju uvjeta kristalizacije (pH , omjer Mg:P , vrijeme zadržavanja) i sprječavanje oborina na neželjenim mjestima (cjevovodi, pumpe).



Slika 61. Shema proizvodnje struvita iz obrade otpadnih voda [115]

U EU je nekoliko desetaka postrojenja implementiralo tehnologiju oporabe struvita iz otpadnih tokova. Primjer je uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Slough (UK), gdje je još 2011. godine ugrađen *Pearl* sustav za precipitaciju struvita, zbog zaštite cjevovoda i proizvodnje gnojiva. U Nizozemskoj, gotovo svi veći UPOV-i imaju ili planiraju sustave za oporabu fosfora; Amersfoort i Tilburg imaju struvit-reatore (*AirPrex*) kojima se godišnje dobiva više tona struvitnog gnojiva. U Njemačkoj, zakon od 2017. godine zahtijeva povrat fosfora iz mulja u roku desetak godina za veće aglomeracije – neke pokrajine potiču struvit kao rješenje. Tako je, primjerice, u Berlinu pokrenut projekt *PxPilot* za izdvajanje struvita iz otpadnog mulja. Dobiveni struvit često se komercijalno plasira kao mineralno gnojivo. Npr. kanadska tvrtka Ostara surađuje s europskim gradovima i prodaje struvitne granule pod markom “Crystal Green”. Regulatorno, kako je spomenuto, od 2022. godine struvit ima status dozvoljenog EU gnojiva, što je ujednačilo pravila i olakšalo trgovinu među državama [116, 117]. Jedan izazov primjene je ekonomska isplativost – struvitne jedinice se najbrže uvode gdje postoji tehnička potreba (npr. sprječavanje struvitnih kamenaca u postrojenju ili obveza smanjenja P u otpadnoj vodi). Kao primjer specifične primjene digestata, istraživanja su pokazala da je moguće dobiti struvit i iz tekuće faze digestata na farmama svinja (gnojnice) dodavanjem magnezija, čime se smanjuje zagađenje voda fosforom i dobiva gnojivo [118].

Struvit ima nekoliko značajnih prednosti. Kao koncentrirano mineralno gnojivo, lakše se skladišti i transportira nego sirovi digestat ili mulj (kristali s ~90% ST). Sadrži fosfor u obliku koji se sporo otpušta, pa je idealan za kulturu s dužom vegetacijom – smanjuje ispiranje fosfora u vodu u odnosu na konvencionalna topiva fosfatna gnojiva [119]. Također sadrži značajan udio magnezija koji je koristan za korekciju kiselosti tla i ishranu biljaka. Struvitno gnojivo obično ima vrlo niske razine teških metala i organskih zagađivala, jer se ti elementi ne ugrađuju značajno u kristalnu rešetku – samim time čistoća proizvoda je visoka (pogotovo u usporedbi s pepelom iz procesa izgaranja mulja). Osim agronomskih prednosti, precipitacija struvita pomaže samom postrojenju – smanjuje spontano taloženje kamenca u cijevima i opremi uređaja, što je bio i prvotni motiv za gradnju takve vrste postrojenja, čime su se ostvarile uštede na troškovima održavanja. U širem smislu, struvit doprinosi cilju zatvaranja ciklusa kruženja fosfora: on je dokaz da se vrijedni element može izdvojiti iz otpada i ponovno koristiti, što povećava samodostatnost poljoprivrede i smanjuje ovisnost o uvoznim fosfatima.

Implementacija tehnologije precipitacije struvita uključuje investiciju u reaktor i operativne troškove kemikalija i energije za miješanje/pumpanje. Studije procjenjuju da trošak proizvodnje 1 kg P u obliku struvita može biti veći od troška konvencionalnih fosfornih gnojiva, ali ekonomsku računicu poboljšava činjenica da se rješava i problem taloga u postrojenju te smanjuju troškovi obrade otpadnih voda (manje kemikalija za taloženje fosfora ili manje kazne za emisije). Dakle, neizravne uštede u pogonu plus vrijednost gnojiva mogu opravdati uvođenje [120, 121]. Cijena struvita na tržištu može varirati; ako se plasira kao specijalno sporo djelujuće gnojivo, može postići i veću cijenu po toni nego fosfatna ruda. EU fondovi i nacionalni poticaji za recikliranje fosfora također potiču ekonomiku – npr. u Njemačkoj se očekuje da komunalna poduzeća investicije u P-oporabu prebacuju djelomično na korisnike vodnih usluga. Jednom operativan, sustav za struvit ima umjerene troškove održavanja, a nusprodukt (struvit) stvara određeni prihod.

S druge strane, princip kompostiranja temelji se na aerobnoj mikrobiološkoj razgradnji organske tvari. Otpadni mulj ili čvrsta frakcija digestata obično se pomiješa sa strukturirajućim materijalom bogatim ugljikom (poput usitnjenog drva, slame, lišća) da se postigne odgovarajući omjer ugljika i dušika (optimalno ~25-30:1) i dobra poroznost. Smjesa se slaže u trape (hrpe) ili u kompostere te se omogućava prozračivanje (pasivno ili aktivno provjetravanje). Termofilna faza procesa²⁰ traje nekoliko dana do tjedana, tijekom koje se uništava većina patogena i sjemenki korova. Slijedi faza hlađenja i zrenja kroz nekoliko mjeseci, nakon čega nastaje stabilan humusni materijal – kompost. Kompost sadrži huminske tvari, stabilizirane hranjive tvari i znatno manje lako razgradive organske tvari. Ključne kontrole su održavanje temperature, vlage (~50-60%) i aeracije; često se hrpe komposta periodično premiješaju (prevrtanje) radi ujednačavanja uvjeta. Kvalitetan kompost ima mrvičastu strukturu, zemljani miris i koristi se kao poboljšivač tla (dodaje organsku tvar, nešto hranjiva i poboljšava mikrobiološku aktivnost tla).

Kompostiranje otpadnog mulja prakticira se u mnogim zemljama EU, često u kombinaciji s drugim biorazgradivim otpadom. Francuska je poznata po visokom udjelu komposta od mulja – još 2013. godine, oko 60% mulja u Francuskoj završavalo je reciklirano u vidu komposta ili direktno na poljima [122]. Poljska i zemlje istočne Europe u posljednjih su desetak godina izgradile moderne kompostane zbog ograničavanja odlaganja mulja – npr. u Poljskoj je trend kompostiranja mulja naglo porastao oko 2010-ih, što je dovelo do povećanja korištenja “*biosolid*” (čvrsta biološka tvar) komposta u melioraciji degradiranih zemljišta. Skandinavske zemlje (npr. Finska) također dio mulja kompostiraju, osobito za neprehrambene primjene (šumarstvo, hortikultura). Kompostiranje digestata je nešto rjeđe jer se digestat često koristi direktno; međutim, čvrsta odvojena frakcija digestata kompostira se primjerice u Italiji i Belgiji kako bi se dobio peletirani kompost visokog sadržaja suhe tvari za lakši transport [122]. Općenito, kompost od mulja koristi se u poljoprivredi uz restrikcije (npr. ne za povrće u neposrednom kontaktu s tlom), ali ima i druge niše: rekultivacija rudokopa, poboljšanje tla u krajobrazu, pa i proizvodnja supstrata (ako je vrlo visoke kvalitete).

Jedna od prednosti procesa kompostiranja jest dobivanje stabiliziranog organskog proizvoda s višestrukom koristi za tlo. Kompost od mulja povećava sadržaj humusa u tlu, poboljšava strukturu, vodni režim i potiče biološku aktivnost tla (poput drugih komposta). Uklanja ili

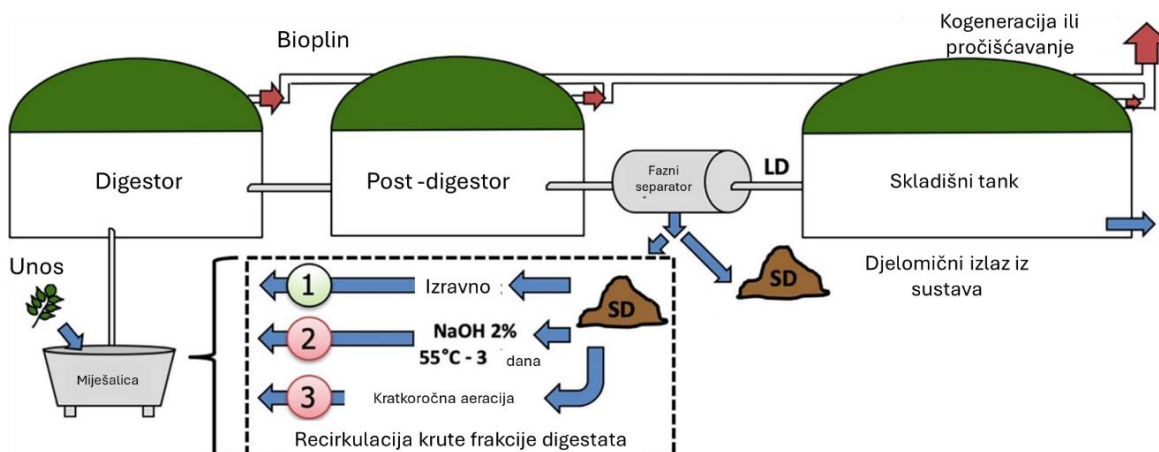
²⁰ faza aerobne razgradnje organske tvari pri povišenim temperaturama, najčešće između 45 i 70 °C, pri čemu dominiraju termofilni mikroorganizmi

znatno smanjuje neugodne mirise i patogene – kvalitetan kompost je higijenski siguran i nema odbojan miris, što olakšava prihvaćanje javnosti u usporedbi s aplikacijom sirovog mulja. Proces također smanjuje masu i volumen: tijekom kompostiranja dio organske tvari se mineralizira (CO_2), pa konačni volumen može biti 40-50% manji od polaznog, što olakšava transport na udaljenije lokacije. Kompost je fleksibilan u primjeni – može se pakirati i koristiti ne samo na oranicama nego i u vrtlarstvu, obnovi degradiranih zemljišta ili kao sastojak supstrata, čime se otvara šire tržište. Uz to, kompostiranje može prihvatiti i druge organske materijale zajedno s muljem, čime se integrirano rješava više tokova biootpada odjednom. Sa stajališta upravljanja, kompostiranje je robusna tehnologija koja ne zahtijeva visoku tehnologiju ni kemikalije, pa je primjenjiva i u manje razvijenim regijama.

Kompostiranje je relativno jednostavan tehnološki proces, često isplativ za veće količine mulja. Troškovi uključuju mehanizaciju (utovarivači, prevrtalice), radnu snagu i eventualno infrastrukturu (plohe, odvodnje, pokrovi). Miješanje s drugim materijalima može zahtijevati njihov dovoz, ali često se koristi lokalno dostupan zeleni otpad ili piljevina (koja može biti i besplatna jer se zbrinjava). Cijena dobivenog komposta po toni obično nije visoka – komunalni kompost se ponekad dijeli besplatno poljoprivrednicima ili prodaje po simboličnoj cijeni (npr. 10-20 EUR/t) [123], što znači da prihodi rijetko pokriju troškove procesa. Ipak, računica je da je kompostiranje jeftinije od odlaganja ili spaljivanja. U dostupnim ekonomskim analizama i pregledima prakse, rute oporabe mulja u poljoprivredi (izravno ili kroz kompostiranje) u pravilu imaju niže jedinične troškove u odnosu na termičke rute i odlaganje, pri čemu je odlaganje često najskuplja opcija. Prednost kompostiranja dodatno raste kada postoji stabilan korisnik/ tržište komposta, jer se dio troška kompenzira plasmanom proizvoda te smanjenjem količina za odlaganje i povezanih naknada [124]. U nekim zemljama se kompost od mulja prodaje komercijalno za određene namjene (recimo za rekultivaciju zemljišta) po nešto višoj cijeni, ali i tada je to više pokriće troškova nego profit. Ukoliko se uspostavi lokalno tržište (poljoprivrednici, rasadnici, općine za javne površine), kompostiranje može biti financijski održivo uz minimalne subvencije.

I.3. Recirkulacija digestata bioplinskog postrojenja

Recirkulacija digestata označava tehnološki postupak u kojem se digestat nastao u bioplinskom postrojenju (nakon AD) ponovno koristi unutar istog postrojenja radi dodatnog ostvarenja koristi – najčešće za povećanje proizvodnje bioplina ili poboljšanje učinkovitosti procesa. U praksi to može značiti da se cjelokupan ili djelomično obrađen digestat vraća natrag u fermentor ili u poseban naknadni fermentor, kako bi preostala organska tvar u njemu dalje razgradila i proizvela dodatni bioplin (Slika 62). Alternativno, recirkulacija se može odnositi na povrat tekuće faze digestata (koja sadrži puno otopljenih nutrijenata i mikroorganizama) u predtretman supstrata ili u početak digestije, čime se zadržavaju aktivne bakterije i vlažnost u sustavu. Ova tehnologija je inovativna u smislu da pokušava zatvoriti ciklus kruženja unutar samog bioplinskog postrojenja: umjesto da se digestat odmah zbrine (npr. na poljoprivrednom zemljištu), dio ili cijeli tok se recirkulira kako bi se izvukla dodatna energija ili stabilnost procesa.



Slika 62. Shema recirkulacije digestata sa ciljem povećanja energetske učinkovitosti bioplinskog postrojenja [125]. SD = solid digestate (kruti digestat), LD = liquid digestate (tekući digestat)

Tehnički, postoji nekoliko pristupa recirkulacije digestata:

- Recirkulacija cijelog digestata – dio istisnutog digestata iz glavnog fermentora vraća se u ulaz i miješa sa svježim supstratom. Time se povećava hidrauličko vrijeme zadržavanja organske tvari i omogućuje mikrobioti²¹ da duže razgrađuje teže razgradive komponente [126].
- Recirkulacija izdvojene tekuće faze – digestat se prvo razdvoji (dekanter centrifugom ili prešom) na krutu i tekuću fazu. Kruta faza (bogata vlaknima) može ići na daljnju obradu ili sušenje, dok se tekuća faza, puna razgrađenih produkata i amonijaka, vraća u fermentor. Time se unosi dio hranjivih elemenata koji mogu podržati metaboličku aktivnost bakterija i održava se vlažnost, ali može zahtijevati kontrolu zbog nakupljanja amonijaka.
- Recirkulacija nakon obrade digestata – digestat se podvrgne specifičnom tretmanu (npr. termičkoj hidrolizi, mehaničkoj dezintegraciji, enzimskoj razgradnji), kako bi se razbile preostale kompleksne strukture, i potom se takav “predobrađeni” digestat vraća u fermentor na dodatnu digestiju [127]. Ovaj princip je učinkovit u oslobađanju još dostupnih ugljika za metanogenezu.

U svim slučajevima, ključna ideja je produljiti vrijeme i uvjete dostupne za razgradnju onih komponenti koje u standardnom (jednokratnom) prolazu kroz fermentor ne bi bile potpuno razgrađene. Recirkulacijom se također vraća aktivna mikrobna biomasa u proces, što može pojačati brzinu razgradnje novog supstrata (jer se povećava koncentracija aktivnih bakterija – djeluje kao inokulum) [126]. Međutim, tehnički izazov je sprječavanje akumulacije inhibitora – primjerice, amonijak iz digestata može doseći toksične razine za metanogene, pa se ponekad recirkulacija kombinira s uklanjanjem amonijaka prije povrata tekućine. Također, reciklirana kruta frakcija može povećati viskoznost i smanjiti miješanje, pa se to obično radi nakon njenog usitnjavanja ili djelomične hidrolize. Sumarno, recirkulacija digestata spaja koncepte dvostupanjske digestije i internog recikliranja hranjiva i biomase radi maksimalnog energetskog iskorištenja supstrata.

²¹ skup svih mikroorganizama koji nastanjuju određeni okoliš ili organizam

Tehnologija i princip recirkulacije digestata još je u razvoju, no postoje primjeri na industrijskoj razini koji pokazuju njenu izvedivost. Smatra se da je razina TRL ove tehnologije oko 6-7, što znači da je dokazana u relevantnom okruženju (pilot ili demo postrojenja) i da postoje prototipovi u radu [128]. Primjer je inovativni projekt u Italiji (regija Lombardija) gdje je komercijalno bioplinsko postrojenje implementiralo recirkulaciju tretiranog digestata i postiglo mjerljive koristi. Također, studije u laboratorijskim i pilotskim razmjerima (npr. u Njemačkoj i Kini) pokazale su povećanje proizvodnje bioplina za 20-30% uz recirkulaciju tekuće faze digestata [129]. Ipak, ova tehnologija još nije standardni dio dizajna bioplinskih postrojenja – primjenjuje se *ad hoc*, ovisno o uvjetima. Kako sve više naglasak dolazi na optimizaciju postojećih bioplinskih postrojenja (umjesto samo gradnje novih), recirkulacija digestata privlači pažnju i prelazi u demonstracijsku fazu na terenu. Važno je napomenuti da recirkulacija digestata zahtijeva pažljivo upravljanje kako bi se izbjegli negativni efekti. U literaturi se navodi da se prekomjernom recirkulacijom može akumulirati amonijak koji inhibira metanogenezu, pa se obično recirkulira do određene granice (npr. 20-30% ukupnog volumena) ili se kombinira s kontrolom amonijaka [130]. Također, ako digestat sadrži visoke koncentracije soli ili metala, recirkulacija bi ih koncentrirala – stoga se ova tehnika najčešće primjenjuje na supstrate kao što su energetske usjevi ili gnojovka, a manje na digestat mulja koji može imati teže metale.

Recirkulacija digestata može znatno povećati iskorištenje organske tvari i time povećati proizvodnju bioplina iz iste količine supstrata. Istraživanja pokazuju porast prinosa metana od 10 do 30% ovisno o supstratu i tehnologiji recirkulacije [129]. To unapređuje energetske učinkovitost postrojenja bez potrebe za većim unosom novog supstrata – što je posebno korisno ako je supstrat ograničen ili skup. Osim više energije, rezultat je i digestat s nižim sadržajem organske tvari, što znači stabilniji krajnji ostatak pogodniji za odlaganje ili uporabu (manje naknadnih emisija). Recirkulacija također štedi vodu – u bioplinskim postrojenjima često je potrebno dodavati vodu, radi održavanja vlage; ako se vraća tekući digestat, manje svježe vode je potrebno, što je korist u područjima s ograničenim vodnim resursima. Također, proces može pospješiti razgradnju tvrdokornih komponenti: kombinacija recirkulacije s predobradom (poput mehaničke dezintegracije) može razbiti lignocelulozu i učiniti je dostupnijom bakterijama pri ponovnom ulasku u fermentor, čime se ostvaruje dublja razgradnja nego u jednostupanjskom procesu [114]. Recirkulacija tekuće faze doprinosi i stabilnosti procesa – vraćanjem bogate mikrobne populacije, fermentor brže reagira na promjene supstrata i otporniji je na vanjske promjene. Ako se uklanja amonijak prije recirkulacije, dobiva se vrijedni amonijski sulfat kao nusproizvod (gnojivo), a fermentor se štiti od toksičnosti. Još jedna prednost je smanjenje količine otpada za zbrinjavanje: ako recirkulacija ide više ciklusa, ukupna količina konačnog digestata za izvoz (npr. na poljoprivredne površine) se smanjuje, jer se dio vode i organske tvari stalno vrti u krugu i eventualno otpusti kao bioplin ili ispari. Time postrojenje može uštedjeti na troškovima transporta digestata i na površini potrebnjoj za njegovu primjenu.

Nadalje, recirkulacija digestata može biti ekonomski isplativa uglavnom kroz povećanu proizvodnju bioplina, što znači više energije (električne ili biometan) za prodaju ili vlastitu potrošnju. Ako postrojenje ima poticajnu otkupnu cijenu za električnu energiju (engl. *Feed in Tariff*, FiT) ili može prodati dodatni bioplin, tada porast proizvodnje direktno povećava prihode. Troškovi implementacije uključuju separator, spremnike za miješanje i ujednačavanje digestata, pumpe i upravljački sustav. U nekim slučajevima treba uložiti u opremu za uklanjanje amonijaka (engl. *stripper*), ukoliko on predstavlja problem u sustavu – to su dodatni troškovi, ali istovremeno mogu stvoriti naknadni prihod od dodatnog proizvoda (amonijska gnojiva) koji

ima vrijednost. Recirkulacija može smanjiti trošak zbrinjavanja digestata: ako manje digestata izlazi iz sustava, manji su troškovi transporta cisternama ili za sušenje. S financijskog gledišta, analiza troškova i koristi recirkulacije ovisit će o cijeni energenta. U doba viših cijena energenata, svaka dodatna količina bioplina donosi značajniju korist, pa se investicija lakše opravda. Obrnuto, pri niskim cijenama električne energije ili kad je postrojenje već na maksimalnoj kapacitiranoj snazi generatora, višak bioplina možda nema kako biti iskorišten (osim ako se ne pročišćava u biometan), pa financijska situacija može biti manje atraktivna. Također, recirkulacija digestata obično ne traži ogromne investicije u usporedbi s izgradnjom novih fermentora – radi se o optimizaciji postojeće opreme, što je jeftiniji način za povećati output.

No, potrebno je spomenuti i ograničenja takvog sustava:

- Akumulacija inhibitora: Kod recirkulacije digestata u anaerobni reaktor, vremenom se mogu akumulirati amonijak, soli i toksični ioni do razine koja inhibira aktivnost metanogenih mikroorganizama [56]. Povišena koncentracija amonijaka (NH_3) smanjuje proizvodnju metana – studije pokazuju pad prinosa čak i prije nego što se dostignu koncentracije od $\sim 3,5$ g/L (granica umjerene inhibicije). Također, recirkulacija može dovesti do nakupljanja teško razgradivih supstanci (npr. huminske kiseline²²) koje se vremenom gomilaju jer ne napuštaju sustav. Sve to povećava kompleksnost vođenja procesa – potrebno je stalno pratiti kemizam digestata i po potrebi provoditi korektivne mjere (npr. izdvajanje dijela digestata, dodavanje svježje vode, kemijska korekcija).
- Gubitak nutrijenata i organske tvari: Za razliku od izravne primjene digestata na tlo (gdje hranjiva tvar i organska tvar doprinose plodnosti tla), recirkulacija „potroši” dio nutrijenata u smislu da se više dušika izgubi kao molekula N kroz proces denitrifikacije ili ispari kao amonijak tijekom manipulacije. Organska tvar se povećanim razgrađivanjem pretvara u bioplin, ali se time gubi humusni potencijal digestata za tlo. Dakle, prva opcija (recirkulacija) može imati veće eksterne troškove za okoliš – tlo ostaje uskraćeno za organsku tvar i nutrijente koje bi inače dobilo gnojivom digestatom. Prema Elge et al. [131], proces izgaranja ili višestruke prerade mulja/digestata treba vrednovati i kroz izgubljene koristi za tlo (organski ugljik koji bi se mogao vratiti).
- Troškovi održavanja i složenost: Recirkulacija digestata uvodi dodatne korake (npr. separacija digestata na krutu/tekuću frakciju, eventualno tretman krute frakcije enzimima ili toplinom [114]). To znači više opreme (separatori, izmjenjivači topline, pumpe), više radnih sati i održavanja, te veću potrošnju energije. U literaturi se navodi da dodavanje druge faze digestije s recirkulacijom zahtijeva ~ 10 – 20% dodatne energije sustava, što može umanjiti neto dobit od dodatnog bioplina [56]. Dakle, ekonomska isplativost recirkulacije ovisi o tome da li vrijednost dobivenog bioplina (ili poticajne tarife za tu energiju) pokriva povećane troškove pogona.

²² visokomolekularni organski spojevi koji nastaju tijekom razgradnje i humifikacije organske tvari u tlu, kompostu, tresetu ili digestatu

I.4. Anaerobna digestija mulja

Anaerobna digestija (AD) mulja je tehnologija obrade komunalnog (i nekog industrijskog) otpadnog mulja, u kojoj se biološkom razgradnjom bez prisustva kisika stabilizira organska tvar u mulju i istodobno proizvodi bioplin bogat metanom. Ova tehnologija primjenjuje se ponajviše na mulj s UPOV-a. U tipičnom UPOV-u nastaju dvije vrste mulja: primarni mulj (iz taložnika, bogat sirovom organskom tvari) i sekundarni ili aktivni mulj (biomasa iz procesa aeracije). AD spaja te tokove i provodi ih kroz zagrijani, zatvoreni reaktor – digestor, gdje ih bakterijske zajednice razgrađuju u više faza (hidroliza, acidogeneza, acetogeneza, metanogeneza). Krajnji produkti su: bioplin (mješavina ~60-65% CH₄, ostatak CO₂ i tragovi drugih plinova) te stabilizirani digestirani mulj [132]. AD mulja se često naziva i “stabilizacija mulja”. Proces značajno smanjuje mirise, patogene i količinu organske tvari u mulju te time olakšava daljnje rukovanje (odvodnju, sušenje ili konačno zbrinjavanje).

U tehnološkom smislu, AD mulja odvija se najčešće u velikim kružnim ili kvadratnim betonskim spremnicima zapremine od nekoliko stotina do nekoliko tisuća kubika, pri mezofilnim uvjetima (~35 °C) ili termofilnim (~55 °C) [100] (Slika 63). Mulj se kontinuirano ili u šaržama uvodi u digestore, gdje ga miješalice ili recirkulacija plina homogenizira. U odsutnosti kisika, bakterije razgrađuju složene u jednostavnije spojeve (ugljične lance, proteine, masti u šećere, aminokiseline, masne kiseline). Finalni rezultat kemijskih reakcija su metan i voda/CO₂, koji u kombinaciji daju bioplin. Masena bilanca organske tvari u sustavu s recirkulacijom otpadnog mulja može se aproksimirati izrazom:

$$\dot{m}_{VS,ulaz} + \dot{m}_{VS,recirk} = \dot{m}_{VS,razgrađeno} + \dot{m}_{VS,izlaz}$$

gdje je

$\dot{m}_{VS,ulaz}$ maseni protok hlapivih krutih tvari u svježe dovedenom mulju;

$\dot{m}_{VS,recirk}$ maseni protok hlapivih krutih tvari u recirkuliranom mulju;

$\dot{m}_{VS,razgrađeno}$ količina hlapivih krutih tvari koja se biološki razgradi; a

$\dot{m}_{VS,izlaz}$ količina hlapivih krutih tvari koja napušta sustav u stabiliziranom mulju.

Proizvodnja bioplina može se povezati s razgrađenom organskom tvari izrazom:

$$\dot{V}_{bioplina} = Y_{CH_4} \cdot \dot{m}_{VS,razgrađeno}$$

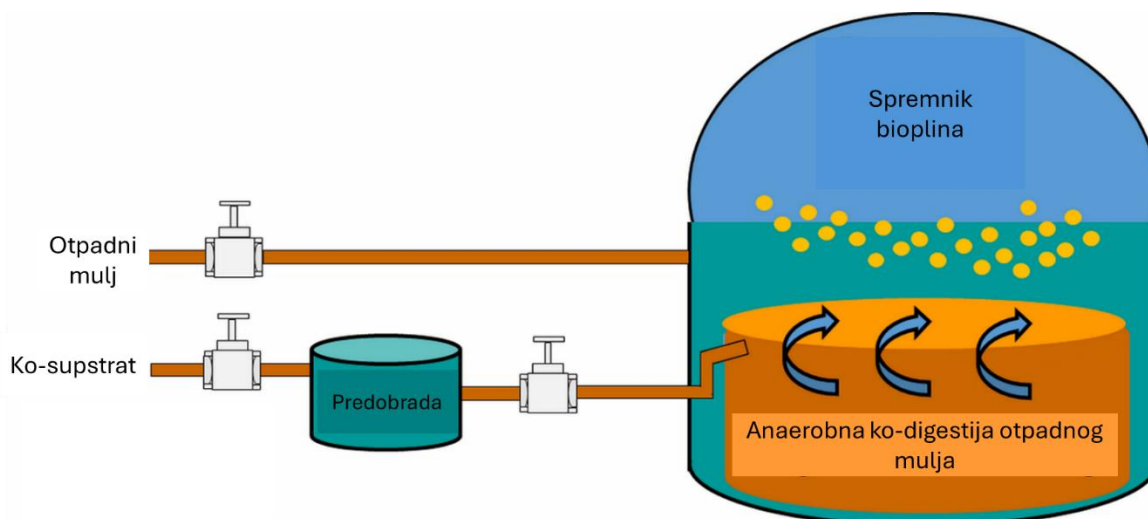
gdje je

$\dot{V}_{bioplina}$ volumni protok proizvedenog bioplina; a

Y_{CH_4} specifični prinos metana po jedinici razgrađenih hlapljivih krutih tvari.

Ovaj višestupanjski proces zahtijeva finu ravnotežu – npr. pH se održava blago bazičnim (oko 7-7,5), zahvaljujući alkalitetu mulja [100]. Vrijeme zadržavanja mulja u digestoru obično je 15-25 dana (mezofilno) što omogućuje dovoljno dugu razgradnju sporijih komponenti. Tokom tog

perioda, volumno se produkcija bioplina kreće oko 0,5-0,8 m³ bioplina po kilogramu dodane organske ST, ovisno o sastavu mulja. Digestirani mulj koji izlazi ima reduciranu hlapivu krutu tvar (engl. *volatile solids*, VS) za oko 40-60% u odnosu na ulazni mulj. Digestirani mulj je znatno manje sklon truljenju (jer su najlakše razgradive tvari već degradirane). Bioplin se kontinuirano skuplja na vrhu reaktora i cjevovodima odvodi do plinskog spremnika ili izravno u kogeneracijsko postrojenje. Tehničke komponente uključuju grijače (toplinski izmjenjivači za održavanje temperature), sustav za doziranje mulja i za recirkulaciju (često se dio vrućeg digestata vraća na ulaz radi grijanja svježeg mulja i održanja populacije mikroba). Ključni parametri za praćenje su udjel ST mulja (obično se mulj razrjeđuje na 3-8% ST prije ulaska u digester zbog bolje miješljivosti), omjer C:N:P (mikroorganizmima treba i nešto dušika i fosfora za rast, što mulj uglavnom ima dovoljno) te toksične supstance (teški metali i toksini mogu inhibirati mikrobe ako su u visokoj koncentraciji) [133]. Tehnički princip dakle leži u prirodnom mikrobiološkom procesu razgradnje bez kisika, koji se odvija unutar kontroliranih uvjeta radi maksimiziranja stvaranja metana umjesto nusprodukata (poput kiselina koje bi snizile pH previše).



Slika 63. Shema proces digestije otpadnog mulja s UPOV-a [134]

AD otpadnog mulja je visokog stupnja tehnološke zrelosti – TRL 9. To je provjerena tehnologija koja se primjenjuje više od 100 godina (prvi digestori za kanalizacijski mulj u Europi su izgrađeni početkom 20. stoljeća). Danas je sastavni dio mnogih velikih uređaja za pročišćavanje: gotovo sve veće aglomeracije (>50.000 stanovnika) u razvijenim zemljama imaju anaerobnu digestiju mulja kao standardni postupak [135]. U EU postoji preko tisuću postrojenja za AD mulja – prema podacima, od ~15.000 UPOV-a u EU, oko 1.240 ima anaerobne digestore za proizvodnju bioplina [136]. Napomenimo da se i dalje uvode inovacije (npr. termofilna digestija, višestupanjska digestija, ko-digestija s dodanim supstratima), ali osnovna tehnologija AD mulja je potpuno dokazana i široko komercijalno dostupna. Regulatorni poticaji (poput ciljeva OIE za bioplin, smanjenje odlaganja mulja) su dodatno raširili ovu tehnologiju. U nekim državama (npr. Njemačka, Nizozemska) gotovo 100% komunalnog mulja prolazi AD prije konačne obrade. Prema izvješću Europske komisije, oko

8,7% ukupne proizvodnje bioplina u EU dolazi iz mulja komunalnih voda [110], što pokazuje značajan doprinos – u 2016. to je bilo ~1,4 Mtoe energije iz mulja.

AD mulja donosi višestruke koristi. Smanjenje količine i stabilizacija mulja: digestijom se tipično reducira masa hlapivih tvari u mulju za 40-50%, što znači manje mulja za daljnju obradu (dehidraciju, transport) [114]. Digestirani mulj je stabilniji – sporije se razgrađuje i manje miriše, te ima znatno smanjen sadržaj patogenih organizama (mezofilna digestija ukloni >90% koliforma²³, termofilna gotovo 100%). Time je takav mulj pogodniji za korisnu primjenu (npr. u poljoprivredi) ili sigurnije odlaganje. Proizvodnja obnovljive energije jedna je od najvećih prednosti – bioplin iz mulja može se koristiti za proizvodnju električne energije i topline u kogeneraciji, čime UPOV postaje energetski djelomično samodostatan. Mnoga postrojenja pokrivaju 50-100% svojih energetskih potreba iz vlastitog bioplina, smanjujući troškove i ugljični otisak. Neka čak izvoze višak energije u mrežu. S ekološkog stanovišta, AD smanjuje emisiju metana u okoliš – da mulj ide na odlagalište ili izravno na polje, aerobno bi trulio i emitirao metan nekontrolirano; ovako se metan skuplja i korisno upotrebljava, što je pozitivan doprinos smanjenju stakleničkih plinova. AD također smanjuje negativan utjecaj organskih onečišćivača: mnogi kompleksni spojevi se anaerobno razgrađuju ili barem transformiraju u manje štetne oblike. Učinkovitost procesa pročišćavanja se povećava jer AD mulja smanjuje volumen koji se mora dehidrirati i kemikalije za stabilizaciju (npr. manje potrebe za vapnom ili polielektrolitima u daljnjim koracima). Prednost je i smanjenje mirisa u konačnom rukovanju muljem – digestat ima “zemljan” miris umjesto oštrog gnjilog smrada sirovog mulja. Tako se lakše skladišti i transportira kroz naseljena područja. Konačno, AD je generator prihoda/pokrića troškova – proizvodnjom energije i eventualno nusproizvoda (npr. struvit se može kombinirati s AD), komunalno poduzeće može smanjiti operativne troškove ili ostvariti prihod, što pomaže ekonomskoj održivosti sustava odvodnje.

Glavna ekonomska vrijednost AD mulja dolazi od proizvedene energije. Kogeneracijom bioplina u struju i toplinu, postrojenje smanjuje svoje račune za struju i može dobiti prihode od prodaje viškova. U mnogim zemljama su postojale FiT ili premije za električnu energiju iz bioplina, što je financijski vrlo povoljno za komunalna poduzeća – time se investicija u digestore otplaćivala kroz uštede i prihode u razdoblju od, primjerice, 8-12 godina [137]. Drugi financijski dobitak je smanjenje troškova zbrinjavanja mulja: dehidrirani digestat je stabilniji i smanjenog volumena, pa troškovi transporta i konačne obrade (bilo kompostiranja, izgaranja ili odlaganja) padaju [138]. AD proces ima i operativne troškove: grijanje (koje se uglavnom pokrije iz bioplina), miješanje (električna energija za miješalice ili pumpe), održavanje opreme i kemikalije za eventualno dodavanje (hranjive tvari ili antikorozivi za H₂S). Ti troškovi obično zahtijevaju dio proizvedene energije, ali ostaje neto dobit. Prema studijama iz UK, AD mulja može smanjiti ukupne troškove upravljanja muljem za ~20-50% u odnosu na aerobnu stabilizaciju, uzimajući u obzir i vanjsko zbrinjavanje, osobito ako se uračunaju prihodi od energije [139]. Stoga su mnoge vodovodne kompanije AD-u pristupile i kao investiciji koja se dugoročno isplati. Na primjer, na Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda Grada Zagreba (CUPOVZ) provodi se mezofilna AD viška aktivnog mulja. U sklopu procesa stabilizacije, organska tvar se razgrađuje uz proizvodnju bioplina, koji se potom koristi u kogeneracijskim jedinicama za istodobnu proizvodnju električne i toplinske energije [140]. Proizvedena električna energija koristi se prvenstveno za pokrivanje vlastitih potreba postrojenja, čime se smanjuje ovisnost o vanjskoj opskrbi i troškovi električne energije.

²³ skupina bakterija koje se koriste kao pokazatelji mikrobiološke kakvoće vode, tla ili organskih materijala

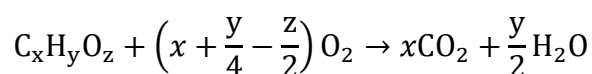
Toplinska energija koristi se za održavanje procesne temperature digestora te za druge potrebe unutar sustava, čime se zatvara unutarnja energetska bilanca postrojenja. Na taj način CUPOVZ funkcionira kao primjer energetske djelomično samodostatnog sustava unutar komunalne infrastrukture. Osim energetske koristi, AD na CUPOVZ-u doprinosi i smanjenju volumena te stabilizaciji mulja, što rezultira nižim troškovima daljnjeg zbrinjavanja, transporta i obrade. Stabilizirani digestat ima manji sadržaj lako razgradive organske tvari, smanjeno stvaranje neugodnih mirisa i bolja svojstva za daljnje postupke obrade.

S holističkog stajališta, UPOV s AD prelazi od potrošača energije ka energetsom proizvođaču, i od generatora otpada ka proizvođaču resursa (digestat kao gnojivo). To se uklapa u viziju održivih “postrojenja za obradu vode” koja ne samo da čiste vodu nego i vraćaju resurse. Neke analize životnog ciklusa pokazale su da AD mulja smanjuje ukupne utjecaje pročišćavanja otpadnih voda za 20-35% u kategorijama klimatskih promjena i zakiseljavanja, upravo zbog povrata energije i hranjivih tvari [141]. Stoga je ova tehnologija često promovirana od strane EU i drugih međunarodnih tijela kao najbolja praksa za velike sustave. Naravno, za potpuni održivi ciklus, idealno je kombinirati AD s iskorištavanjem digestata (npr. u poljoprivredi uz rekuperaciju P) i s minimizacijom štetnih ostataka (poput mikroplastike, koja ostaje izazov – AD je ne uklanja, samo je fizički koncentrira u mulju).

I.5. Termička obrada – izgaranje

Izgaranje otpadnog mulja ili digestata podrazumijeva termalnu obradu pri visokoj temperaturi uz prisustvo kisika, pri čemu organska tvar potpuno izgara do plinovitih produkata (CO_2 , H_2O , oksidi dušika i dr.), a anorganski ostatak se pretvara u pepeo ili šljaku. Glavni cilj spaljivanja je smanjiti količinu otpada i uništiti opasne ili neugodne komponente (patogene, organske toksine). Za otpadni mulj, postoje dvije osnovne prakse u EU: (a) monoizgaranje mulja – specijalizirane spalionice dizajnirane samo za mulj ili u kombinaciji s drugim otpadom, gdje se mulj prethodno dehidrira i eventualno osuši do ~30-90% ST prije ulaska u ložište; i (b) ko-izgaranje – izgaranje mulja zajedno s drugim gorivima, npr. u cementnim pećima, termoelektranama na ugljen ili spalionica komunalnog otpada, gdje mulj služi kao dodatno gorivo i istovremeno se zbrinjava. U oba slučaja krajnji ostaci su pepeo (fini neizgorivi materijal) i eventualno šljaka (otopljeni ostaci ako su temperature vrlo visoke), koje sadrže minerale poput silikata, oksida metala i koncentrirane nutrijente (fosfor u obliku P_2O_5 u pepelu). Spaljivanje mulja može biti mokro (izravno sagorijevanje dehidriranog mulja ~30% ST u fluidiziranom sloju s dodatkom topline) ili suho (mulj se prethodno osuši na >85% ST pa se spaljuje gotovo kao čvrsto gorivo) [142].

U procesu izgaranja se odvija brza egzotermna oksidacija organske tvari. Za komunalni mulj/digestat koji je prethodno osušen, goriva komponenta se često aproksimira empirijskom formulom tipa CH_aO_b . Opća stehiometrijska reakcija s kisikom u teoriji izgleda ovako:



Energetska bilanca procesa spaljivanja digestata i mulja ($\dot{Q}_{\text{kotao}}$) temelji se na donjoj ogrjevnoj vrijednosti suhe tvari i može se u pojednostavljenom obliku zapisati kao:

$$\dot{Q}_{\text{kotao}} = \dot{m}_{\text{ST}} \cdot LHV_{\text{ST}} = \dot{Q}_{\text{para/toplina}} + \dot{Q}_{\text{gubici}} + \dot{Q}_{\text{isparavanje}}$$

gdje je:

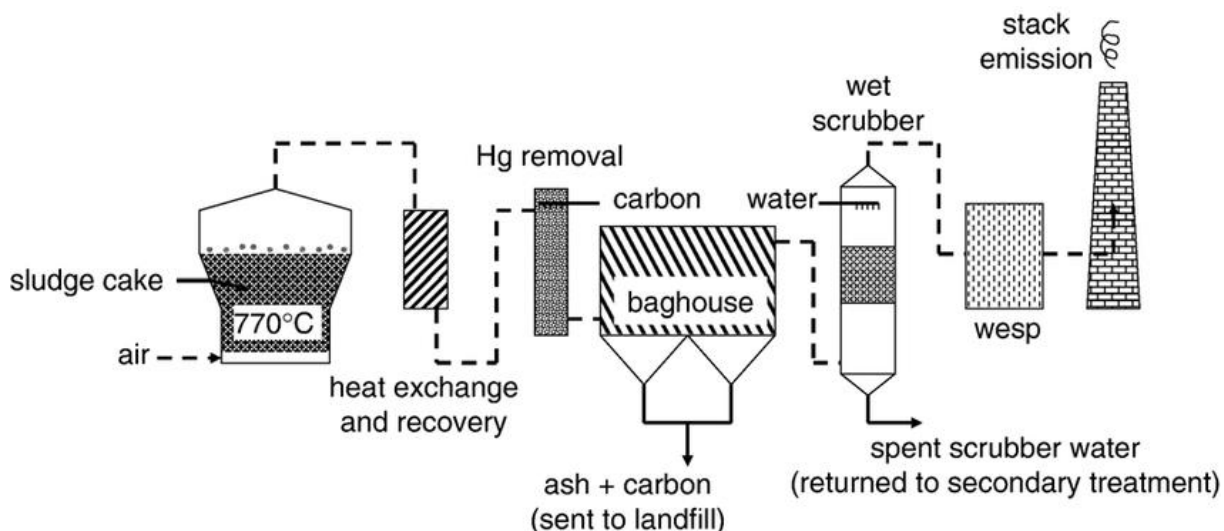
LHV_{ST} – donja ogrjevna vrijednost suhe tvari mulja (funkcija sadržaja organske tvari; tipično 8–14 MJ/kg_{ST} za stabilizirani mulj, više za biomasu);

$\dot{Q}_{\text{para/toplina}}$ – korisno iskorištena toplina (para, grijanje);

$\dot{Q}_{\text{gubici}}$ – gubici kroz dimne plinove, zračenje i toplinske mostove;

$\dot{Q}_{\text{isparavanje}}$ – toplina utrošena na isparavanje vlage u mulju (ako se spaljuje nedovoljno osušen mulj).

U tipičnoj monospalionici mulja (Slika 64.), prethodno mehanički odvodnjeni mulj (20-30% ST) prvo se suši (najčešće iskoristivom toplinom iz procesa) do visokog udjela ST (~90%). Osušeni mulj zatim ulazi u ložište – često tipa fluidiziranog sloja ili rotacijske peći – gdje se pri temperaturama 800-900 °C organski ugljik oksidira. Za stabilno izgaranje, mulj se može miješati s pomoćnim gorivom (npr. zemni plin ili mazut) ako nema dovoljnu ogrjevnju vrijednost samostalno. U fluidiziranom sloju, vrući pijesak se koristi za prijenos topline i ravnomjerno izgaranje mulja u suspenziji. Plinovi izgaranja (dimni plin) sadrže CO₂, vodenu paru, dušik, te okside dušika (NO_x), sumporne okside (SO₂ ako ima S), klorovodik (HCl ako ima klora u mulju), te pepeo u lebdećim česticama. Stoga spalionice imaju sustave za pročišćavanje dimnih plinova: cikloni i vrećasti filteri za hvatanje lebdećih čestica pepela, reaktori s vapnom ili natrijevim bikarbonatom za neutralizaciju kiselih plinova (HCl, SO₂), te selektivnu katalitičku ili nekatalitičku redukciju za NO_x. Preostali pepeo se skuplja iz peći i iz filterskog sustava (leteći pepeo). Količina pepela je tipično oko 10-20% mase suhog mulja (jer mulj ima toliko anorganskih tvari) [143]. Kod ko-izgaranja, princip je sličan, samo se mulj dodaje postojećem procesu – npr. u cementnoj peći mulj (često prethodno osušen) se unosi i sagorijeva, a pepeo postaje dio klinkera cementa (time se fosfor i silikati ugrađuju u cement). U elektrani na ugljen, mulj se može raspršiti u kotao zajedno s ugljenom prašinom. Ključno je da se održava dovoljna temperatura i vrijeme zadržavanja (obično >2 sekunde iznad 850 °C prema EU regulativi za spalionice) kako bi se osiguralo potpuno uništenje organskih spojeva i patogena. Termička energija oslobođena spaljivanjem može se iskoristiti – najčešće za proizvodnju pare i struje (spalionice imaju kotlove za parno turbinsko postrojenje) ili za toplinu (npr. daljinsko grijanje). Međutim, zbog visoke vlažnosti mulja energetske doprinos je umjeren; često je potrošnja energije za sušenje značajna, pa neto energija ovisi o supstituciji goriva i učinkovitosti.



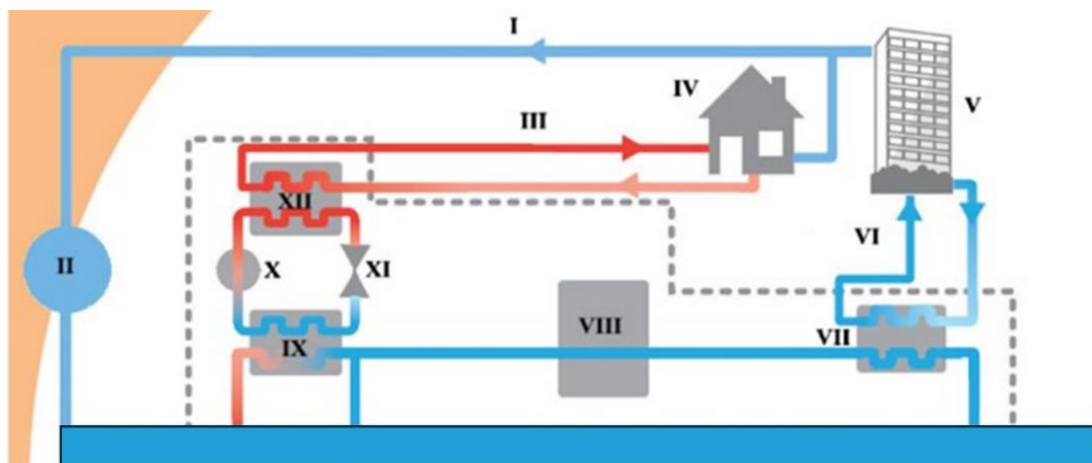
Slika 64. Shema postrojenja za termičku obradu otpada [144]

Izgaranje otpadnog mulja je potpuno komercijalizirana tehnologija (TRL 9). U mnogim europskim državama postoji duga tradicija termičke obrade mulja, osobito tamo gdje je reducirana mogućnost poljoprivredne uporabe. Već 1970.-ih su građene prve spalionice mulja (npr. u Njemačkoj). Danas u Europi rade deseci monospalionica mulja i stotine postrojenja za su-spaljivanje. Tehnologija je zrela: raspoloživi su standardizirani kotlovi, sušaci, plamenici, i sustavi za čišćenje dimnih plinova prilagođeni mulju [145]. Stalnim poboljšanjima smanjene su emisije na vrlo niske razine, pa moderni objekti ispunjavaju stroge EU Direktive o spalionicama otpada (2010/75/EU). Također, pojedine države planiraju obvezu spaljivanja mulja radi povrata fosfora (Njemačka od 2029. za velike UPOV-e) i već računaju na postojeće tehnološke kapacitete.

I.6. Dizalice topline

Uloga dizalica topline je uloga iskorištavanje niskotemperaturnih toplinskih izvora prisutnih u sustavu – ponajprije otpadnih voda, otpadnih tokova iz linije mulja (supernatant, procesne vode, rashladne vode) te topline sadržane u digestatu – i pretvaranje te topline u korisnu energiju više temperaturne razine za potrebe samog postrojenja ili vanjskih potrošača. Na taj se način povećava ukupni stupanj energetske učinkovitosti sustava, smanjuje potrošnja primarne energije i pridružene emisije stakleničkih plinova, bez promjene osnovne funkcije tehnologija koje obrađuju otpadne tokove.

Dizalice topline (toplinske pumpe) omogućuju prijenos toplinske energije iz izvora niske temperature (npr. otpadna voda, zrak, tlo) na višu temperaturu pogodnu za grijanje prostora ili potrošne tople vode (Slika 65). U kontekstu kružnog gospodarstva, osobito su važne dizalice topline koje iskorištavaju otpadnu toplinu iz komunalnih ili industrijskih otpadnih voda – energiju koja bi se inače izgubila, pretvaraju u korisnu toplinsku energiju [44].



Slika 65. Shema korištenja energije iz otpadnih voda putem dizalica topline [146]

I = sustav otpadnih voda; II = UPOV; III = mreža za daljinsko grijanje; IV = korisnik daljinskog grijanja; V = korisnik daljinskog hlađenja; VI = mreža za daljinsko hlađenje; VII = izmjenjivači toplote; VIII = akumulator rashlađene vode; IX = isparivač; X = kompresor; XI = ekspanzijski ventil; XII = kondenzator

Osnovni princip rada toplinske dizalice temelji se na kruženju radne tvari kroz četiri glavne faze: isparavanje pri niskom tlaku na strani hladnog izvora, kompresija pare, kondenzacija pri višem tlaku na strani toplog izvora te ekspanzija natrag na niži tlak. Na strani hladnog izvora (otpadna voda, digestat, supernatant) radna tvar preuzima toplinu pri relativno niskoj temperaturi (tipično 10–25 °C), zatim se pri kompresiji diže njezina temperatura, a na strani toplog izvora ta se toplina predaje potrošačima na višoj razini (npr. 40–70 °C). COP definira odnos između isporučene toplote i utrošene električne snage kompresora, pri čemu veće vrijednosti COP ukazuju na višu energetska učinkovitost [147]:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{HP}}}{\dot{W}_{\text{el,HP}}}$$

gdje je

$\dot{Q}_{\text{HP}}$ toplina isporučena iz dizalice; a

$\dot{W}_{\text{el,HP}}$ električna snaga kompresora.

COP ovisi o temperaturnim razlikama izvora i prijemnika te o izvedbi sustava, pri čemu se u praksi za otpadne vode postižu vrijednosti COP između 3 i 5.

Tehnologija dizalica topline je visoko razvijena i naširoko primijenjena (TRL 9). U kontekstu postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda toplinske dizalice se mogu integrirati na više razina. Na liniji vode mogu se koristiti toplina pročišćene otpadne vode ili kanalizacijskih tokova prije ulaska u uređaj, dok se na liniji mulja mogu koristiti toplinski tokovi povezani s digestatom, supernatantom nakon dehidracije ili procesnim vodama iz postupaka sušenja. Tako dobivena toplina može se koristiti za grijanje mezofilnih ili termofilnih digestora, predgrijavanje mulja prije ulaska u digestore, održavanje uvjeta u procesima hidrolize i sušenja mulja te grijanje zgrada unutar postrojenja ili priključenog sustava daljinskog grijanja. Toplinske dizalice se na

taj način pojavljuju kao horizontalna tehnologija koja se može nadograditi na različite konfiguracije osnovnih tehnologija obrade otpadnih tokova. Saravia Matus et al. [148] ističu potencijal dizalica topline koje koriste toplinu otpadnih voda u održivom gospodarstvu. Prema izvješću, u velikim UPOV-ima mogu se instalirati toplinske pumpe koje izvlače energiju iz tople otpadne vode te njome zagrijavaju vodu u toplinskim sustavima zgrada. Takve dizalice topline su vrlo učinkovite – za svaki 1 kWh utrošene električne energije mogu proizvesti 2–4 kWh korisne topline. Time se otpadna toplina reciklira natrag u energetske sustav grada, smanjuje se potrošnja fosilnih goriva za grijanje i ostvaruje princip kružnog gospodarstva u sektoru upravljanja otpadom i vodama.

Toplinska bilanca postrojenja s integriranom toplinskom dizalicom može se u pojednostavljenom obliku izraziti relacijom u kojoj se ukupne toplinske potrebe sustava pokrivaju kombinacijom topline iz procesa izgaranja (bioplin, mulj) i topline iz toplinske dizalice, umanjene za toplinske gubitke:

$$\dot{Q}_{\text{potrebe}} = \dot{Q}_{\text{izgaranja}} + \dot{Q}_{\text{HP}} - \dot{Q}_{\text{gubici}}$$

gdje je

$\dot{Q}_{\text{potrebe}}$ ukupna toplinska potreba postrojenja (grijanje digestora, predgrijavanje mulja, sušenje, grijanje zgrada);

$\dot{Q}_{\text{izgaranja}}$: toplina dobivena iz izgaranja bioplina ili mulja;

$\dot{Q}_{\text{HP}}$: toplina isporučena iz dizalice topline;

$\dot{Q}_{\text{gubici}}$: ukupni toplinski gubici sustava.

Ovakav pristup omogućuje proračun kako energetskog, tako i okolišnog učinka integracije, ovisno o ugljičnom intenzitetu elektroenergetskog sustava.

U zemljama poput Austrije, Njemačke, Danske i Nizozemske postoje brojni primjeri uspješnih sustava. U Beču je u centralizirani sustav grijanja ugrađena dizalica topline snage 55 MW koja koristi toplinu pročišćene otpadne vode za grijanje 56.000 kućanstava, s planom proširenja na 112.000 do 2027. godine. Njemački gradovi poput Hamburga i Frankfurta također koriste energiju otpadne vode. U skandinavskim zemljama sustavi povrata topline iz komunalnih voda koriste se za grijanje bazena, bolnica i industrijskih objekata [149].

Dizalice topline omogućuju visok stupanj energetske učinkovitosti i značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova. Koriste lokalno dostupnu, "nevidljivu" obnovljivu energiju iz otpadne topline. Smanjuju se troškovi grijanja te emisije CO₂, a tehnologija je skalabilna i može se prilagoditi lokalnim uvjetima. Međutim, investicijski trošak je relativno visok, osobito za velike centralizirane sustave. Potrebna je dostupnost stabilnog izvora otpadne topline, kao i pristup toplinskoj mreži ili sustavu distribucije. U nekim slučajevima mogu biti potrebne dodatne mjere za sprječavanje nakupljanja kamenca ili korozije zbog karakteristika otpadne vode. Dizalice topline predstavljaju ekonomično dugoročno rješenje, osobito u urbanim sredinama s kontinuiranim toplinskim potrebama. Vijek trajanja sustava je dug (15–25 godina), a operativni troškovi niski [150]. Okolišno, doprinose ciljevima dekarbonizacije i energetske učinkovitosti te omogućuju integraciju sektora vode i energije u kružno gospodarstvo. Povrat investicije često je moguć u roku od 5–10 godina, ovisno o veličini i uvjetima.

PRILOG II. ANALIZA OSJETLJIVOSTI

Ia. Analiza osjetljivosti – opcija a

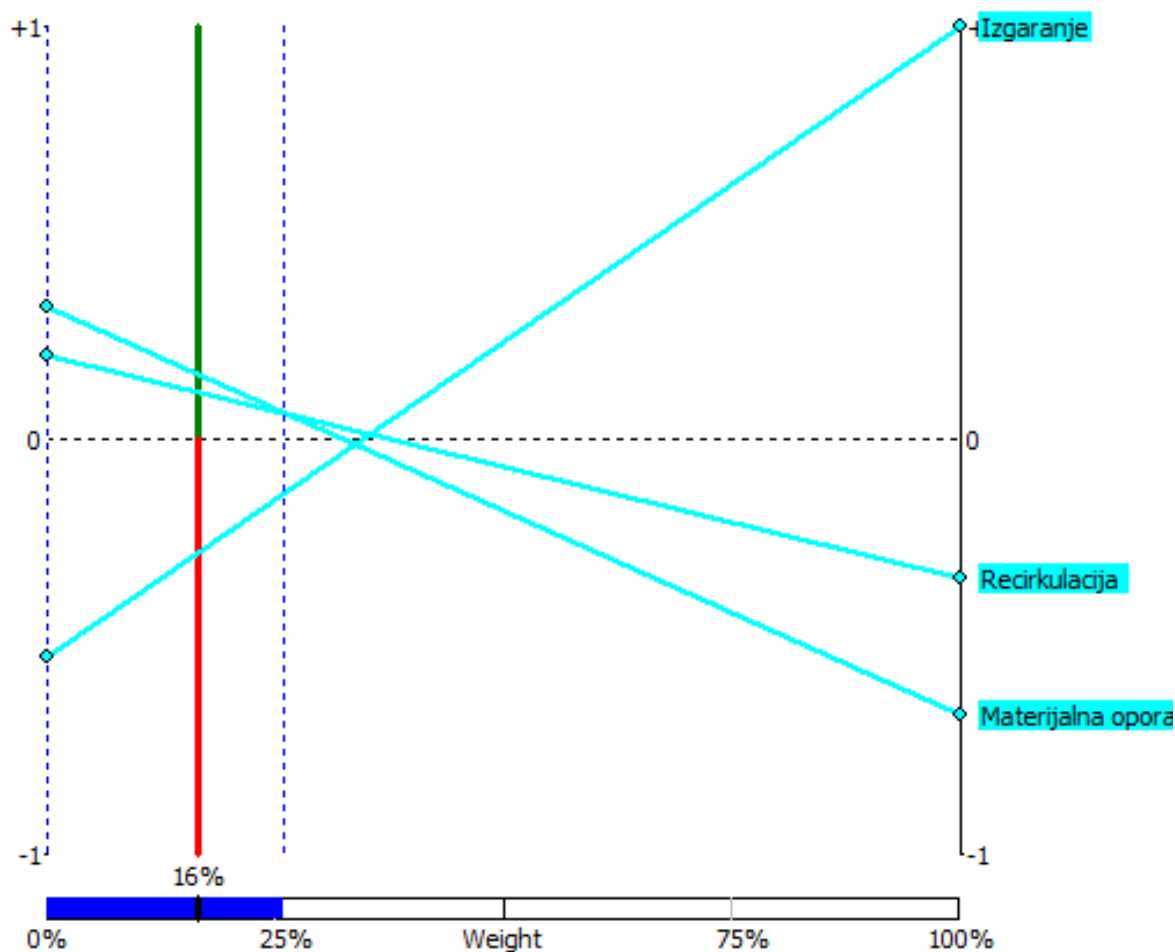
Potrebno je imati na umu kako se PROMETHEE i GAIA metode snažno oslanjaju na različite pretpostavke koje omogućavaju analiziranje problema donošenja odluke i omogućuju donositelju odluka kvalitetnu preporuku.

Iako su razne empirijske studije pokazale kako je PROMETHEE metoda poprilično robusna u pogledu pragova preferencijskih funkcija, težine kriterija većinom imaju snažan utjecaj na rezultat analize, naročito kad su u pitanju vrlo oprečni kriteriji.

Zbog toga je provedba analize osjetljivosti kriterija neophodna te PROMETHEE uključuje nekoliko alata kako bi ista bila provediva. U ovom radu će se koristiti *Visual Stability Intervals* alat, koji omogućava korisniku iscrpnu analizu osjetljivosti težina kriterija – on prikazuje kako *Phi* rezultat i PROMETHEE II rangiranje variraju kao funkcije težina kriterija te identificira interval stabilnosti najbolje rangiranih tehnologija (opcija). Zbog velikog broja kriterija koji su definirani u ovoj disertaciji, razmatrane su grupe kriterija (*Tehnologija, Energija, Ostalo, Pravno-administrativni okvir, Troškovi i Emisije*) u ukupnom rezultatu.

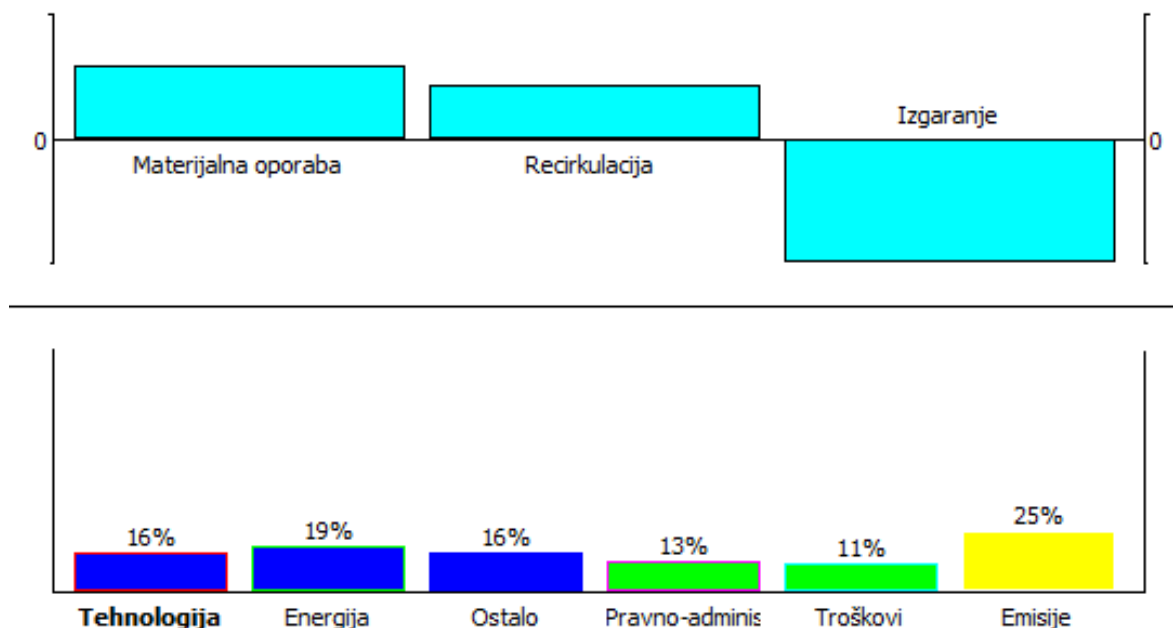
U nastavku su prikazane analize po grupama kriterija, no prvo je potrebno objasniti grafičke prikaze (Slika 66. – primjer za grupu kriterija „Tehnologija“). Horizontalna dimenzija odgovara težini razmatranog kriterija, dok vertikalna dimenzija odgovara *Phi* ukupnom rezultatu. Za svaku tehnologiju prikazana je linija (zeleno-crvena) koja prikazuje ukupni rezultat kao funkciju težine razmatrane grupe kriterija. Na desnom rubu prikaza, težine su grupe kriterija jednake 100% (maksimalna težina na određenoj grupi kriterija), a tehnologije rangirane na temelju razmatrane grupe kriterija. Na lijevom rubu su prikazane težine grupe kriterija jednake 0% (minimalna težina na određenoj grupi kriterija). Pozicija vertikalne zeleno-crvene linije označava trenutnu težinu grupe kriterija – u ovom slučaju za talijanski primjer, gdje je prikazan ukupni rezultat u prethodnom poglavlju, dok presjek linija tehnologija sa vertikalnom linijom označava PROMETHEE II rangiranje.

Kad je u alatu označena opcija „Stupanj stabilnosti“ (engl. *Stability level*), pojavljuju se dvije točkaste vertikalne linije koje prikazuju interval težina unutar kojih najbolja opcija u PROMETHEE II rangiranju ostaje nepromijenjena. Broj tehnologija koje su uzete u obzir (stupanj stabilnosti) može biti postavljen od 1 (razmatrana samo optimalna tehnologija, tj. konačan odabir) do 5 (uzete u obzir sve tehnologije – cjelokupno rangiranje). U razmatranim prikazima uzete su u obzir sve tehnologije, kako bi se prikazao utjecaj grupe kriterija na sve tehnologije.



Slika 66. Primjer prikaza Visual Stability Intervals – opcija a

Analizu je dodatno moguće potkrijepiti korištenjem alata *Walking Weights*, koji omogućava promjenu težina kriterija i njihov utjecaj na PROMETHEE II rangiranje. U gornjem dijelu slike je prikazano PROMETHEE II rangiranje, dok se u donjem dijelu slike nalaze grupe kriterija i njihove težine. Pomoću klizne funkcije na dnu, moguće je pomicati težine određene grupe kriterija i vidjeti njegov utjecaj na konačni rezultat. Na Slika 67. su prikazani rezultati za razmatran slučaj i prethodno definirane težinske vrijednosti kriterija.

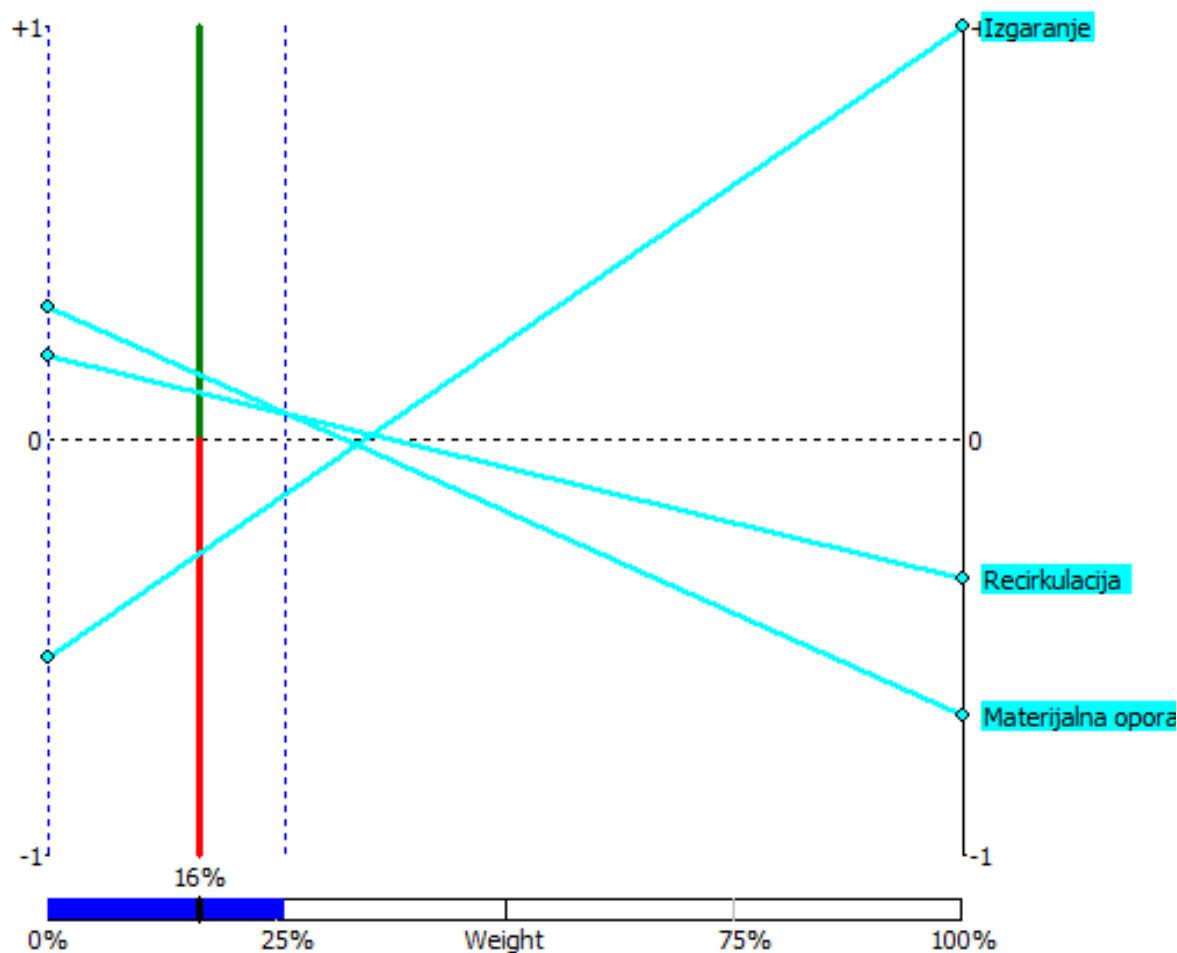


Slika 67. Prikaz odabira tehnologije u slučaju prethodno definiranih težina grupa kriterija za Italiju – opcija a

Grupa kriterija Tehnologija (opcija a)

Tehnološka skupina kriterija pokazala se kao najutjecajniji faktor u ukupnom PROMETHEE poretku. Kriteriji kao što su TRL, pouzdanost, kompleksnost sustava, mogućnost integracije u postojeću infrastrukturu i fleksibilnost u radu s promjenjivim ulaznim tokovima otpada imali su ključnu ulogu u formiranju rezultata. U pogledu grupe kriterija „Tehnologija“ (Slika 68), moguće je uočiti vrlo malen prostor za mijenjanje težina kriterija, bez utjecaja na odabir tehnologije energetske/materijalne uporabe otpada. Ovoj grupi pripadaju sljedeći kriteriji: *Pouzdanost tehnologije*, *Zrelost tehnologije* te *Poznavanje tehnologije*. U PROMETHEE II rangiranju, tehnologija **IIa** je odabrana kao najbolja, no samo unutar malo raspona kriterijskih težina. To znači da, ukoliko bi se grupi kriterija *Tehnologija* dala veća ili manja težina, za samo nekoliko postotaka, druga tehnologija bi bila odabrana kao optimalna. Vizualni alat *Stability Intervals* pokazao je da je rang poretka stabilan dokle god ukupna težina Tehničke grupe kriterija ostaje između 0% i 25,32%. Izvan tog intervala, dolazi do promjene – što ukazuje na osjetljivost odluke na tehničke kriterije: oni su trenutno postavljeni na ~16%, i pomak od $\pm 1\%$ može dovesti do izmjene redoslijeda između vodećih tehnologija. Ovaj rezultat potvrđuje da se odluka o optimalnom rješenju u značajnoj mjeri oslanja na tehničku izvedivost i stupanj komercijalne spremnosti pojedine tehnologije.

Uobičajena je praksa da tehnologije koje imaju viši TRL pokazuju veću stabilnost u rezultatima, jer su tehnički provjerene i imaju dostupnu operativnu evidenciju. U usporedbi s eksperimentalnim tehnologijama, one ostvaruju niži rizik implementacije i kraće vrijeme prilagodbe sustava. U praksi to znači da bi kod planiranja regionalnih ili lokalnih postrojenja ova skupina kriterija trebala zadržati visoki ponder, jer omogućuje donošenje odluka koje su tehnički provedive u kratkom i srednjem roku. Stabilnost rezultata u kontekstu tehničke pouzdanosti doprinosi smanjenju investicijskog rizika i povećava sigurnost ulaganja.



Slika 68. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Tehnologija – opcija a

Grupa kriterija *Energija* (opcija a)

U pogledu grupe kriterija *Energija* (Slika 69.) postoji znatno raspon unutar koje je moguće mijenjati težine kriterija (4,96% do 41,77%), bez promjene odabira i donošenja druge odluke, u usporedbi s prethodnom grupom kriterija. Razlog većeg raspona leži u činjenici da sve razmatrane tehnologije imaju malen raspon vrijednosti kriterija koje se nalaze u ovoj grupi.

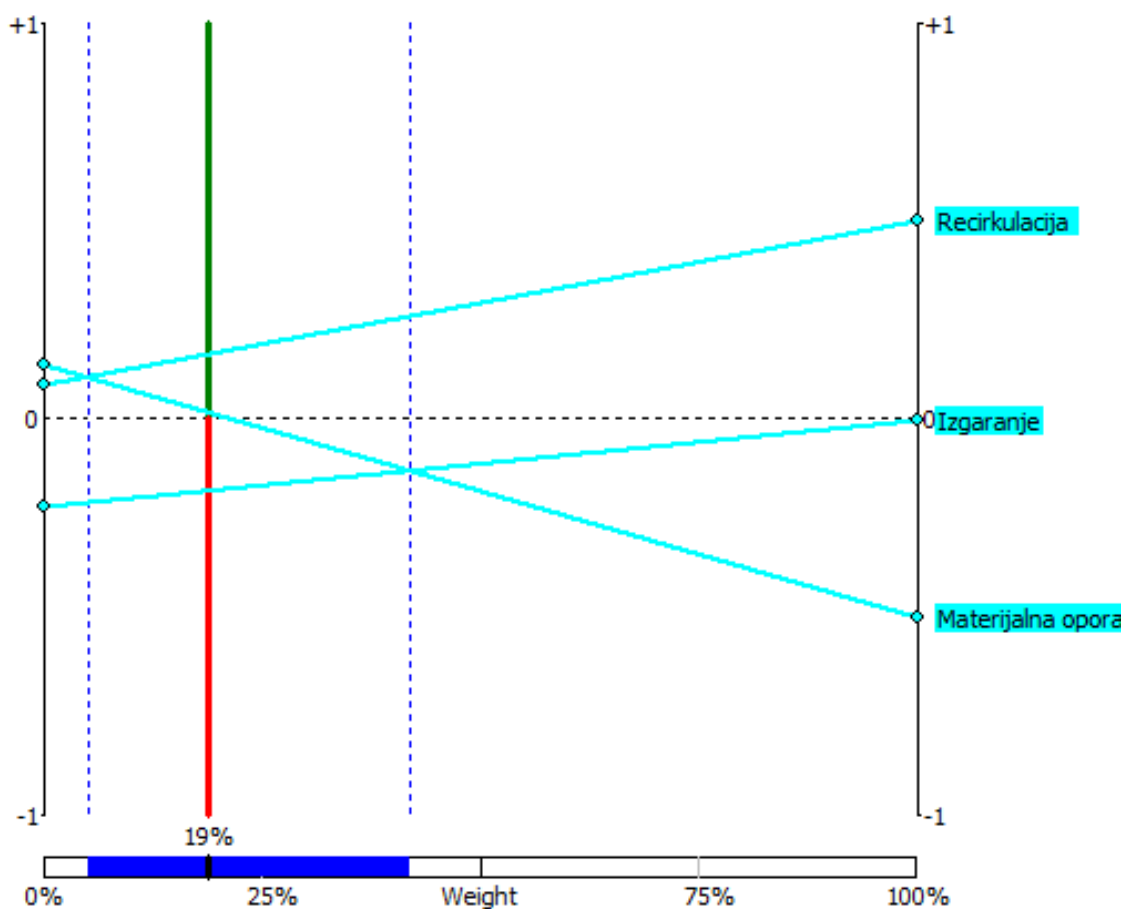
Za grupu kriterija *Energija*, utvrđen je znatno širi raspon stabilnosti – težina te grupe može varirati u širem intervalu bez promjene ranga. To znači da je odluka robusna na promjene prioriteta vezanih uz energetske učinkovitost, što je i očekivano jer sve razmatrane tehnologije ostvaruju slične vrijednosti energetske pokazatelja. Drugim riječima, čak i ako se u procesu odlučivanja znatno poveća važnost energetske parametara, poredak alternativa ostaje gotovo nepromijenjen. Ova stabilnost proizlazi iz činjenice da većina analiziranih tehnologija koristi sinergijske mehanizme pretvorbe energije (npr. kombinaciju električne i toplinske uporabe) koji rezultiraju usporedivim ukupnim energetske učinkom.

Analizom GAIA ravnine (Slika 45.) vidljivo je da su kriteriji električne i toplinske učinkovitosti usmjereni u sličnom vektorskom smjeru, što ukazuje na visoku međusobnu korelaciju –

povećanje važnosti jednoga gotovo uvijek podupire i drugi. S druge strane, kriterij energetske potražnje (količina energije potrebna za rad postrojenja) djeluje u suprotnom smjeru, što znači da njegovo povećanje težine može donekle umanjiti ukupni rezultat energetske intenzivnijih tehnologija (npr. termičke obrade). Time se dodatno potvrđuje da su tehnologije s nižim specifičnim energetskim potrebama u prednosti kada se u odlučivanju teži energetskej učinkovitosti sustava.

Važno je napomenuti da ova grupa kriterija ima strateški značaj jer ne utječe samo na tehničku učinkovitost sustava, već i na njegovu povezanost s energetskim politikama i ciljevima klimatske neutralnosti. Visoka energetska učinkovitost znači niže operativne troškove, manju potrošnju primarne energije i veću otpornost na promjene cijena energenata, što u konačnici povećava dugoročnu održivost i ekonomsku isplativost odabrane tehnologije.

Osim toga, rezultati pokazuju da tehnologije s mogućnošću kogeneracije (istodobne proizvodnje električne i toplinske energije) ostvaruju dodatnu prednost u scenarijima gdje postoji lokalna potražnja za toplinskom energijom – primjerice u industrijskim zonama ili komunalnim sustavima daljinskog grijanja. Time se potvrđuje važnost lokalnog energetskog konteksta pri određivanju težina ove grupe kriterija.

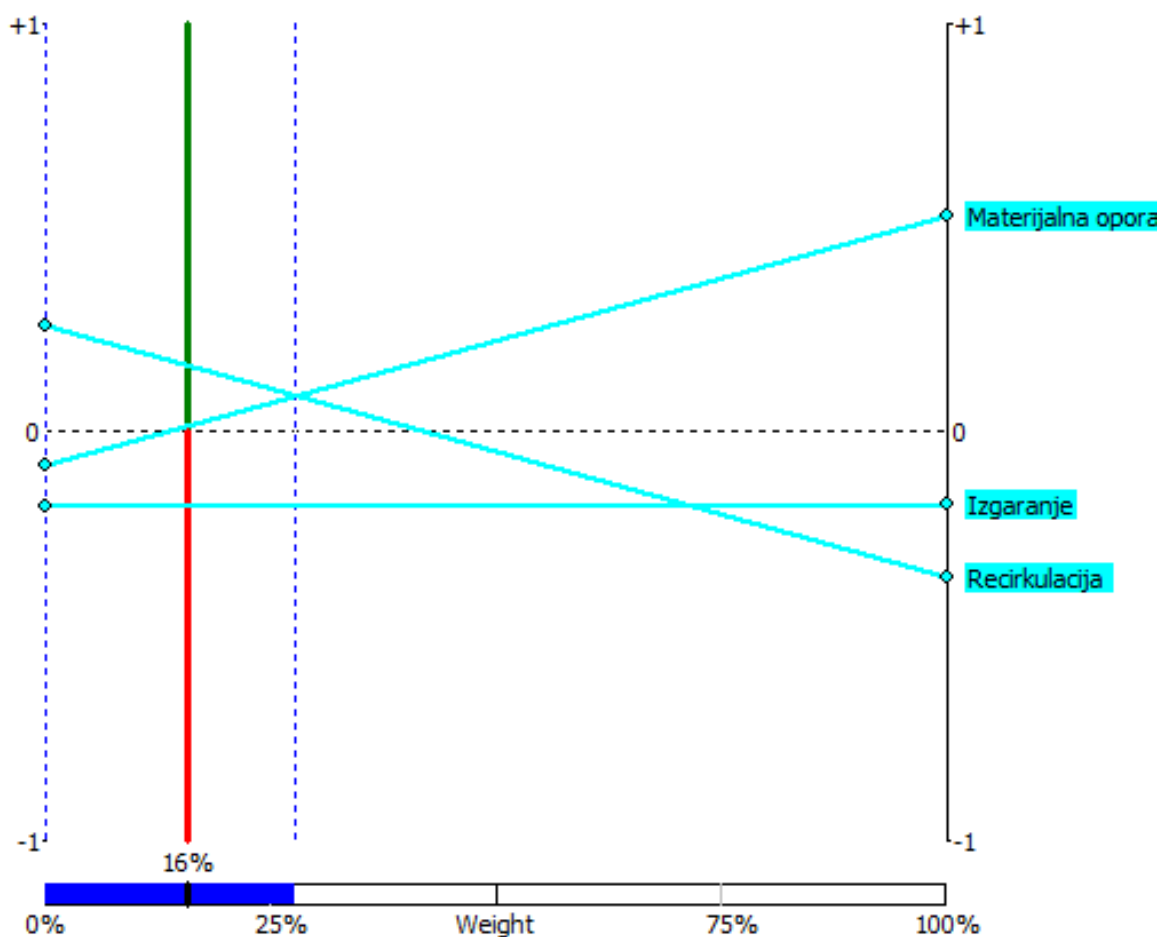


Slika 69. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Energija – opcija a

Grupa kriterija *Ostalo (opcija a)*

Slučaj grupe kriterija *Ostalo* (Slika 70.), kojoj pripadaju kriteriji *Potreba za zemljištem*, *Oporabljeni materijali* te *Potencijal za nadogradnju*, je vrlo slična grupi kriterija *Tehnologija* po pitanju osjetljivosti utjecaja težine kriterija na konačan odabir tehnologije. Iz slike se može vidjeti kako se ponovno radi o velikom rasponu vrijednosti težine kriterija (0% do 27,61%), unutar kojeg je odabrana jedna tehnologija, a to je moguće povezati sa kriterijima koji se u skupini nalaze. Naime, vrijednosti kriterija ove skupine su prilično širokog raspona i zbog toga jedino veće promjene težinskih vrijednosti mogu doprinijeti promjeni odluke, tj. odabiru druge tehnologije.

Kao što je već prikazano prethodnim rezultatima, tehnologije koje su prihvatljive, tj. nalaze se u PROMETHEE II rangiranju u Φ^+ području su one koje ne uključuju termičku obradu otpada. No, povećanjem težišta na ovu grupu kriterija (60% i više), postiže se i razmatranje tehnologije izgaranja (**Ia**) kao prihvatljive opcije jer postoji mogućnost oporabe pepela, tj. vraćanja hranjivih tvari koje se u njemu nalaze u ciklus kruženja tvari (korištenje kao poboljšivača tla na poljoprivrednim zemljištima).



Slika 70. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Ostalo – opcija a

Grupa kriterija *Pravno-administrativni okvir (opcija a)*

Ova grupa kriterija je vrlo specifična u pogledu kriterija koji se u njoj nalaze: *Pravno-administrativni okvir*, *Radna mjesta* te *Javna prihvatljivost*. Uzevši u obzir razlike u tehnologijama koje se razmatraju u ovom radu, sa pravno-administrativnog pogleda postoji širok raspon mogućeg odabira tehnologija, ovisno o zadanoj težini kriterija, kao što je vidljivo iz Slika 71. U razmatranom kontekstu, sa kriterijima zadanim u prethodnom poglavlju, raspon promjene ovisan o ovoj grupi kriterija je također vrlo uzak. Za grupu „Pravno-administrativni kriteriji“, stabilnost poretka se održava između 0% i 76,54%. Promjene izvan tog raspona uzrokuju preokret između tehnologija koje se razlikuju u regulatornoj kompleksnosti. To pokazuje da ova grupa kriterija ima ograničen, ali strateški važan utjecaj kod odlučivanja u politički osjetljivim područjima ili tržištima s visokom razinom regulacije.

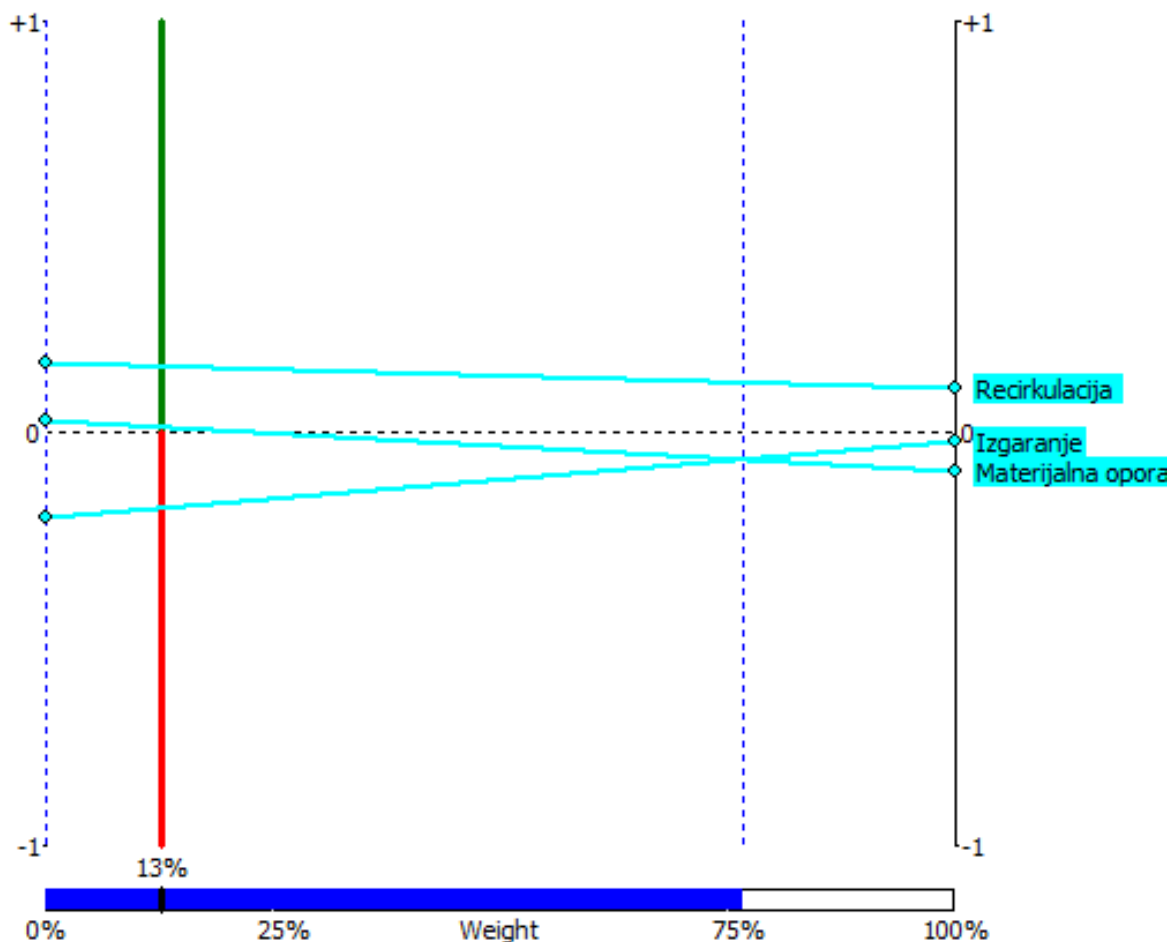
Ova skupina kriterija ima važnu korektivnu funkciju u procesu odlučivanja, jer ukazuje na razliku između teoretski optimalnih i praktično izvedivih rješenja. Na primjer, tehnologije koje zahtijevaju višegodišnje postupke ishoda dozvola (npr. spalionice otpada, sustavi s emisijskim jedinicama ili visokim ekološkim rizikom) mogu imati vrlo dobre tehničko-ekonomske pokazatelje, ali u praksi su često odgođene ili onemogućene zbog administrativnih ograničenja. S druge strane, tehnologije s jednostavnijom regulativnom procedurom i jasnim zakonodavnim okvirom imaju kraće vrijeme implementacije i stoga veću izvedivost u stvarnim uvjetima.

U kontekstu europskog zakonodavstva, važnu ulogu imaju i nacionalne interpretacije EU direktiva (primjerice Okvirna direktiva o otpadu 2008/98/EZ i Direktiva o industrijskim emisijama 2010/75/EU). U praksi se pokazuje da razlike u nacionalnoj primjeni propisa mogu znatno utjecati na odabir tehnologije – dok su u nekim državama (npr. Njemačka, Nizozemska) termičke tehnologije široko prihvaćene zbog jasnih regulatornih procedura i sustava nadzora emisija, u drugim državama (npr. Hrvatska, Slovenija) još uvijek prevladavaju administrativne prepreke koje usporavaju ili onemogućuju njihovu primjenu.

Iz GAIA analize (Slika 45.) vidljivo je da kriteriji ove grupe imaju slabiji, ali stabilan vektorski utjecaj, usmjeren prema tehnologijama koje su institucionalno jednostavnije i regulatorno prihvatljivije. Ovaj rezultat potvrđuje da, iako ova skupina ne mijenja dramatično poredak u PROMETHEE II analizi, ona bitno utječe na konačnu odluku donositelja, osobito u fazi planiranja i provedbe projekta.

Osjetljivost grupe „Pravno-administrativni okvir“ stoga treba promatrati u strateškom kontekstu upravljanja rizikom. U državama s administrativno zahtjevnim postupcima i dugim rokovima odobravanja (primjerice, u zemljama jugoistočne Europe), povećanje težine ove skupine može znatno promijeniti konačan izbor tehnologije, dok će u razvijenim regulatornim sustavima (npr. Skandinavske zemlje, Njemačka) njezin utjecaj biti manji.

Kao dodatna preporuka za buduće primjene modela, predlaže se uvođenje pokazatelja poput *Regulatory Readiness Index* (RRI) i *Implementation Feasibility Factor* (IFF), koji bi kvantificirali složenost regulatornog procesa i procijenili spremnost institucija za implementaciju novih tehnologija. Ti pokazatelji mogu pomoći u objektivizaciji administrativnog rizika i osigurati transparentnost prilikom donošenja odluka.



Slika 71. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Pravno-administrativni okvir – opcija a

Grupa kriterija Troškovi (opcija a)

U grupu kriterija *Troškovi* spadaju sljedeći kriteriji: *Operativni troškovi*, *Kapitalni troškovi* te *FiT/Premium model*. Kao i u prethodnim slučajevima, raspon unutar kojega jedna tehnologija ostaje odabrana je vrlo malen, zbog različitih vrijednosti svakog od kriterija. Promjenom težine grupe „Troškovi“ unutar raspona 0% do 100% nije došlo do promjene redoslijeda (Slika 72). Kada težina premaši gornju granicu, materijalna oporaba se spušta za jedno mjesto zbog dominantnog negativnog utjecaja visokih operativnih troškova. Troškovni kriteriji imaju visoku osjetljivost u analizama gdje je CAPEX i OPEX kritičan ulazni parametar.

U scenarijima gdje se povećava ponder skupine *Troškovi*, prednost preuzimaju tehnologije s nižim ulaznim ulaganjima i stabilnim operativnim troškovima. Nasuprot tome, tehnologije koje zahtijevaju skupu infrastrukturu, složenu opremu i kontinuirani nadzor (npr. termička obrada otpada, materijalna oporaba) gube pozicije u ukupnom rangui, iako su s aspekta emisija i energetske učinkovitosti često vrlo učinkovite.

Iz GAIA analize (Slika 45.) proizlazi da se vektori kriterija troškova protežu u suprotnom smjeru od većine tehnoloških i energetskih kriterija, što ukazuje na uzajaman odnos između investicijske zahtjevnosti i tehničke naprednosti tehnologije. Drugim riječima, kako raste

tehnička sofisticiranost, obično raste i ukupna cijena implementacije, što stvara potrebu za uravnoteženjem između inovativnosti i troškovne učinkovitosti.

Kriterij CAPEX ima najveći pojedinačni utjecaj u ovoj grupi, jer određuje ulaznu barijeru za implementaciju tehnologije. Kod manjih komunalnih jedinica ili lokalnih investitora, visoki kapitalni troškovi često znače da se projekt uopće ne može realizirati bez vanjskog financiranja. U tom kontekstu, dostupnost EU fondova, nacionalnih potpora ili modela javno-privatnog partnerstva postaje presudan faktor za realnu izvedivost projekta.

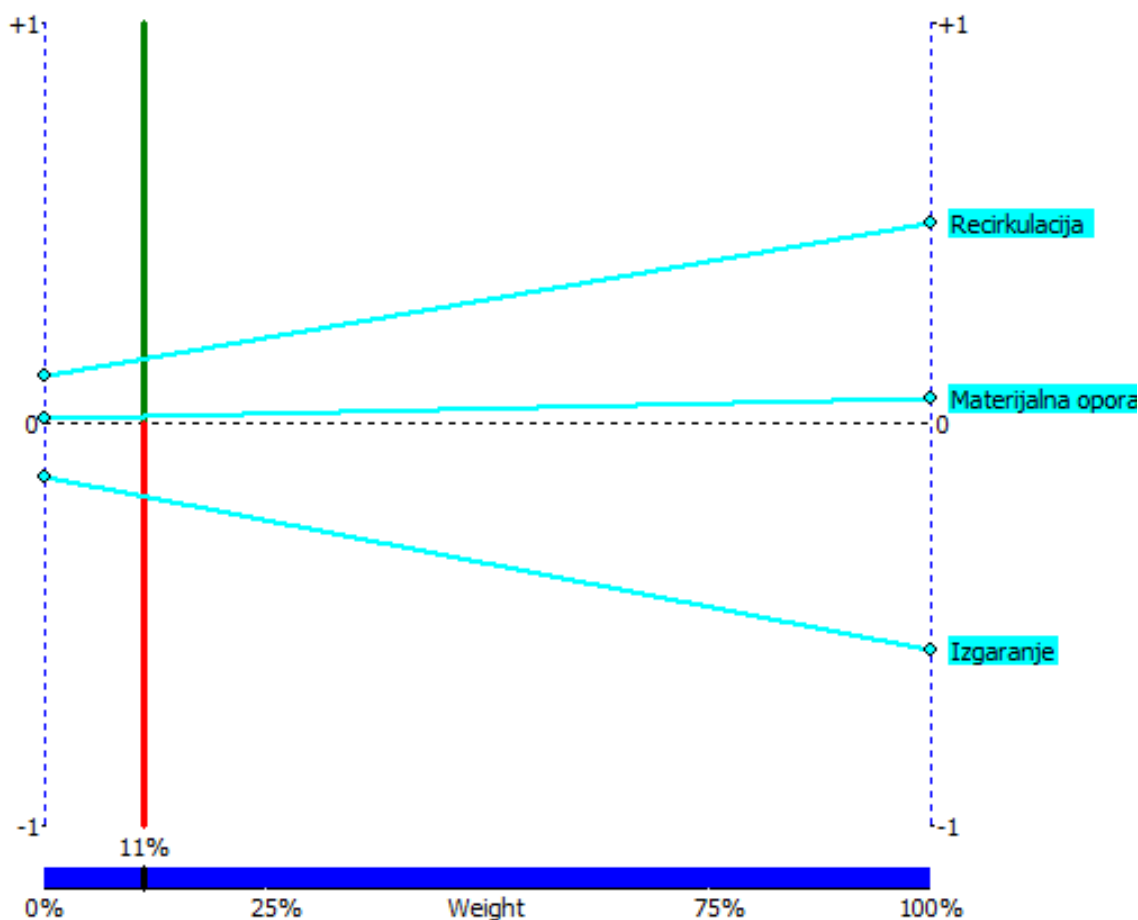
Kriterij OPEX, koji obuhvaća troškove energije, održavanja, radne snage i potrošnog materijala, ima nešto manji, ali vrlo stabilan utjecaj na dugoročnu održivost tehnologije. Tehnologije s niskim operativnim troškovima i manjim brojem zahtjevnih radnih sati po jedinici ulaza (npr. automatizirani sustavi obrade digestata ili otpadnog mulja) ostvaruju znatnu prednost u višegodišnjim projekcijama troškova.

Ekonomski pokazatelji NPV i IRR dodatno potvrđuju kako tehnologije s kraćim periodom povrata ulaganja i stabilnim godišnjim prihodima (npr. prodaja bioplina, električne energije ili gnojiva) osiguravaju bolju financijsku održivost i otpornost na tržišne fluktuacije. U nekim scenarijima, čak i male promjene u cijeni ulaznog materijala (npr. povećanje troška odlaganja) ili izlaznog proizvoda (npr. pad tržišne cijene bioplina) mogu znatno promijeniti isplativost projekta, što dodatno potvrđuje potrebu za detaljnim modeliranjem troškovne dinamike u budućim analizama.

Posebnu ulogu ima i kriterij troška po jedinici obrađenog otpada (EUR/t). Ovaj pokazatelj omogućuje direktnu usporedbu između različitih tehnologija neovisno o njihovom kapacitetu. Analiza pokazuje da je upravo ovaj kriterij jedan od najosjetljivijih u cijeloj skupini: već povećanje težine za 2% može uzrokovati promjenu u rangiranju među tehnologijama koje su inače gotovo izjednačene po ostalim parametrima.

Osim kvantitativnih aspekata, važno je istaknuti i kvalitativne čimbenike povezane s troškovima, poput predvidivosti cijena resursa, stabilnosti tržišta energije i dugoročnih ugovora o otkupu. U uvjetima nestabilnog tržišta, tehnologije s manjom ovisnošću o promjenjivim inputima (npr. biološki procesi s lokalnim izvorima biomase) pokazuju se otpornijima.

Na temelju provedenih analiza, može se zaključiti da grupa kriterija „Troškovi“ ima presudan utjecaj na donošenje odluke u većini realnih scenarija. Iako su tehničke i okolišne performanse važne za održivost sustava, financijska izvedivost ostaje ključan ograničavajući faktor u procesu implementacije. Stoga bi u budućim primjenama modela bilo korisno uključiti i analizu osjetljivosti troškova kroz vremenski horizont (npr. 10–15 godina) kako bi se simulirale promjene cijena energenata, inflacija i tržišne neizvjesnosti.



Slika 72. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Troškovi – opcija a

Grupa kriterija Emisije (opcija a)

Grupa kriterija *Emisije* sadrži sljedeće kriterije: *Mirisi*, *Buka*, *Emisije* te *Ekološki otisak*. Iz Slika 73. je vidljivo kako se tehnologije mogu razvrstati u dvije grupe – ekološki prihvatljive i neprihvatljive, tj. na tehnologije koje imaju manje negativan učinak na okoliš (**IIa**, **IIIa**) i tehnologije koje imaju značajne količine emisija koje nastaju termičkim procesima (**Ia**). Uzevši u obzir tu podjelu, moguće je zaključiti da je to glavni uzrok šireg raspona odabira tehnologije, unutar kojeg ne dolazi do promjena rasporeda tehnologija koje se razmatraju.

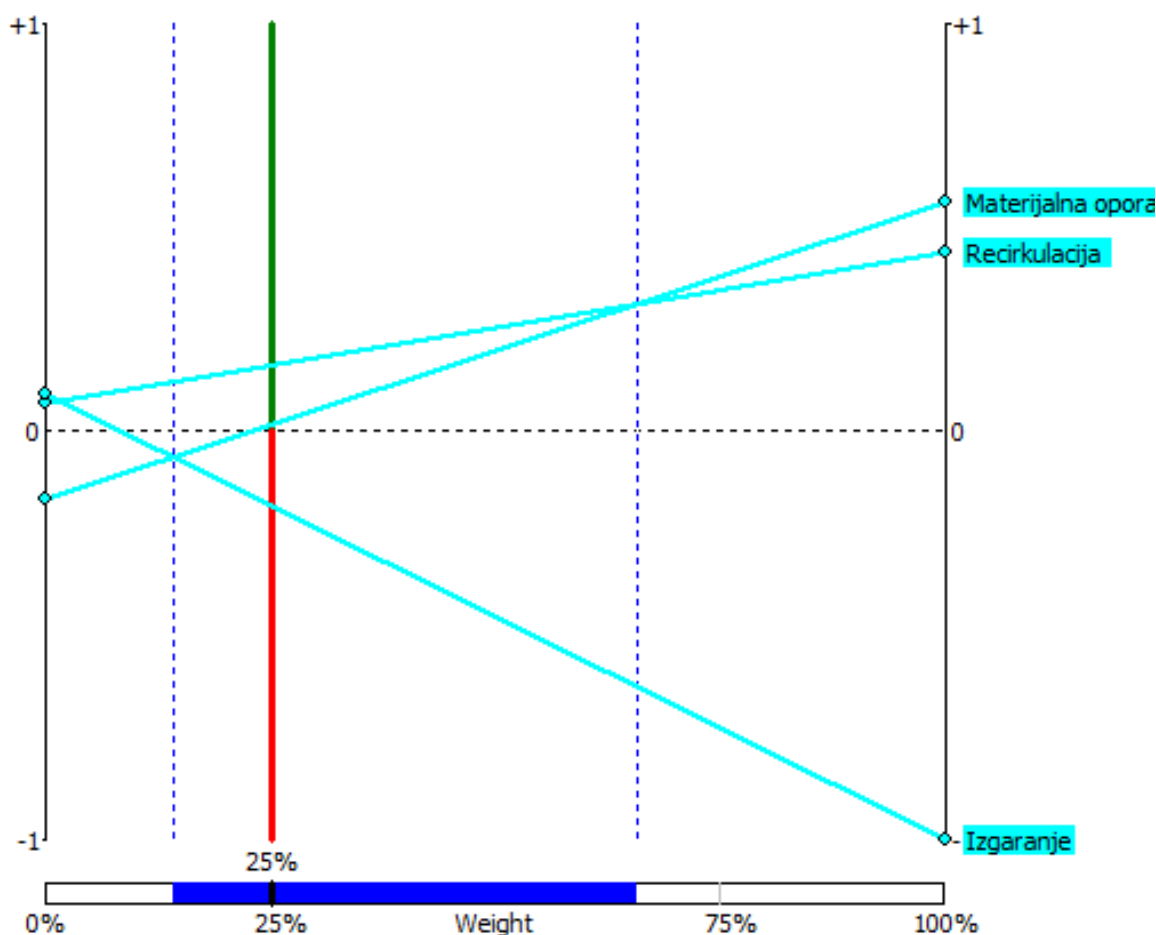
Rezultati PROMETHEE analize pokazuju da grupa Emisije ima stabilan, ali izražen utjecaj na ukupni rang tehnologija. To proizlazi iz jasnih razlika među tehnologijama: one koje ne uključuju procese izgaranja gotovo uvijek ostvaruju bolje rezultate od termalnih tehnologija. Tehnologije poput materijalne uporabe i recirkulacije digestata ili otpadnog mulja bilježe najniže emisije, dok procesi izgaranja imaju veće emisije, ali dijelom ih nadoknađuju energetsom uporabom i smanjenjem količine otpada koji završava na odlagalištima.

Kriterij emisija CO_{2eq} ima najveći pojedinačni utjecaj u ovoj skupini. U obzir su uzete i indirektno emisije, čime se dobiva cjelovit prikaz ugljičnog otiska. Tehnologije koje koriste lokalne resurse i zatvorene sustave obrade ostvaruju najniže vrijednosti emisija te doprinose

smanjenju eutrofikacijskog potencijala. Time se potvrđuje da biološke tehnologije imaju jasnu prednost u scenarijima s povećanom važnosti okolišnih kriterija.

Grupa *Emisije* također ima indirektni društveni učinak, jer niske emisije povećavaju lokalnu prihvatljivost i olakšavaju regulatorne postupke. U GAIA ravnini (Slika 45.) vektor emisija pokazuje jaku povezanost s tehničkom učinkovitošću, što sugerira da su tehnološki naprednija rješenja istodobno i ekološki prihvatljivija.

Zaključno, skupina Emisije ima ključnu ulogu u povezivanju ekonomske isplativosti i ekološke održivosti. Njena stabilnost jamči da odluka o izboru tehnologije ostaje usklađena s dugoročnim ciljevima dekarbonizacije i kružnog gospodarstva te da promicanje niskougličnih tehnologija postaje integralni element sustava gospodarenja otpadom.



Slika 73. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Emisije – opcija a

Kroz prethodne se prikaze moglo uočiti kako su u modelu i odluci prisutni vrlo uski rasponi vrijednosti težina grupa kriterija, kako ne bi došlo do promjene rasporeda odluke među promatranim tehnologijama. Bitno je uočiti kako se u svakoj grupi kriterija proširio raspon stabilnosti tehnologije koja je odabrana PROMETHEE II rangiranjem, što ukazuje na veću stabilnost odabrane tehnologije u razmatranom slučaju.

U konačnici, pitanje boljeg odabira tehnike oporabe ovisi o kriterijima vrednovanja:

- Ako je prioritet obnovljiva energija, recirkulacija je bolje rješenje (više bioplina).
- Ako razmatramo poljoprivrednu korist i jednostavnost, materijalna uporaba je bolja alternativa (manje troška, vraća nutrijente).
- Kod eksternih troškova/koristi za okoliš, treba balansirati: recirkulacija smanjuje emisije metana iz otvorenih laguna i odgađa ispuštanje nitrata, ali gubi dio potencijala poboljšanja tla. Materijalna uporaba štedi mineralna gnojiva i vraća ugljik u tlo, što je okolišna korist, ali može uzrokovati emisije stakleničkih plinova i ispiranje nitrata ako se ne kontrolira.

Stoga bi moguća alternativna strategija bila bi recirkulacija samo tekuće frakcije digestata, dok bi se većina krute frakcije stabilizirala i koristila kao gnojivo. Time bi se nastojao postići kompromis – izvlačenje dodatne energije iz lako razgrađivih komponenti tekuće faze, uz zadržavanje većine hranjiva i organske tvari za tlo, iako se ova alternativa nije prikazivala zbog nemogućnosti kombiniranja i uspoređivanja više tehnologija unutar modela (nije moguće usporediti dvije tehnologije, od kojih je jedna uključena kao dodatna opcija unutar druge).

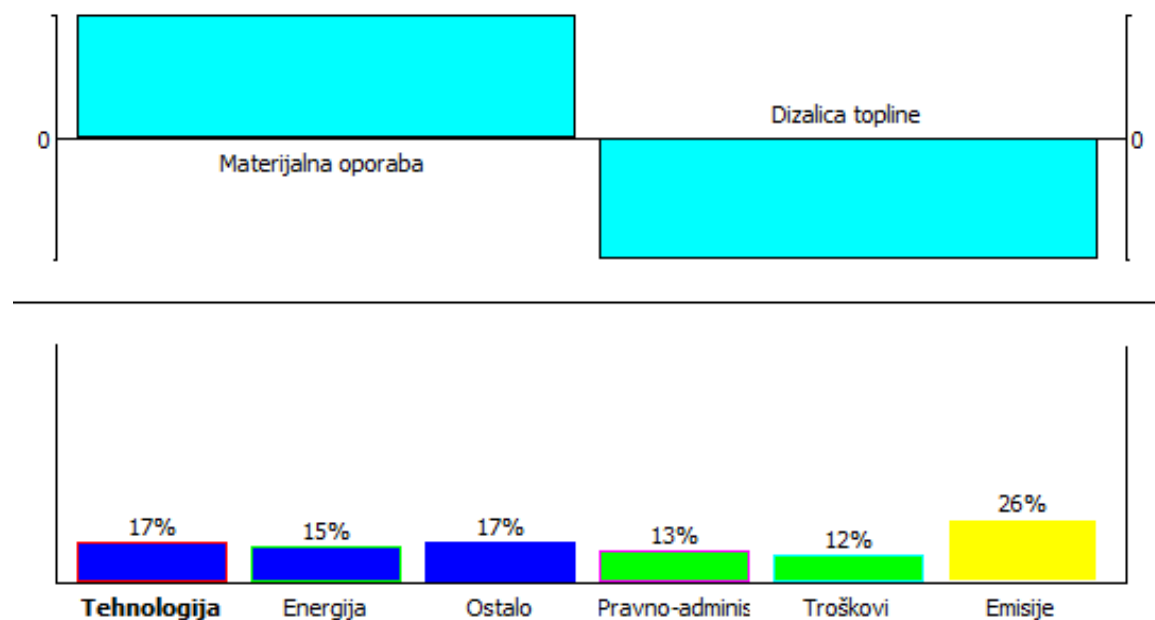
Kada bi se uračunale potencijalne vanjske koristi vraćanja hranjiva u tlo, rangiranje opcija moglo bi se promijeniti. Konkretno, studija u sklopu [131] dokazala je da mono-izgaranje otpadnog mulja s obaveznom rekuperacijom fosfora donosi najveću čistu društvenu korist – veće i od scenarija korištenja mulja u poljoprivredi (koji ima pozitivne, ali manje koristi). To je zato što P oporabljen iz pepela ima višu učinkovitost u biljnoj ishrani nego P iz sirovog mulja, a rizici od onečišćenja su niži. Nasuprot tome, izgaranje bez rekuperacije P ima negativne učinke (gubitak resursa). U razrađenom modelu, opcija izgaranja je rangirana najniža dijelom zbog visokih troškova i emisija, ali i zbog toga što nije eksplicitno vrednovan povrat fosfora kao korist (kriterij „oporabljeni materijali“ nosi malu težinu). Da se doda monetarnu vrijednost oporabljenog fosfora i organske tvari, opcija izgaranja digestata i otpadnog mulja (**I**) vjerojatno bi poboljšale svoj rang.

Međutim, vrijedi primijetiti da je i uz te benefite izgaranje skupa opcija; studija [131] navodi da bi prelazak na obavezno mono-izgaranje otpadnog mulja u EU povećao godišnje troškove za 138–569 milijuna EUR (ovisno o obuhvatu postrojenja), što je poskupljenje od otprilike 1–3% u procesu pročišćavanja voda. To znači da, čak i ako eksterne koristi opravdavaju procesa izgaranja na društvenoj razini, lokalni donosioci odluka i dalje vide veći neposredni trošak. To objašnjava i zašto su u zemljama poput Njemačke, Nizozemske i Austrije donesene zakonske obaveze za P-rekuperaciju – jer tržišno to ne bi moglo zaživjeti zbog troškova, bez intervencije države. Ukratko, uključivanje eksternih koristi (poput uštede mineralnog P) pomaknulo bi ocjenu procesa izgaranja prema gore, ali u modelu to ne bi nužno promijenilo ukupni poredak, s obzirom da su socio-ekonomski kriteriji (poput prihvatljivosti i troškova) značajno ponderirani i ostale opcije su bolje rangirane.

Prilikom odabira tehnologije, cilj za donositelja odluke je u ovakvom tipu prikaza imati što širi raspon stabilnosti optimalne tehnologije, koja je prikazana kao konačno rješenje modela, a u usporedbi s ostalim tehnologijama. Na taj način je prikazano rješenje stabilno u širem rasponu kriterija i manje podložno promjenama težina kriterija te donositelj odluka može biti sigurniji u svoj konačan odabir.

Ib. Analiza osjetljivosti – opcija b

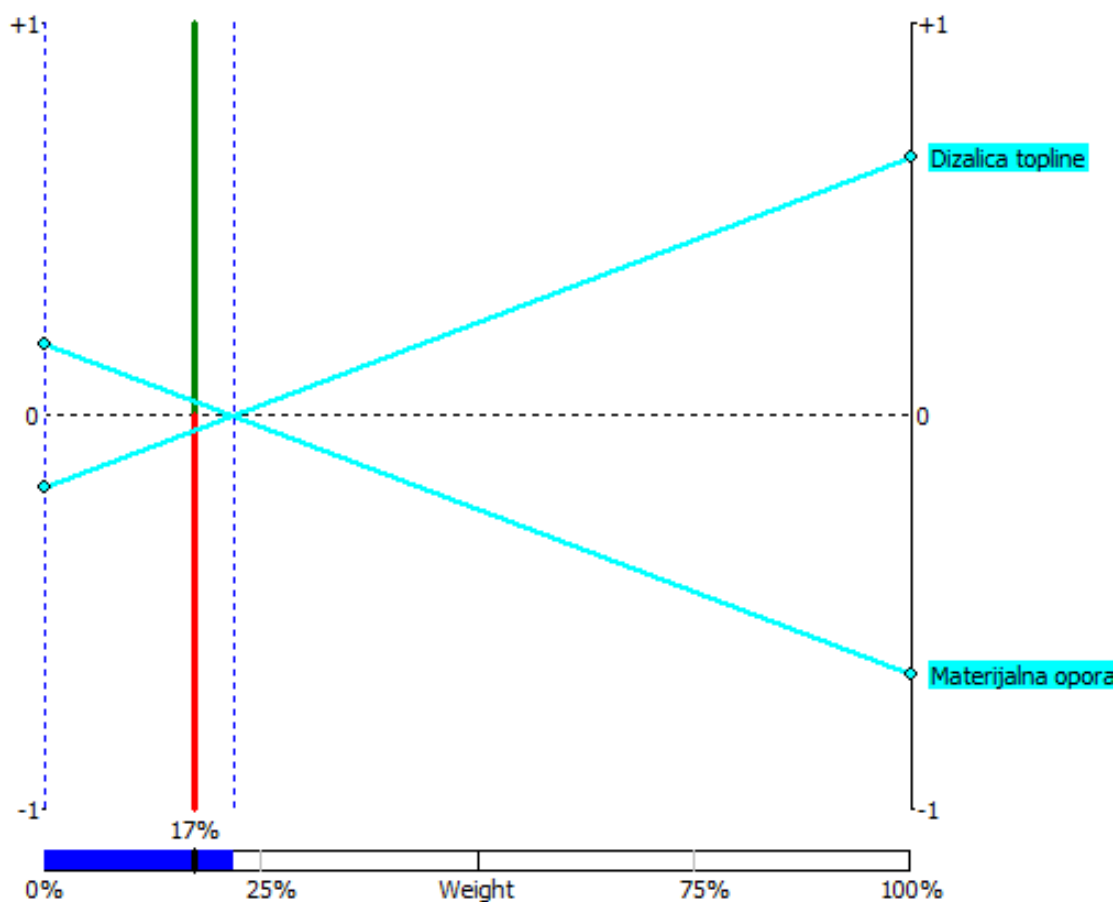
Na Sliku 74. su prikazani rezultati za razmatran slučaj i prethodno definirane težinske vrijednosti kriterija.



Slika 74. Prikaz odabira tehnologije u slučaju prethodno definiranih težina grupa kriterija za Italiju – opcija b

Grupa kriterija Tehnologija (opcija b)

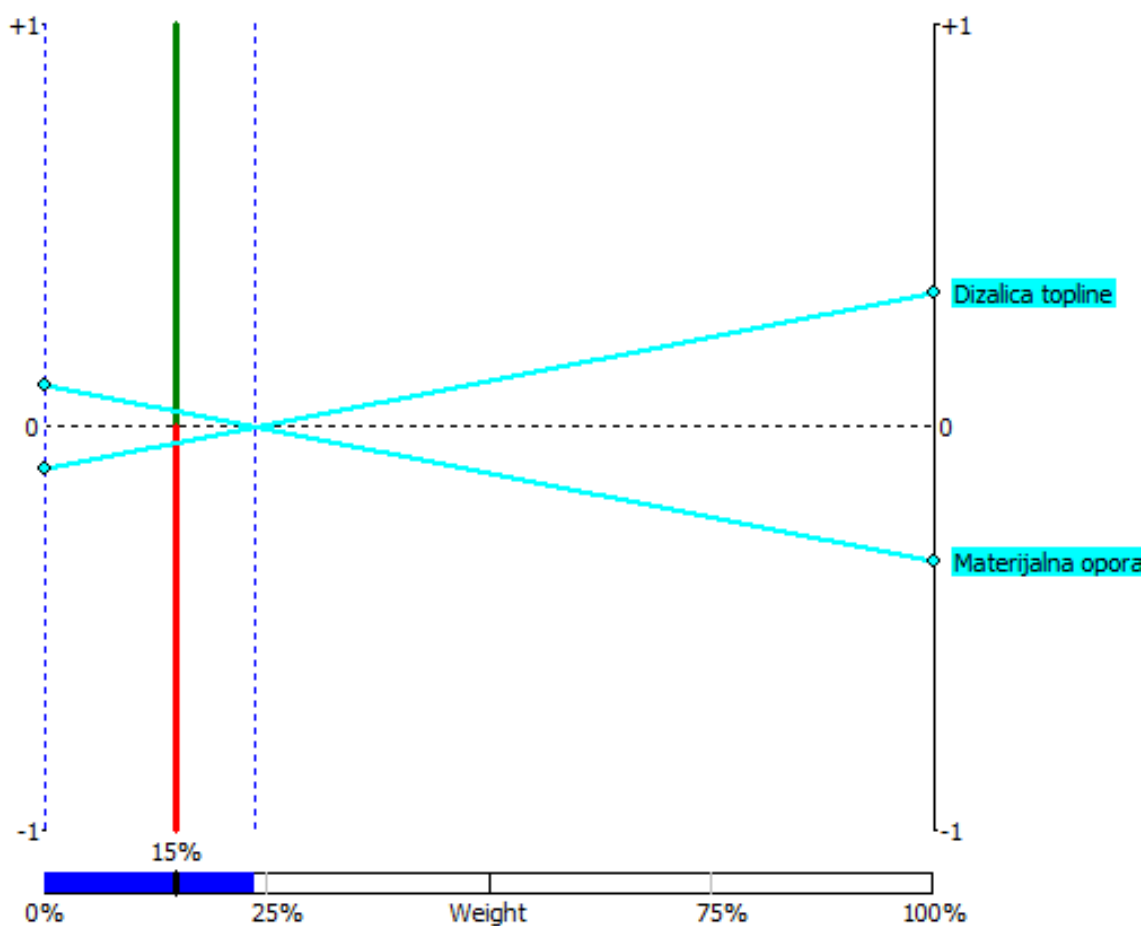
U pogledu grupe kriterija „Tehnologija“ (Slika 75.), vizualni alat *Stability Intervals* pokazao je da je rang poretka stabilan dokle god ukupna težina Tehničke grupe kriterija ostaje između 0% i 21,91%. Izvan tog intervala, dolazi do promjene – što ukazuje na osjetljivost odluke na tehničke kriterije.



Slika 75. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Tehnologija – opcija b

Grupa kriterija *Energija (opcija b)*

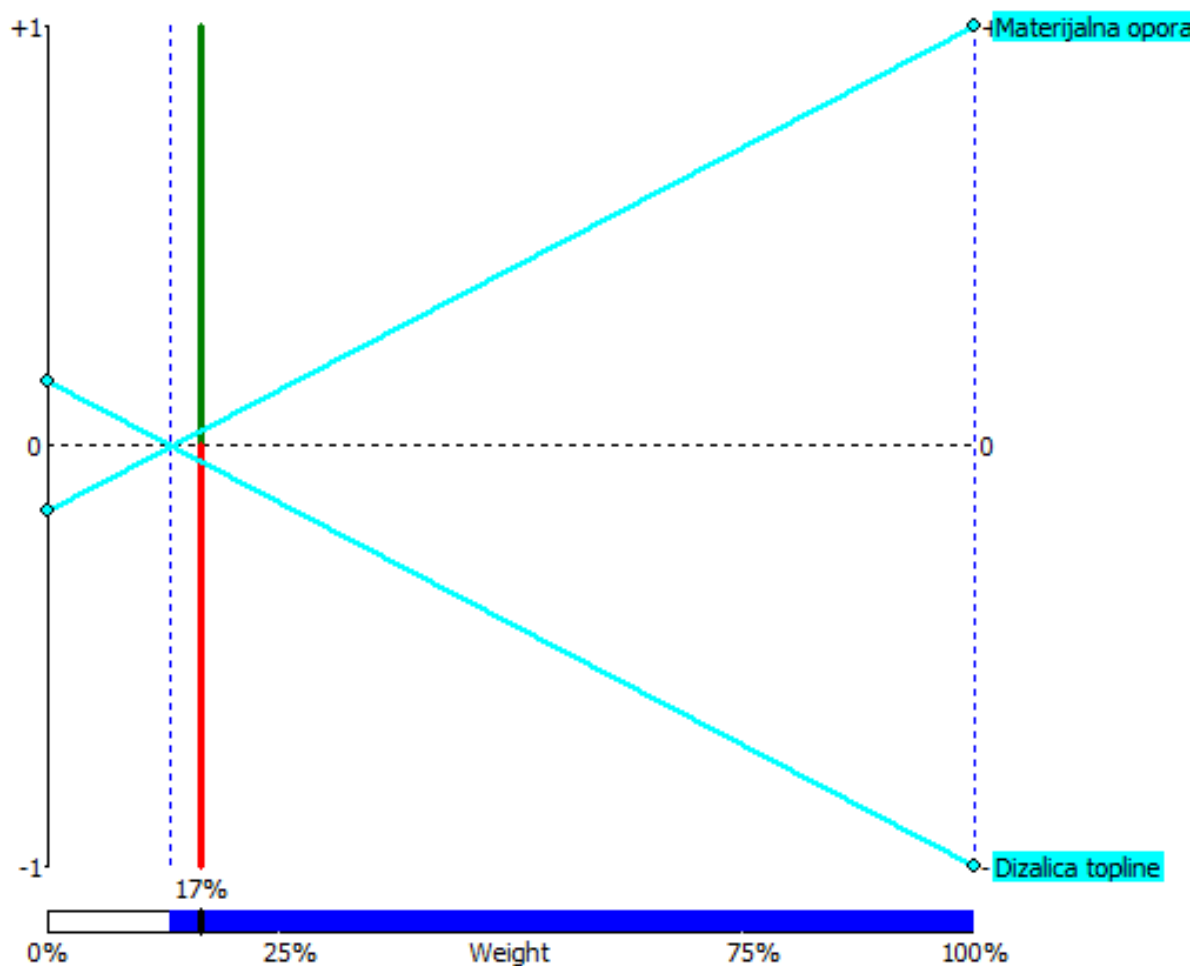
U pogledu grupe kriterija *Energija* (Slika 76.) postoji veći raspon unutar koje je moguće mijenjati težine kriterija (0 do 23,70%), bez promjene odabira i donošenja druge odluke, u usporedbi s prethodnom grupom kriterija.



Slika 76. Analiza osjetljivosti grupe kriterija *Energija* – opcija b

Grupa kriterija *Ostalo* (opcija b)

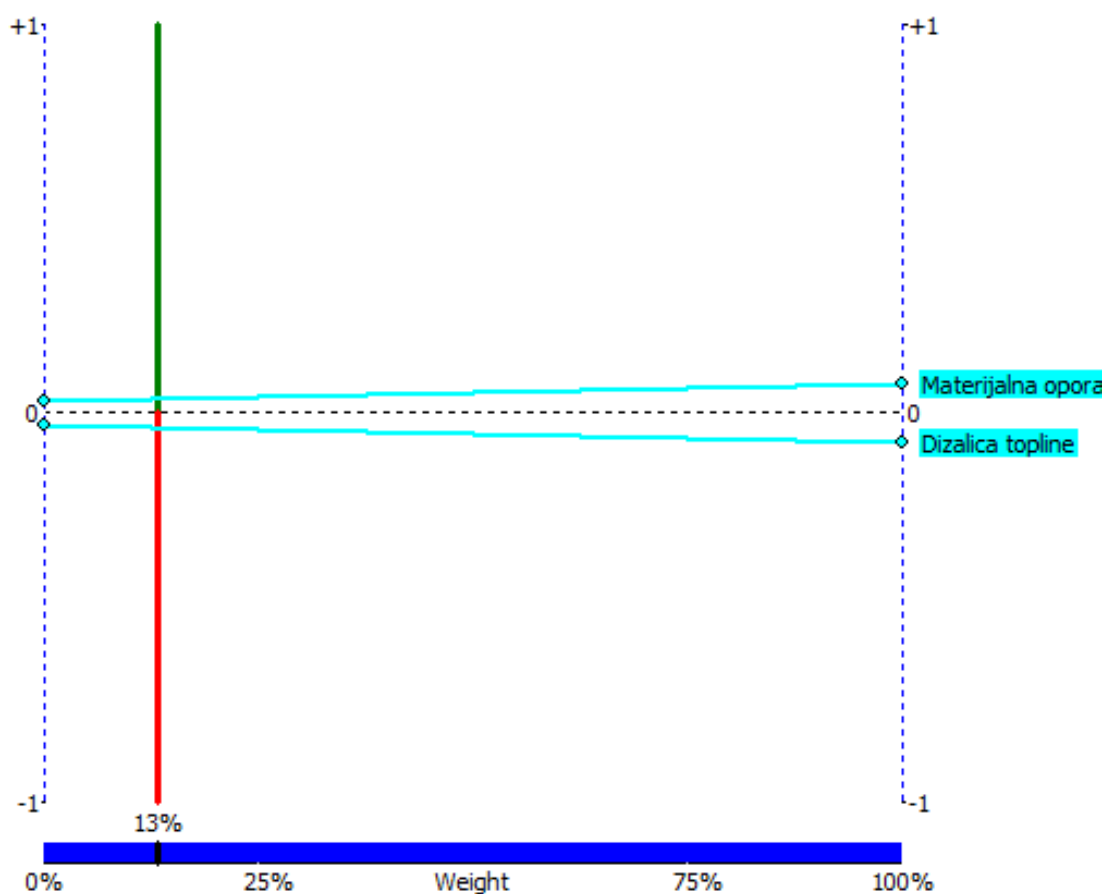
Slučaj grupe kriterija *Ostalo* (Slika 77.) prikazuje kako se radi o velikom rasponu vrijednosti težine kriterija (13,16% do 100%), unutar kojeg je odabrana jedna tehnologija, a to je moguće povezati sa kriterijima koji se u skupini nalaze.



Slika 77. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Ostalo – opcija b

Grupa kriterija *Pravno-administrativni okvir (opcija b)*

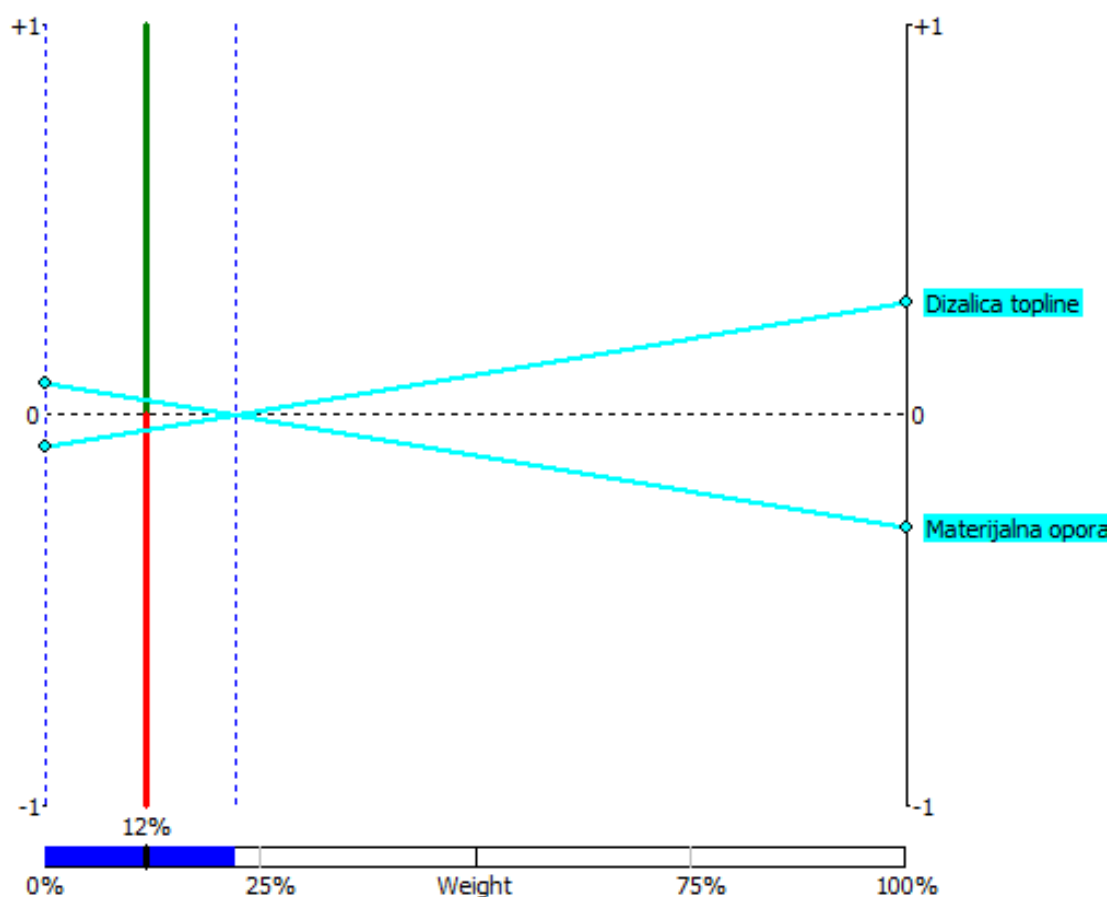
Ova grupa kriterija je vrlo specifična u pogledu kriterija koji se u njoj nalaze: *Pravno-administrativni okvir*, *Radna mjesta* te *Javna prihvatljivost*. Za grupu „Pravno-administrativni kriteriji“, stabilnost poretka se održava između 0% i 100%. Promjene izvan tog raspona uzrokuju preokret između tehnologija koje se razlikuju u regulatornoj kompleksnosti. To pokazuje da ova grupa kriterija ima ograničen, ali strateški važan utjecaj kod odlučivanja u politički osjetljivim područjima ili tržištima s visokom razinom regulacije.



Slika 78. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Pravno-administrativni okvir – opcija b

Grupa kriterija *Troškovi* (opcija b)

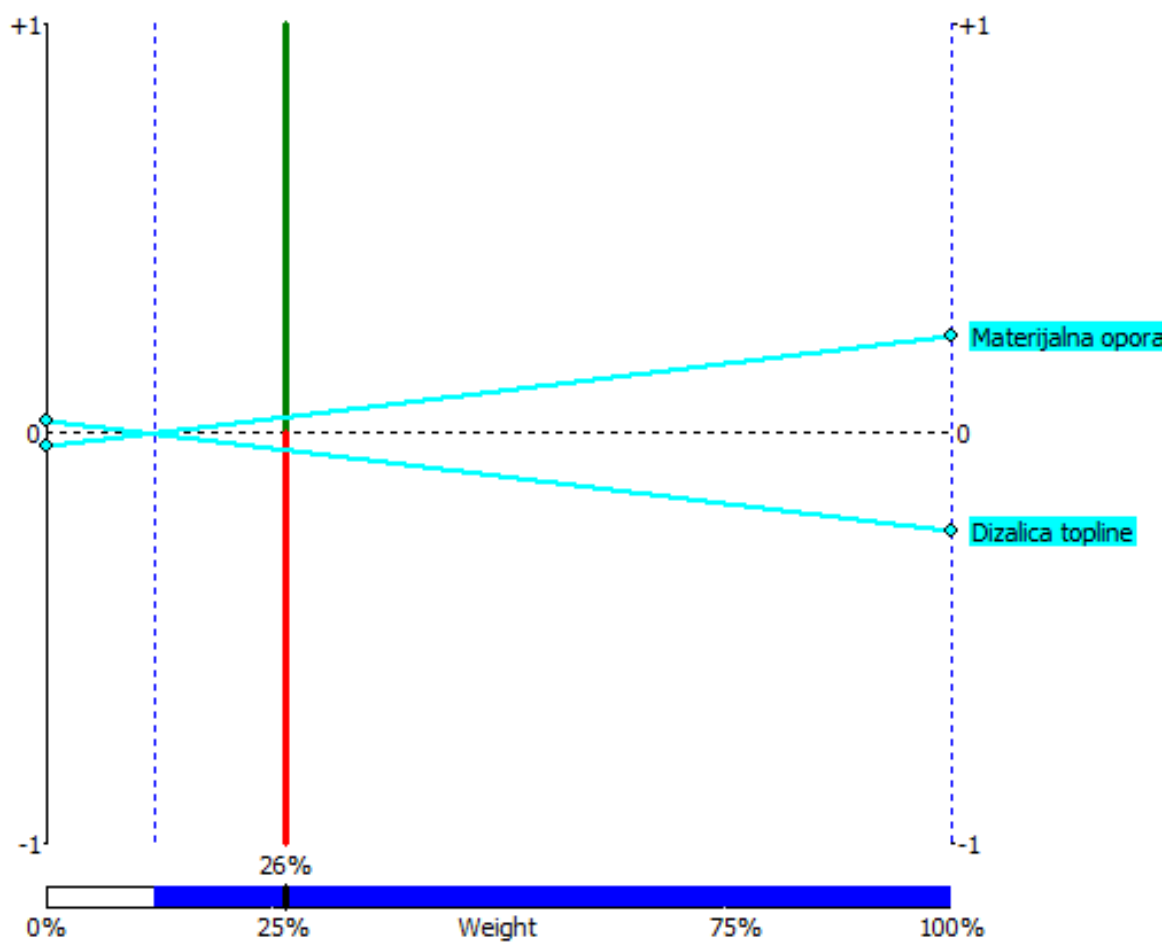
U grupu kriterija *Troškovi* spadaju sljedeći kriteriji: *Operativni troškovi*, *Kapitalni troškovi* te *FiT/Premium model*. Kao i u prethodnim slučajevima, raspon unutar kojega jedna tehnologija ostaje odabrana je vrlo malen, zbog različitih vrijednosti svakog od kriterija. Promjenom težine grupe „Troškovi“ unutar raspona 0% do 22,21% nije došlo do promjene redoslijeda.



Slika 79. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Troškovi – opcija b

Grupa kriterija *Emisije (opcija b)*

Grupa kriterija *Emisije* sadrži sljedeće kriterije: *Mirisi*, *Buka*, *Emisije* te *Ekološki otisak*. Iz Slika 80 je vidljivo kako je raspon promjene u ovom slučaju u rangu 11,81% i 100%



Slika 80. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Emisije – opcija b

Kroz prethodne prikaze može se uočiti da su u modelu prisutni relativno uski rasponi težina pojedinih grupa kriterija unutar kojih ne dolazi do promjene poretka između razmatranih tehnologija. Ipak, u slučaju *opcije b* vidljivo je proširenje intervala stabilnosti za tehnologiju koja je odabrana PROMETHEE II rangiranjem, što upućuje na veću robusnost i otpornost konačne odluke na promjene težinskih vrijednosti. Drugim riječima, materijalna uporaba zadržava svoju poziciju u širokom spektru scenarija ponderiranja, dok je odluka manje osjetljiva na pojedinačne korekcije kriterija.

U konačnici, izbor između dizalica topline i materijalne uporabe ovisi o prioritetima vrednovanja:

- Ako je prioritet energetska tranzicija i povećanje udjela obnovljivih izvora topline, dizalice topline predstavljaju racionalnije rješenje jer omogućuju izravnu supstituciju fosilnih goriva i smanjenje emisija CO₂ u sektoru grijanja.
- Ako se naglasak stavlja na kružno gospodarstvo, sigurnost opskrbe fosforom i zatvaranje hranidbenog ciklusa, materijalna uporaba kroz rekuperaciju struvita ima veću stratešku vrijednost jer generira sekundarnu sirovinu i smanjuje ovisnost o primarnim mineralnim gnojivima.
- U pogledu eksternih okolišnih koristi, potrebno je razmotriti širi sustavni kontekst. Dizalice topline smanjuju emisije stakleničkih plinova kroz energetska supstitucija, ali ne utječu izravno na materijalne tokove. Materijalna uporaba, s druge strane, doprinosi smanjenju eutrofikacijskog potencijala i vraćanju fosfora u poljoprivredni ciklus, no njezina ukupna okolišna korist ovisi o kontroli kvalitete proizvoda i pravilnoj primjeni na tlu.

Moguća alternativna strategija bila bi paralelna primjena obje tehnologije: korištenje dizalice topline za energetska valorizaciju toplinskog potencijala otpadne vode, uz istodobnu rekuperaciju struvita iz povratnih tokova. Takav integrirani pristup omogućio bi istodobno ostvarivanje energetskih i materijalnih koristi. Međutim, unutar postojećeg modela nije bilo moguće kombinirati i vrednovati kompozitne scenarije, budući da metodologija zahtijeva usporedbu jasno definiranih, međusobno isključivih alternativa.

Ukoliko bi se dodatno monetizirale dugoročne koristi uporabe fosfora (primjerice kroz tržišnu vrijednost recikliranog gnojiva ili izbjegnute troškove uvoza primarnog fosfata), rangiranje bi se moglo dodatno pomaknuti u korist materijalne uporabe. S druge strane, uključivanje snažnijih poticaja za obnovljivu toplinu ili visoke cijene ugljika moglo bi povećati relativnu atraktivnost dizalica topline. Stoga konačni poredak nije isključivo tehničko pitanje, već odražava širi regulatorni i tržišni okvir unutar kojeg se tehnologije primjenjuju s obzirom da su socio-ekonomski kriteriji (poput prihvatljivosti i troškova) značajno ponderirani i ostale opcije su bolje rangirane.

Prilikom odabira tehnologije, cilj za donositelja odluke je u ovakvom tipu prikaza imati što širi raspon stabilnosti optimalne tehnologije, koja je prikazana kao konačno rješenje modela, a u usporedbi s ostalim tehnologijama. Na taj način je prikazano rješenje stabilno u širem rasponu kriterija i manje podložno promjenama težina kriterija te donositelj odluka može biti sigurniji u svoj konačan odabir.

PRILOG III. Popis tablica

Tablica 1. Višekriterijska tablica [108]	43
Tablica 2. Jednokriterijska tablica GAIA softvera	46
Tablica 3. Opis i pregled tehnoloških kriterija	52
Tablica 4. Opis i pregled socio-ekonomskih kriterija	56
Tablica 5. Opis i pregled okolišnih kriterija.....	58
Tablica 6. Literaturni pregled raspona kriterija za svaku od tehnologija opcije a	66
Tablica 7. Literaturni pregled raspona kriterija za svaku od tehnologija opcije b	68
Tablica 8. Prikaz podataka za unos u model – opcija a.....	85
Tablica 9. Prikaz podataka za unos u model – opcija b	86

PRILOG IV. Popis slika

Slika 1. Procjena životnog ciklusa sustava nula-otpada [81]	12
Slika 2. Hijerarhija gospodarenja otpadom [75].....	13
Slika 3. Tipičan dijagram tijeka glavnih procesa MBO [83] (CLO = composite-like output; RDF/SRF = refuse derived fuel / solid recovered fuel).....	14
Slika 4. Slikoviti prikaz koncepta kružnog gospodarstva [85].....	22
Slika 5. Usporedba linearnog (lijevo) i kružnog koncepta (desno) gospodarstva [101].....	27
Slika 6. Grafički prikaz primjera osnovnog sučelja PROMETHEE metode [108].....	39
Slika 7. Definiranje opcija (lijevo) i kriterija (desno) [108].....	40
Slika 8. Hijerarhijska raspodjela kriterija [108]	41
Slika 9. Primjer unosa podataka o težinskim kriterijima [108]	42
Slika 10. Primjer GAIA prikaza rezultata modela [108].....	47
Slika 11. Pet-stupanjski sustav ocjenjivanja kriterija (iz PROMETHEE metode).....	48
Slika 12. Da/ne sustav ocjenjivanja kriterija (iz PROMETHEE metode).....	49
Slika 13. Hijerarhija kriterija za model energetske i materijalne uporabe otpada.....	50
Slika 14. Granica modela za tehnologiju Ia (izgaranje digestata/otpadnog mulja)	60
Slika 15. Granica modela za tehnologiju IIa (recirkulacija digestata/otpadnog mulja)	61
Slika 16. Granica modela za tehnologiju IIIa (materijalna uporaba)	62
Slika 17. Granica modela za tehnologiju Ib (energetska uporaba).....	63
Slika 18. Granica modela za tehnologiju IIb (materijalna uporaba).....	64
Slika 19. Weighing Assistant prikaz za scenarij Javnost.....	71
Slika 20. Weighing Assistant prikaz za scenarij Tehnički aspekt	72
Slika 21. Weighing Assistant prikaz za scenarij Okoliš.....	73
Slika 22. Prikaz univerzalnog modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova (opcija a).....	76
Slika 23. Prikaz univerzalnog modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih tokova (opcija b).....	76
Slika 24. Smještaj i okruženje regije Lombardija u Italiji [217]	78
Slika 25. Prikaz bioplinskog postrojenja s recirkulacijom digestata [221]	79
Slika 26. Kumulativni prinos metana pri uvjetima normalne temperature i tlaka neobrađenog i obrađenog digestata (A) te separirane krute frakcije (B) [179].....	81
Slika 27. Energetska bilanca proizvodnje dodatne energije uz recirkulaciju: A) neobrađenog digestata, B) enzimatski obrađene separirane krute frakcije digestata te C) neobrađene separirane krute frakcije digestata [179]	82
Slika 28. Prikaz težinskih omjera za scenarij Javnost (opcija a)	88
Slika 29. Prikaz težinskih omjera za scenarij Tehnički aspekt (opcija a).....	88
Slika 30. Prikaz težinskih omjera za scenarij Okoliš (opcija a)	89
Slika 31. Prikaz težinskih omjera za scenarij Javnost (opcija b).....	89
Slika 32. Prikaz težinskih omjera za scenarij Tehnički aspekt (opcija b)	90
Slika 33. Prikaz težinskih omjera za scenarij Okoliš (opcija b)	90
Slika 34. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija a	91
Slika 35. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija a.....	92
Slika 36. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) - opcija a	93
Slika 37. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) – opcija a	94
Slika 38. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija a	95
Slika 39. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija a	96
Slika 40. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija a.....	97
Slika 41. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija a	98
Slika 42. PROMETHEE Diamond prikaz tehnologija svih scenarija – opcija a.....	100

Slika 43. Međusobna usporedba svih scenarija – opcija a	101
Slika 44. PROMETHEE Rainbow prikaz tehnologija svih scenarija – opcija a	102
Slika 45. Ukupni GAIA prikaz po kriterijima – opcija a	104
Slika 46. GAIA prikaz po scenarijima – opcija a	105
Slika 47. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija b	108
Slika 48. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost) – opcija b	109
Slika 49. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) – opcija b	110
Slika 50. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt) – opcija b	111
Slika 51. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija b	112
Slika 52. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš) – opcija b	113
Slika 53. Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija b	114
Slika 54. Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno) – opcija b	115
Slika 55. PROMETHEE Diamond prikaz tehnologija svih scenarija – opcija b	117
Slika 56. Međusobna usporedba svih scenarija – opcija b	118
Slika 57. PROMETHEE Rainbow prikaz tehnologija svih scenarija – opcija b	119
Slika 58. Ukupni GAIA prikaz po kriterijima – opcija b	120
Slika 59. GAIA prikaz po scenarijima – opcija b	121
Slika 60. Primjer sheme korištenja digestata za poljoprivredne svrhe (modificirano iz [112])	147
Slika 61. Shema proizvodnje struvita iz obrade otpadnih voda [115]	150
Slika 62. Shema recirkulacije digestata sa ciljem povećanja energetske učinkovitosti bioplinskog postrojenja [125]. SD = solid digestate (kruti digestat), LD = liquid digestate (tekući digestat)	153
Slika 63. Shema proces digestije otpadnog mulja s UPOV-a [134]	157
Slika 64. Shema postrojenja za termičku obradu otpada [144]	161
Slika 65. Shema korištenja energije iz otpadnih voda putem dizalica topline [146] I = sustav otpadnih voda; II = UPOV; III = mreža za daljinsko grijanje; IV = korisnik daljinskog grijanja; V = korisnik daljinskog hlađenja; VI = mreža za daljinsko hlađenje; VII = izmjenjivači topline; VIII = akumulator rashlađene vode; IX = isparivač; X = kompresor; XI = ekspanzijski ventil; XII = kondenzator	162
Slika 66. Primjer prikaza Visual Stability Intervals – opcija a	166
Slika 67. Prikaz odabira tehnologije u slučaju prethodno definiranih težina grupa kriterija za Italiju – opcija a	167
Slika 68. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Tehnologija – opcija a	168
Slika 69. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Energija – opcija a	169
Slika 70. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Ostalo – opcija a	170
Slika 71. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Pravno-administrativni okvir – opcija a	172
Slika 72. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Troškovi – opcija a	174
Slika 73. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Emisije – opcija a	175
Slika 74. Prikaz odabira tehnologije u slučaju prethodno definiranih težina grupa kriterija za Italiju – opcija b	177
Slika 75. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Tehnologija – opcija b	178
Slika 76. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Energija – opcija b	179
Slika 77. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Ostalo – opcija b	180
Slika 78. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Pravno-administrativni okvir – opcija b	181
Slika 79. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Troškovi – opcija b	182
Slika 80. Analiza osjetljivosti grupe kriterija Emisije – opcija b	183

PRILOG V. Popis objavljenih znanstvenih radova

- I. Dinko Đurđević, Paolo Blecich, Kristian Lenić: *Energy Potential of Digestate Produced by Anaerobic Digestion in Biogas Power Plants: The Case Study of Croatia*; Environmental Engineering Science (2018), Svezak 35, Broj 12, pp. 1286-1293; <http://doi.org/10.1089/ees.2018.0123>
- II. Dinko Đurđević, Ivona Hulenčić, Biljana Kulišić: *Degradation of Lignocellulosic Complex Through Production of Struvite from Digestate*; Waste and Biomass Valorization (2019); <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00637-6>
- III. Dinko Đurđević, Dražen Balić, Bernard Franković: *Wastewater heat utilization through heat pumps: The case study of City of Rijeka*; Journal of Cleaner Production (2019); Svezak 231, pp. 207-213; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.235>
- IV. Dinko Đurđević, Maja Trstenjak, Ivona Hulenčić: *Sewage Sludge Thermal Treatment Technology Selection by Utilizing the Analytical Hierarchy Process*; Water (2020), Svezak 12, Broj 5, pp. 1255-1272; <https://doi.org/10.3390/w12051255>
- V. Dinko Đurđević, Paolo Blecich, Željko Jurić: *Energy recovery from wastewater sludge: The case study of Croatia*; Energies (2019), Svezak 12, Broj 10, pp. 1927-1940; <https://doi.org/10.3390/en12101927>
- VI. Dinko Đurđević, Dražen Balić, Željko Jurić: *Socio-economic aspects in satisfying energy demands by different technologies of heat and electricity generation*; Technical Gazette (2019), Svezak 26, Broj 6; <https://doi.org/10.17559/TV-20180525214147>
- VII. Dinko Đurđević, Ivona Hulenčić: *Anaerobic Digestate Treatment Selection Model for Biogas Plant Costs and Emissions Reduction*; Processes (2020), Svezak 8, Broj 2, pp. 142-157; <https://doi.org/10.3390/pr8020142>
- VIII. Dinko Đurđević, Saša Žiković, Tomislav Čop: *Socio-Economic, Technical and Environmental Indicators for Sustainable Sewage Sludge Management and LEAP Analysis of Emissions Reduction*; Energies (2022); Svezak 15, Broj 15, pp. 6050-6065; <https://doi.org/10.3390/en15166050>
- IX. Dinko Đurđević, Saša Žiković, Paolo Blecich: *Sustainable Sewage Sludge Management Technologies Selection Based on Techno-Economic-Environmental Criteria: Case Study of Croatia*; Energies (2022), Svezak 15, Broj 11, pp. 3941-3964; <https://doi.org/10.3390/en15113941>

PRILOG VI. Životopis autora i popis objavljenih radova

Dinko Đurđević diplomirao je na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, smjer Ekoinženjerstvo. Karijeru je započeo 2015. godine u Energetskom institutu Hrvoje Požar (EIHP), u Odjelu za obnovljive izvore energije, energetske učinkovitost i zaštitu okoliša. U okviru EIHP-a radio je na ublažavanju klimatskih promjena, gospodarenju otpadom, upravljanju otpadnim vodama, tehno-ekonomskim studijama, analizama stanja i opravdanosti korištenja obnovljivih izvora energije. Godine 2021. prelazi u organizaciju Hydrogen Europe, gdje je radio kao analitičar za primjenu vodika u mobilnosti, te se intenzivno počinje baviti vodikom – kako aspektima proizvodnje (iz obnovljivih izvora, ali i pretvorbu otpada u vodik), tako i aspektima primjene (s naglaskom na mobilnost). Na temelju iskustva i kontakata stečenih u Hydrogen Europe, Dinko 2023. godine počinje raditi za tvrtku Gitone Kvarner kao voditelj projekata, s fokusom na razvoj i provedbu projekata povezanih s proizvodnjom i primjenom vodika, gospodarenjem otpadom (rješenja za pretvorbu otpada u energiju, reciklaža baterija i kružno gospodarstvo). S ciljem omogućavanja zelene tranzicije, Dinko je osnovao tvrtku Green Sustainable Solutions, koja se fokusira na sljedeća područja: upravljanje projektima, tehnologije i gospodarenje otpadom, kružno gospodarstvo i bioekonomiju te energetske sektor (obnovljivi izvori energije i vodik).

Popis objavljenih radova:

- B. Kulišić, D. Đurđević, I. Ivić: „Povećanje ekonomičnosti poslovanja bioplinskog postrojenja kroz inovativno vrednovanje digestata“; Znanstveno-stručna radionica Proizvodnja bioplina, 15. lipanj 2016. Zagreb
- D. Đurđević: „Bioplinska postrojenja kao mjesto ponora stakleničkih plinova uz proizvodnju novih materijala s niskim ugljičnim otiskom“; Međunarodni kongres Energija i okoliš 2016., 26.-28. listopada 2016., Opatija
- Ž. Jurić, D. Ljubas, D. Đurđević, L. Luttenberger: „Ublažavanje klimatskih promjena smanjenjem ugljikovog otiska poslovnih subjekata“; 25. Forum, Dan energije u Hrvatskoj, „Jedinstvena energetska i klimatska politika u otvorenom tržištu energije“, 18. studeni 2016., Zagreb
- Ž. Jurić, D. Ljubas, D. Đurđević: „Approach for Harmonization of the Carbon Footprint Calculation on Example of the Energy Institute Hrvoje Požar“; 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 4.-8. listopada 2017., Dubrovnik
- D. Đurđević, B. Jelavić: „Otpad kao izvor energije i utjecaj energetske uporabe otpada na okoliš“; Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 6. (12.) savjetovanje, 13.-16. svibanj 2018., Opatija
- D. Đurđević, P. Blečić, K. Lenić: „The energy potential of digestate produced by anaerobic digestion in biogas power plants: the case study of Croatia“; Environmental Engineering Science (2018), Svez. 35, Br. 12, pp. 1286-1293; <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0123>

- D. Đurđević: „Tehnologije zbrinjavanja otpada u sklopu kružne ekonomije“; 27. Forum, Dan energije u Hrvatskoj, „Razvoj tehnologija za ostvarenje jedinstvene klimatske i energetske politike“, 16. studeni 2018., Zagreb
- D. Đurđević, I. Hulenčić, B. Kulišić: „Degradation of Lignocellulosic Complex Through Production of Struvite from Digestate“; Waste and Biomass Valorization (2019); <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00637-6>
- Ž. Jurić, D. Ljubas, D. Đurđević, L. Luttenberger: “Implementation of the Harmonised Model for Carbon Footprint Calculation on Example of the Energy Institute in Croatia“; Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Svezak 7, Broj 2, pp. 368-384; <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0253>
- D. Đurđević, P. Blečić, Ž. Jurić: „Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia“; Energies (2019), Svez. 12, Br. 10, pp. 1927-1940; <https://doi.org/10.3390/en12101927>
- D. Đurđević, D. Balić, B. Franković: „Wastewater heat utilization through heat pumps: The case study of City of Rijeka“; Journal of Cleaner Production (2019); Svez. 231, pp. 207-213; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.235>
- D. Đurđević, D. Balić, Ž. Jurić: „Socio-economic aspects in satisfying energy demands by different technologies of heat and electricity generation“; Technical Gazette (2019), Svez. 26, Br. 6; <https://doi.org/10.17559/TV-20180525214147>
- D. Đurđević, I. Hulenčić: „Anaerobic Digestate Treatment Selection Model for Biogas Plant Costs and Emissions Reduction“; Processes (2020), Svez. 8, Br. 2, pp. 142-157; <https://doi.org/10.3390/pr8020142>
- D. Đurđević, M. Trstenjak, I. Hulenčić: „Sewage Sludge Thermal Treatment Technology Selection by Utilizing the Analytical Hierarchy Process“; Water (2020), Svez. 12, Br. 5, pp. 1255-1272; <https://doi.org/10.3390/w12051255>