

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, 2025.

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, 2025.

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, 2025

Mentor rada: prof. dr. sc. Igor Wolf

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

Doktorski rad obranjen je dana _____ u/na
_____, pred povjerenstvom u
sastavu:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

Zahvala

Zahvaljujem....

SAŽETAK

Kružno gospodarstvo je relativno novi model proizvodnje i potrošnje, kojim se želi postići smanjenje proizvodnje otpada, i zadržavanje proizvoda u njegovom životnom ciklusu. Koncept je razvijen u EU, čime se želi smanjiti negativan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje, te istovremeno poboljšati učinkovitost resursa, sa što manje utjecaja na gospodarstvo.

Ciljevi kružnog gospodarstva postižu se unutar koncepta hijerarhije gospodarenja otpadom, kojom se potiče stvaranje što manjih količina otpada te ponovna uporaba istoga. Međutim, neke vrste otpada nije moguće ponovno uporabiti te je potrebno recikliranje ili energetska i/ili materijalna uporaba. U ovom radu razmatrane su vrste otpada koje nije moguće reciklirati te se razmatra njihova energetska i/ili materijalna uporaba: digestat s bioplinskih postrojenja, otpadne vode i otpadni mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda.

Neuređeni sustav gospodarenja navedenim otpadnim strujama negativno se odražava na sastavnice okoliša kao što su voda, zrak, more i tlo te na klimu, ljudsko zdravlje i drugi živi svijet. Zbog toga je potrebno uvesti sustav gospodarenja otpadom koji je prikladan za lokaciju na kojoj se planira njegova primjena. Odluku o tome donose predstavnici jedinica lokalnih samouprava, regionalnih samouprava ili donositelji odluka na nacionalnoj razini, koji određuju sustav gospodarenja otpadom koji će se primjenjivati, kako bi se učinkovito primijenila načela kružnog gospodarstva. Međutim, većina donositelja odluka nije stručna u području gospodarenja otpadom te je potrebno provesti niz studija kako bi odredio sustav gospodarenja navedenim otpadnim strujama, koji je prikladan za razmatranu situaciju i lokaciju. Navedeni sustavi imaju vrlo velik broj parametara i kriterija, koji često znaju biti međusobno u konfliktu.

Kako bi se smanjio trošak donošenja prvotne odluke i ubrzao proces izrade učinkovitog sustava, potrebno je izraditi model, koji će olakšati donositeljima odluka prvi korak – jednostavan odabir tehnologije zbrinjavanja otpadnih struja, koje nije moguće reciklirati ili ponovno uporabiti (u ovom slučaju – digestat, otpadne vode i otpadni mulj s UPOV-a). Danas postoji velik broj modela koji se koriste u različite svrhe, a temeljeni su na višekriterijskim metodama. Metoda koja se koristi u ovom radu je *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE), zbog svoje funkcionalnosti, koja se najviše može iskoristiti u svrhu odabira tehnologija za gospodarenje otpadom. U poglavlju 3 definiran je opis same metode te kako se ona koristi za izradu modela – prikazan je odabir kriterija i postavljanje raspona vrijednosti (kvalitativnih i kvantitativnih) za iste, putem literaturnog pregleda, komunikacije sa stručnjacima i na temelju iskustva autora u području gospodarenja otpadom. Tako su definirane 3 skupine kriterija: *Tehnološki*, *Socio-ekonomski* i *Okolišni* te opisani svi kriteriji – kvalitativno i kvantitativno (raspon vrijednosti kriterija). Kako su navedeni kriteriji podložni subjektivnim promjenama od strane donositelja odluka, što je i potrebno, kako bi se model što je više moguće prilagodio uvjetima razmatrane lokacije, korišteni su literaturni i realni podaci na način da se objektivizira model i omogućí njegova primjena i prilagodba svakoj situaciji i korisniku.

Nakon definiranih fiksnih vrijednosti modela i postavljanja istoga, primjena modela je prikazana na realnom primjeru regije Lombardija u Italiji. Navedena regija korištena je kao primjer jer se radi o vrlo naprednoj talijanskoj regiji, u kojoj su primjenjive i razmatrane tehnologije energetske/materijalne uporabe otpadnih struja, koje se razmatraju u ovome radu. Pregledom literaturnih vrijednosti i komercijalnih postrojenja, u model su unesene vrijednosti, specifične za navedene tehnologije. Rezultati su prikazani u poglavlju 4 kroz sve scenarije, a ukupni rezultat, kao optimalnu opciju, prikazao je tehnologiju recirkulacije digestata, u sklopu bioplinskog postrojenja. Kako bi se donositelju odluka jednostavnije objasnio proces zašto je model odabrao tu odluku, rezultati su prikazani pomoću više prikaza programa *Geometrical Analysis for Interactive Aid* (GAIA): *Diamond*, *Rainbow* te prikaza po kriterijima i scenarijima. Također, nastavno na prikaz rezultata, napravljena je i analiza osjetljivosti pomoću *Visual Stability Intervals* alata u PROMETHEE-u (poglavlje 4.2.5), kako bi se moglo ustanoviti koje su granice unutar kojih je donesena određena odluka.

Na kraju rada, u poglavlju 4.3, prikazan je dokaz rezultata modela, u obliku studije slučaja. Studija slučaja koja je prikazana je vezana za komercijalno postrojenje koje koristi tehnologiju recirkulacije digestata, proizvedenog u bioplinskom postrojenju u regiji Lombardija, u Italiji. Regija je poznata po velikom broju bioplinskih postrojenja, te zbog toga ne čudi što je upravo odabrana tehnologija najprikladnija u tom području. Iz studije slučaja je vidljivo, kroz energetske i ekonomsku analizu, kako je model pružio dobar rezultat, odabirom tehnologije recirkulacije digestata, u svrhu njegove energetske uporabe.

Iako jednostavan i robustan, izrađeni model može poslužiti kao osnova donositeljima odluka za početni odabir tehnologije energetske i/ili materijalne uporabe otpadnih struja koje su razmatrane. Potrebno je uzeti u obzir kako se rezultati ovoga modela ne mogu shvatiti kao konačno rješenje o izboru tehnologije, već da ih je moguće koristiti kao osnova za provedbu daljnjih studija izvodljivosti, tehničko-ekonomskih analiza, socioloških ispitivanja i ispitivanja tržišta. Na taj način bi se dobili konkretni i detaljniji podaci o mogućnostima primjene optimalno odabrane tehnologije pomoću modela.

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

SUMMARY

Circular economy is a relatively new model of production and consumption, which tends to achieve the reduction of waste production and retain the products in its life cycle, as long as possible. The concept is developed in EU and is set to reduce the negative impact on the environment and human health, but also to improve resource efficiency, while reducing the impact on economy.

The goals of circular economy are achieved with the concept of waste management hierarchy, by which reduction of waste production is accomplished, along with its reuse. However, some waste types cannot be reused and require recycling process or energy and/or material recovery. This thesis considers waste types that cannot be recycled and discusses their energy and/or material recovery: digestate from biogas plants, wastewater and sewage sludge from wastewater treatment plants.

Unregulated waste management systems for aforementioned waste streams is negatively reflected on the elements of the environment, such as water, air and soil, but also climate change, human health and other components of the ecosystem. Therefore, it is necessary to implement a waste management system that is appropriate for the location where it is implemented. This decision is made by representatives of local government units, regional government units or decision makers on national level, who determine the waste management system that will be implemented, in order to efficiently implement the principles of circular economy. However, most decision makers do not have the necessary experience in the field of waste management and it is necessary to conduct a range of studies to determine the appropriate waste management system, that is suitable for observed situation and location. These systems have a large number of parameters and criteria, that can often be in mutual conflict.

With a view to reduce to costs of establishing the first decision and increase the process of efficient system development, it is necessary to create a model that will assist the decision maker's first step – a simple technology selection for waste streams management, that cannot be recycled or reused (in this case – digestate, wastewater, sewage sludge). Nowadays, there is a large number of various models that are used for different purposes, which are based on Multi Criteria Decision Making process. The method used in this thesis is *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE), due to its functionality, which can be utilized for the purpose of waste management technology selection. Chapter 3 defines the description of the method itself, and how it is used for the creation of the model – this chapter presents the selection of criteria and defines the range of values (qualitative and quantitative) for the criteria, through literature overview, communication with experts and based on author's experience in the waste management sector. Moreover, three criteria clusters are determined: *Technological*, *Socio-economic* and *Environmental*, and all the criteria are described – qualitatively and quantitatively. As specified criteria are susceptible to subjective changes by decision makers, which is necessary in order to adjust the model as much as possible to conditions of the observed location, literature and real data are

used as a manner of objectivizing the model and enable its utilization and adjustment to specific situation and user.

After defining fixed values of the model and setting the model itself, model utilization is presented on a real example of Lombardy region in Italy. This region is used as an example because it is a highly advanced Italian region, which implements and considers several technologies for energy/material recovery of waste streams, including the ones considered in this thesis. After overview of literature values and data from commercial plants, values have been inserted in the model, specific for the observed technologies. Results presented in Chapter 4, through all scenarios, and total result, present the technology of recirculation of biogas digestate as an optimal solution. With the idea to present to decision maker the process of selection within the model, results are presented in different ways with *Geometrical Analysis for Interactive Aid* (GAIA): *Diamond*, *Rainbow* and presentation through criteria and scenarios. Moreover, following the results presentation, sensitivity analysis is conducted with *Visual Stability Intervals* tool in PROMETHEE (Chapter 4.2.5), in order to determine the boundaries within certain decision was made.

Finally, Chapter 4.3 presents the proof of model's results, in the form of case study. The case study is related to commercial plant, using the technology of digestate recirculation, produced in biogas plant in Lombardy region, in Italy. The region is well-known for a large number of biogas plants and therefore it is no surprise that the chosen technology is most suitable for the observed location. It is presented, through energy and economic analysis, that the model provided a good result, by selecting the digestate recirculation technology, for the purpose of its energy recovery.

Although simple and robust, the created model can be used as a basis for decision maker's initial decision of technology for energy/material recovery of waste streams, considered in this thesis. It should be considered that the results of this model cannot be perceived as the final solution regarding technology selection but can be used as a basis for implementation of further feasibility studies, techno-economic analysis, sociological investigations and market research. Thereby, concrete and more detailed data would be obtained, on the possibilities of utilizing the optimal technology for observed location and situation, that was pre-determined by the model.

Keywords: Circular Economy, waste management, PROMETHEE method, Multiple Criteria Decision Making

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	Pregled literature.....	2
1.2.	Svrha i cilj izrade doktorskog rada	7
1.3.	Struktura doktorskog rada	9
2.	KRUŽNO GOSPODARSTVO.....	10
3.	RAZVOJ MODELA POMOĆU PROMETHEE METODE.....	19
3.1.	Osnovne pretpostavke i opisi tehnologija	20
3.1.1.	Izravna poljoprivredna uporaba digestata i mulja	20
3.2.	Višekriterijsko odlučivanje u kružnom gospodarenju otpadom	36
3.3.	Odabir metode.....	37
3.4.	Korištenje metode	40
3.5.	PROMETHEE rangiranje	47
3.6.	GAIA	48
3.7.	Odabir kriterija.....	50
3.7.1.	Tehnološki kriteriji.....	53
3.7.2.	Socio-ekonomski kriteriji.....	55
3.7.3.	Okolišni kriteriji	58
3.7.4.	Granice sustava	60
3.8.	Izrada modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe.....	66
3.8.1.	Raspon vrijednosti kriterija	67
3.8.2.	Postavljanje scenarija i težišta	70
3.8.3.	Definiranje modela u PROMETHEE metodi.....	75
4.	PRIMJENA MODELA NA REALNOM PRIMJERU	77
4.1.	Unos podataka u model.....	77
4.2.	Rezultati primijenjenog modela.....	84
4.2.1.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Javnost</i>	84
4.2.2.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Tehnički aspekt</i>	84
4.2.3.	Rezultati izrađenog modela – scenarij <i>Okoliš</i>	85
4.2.4.	Rezultati izrađenog modela – ukupni rezultat	86
4.2.5.	Analiza osjetljivosti.....	96
4.3.	Dokaz rezultata modela – studija slučaja	102
5.	ZAKLJUČAK	110

6. POPIS LITERATURE.....	116
7. Popis tablica (prva stranica sljedećeg lista).....	131
8. Popis slika	132
9. Popis objavljenih znanstvenih radova (prva stranica sljedećeg lista)	134
10. Životopis autora (prva stranica sljedećeg lista + popis objavljenih radova)	136
Prilog 1 – Rezultati izrađenog modela	138
Prilog 2 – Analiza osjetljivosti	146
Prilog 3 – Intervali stabilnosti.....	152

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 struja 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 struja, poput biomase i komunalnog otpada, kao novih energetske i sirovinskih izvora.

Proizvedeni otpad se uglavnom sortira za proces recikliranja, a otpad koji nije moguće reciklirati se u visokom postotku odlaže na odlagališta. Odlaganje uzrokuje konstantno i značajno smanjenje prostora (stambenog, poslovnog, itd.) te ima negativan utjecaj na okoliš (emisije stakleničkih plinova iz otpada). Jedan od najvećih problema odlaganja je biorazgradivi otpad, koji je moguće energetski oporabiti. Izvješće od strane Organizacije Ujedinjenih naroda za prehranu i poljoprivredu (FAO) iz 2011. godine prikazalo je kako se odlaže najmanje 33% globalnih zaliha hrane (1,3 milijarde tona prehrambenog otpada) 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 struja, poput otpadnog mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) i digestata iz bioplinskih postrojenja. Navedene struje su čak i zanimljivije 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 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 energetskom i klimatskom politikom EU-a, ali se taj proces mora ravnati prema načelima EU-ove 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 se radovi posvetili 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 mane. 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 5 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 energetska vrijednost 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, čime 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 oporabe otpada na okoliš [17, 18, 19]. U tom duhu, 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 svijesti. 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 (AD 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 te povećati učinkovitost iskorištavanja resursa uz istovremeno smanjenje otpada [21]. Navedene otpadne struje 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 struja. 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] izradili ispitivanje procjene životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA) u kojoj je procijenjen okolišni utjecaj iskorištavanja pepela nastalog spaljivanjem biorazgradivog komunalnog otpada u materijalnoj uporabi i iskorištavanju u građevinskoj industriji. Pubule [27] je razvila metodologiju za čišću proizvodnju energije iz biootpada pomoću višekriterijske i regresijske analize. Tonini [28] je izradio 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 struja (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 termalne obrade otpada obrađivali su i Werle i Wilk [23], koji su u svom radu istražili mogućnosti energetske uporabe otpadnog mulja s UPOV-a. Na primjeru Poljske su prikazali kako je potrebno usmjeriti zakonodavni okvir prema otvaranju mogućnosti korištenja naprednih tehnologija energetske uporabe 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 Schenider et al. [31], dok su Perrot i Subiantoro [32] za slučaj Novog Zelanda dobili za najpovoljnije rješenje upotrebu procesa AD u svrhu energetske uporabe otpada. Sukladno tome, u više radova je prikazano kako je potrebno prilagoditi sustav energetske uporabe otpada zemlji i lokaciji u kojoj se ona izvršava [33, 34, 35].

U pogledu materijalne uporabe otpada koji preostaje nakon procesa recikliranja i ponovne uporabe predmeta (proces 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 spaljivanja. 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 uporabu 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.

Po pitanju samog digestata iz bioplinskih postrojenja, Kovačić et al. [42] su napravili pregled njegovog postupanja u EU i izvijestili da se godišnje proizvede oko 180 milijuna tona digestata, od čega je ~120 milijuna tona poljoprivrednog podrijetla (gnojiva i energetske usjevi). Oko 46 milijuna tona potječe iz komunalnog biootpada, ~7 milijuna tona iz odvojeno prikupljenog biootpada, a samo ~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 bio-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 [43]. Ovaj 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 ~0,5–0,6 Mt dušika i ~0,4–0,5 Mt fosfora godišnje u EU), a očekuje se višestruki porast do 2050. 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 [44] pokazala je da ponovna digestija može povećati energetska iskoristivi bioplina, ali upozorava na ograničenja: akumulacija amonijaka i soli u reaktoru može inhibirati metanogenezu 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 [45] naglašavaju da se digestat, nusprodukt bioplinskih postrojenja, može valorizirati raznim tehnologijama u kružno-gospodarskom kontekstu. Primjerice, struvitna precipitacija i stripiranje amonijaka iz digestata izdvajaju fosfor i dušik te ih pretvaraju u gnojivo, dok novije metode poput uzgoja mikroalgi na tekućem digestatu, kompostiranja i vermikompostiranja čvrste frakcije, pirolize digestata u biochar te primjene membranskih filtracija omogućuju dodatni oporaba hranjivih tvari i organske tvari iz digestata. Integracijom tih postupaka značajno se podiže održivost anaerobne digestije, smanjuje količina otpada i proizvode sekundarne sirovine (bio-gnojiva), u skladu s principima kružnog gospodarstva. Mikusińska et al. [46] 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 hidrochar 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 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 struje. Tako su Zhang et al. [47] proveli LCA analizu za četiri načina obrade biološkog otpada te utvrdili da je spoj termofilne digestije 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.

Navedene otpadne struje se već na europskoj (ali i globalnoj) razini primjenjuju, no prethodno su provedeni nizovi studija kojima bi se dokazala učinkovitost postrojenja energetske i materijalne oporabe 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 energetska i/ili materijalnu oporabu 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. [48] 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 [49] 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 [50, 51]. Metode višekriterijske analize korištene su u velikom broju radova u pogledu gospodarenja otpadom, što su prikazali i Achillas et al. [52] u svome preglednom radu, sagledavajući širok raspon mogućnosti korištenja metoda višekriterijske analize u svrhu rješavanja problema različitih vrsta otpada: miješani komunalni otpad, građevinski otpad, otpadne vode, elektronski i elektronički otpad, itd. Aslan et al. [53] razmatraju ulogu tehnologija “otpada-u-energiju” u kružnom gospodarstvu. Ustanovljeno je da su metode poput anaerobne digestije, spalionica, 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 WtE rješenja. Ovaj okvir, primjenom višekriterijske odluke i LCA analize, pomaže donositeljima odluka da optimiziraju WtE strategije u skladu s ciljevima kružnog gospodarstva, maksimizirajući povrat energije i materijala uz minimalan utjecaj na okoliš. Također, Guo et al. [54] su prikazali kako je odabir lokacije postrojenja za termičku obradu otpada suočen s izazovima NIMBY efekta i potencijalnim utjecajima na održivost projekta. Kako bi se donijela utemeljena odluka, razvijen je višekriterijski okvir koji kombinira fuzzy logiku i PROMETHEE rangiranje za procjenu 16 potkriterija u 4 kategorije. Primjena 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 [55], 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 Trolborg et al. [56] te Kumar et al. [57]. No, ovakvi modeli mogući su i za izbor proizvodnje energije iz klasičnih izvora, što širi raspon njihove upotrebe [58, 59, 60].

No, potrebno je razmotriti i socio-ekonomski aspekt primjene tehnologija gospodarenja otpadom. Achillas i Vlachokostas [61] ističu da tehnološke inovacije u gospodarenju otpadom moraju biti praćene rješavanjem društvenih i ekonomskih barijera. 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 [62] 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: 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 (engl. *Not in my back yard*) 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.

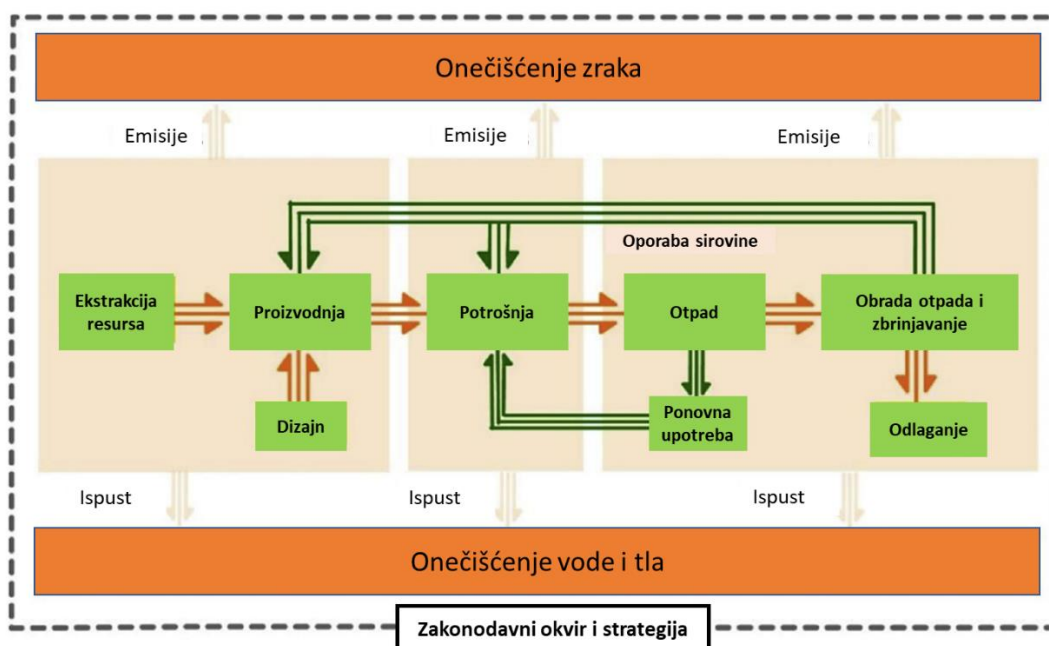
Iz navedenog je moguće uočiti prednost višekriterijskih metoda, a naročito PROMETHEE metode, koji pokriva tematiku gospodarenja otpadom te proizvodnje energije te je vrlo prikladan za korištenje prilikom modeliranja i pojednostavljivanja problematike energetske i materijalne oporabe otpada.

1.2. Svrha i cilj izrade doktorskog rada

Jedan od važnijih ciljeva EU je postizanje održivog razvoja u sektoru gospodarenja otpadom. Cilj EU je smanjenje konačnog odlaganja otpada do 2050. godine za 50% u usporedbi s 2000. godinom. Kako bi se to postiglo, 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 [63]

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 [64]

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.

Međutim, postoje specifične vrste otpada koje nije moguće zbrinuti na gore opisane načine te je potreban drukčiji pristup – neke od tih vrsta su digestat s bioplinskih postrojenja (nus-proizvod AD procesa), otpadne vode te otpadni mulj s UPOV-a. Navedene vrste su specifične jer je u njihovom slučaju moguće iskoristiti energetske i materijalne komponente, čime se i dalje zadovoljava hijerarhija gospodarenja otpadom („Drugi postupci uporabe“ iz Slika 2).

U ovoj doktorskoj disertaciji razmatrane su tehnologije koje imaju mogućnosti energetske i materijalne uporabe digestata s bioplinskog postrojenja (definirane rimskim brojevima **I** i **II**),

energetske uporabe otpadnih voda (**III**) te energetske uporabe otpadnog mulja (**IV**, **V** i **VI**, koji će se u daljnjem tekstu označavati kao jedna tehnologija: **IV**).

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 materijalne uporabe otpadnih struja s visokim potencijalom uporabe (digestat iz bioplinskih postrojenja, otpadne vode i otpadni mulj s UPOV-a).

1.3. 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 struja 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 (**I**, **II**, **III** i **IV**) te pregleda literaturnih podataka.

Poglavlje 4: U ovom poglavlju će se primijeniti izrađeni model te prikazati rezultati tri scenarija koji su prilagođeni talijanskim uvjetima, kako bi se prikazalo funkcioniranje modela u cjelini. Također će biti prikazana studija slučaja odabrane tehnologije, kojom se dokazuje funkcionalnost modela.

Poglavlje 5: Zaključci disertacije i rezultata dobivenih u poglavlju 4.

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 [65]. 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“ [66]. 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 oporabu 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. *Circular Material Use Rate* (CMUR) EU porastao je vrlo skromno – s 10,8% (2010.) na 11,8% (2023.) [67]. To znači da samo oko 12% materijala korištenih u EU potječe iz recikliranih izvora (sekundarnih sirovina). U razdoblju 2015.–2025. 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, uporaba / ponovno korištenje i recikliranje (engl. *Reduction, Reuse, Recycling*) [68, 69].

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 [70].

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“ [71]. 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 [72]. 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 prerađu organskog materijala, ali ne uključuje energetske oporabu i prerađu u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za nasipavanje“ [71]. 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, udjel recikliranih materijala u ukupnoj potrošnji porastao je za samo 1,1 p.b. od 2010. do 2023. [73], što pokazuje izazovnost 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 (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: 66% (2018.) premašila cilj za 2025. (65%).
- Circular material use rate 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) [74]. 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 [75] ističu da je spaljivanje 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 spaljivanjem 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. [76] 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 [77], koje je prikazalo da kombinacija termičke obrade biomase (šumski ostaci putem pirolize) s anaerobnom digestijom 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 prikupljamo naš otpad i gospodarimo njime 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 3) [78, 79]. U takvim petljama dolazi do integriranja kombinacija industrijskih aktivnosti koje djeluju sinergistički kako bi se međusobno podupirale, tj. kako bi nus-proizvod (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 3 Slikoviti prikaz koncepta kružnog gospodarstva [65]

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 oporabe 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“ (BREF-ovi), koje države članice moraju razmotriti pri izdavanju zahtjeva za dozvole industrijskim postrojenjima, te promicati najbolje prakse u području rudarskog otpada. 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 struja 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 papirnate, staklene, plastične, metalne i drvene ambalaže, kako bi se povećao opseg odvojenog prikupljanja na razini kućanstava i industrije te recikliranja te otpadne struje. 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;
- Ključne osnove;
- Gradnja i rušenje;
- 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. *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 autori naglašavaju kao ključni čimbenik.
- Infrastrukturna 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. *Circular material use rate* za Hrvatsku iznosi svega 5,2% (2020.), znatno ispod prosjeka EU (~12%). Stopa recikliranja komunalnog otpada u Hrvatskoj dosegla je ~37% u 2024. godini [80], što je napredak u odnosu na ~5% iz 2005., ali još daleko od cilja 55% do 2025. Međutim, korisno je istaknuti pozitivne pomake:

- Uspostava odvojenog prikupljanja biootpada u većim gradovima 2021–2022. povećala je količine 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 tjele zmlje 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 Hum 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 – recimo, 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 nabava financijskih sredstava za provedbu projekata inovacija i primjene poboljšanih tehnologija i postupaka. Značajnu ulogu ovdje igraju fondovi za sufinanciranja, organizirani u obliku programa EU: Obzor Europa, LIFE, Interreg, COSME, i drugi.

Sukladno tome, uključivanje tehnologija za energetske i materijalnu uporabu otpada ključno je za tranziciju prema kružnom gospodarstvu. Na primjer, digestat iz bioplinских postrojenja više se ne smatra krajnjim otpadom, već sirovinom za biogoriva (sušenjem i peletiranjem nastaju peleti za loženje) ili za gnojiva (izravan ili prerađen u struvit i kompost); otpadni mulj iz kanalizacije postaje sirovina za proizvodnju bioplina (kroz AD procese), kogeneracijsku proizvodnju toplinske i električne energije te izvor fosfora (kroz struvit ili vađenje iz pepela); 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 razmatramo modele 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, sa proizvodnjom dugotrajnih proizvoda koji mogu biti popravljani ili jednostavno rastavljeni i reciklirani (Slika 4). 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 4 Usporedba linearnog (lijevo) i kružnog koncepta (desno) gospodarstva [81]

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 [82]. 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 [83]. 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 [84]. Iako su ostale navedene metode potencijalno prikladne za primjenu prilikom odabira tehnologije zbrinjavanja otpadnih struja, 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 koristit će 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. 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). Navedene varijante metode nisu implementirane u grafičko sučelje korištene metode. 1988. godine predstavljena je GAIA, kao grafički dodatak PROMETHEE rangiranju. 1992. godine predstavljen je PROMETHEE V, 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 (preko tisuću referenci: <http://biblio.promethee-gaia.net>) [85].

3.1. Osnovne pretpostavke i opisi tehnologija

Kako je već navedeno, ova disertacija će razmotriti dvije otpadne struje (digestat iz bioplinskog postrojenja i otpadni mulj iz UPOV-a) te nekoliko tehnologija kojima je moguće napraviti energetska i/ili materijalnu uporabu istih. U nastavku će biti navedene specifičnosti i vrste tehnologija koje će biti razmatrane.

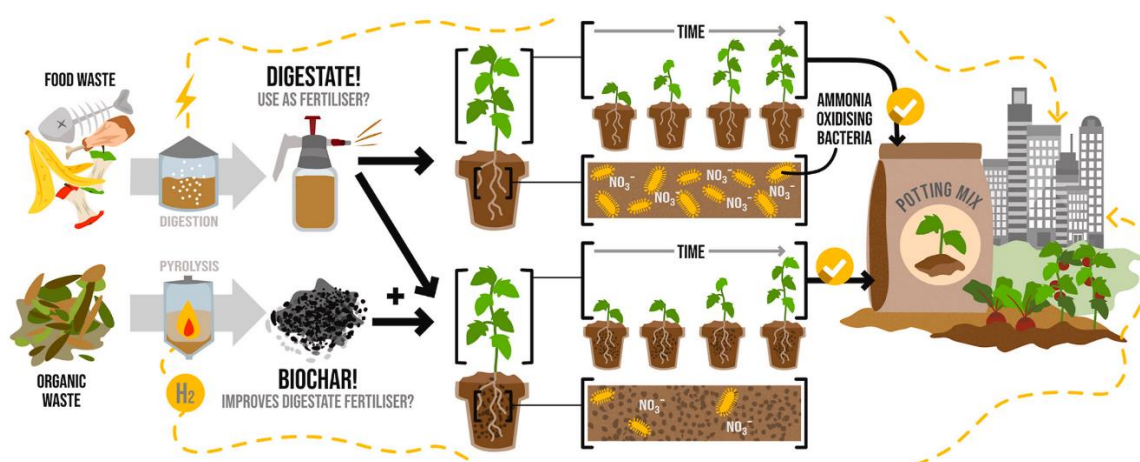
3.1.1. Izravna poljoprivredna uporaba digestata i mulja

Iako neće biti primijenjena i razmatrana kao tehnologija za odabir u sklopu disertacije, bitno je naglasiti ovaj pristup zbrinjavanju otpadnih struja jer se danas 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 [86]. 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% spaljuje [87]. Međutim, postoje velike razlike među državama članicama. 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). Hrvatska, primjerice, trenutno manji dio mulja koristi na poljima zbog ograničenja i traženja alternativa [37].

Izravna primjena digestata ili pročišćenog otpadnog mulja na poljoprivrednim površinama podrazumijeva korištenje ovih materijala kao gnojiva i poboljšivača tla, slika 5. Digestat je tekući ili polukruti ostatak nakon procesa anaerobne digestije 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.



Slika 5 Primjer sheme korištenja digestata za poljoprivredne svrhe [88]

Princip izravne uporabe temelji se na razlaganju organske tvari u tlu i dostupnosti hranjiva biljkama. Digestat obično sadrži dušik većim dijelom u amonijakom obliku, koji je biljkama brže dostupan nego organski dušik iz neprobijenog gnojiva. 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 usvajaju 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 zagađenja 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.

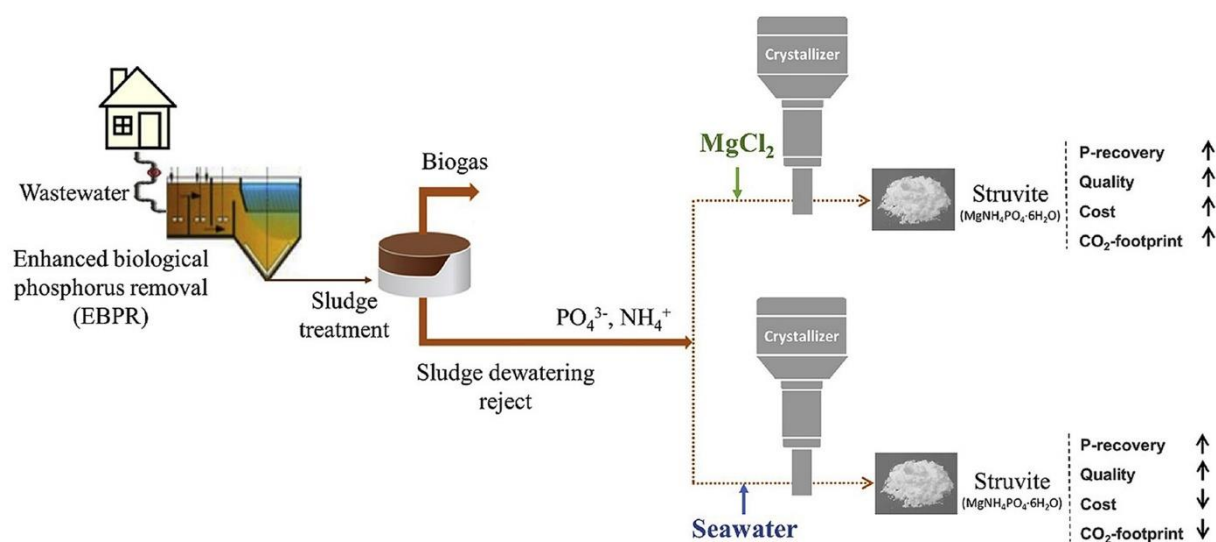
Ekonomski gledano, izravna poljoprivredna uporaba često je najisplativija opcija zbrinjavanja digestata/mulja. Troškovi obično uključuju samo skladištenje, rukovanje i transport do polja, što je znatno manje od, primjerice, troškova izgradnje i pogona spalionice ili sušare. Prema studijama, trošak obrade 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 [89]. 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).

3.1.2. 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, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \times 6 \text{H}_2\text{O}$) koji se može izdvojiti iz tekućih tokova bogatih amonijem 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 (taloženje) (Slika 6). U praksi, tekuća faza digestata ili otpadne vode (obično nakon AD mulja, gdje je oslobođen fosfor) tretira se u reaktoru gdje se namješta alkalnost (pH ~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 taložnim jedinicama (struvit-reaktorima) uz 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 [90]. 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 6 Shema proizvodnje struvita iz obrade otpadnih voda [91]

U EU je nekoliko desetaka postrojenja implementiralo tehnologiju uporabe 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 uporabu 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 [92, 93]. 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 (gnojnica) dodavanjem magnezija, čime se smanjuje zagađenje voda fosforom i dobiva gnojivo [94].

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 [95]. 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 spaljenog 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 [96, 97]. Cijena struvita na tržištu može varirati; ako se plasira kao specijalno sporo djelujuće gnojivo, može postići i veću cijenu po toni nego fosfatno kamenje. 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 procesa (temperatura 50-70 °C) 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

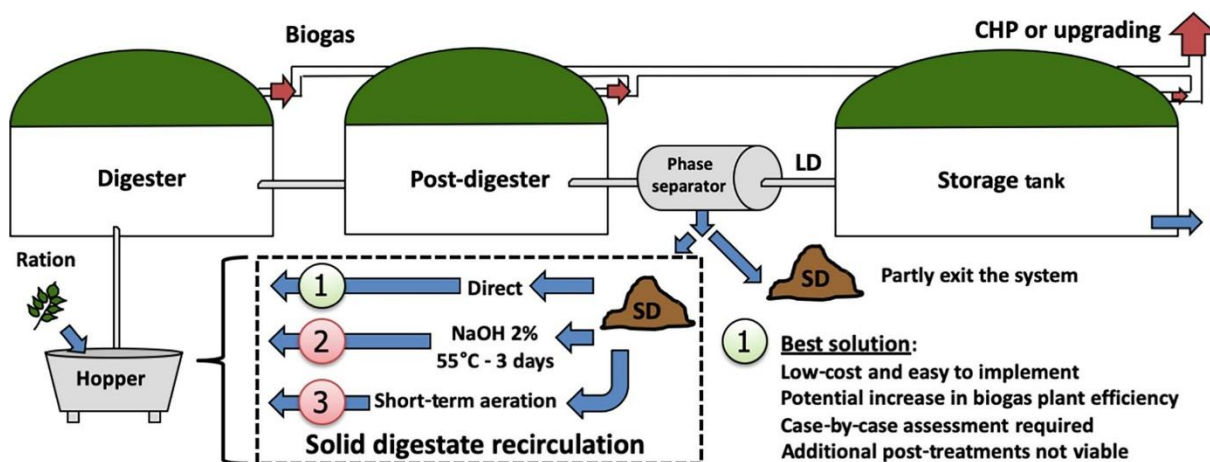
direktno na poljima [98]. Poljska i zemlje istočne Europe u posljednjih su desetak godina izgradile moderne kompostane zbog ograničavanja odlaganja mulja – npr. u Poljskoj je trend kompostiranja mulja naglo porastao oko 2010-ih, što je dovelo do povećanja korištenja “*biosolid*” komposta u melioraciji 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 [98]. 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 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 otpušten), 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) [99], što znači da prihodi rijetko pokriju troškove procesa. Ipak, računica je da je kompostiranje jeftinije od odlaganja ili spaljivanja. Npr. u Češkoj je analiza pokazala da je kompostiranje mulja ~30% jeftinije od termičke obrade, uz uvjet da postoji korisnik komposta. Kompostiranjem se smanjuje i masa za odlaganje, pa se štede naknade za deponij. 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.

3.1.3. 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 (slika 7). 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 generirala dodatni bioplin. 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 7 Shema recirkulacije digestata sa ciljem povećanja energetske učinkovitosti bioplinskog postrojenja [100]

Tehnički, postoji nekoliko pristupa recirkulaciji 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 mikrobioti da duže razgrađuje teže razgrađive komponente [101].
- 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 [102]. 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) [101]. 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.

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 [103]. Primjer je istraživački 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 [104]. 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. Može se reći da je zrelost srednja – koncept je provjeren i postoje uspješni primjeri (TRL7), ali nije široko komercijalno rasprostranjen pa se i dalje smatra donekle inovativnim rješenjem. 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 [105]. Također, ako digestat sadrži visoke koncentracije soli ili metala, recirkulacija bi ih koncentrirala – stoga se ova tehnika najčešće primjenjuje na supstrate kao što su energetski 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 [104]. To unapređuje energetsku 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 svježih 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 [90]. 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 amonijev 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 bioplina ili ispari. Time postrojenje može uštedjeti na troškovima transporta digestata i na površini potrebnoj 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 (amonijaska 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, svaki 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 [44]. Povišena koncentracija amonijaka (NH_3) smanjuje proizvodnju metana – studije pokazuju pad prinosa čak i prije nego što se dostignu koncentracije od ~3,5 g/L (granica umjerene inhibicije). Također, recirkulacija može dovesti do nakupljanja teško razgradivih supstanci (npr. huminske kiseline) 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 N_2 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. [106], spaljivanje ili višestruka prerada mulja/digestata treba vrednovati i kroz izgubljene koristi za tlo (organski ugljik koji bi se mogao vratiti).

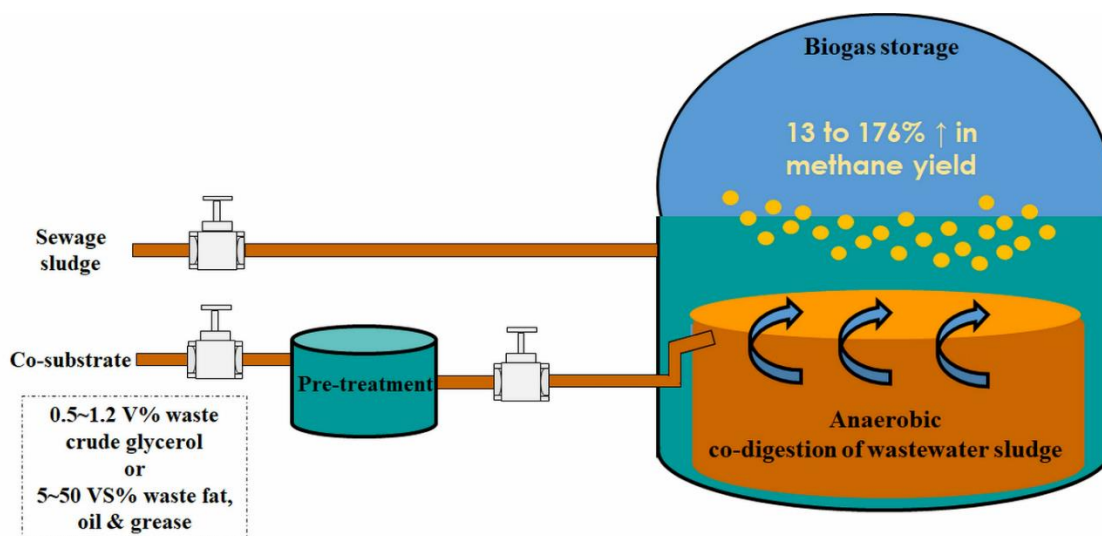
- Troškovi održavanja i složenost: Recirkulacija digestata uvodi dodatne korake (npr. separacija digestata na krutu/tekuću frakciju, eventualno tretman krute frakcije enzimima ili toplotom [90]). To znači više opreme (separatori, izmjenjivači topline, pumpe), više radnih sati i održavanja, te veću potrošnju energije. U literaturi se navodi da dodavanje druge faze digestije s recirkulacijom zahtijeva ~10–20% dodatne energije sustava, što može umanjiti neto dobit od ekstra bioplina [44]. Dakle, ekonomska isplativost recirkulacije ovisi o tome da li vrijednost dobivenog bioplina (ili poticajne tarife za tu energiju) pokriva povećane troškove pogona.

3.1.4. 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 organikom) i sekundarni ili aktivni mulj (biomasa iz procesa aeracije). AD spaja te struje 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 [107]. 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, anaerobna digestija mulja odvija se najčešće u velikim kružnim ili kvadratnim betonskim spremnicima zapremine od nekoliko stotina do nekoliko tisuća kubika, pri mesofilnim uvjetima (~35 °C) ili termofilnim (~55 °C) [108] (Slika 8). Mulj se kontinuirano ili u šaržama uvodi u digestore, gdje ga miješalice ili recirkulacija plina homogenizira. U odsutnosti kisika, konzorcij anaerobnih mikroorganizama razgrađuje organske polimere mulja: prvo enzimi hidroliziraju složene spojeve (ugljične lance, proteine, masti) u jednostavnije molekule (šećere, aminokiseline, masne kiseline). Potom acidogene bakterije fermentiraju te monomere u kratkolančane masne kiseline (poput octene, propionske), alkohole, H₂ i CO₂. Acetogene bakterije dalje konvertiraju više masne kiseline i alkohole u octenu kiselinu, CO₂ i vodik. Konačno, metanogene arheje koriste uglavnom octenu kiselinu (acetoklastične metanogene) i H₂/CO₂ (hidrogenotrofne metanogene) da proizvedu metan i vodu/CO₂. Ovaj višestupanjski proces zahtijeva finu ravnotežu – npr. pH se održava blago neutralnim (oko 7-7,5) zahvaljujući alkalitetu mulja [108]. Vrijeme zadržavanja mulja u digestoru obično je 15-25 dana (mesofilno) što omogućuje dovoljno dugu razgradnju sporijih komponenti. Tokom tog perioda, volumno se produkcija bioplina kreće oko 0,5-0,8 m³ bioplina po kg dodane organske suhe tvari, ovisno o sastavu mulja. Digestirani mulj koji izlazi ima reduciranu hlapljivu krutu tvar (engl. *volatile solids*) za oko 40-60% u odnosu na ulazni mulj. Također 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 digestor 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) [109]. 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 8 Shema proces digestije otpadnog mulja s UPOV-a [110]

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 [111]. 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 [112]. 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 [87], 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) [90]. Digestirani mulj je stabilniji – sporije se razgrađuje i manje miriše,

te ima znatno smanjen sadržaj patogenih organizama (mezofilna digestija ukloni >90% koliforma, 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 energetska 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/pokriva 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.

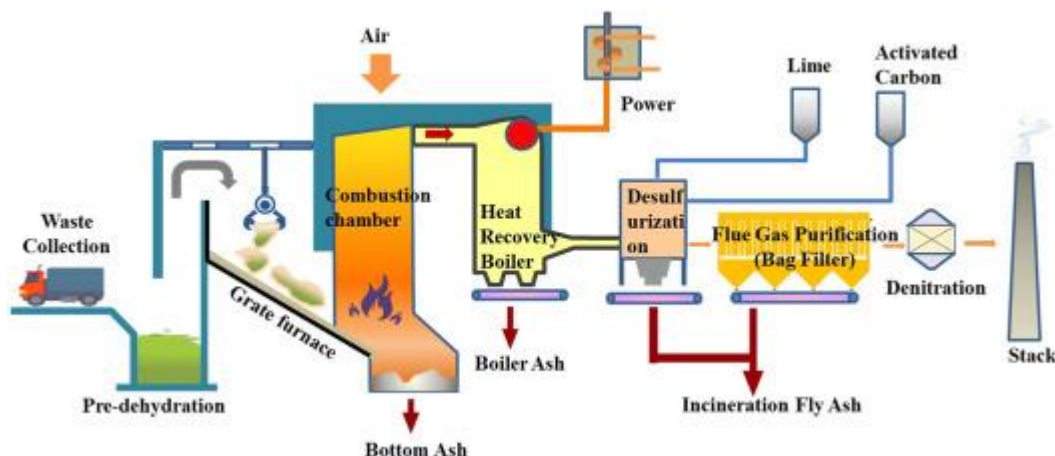
Glavna ekonomska vrijednost AD mulja dolazi od proizvedene energije. Kogeneracijom bioplina u struju i toplinu, postrojenje smanjuje svoje račune za struju i može dobiti prihode od prodaje viškova. U mnogim zemljama su postojale FiT ili premije za električnu energiju iz bioplina, što je financijski vrlo povoljno za komunalna poduzeća – time se investicija u digestore otplaćivala kroz uštede i prihode u razdoblju od, primjerice, 8-12 godina [113]. Drugi financijski dobitak je smanjenje troškova zbrinjavanja mulja: dehidrirani digestat je stabilniji i smanjenog volumena, pa troškovi transporta i konačne obrade (bilo kompostiranja, spaljivanja ili odlaganja) padaju. Npr. ako je prije digestije mulj imao 80% organske tvari, a nakon 50%, onda se plaća odlaganje manje organskog (u nekim zemljama se naplaćuje po masi organske tvari ili po toni mulja) [114]. 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 antikoroziivi 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 [115]. Stoga su mnoge vodovodne kompanije AD-u pristupile i kao investiciji koja se dugoročno isplati.

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 [116]. 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).

3.1.5. Termička obrada – spaljivanje

Spaljivanje 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 (mulj ima preko 70% organske tvari pa gotovo sve to izgori) i uništiti opasne ili neugodne komponente (patogene, organske toksine). Za otpadni mulj, postoje dvije osnovne prakse u EU: (a) monospaljivanje 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) su-spaljivanje – 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% suhe tvari u fluidiziranom sloju s dodatkom topline) ili suho (mulj se prethodno osuši na >85% suhe tvari pa se spaljuje gotovo kao čvrsto gorivo) [117].

U spaljivanju se odvija brza egzotermna oksidacija organske tvari. U tipičnoj monospalionici mulja, prethodno mehanički odvođeni 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 ogrjevnu vrijednost samostalno. U fluidiziranom sloju, vrući pijesak se koristi za prijenos topline i ravnomjerno izgaranje mulja u suspenziji. Plinovi izgaranja (dimni plin) sadrže CO_2 , vodenu paru, dušik, te okside dušika (NO_x), sumporne okside (SO_2 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 filteri vrećasti za hvatanje lebdećih čestica pepela, reaktori s vapnom ili natrijevim bikarbonatom za neutralizaciju kiselih plinova (HCl , SO_2), 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) [118]. Kod su-spaljivanja, 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.

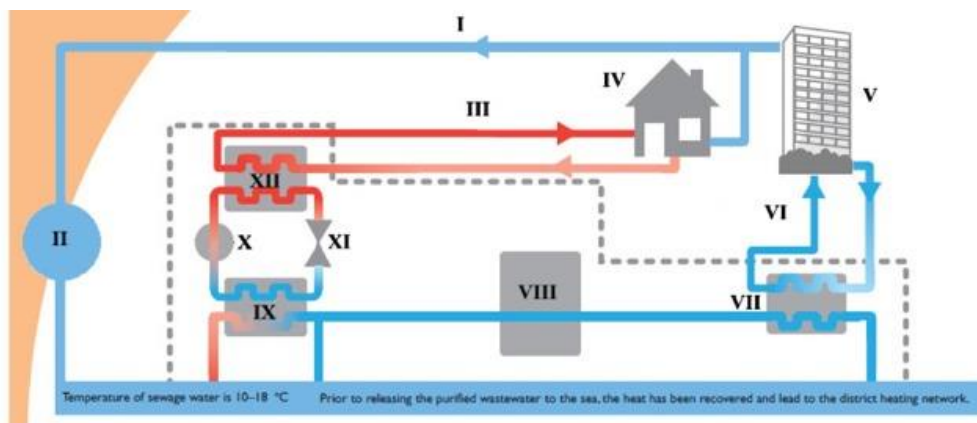


Slika 9 Shema postrojenja za termičku obradu otpada [119]

Spaljivanje 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 [120]. 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.

3.1.6. Dizalice topline

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. 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 [121].



I. Wastewater system, II. Wastewater treatment plant , III. District heating network, IV. District heating customer, V. District cooling customer, VI. District cooling network, VII. Heat exchangers, VIII. Chilled water accumulator, IX. Evaporator, X. Compressor, XI. Expansion valve, XII. Condenser

Slika 10 Shema korištenja energije iz otpadnih voda putem dizalica topline [122]

Dizalica topline radi na principu rashladnog ciklusa (kompresije i ekspanzije radnog medija). Otpadna voda ili drugi medij prenosi toplinu na radni fluid, koji se zatim komprimira čime raste njegova temperatura. Ova toplina se zatim predaje sustavu grijanja (npr. zgradama), a fluid se ponovno ekspanzijom ohladi i vraća u ciklus. Na taj način se s relativno malo električne energije može dobiti više puta veća količina toplinske energije – tipični koeficijent učinkovitosti (COP) iznosi 3–5. Sustavi mogu biti centralizirani (velike dizalice spojene na toplinsku mrežu) ili decentralizirani (manje jedinice za pojedine zgrade) [123]. Tehnologija dizalica topline je visoko razvijena i naširoko primijenjena (TRL 9). Posebice u urbanim sredinama s razvijenom kanalizacijom i komunalnim sustavima, iskorištavanje topline iz otpadnih voda dobiva na važnosti kao oblik lokalne obnovljive energije. Saravia Matus et al. [124] 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.

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 [125].

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 [126]. 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.

Potrebno je naglasiti da je u sklopu ove disertacije dizalica topline u modelu tretirana kao tehnologija energetske oporabe otpadne vode, dok ostale tehnologije ciljaju oporabu krutih otpadnih struja (digestat, mulj). Time je pomalo kao „jabuke i kruške“ – no zajedničko im je da sve doprinose ciljevima kružnog gospodarstva (smanjenje emisija, energetska/materijalna oporaba). U idealnom slučaju, ove se tehnologije ne isključuju međusobno već mogu djelovati komplementarno (npr. istodobno primijeniti dizalicu topline na UPOV i reciklirati digestat u bioplinskom). Ipak, radi potrebe rangiranja, bilo ih je potrebno staviti u isti izborni skup, uz pretpostavku da bi korisnik odabrao onu investiciju koja donosi najveću korist u skladu s prioritetima.

Također, tehnologija dizalice topline (III) nije zamjena za tehnologije zbrinjavanja mulja ili digestata, već adresira drugi tok (toplinu iz pročišćene vode). U kontekstu ovog modela, ona je ipak uključena kao jedna od konkurentskih opcija ulaganja u oporabu otpada, pod pretpostavkom da korisnik želi odabrati jednu stratešku opciju za unaprjeđenje cjelokupnog sustava gospodarenja otpadnim tokovima. U praksi, primjena dizalice topline ne eliminira potrebu zbrinjavanja mulja – stoga visok rang dizalice topline znači da bi ova tehnologija mogla biti praktična alternativa za energetske povrat, ali dugoročno će trebati kombinirati ju s rješenjem za krute otpade (npr. digestat ili mulj).

3.2. 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 vrlo teško odrediti ulazni sastav otpadne vode koja ulazi u UPOV (zbog doba godine, padalina, stanovništva, itd.). U skladu s tim, vrlo je teško napraviti univerzalno postrojenje koje može zbrinjavati sve vrste otpadnih voda, ali i u konačnici otpadnog mulja. Zbog toga su tijekom izrade modela razmatrani vrlo općeniti kriteriji, koji se odnose na sve UPOV-e i postrojenja za obradu nastalog otpadnog mulja.

Na temelju razmatranih tehnologija, koje su uzete u obzir kao temelj za izradu modela, moguće je uočiti na koje je kriterije potrebno obratiti pozornost tijekom obrade podataka za energetske i materijalne upotrebe otpadnih voda i otpadnog mulja, a koji će olakšati donositeljima odluka izbor tehnologije. S obzirom na prirodu tehnologija koje se koriste, sa ciljem što veće jednostavnosti procesa, fokus je postavljen na energetske upotrebe otpadne vode (putem dizalice topline) te otpadnog mulja iz UPOV-a (putem procesa spaljivanja).

U pogledu digestata, u ovoj disertaciji bit će sagledan slučaj upotrebe digestata u energetske i materijalne svrhe, u kojem se digestat koristi kao nova sirovina za dobivanje energije i novih materijala (gnojiva). Digestat je smjesa djelomično razgrađenih organskih tvari, mikrobiološke mase te anorganskih spojeva (primjer sastava digestata je dan u [90]). Izravna upotreba digestata kao poljoprivrednog gnojiva trenutno se smatra jeftinim rješenjem za problem njegovog odlaganja te upotrebu mineralnih i organskih tvari koje se u njemu nalaze. Međutim, postoje digestati koji se ne mogu koristiti kao poljoprivredno gnojivo te se moraju zbrinuti na drugi način. Ti digestati su ograničeni Nitratnom direktivom [127]. Svrha donošenja Nitratne direktive sastoji se u zaštiti i sprječavanju daljnjeg prekomjernog onečišćivanja podzemnih i pitkih voda nitratima, koje je najvećim dijelom uzrokovano nitratima poljoprivrednog porijekla, dakle, zbog neadekvatne i prekomjerne gnojidbe te nepravilnog skladištenja gnojovke. Također, trenutno digestat nije razmatran u regulativi ili standardima kao biogorivo te zbog toga nije bio niti istraživao kao alternativno gorivo. Zbog toga je potrebno pronaći druge načine iskorištavanja digestata kako bi se izbjeglo njegovo prekomjerno odlaganje.

Uzevši u obzir razmatrane tehnologije i otpadne struje, model se temeljio na navedenih pet tehnologija zbrinjavanja dviju otpadnih struja (digestat i otpadni mulj). Model bi bilo moguće proširiti na veći raspon tehnologija koje zbrinjavaju otpadne struje, no unutar ovoga istraživanja i doktorske disertacije fokus je bio na izradi modela koji će moći razmotriti i obuhvatiti različite otpadne struje. Razvoj ovakvog modela može biti značajna osnova za daljnja istraživanja, koja će obuhvatiti veći broj tehnologija i otpadnih struja, što može biti od velike koristi donositeljima odluka koji imaju širok izbor unutar kojega mogu donijeti odluku.

3.3. Odabir metode

Među spomenutim metodama, u ovom je radu odabrana metoda PROMETHEE (engl. *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*) 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 patiti od konzistencije 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 (engl. *Geometrical Analysis for Interactive Aid*) 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 ćemo takvu analizu osjetljivosti za razmatrane scenarije, kako bismo provjerili 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 – razvijena 1980-ih, danas broji preko 1000 znanstvenih radova i primjena u raznim sektorima. U području gospodarenja otpadom i energetike, PROMETHEE je često odabran zbog sposobnosti da uključi i kvantitativne i kvalitativne kriterije. Primjeri:

- Troldborg et al. [56] primijenili su PROMETHEE za rangiranje opcija mulja (kompostiranje, spaljivanje, anaerobna digestija) uz ekološke i ekonomske kriterije.
- Kumar et al. [57] 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 PROMETHEE posebno dobro radi 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 [128]:

- Jednostavnost primjene i interpretacije: PROMETHEE ima relativno intuitivnu strukturu – za svaku alternativu računa se Φ_i^+ (prednost) i Φ_i^- (manjak) u odnosu na druge, te konačni Φ_i 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, € 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 TOPSIS ili raniji ORESTE, 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 izbjeгава 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 [128]:

- 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 (ili 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 smo težine drugačije postavili”.
- Odabir funkcija preferencije i parametara: PROMETHEE zahtijeva da za svaki kriterij odaberemo 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 sutra uvrstimo 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 na kojoj kriterijima je neka alternativa najslabija ili najjača u numeričkom obliku. To se mora iščitavati ili iz GAIA grafova ili kroz detaljne preferencijske indekse po parovima. Drugim riječima, PROMETHEE ne daje 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 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 dodat 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

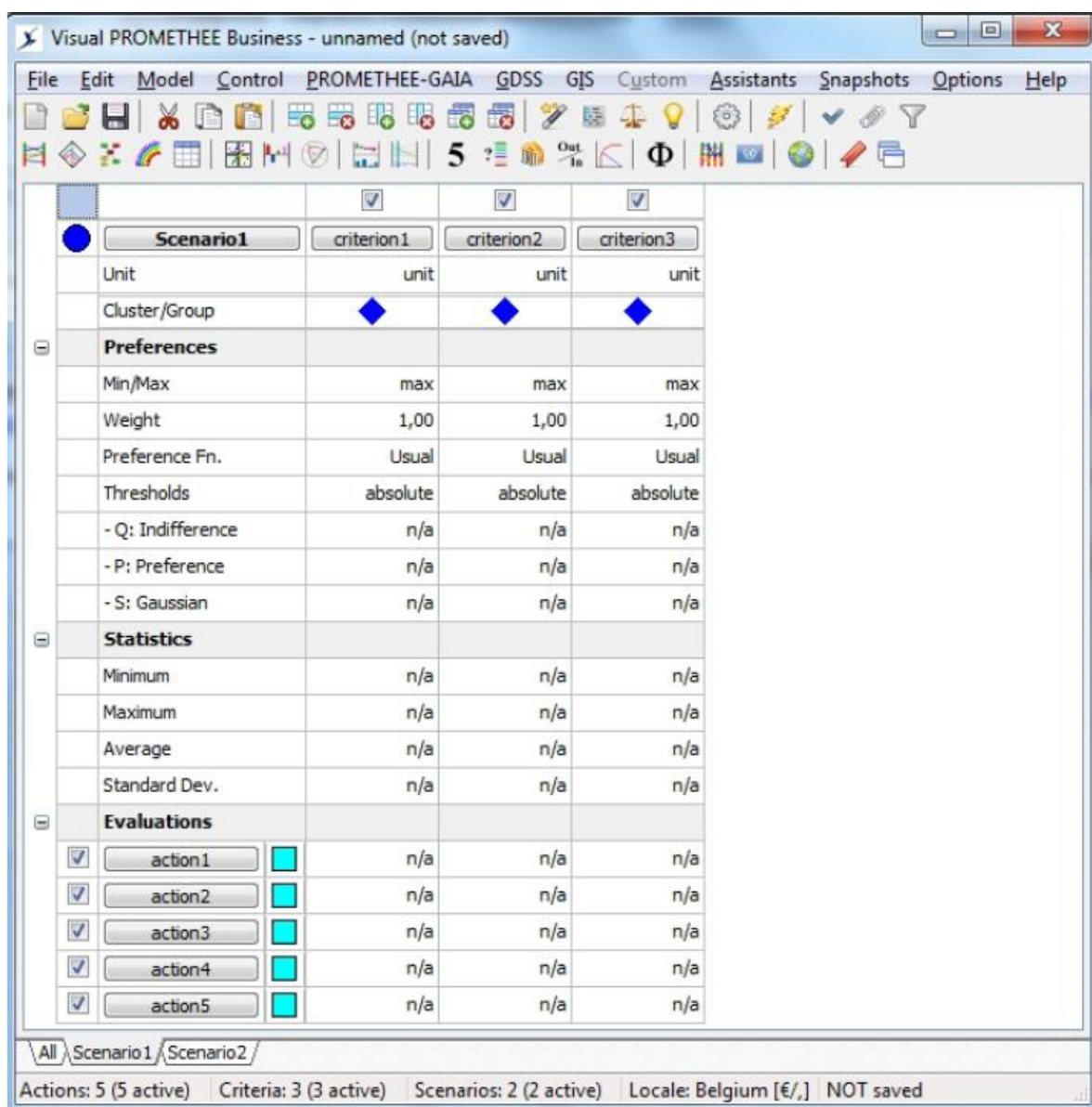
(postoji Fuzzy-PROMETHEE varijanta, ali ne u standardnoj primjeni). Stoga je nužno raditi analizu osjetljivosti – što je izrađeno u sklopu ove disertacije (*Visual Stability Intervals*). Time se provjerava koliko male promjene u težinama utječu na odluku. U radu, stabilnost odabrane tehnologije testirana je i utvrđeno je da je prilično robusna unutar određenih granica težina. To ulijeva povjerenje da se odluka može vjerovati.

3.4. Korištenje metode

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

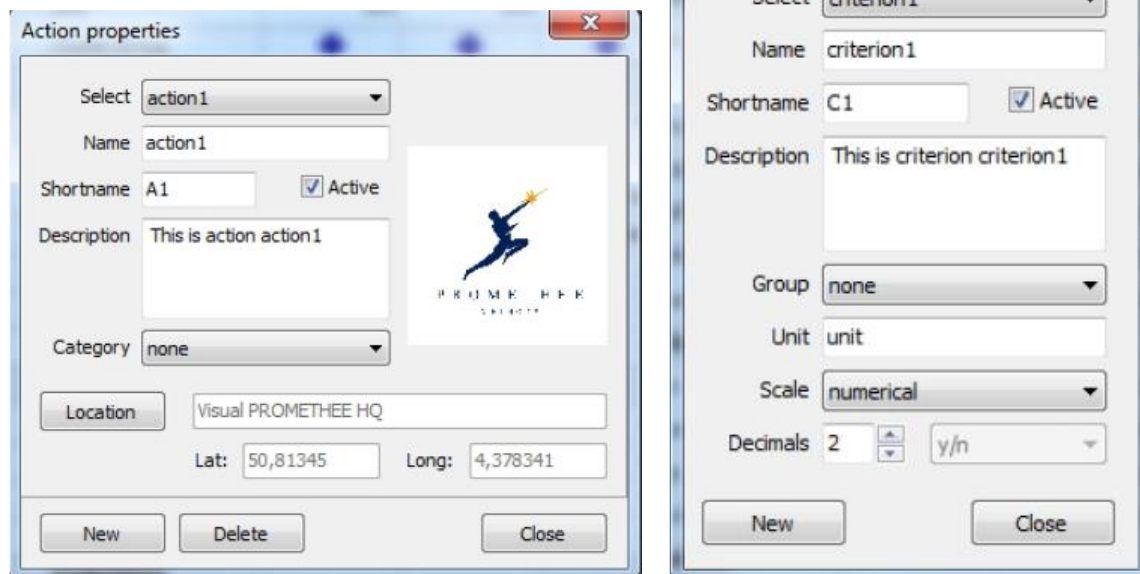
- Opcija (engl. *Alternative*);
- Kriteriji (engl. *Criteria*);
- Scenariji (engl. *Scenario*);
- Pretpostavke modela (ljestvica preferenci) (engl. *Preference Function*);
- Organizacija kriterija te
- Kriterijske težine (engl. *Weight*).

Grafički primjer postavljanja opcija, kriterija i scenarija prikazan je na Slika 11:



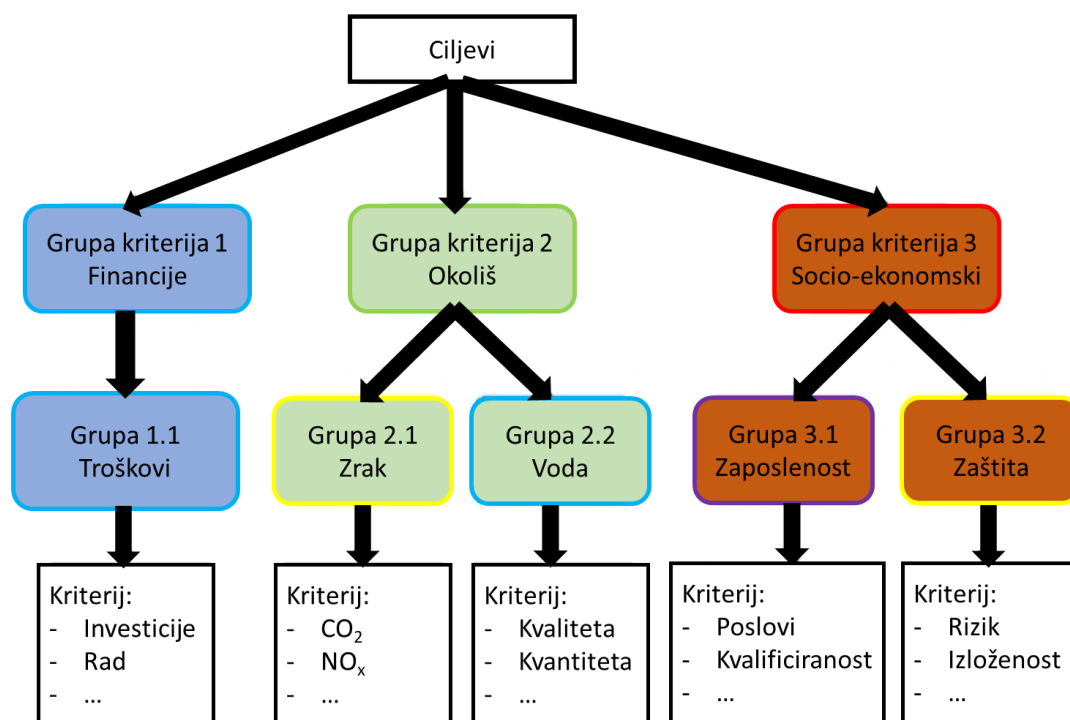
Slika 11 Grafički prikaz primjera osnovnog sučelja PROMETHEE metode [85]

Definiranje aktivnosti i kriterija izvršava se u zasebnim programskom dijalogima, koji su prikazani na sljedećoj slici (Slika 12):



Slika 12 Definiranje opcija (lijevo) i kriterija (desno) [85]

Kriterijska hijerarhija u PROMETHEE metodi sastoji se od 3 razine (Slika 13): na vrhu je *skupina* (engl. *Cluster*), koja je identificirana oblikom i bojom kojom je ispunjen oblik. Na središnjoj razini nalaze se *grupe kriterija* (engl. *Group*) – svaka grupa pripada određenoj skupini. Identificirane su oblikom vlastite skupine te bojom ispune, kao i specifičnom bojom vanjske linije. Na dnu se nalaze *zasebni kriteriji: pod-kriteriji* (engl. *Criteria*). Svaki kriterij pripada vlastitoj kriterijskoj grupi.



Slika 13 Hijerarhijska raspodjela kriterija [85]

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 (niste 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 preferenci) 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 14).

Weighing Assistant

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 14 Primjer unosa podataka o težinskim kriterijima [85]

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 [85]:

$$\max \{f_1(a), f_2(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a) \mid a \in A\} \quad (1)$$

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 (1, kriteriji su maksimizirani, međutim moguće ih je i minimizirati.

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

Tablica 1 Višekriterijska tablica [85]

	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:

- a je prioritetniji od b ;
- a i b su indiferentni;
- 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:

$$\Pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j P_j(a, b) \quad (2)$$

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.

3.5. 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.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a, b) \quad (3)$$

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.

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(b, a) \quad (4)$$

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:

$$a P^I b \text{ ako i samo ako } \Phi^+(a) \geq \Phi^+(b) \text{ i } \Phi^-(a) \leq \Phi^-(b) \quad (5)$$

gdje P^I označava prioritet u PROMETHEE I rangiranju.

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

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (6)$$

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:

$$aP''b \text{ ako i samo ako } \Phi(a) > \Phi(b) \quad (7)$$

gdje P'' označava prioritet u PROMETHEE II rangiranju.

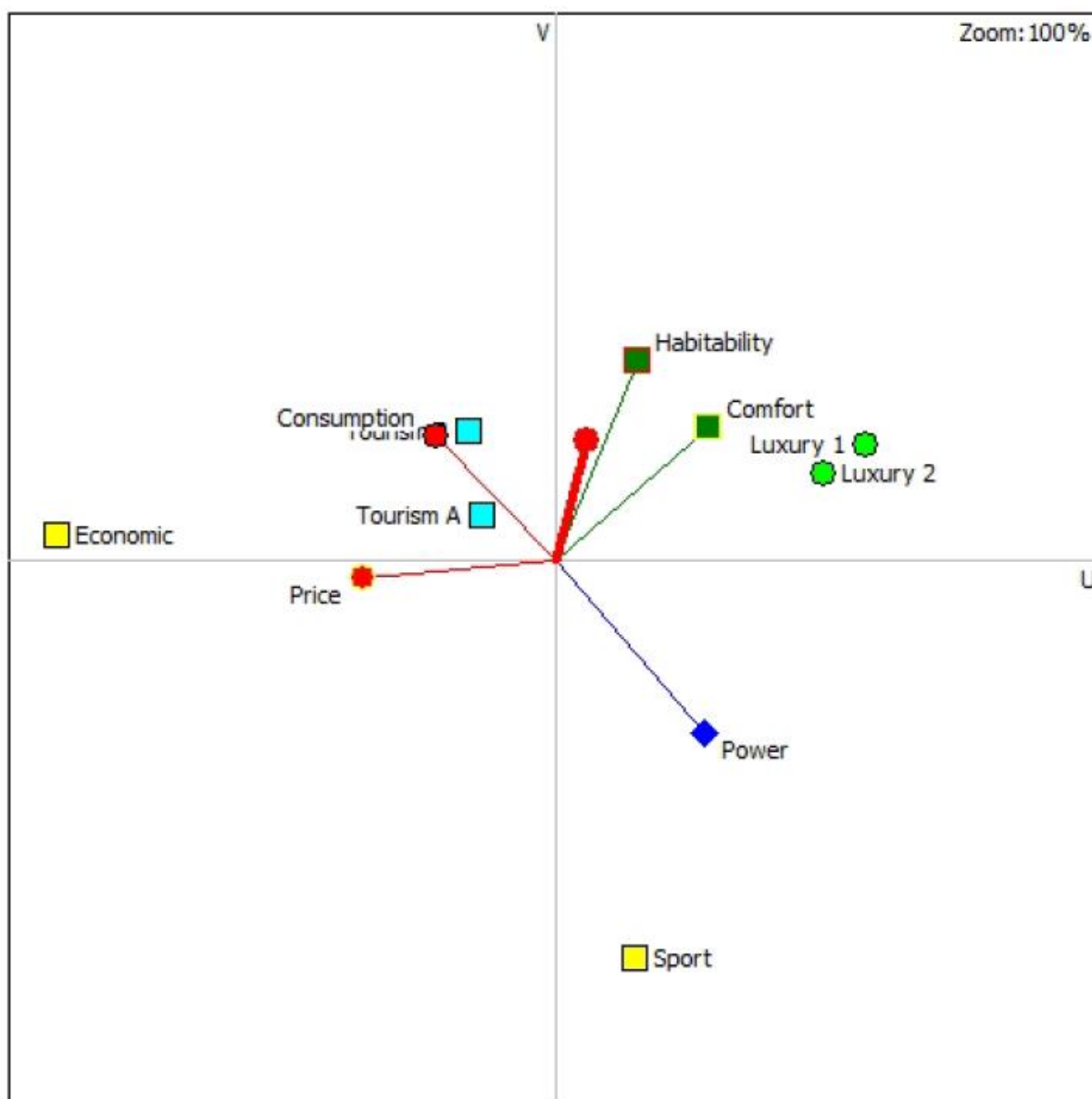
3.6. GAIA

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 15).



Slika 15 Primjer GAIA prikaza rezultata modela [85]

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.

3.7. Odabir kriterija

Pregledom literature na temu energetske i materijalne uporabe otpada i otpadnih struja (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 uporabe otpada.

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

Tehnološka skupina je podijeljena na tri grupe kriterija pod nazivima: *Tehnologija*, *Energija* i *Ostalo*. *Socio-ekonomska* skupina podijeljena je na dvije grupe kriterija pod nazivima: *Pravno-administrativni okvir* te *Troškovi*. *Okolišna* skupina sastoji se od jedne grupe kriterija pod nazivom: *Emisije*. Navedenim grupama i skupinama kriterija pripada sveukupno 20 kriterija (Slika 18).

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 najlošijeg (1), koji prikazuje najlošije karakteristike razmatranog kriterija (npr. najslabija pouzdanost tehnologije jer nije ispitana niti na laboratorijskoj razini), do najboljeg (5), koji prikazuje najbolje karakteristike (npr. tehnologija je komercijalna i ispitana i zbog toga je dokazana njena pouzdanost), što je prikazano na Slika 16.

The screenshot shows a 'Qualitative Scales' dialog box. On the left, there are input fields for 'Select' (set to '5-point'), 'Name' (set to '5-point'), and 'Unit' (set to '5-point'). Below these is an 'Orientation' section with 'Min' and 'Max' radio buttons, where 'Max' is selected. At the bottom left, there is a 'Number of levels (max 10)' spinner set to 5. On the right is a table with 10 rows and 3 columns: 'Level', 'Label', and 'Value'. The first five rows are populated with values 1 through 5 and their corresponding labels. The last five rows are empty. At the bottom are buttons for 'New', 'Delete', 'Scale Builder', and 'Close'.

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 16 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 17.

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		

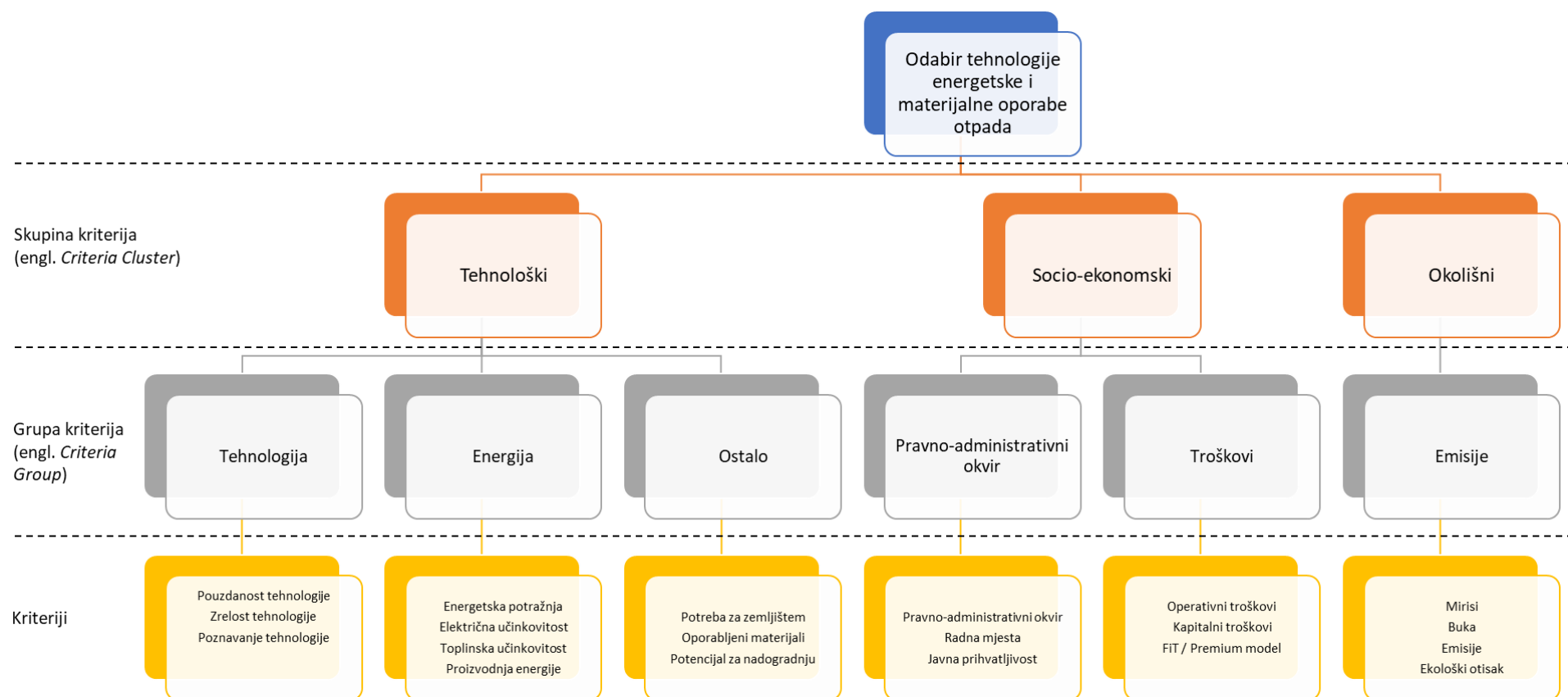
New
Delete
Scale Builder
Close

Slika 17 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 18 Hijerarhija kriterija za model energetske i materijalne oporabe otpada

3.7.1. Tehnološki kriteriji

Skupina kriterija *Tehnološki kriteriji* je jedna od najčešćih koje se pojavljuju u različitim radovima, znanstvenim istraživanjima, ali i komercijalnoj provedbi raznovrsnih modela (Slika 18). 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
Pouzdanost tehnologije	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Ovaj kriterij ocjenjuje tehnologije koje se razmatraju. Jesu li tehnologije ispitane ili su još uvijek u laboratorijskoj fazi? Je li riječ o komercijalnim tehnologijama koje je moguće dodatno poboljšati ili su one već utvrđene? Pouzdanost tehnologije moguće je mjeriti i na temelju broja postojećih operativnih postrojenja.
Zrelost tehnologije	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Kriterij koji definira broj mana i kvarova tehnologije. Koliko je komercijalna tehnologija i njena dostupnost? 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 energetske 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 energetske 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.
Oporabljeni materijali	Kvalitativno (da-ne)	Maksimizacija	Nastaju li prilikom korištenja tehnologije novi materijali? Materijali koji su oporabljeni uporabom tehnologije iz otpadnih struja 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 otpadne struje.
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?

3.7.2. 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 struja.

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 (engl. *Plant capital cost*, CAPEX);
- Operativni i troškovi održavanja (engl. *Plant operational cost*, 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 (NSV);
- 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 spaljivanja digestata iz bioplinskih postrojenja (I), CAPEX uključuje izradu infrastrukture i spremnika za digestat, sustav za izgaranje i kotao, sustav vode i pare, projektiranje i izgradnju te elektromehaničke instalacije [129]. No, u CAPEX tehnologije I 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 [129].

CAPEX i OPEX tehnologije **II-a/b** definirani su u radu Đurđević i Hulenčić [130], a povezani su s troškovima nadogradnje bioplinskog postrojenja, s ciljem recirkulacije digestata ili proizvodnje gnojiva (struvita).

U slučaju tehnologije dizalice topline (**III**), CAPEX uključuje izradu postrojenja (izmjenjivač, cijevi, pumpe, itd.), opremu za analize ulaznih i izlaznih struja otpadne vode te troškove priključaka na mrežu i ostale neplanirane troškove [131, 132]. S druge strane, OPEX uključuje troškove električne energije potrebne za rad postrojenja te trošak održavanja. Trošak održavanja u slučaju tehnologije **III** može biti značajan zbog potrebe za čišćenjem cijevi, kako ne bi došlo do začepjenja i smanjenja ili zaustavljanja protoka, te znatno ovisi o sastavu otpadnih voda koje se koriste kao izvor energije [132].

Kod tehnologije spaljivanja otpadnog mulja (**IV**), CAPEX i OPEX su vrlo slični kao i kod tehnologije spaljivanja digestata (**I**), no u ovom slučaju je moguće u OPEX-u zanemariti troškove zbrinjavanja pepela, zbog mogućnosti primjene istoga na pogodnim površinama (poljoprivreda, hortikultura).

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.

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 struja 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.

3.7.3. 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 struja;
- 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.

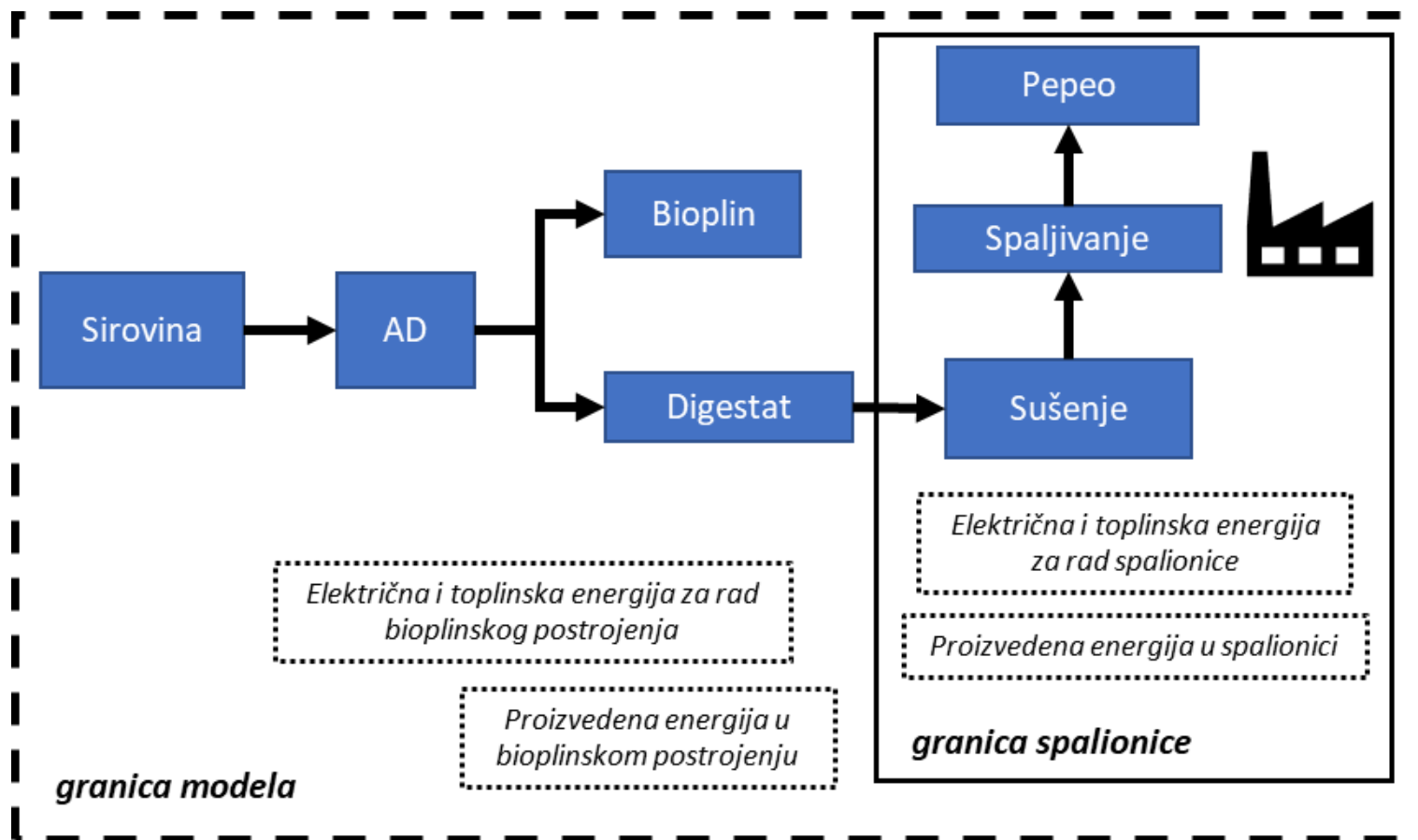
U cilju preventivnosti, prilikom korištenja okoliša, primjenjuju se najbolje raspoložive tehnike i u svijetu priznati sustavi održavanja postrojenja. U ovom radu su prikazane tehnologije koje mogu pomoći donositeljima odluka omogućavanje gospodarskog napretka kroz očuvanje okoliša, ukoliko se pridržavaju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

Tablica 5 Opis i pregled okolišnih kriterija

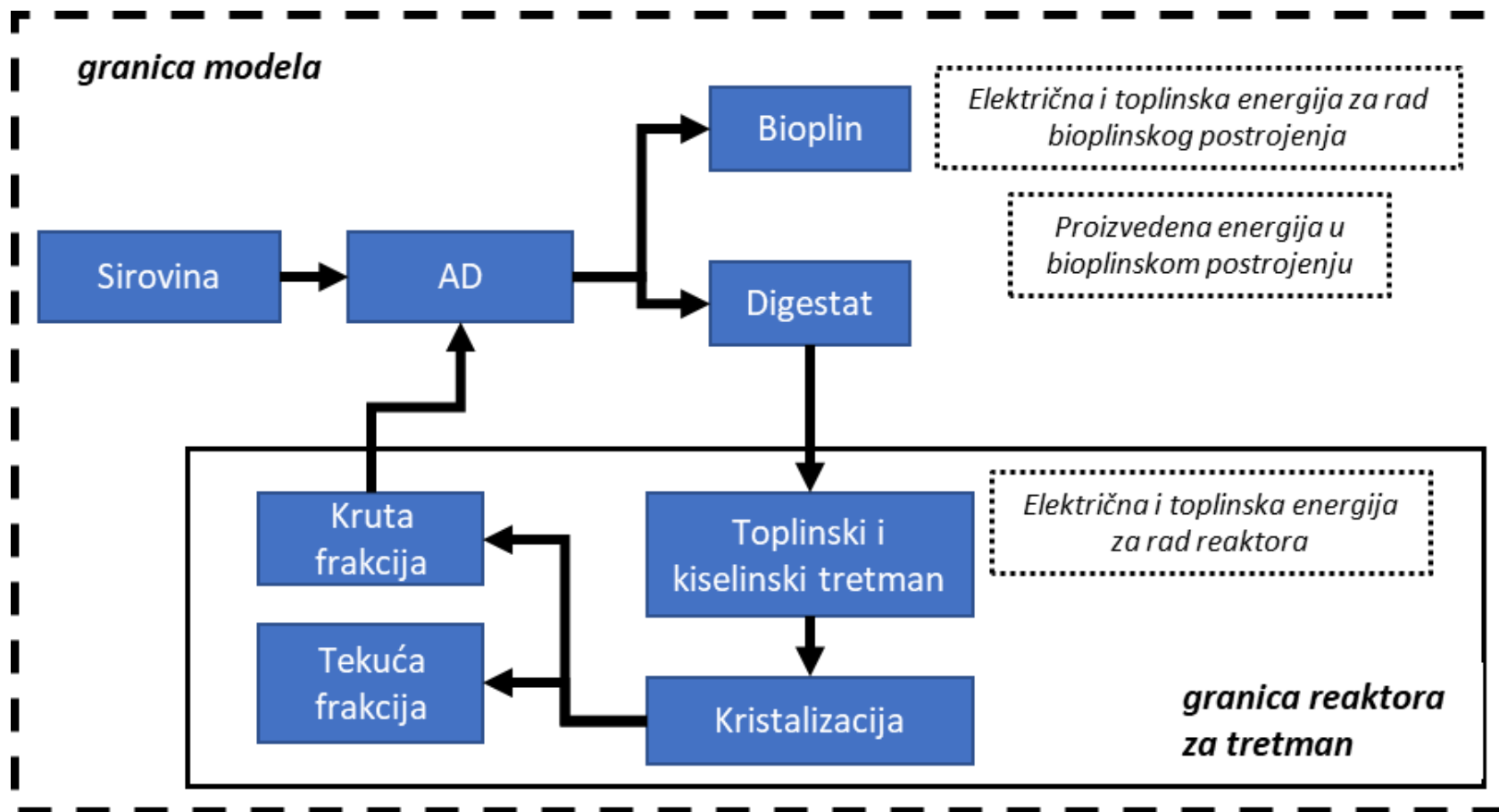
Kriterij	Jedinica	Optimizacija	Opis
Mirisi	Kvalitativno (1-5)	Maksimizacija	Stvaranje i utjecaj neugodnih mirisa tijekom rada postrojenja. Ovaj kriterij je potrebno maksimizirati jer se razmatra povećanje pozitivnog utjecaja na okoliš, tj. smanjenje pojavljivanja neugodnih mirisa zbog ispuštanja štetnih 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 (engl. <i>Global Warming Potential</i> , GWP) svakog proizvedenog stakleničkog plina [133].
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 [134]. Ovaj kriterij je potrebno maksimizirati, jer veća ocjena ekološkog otiska označava manji negativan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje.

3.7.4. Granice sustava

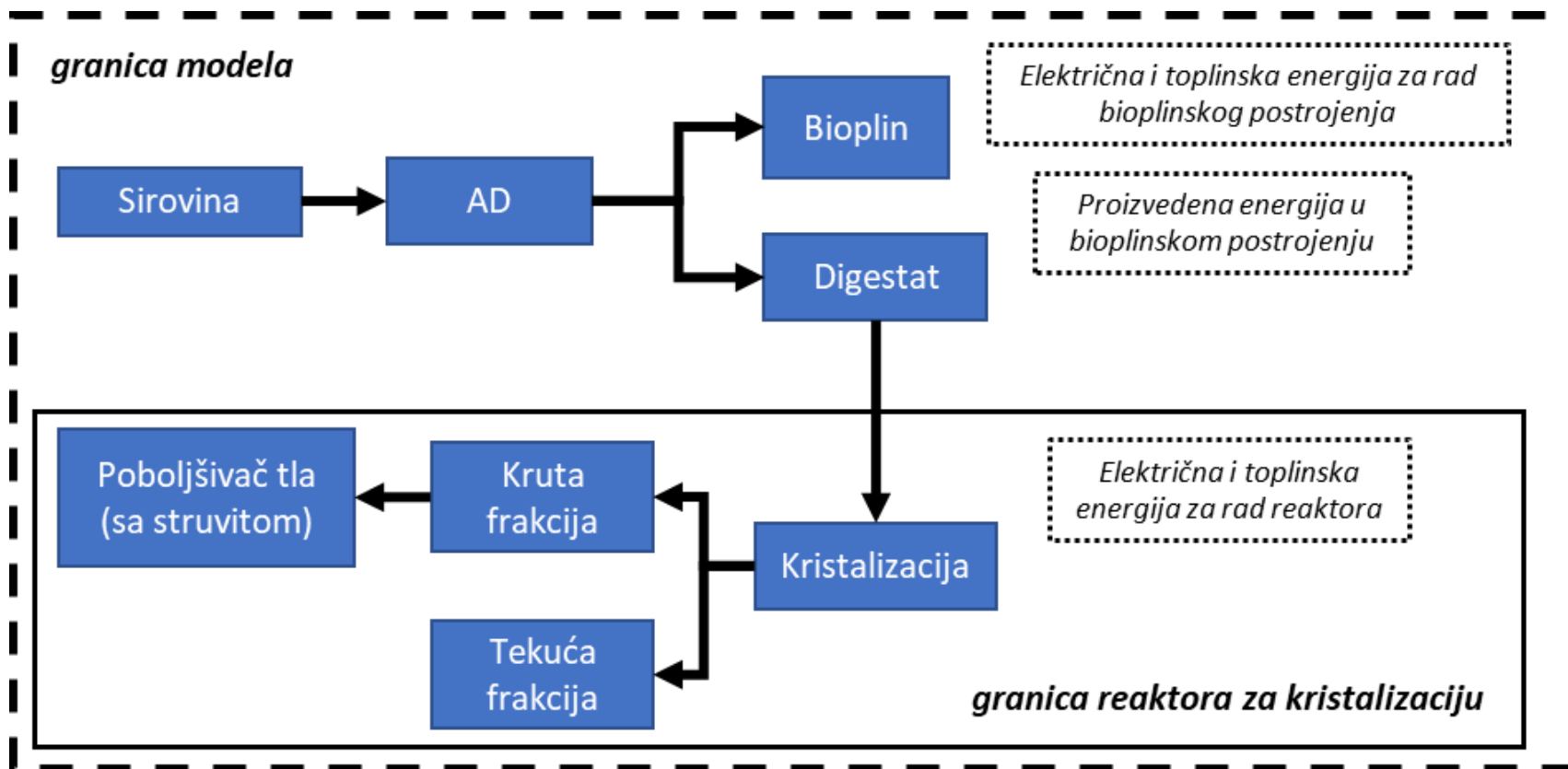
Potrebno je naglasiti kako su razmatrani kriteriji bili odabrani i u skladu s granicama sustava koje su definirane za svaku tehnologiju (**I – IV**). Granice sustava prikazane su na slikama za zbrinjavanje otpadnih struja bioplinskog postrojenja (Slika 19, Slika 20) te za zbrinjavanje otpadnih voda i otpadnog mulja (Slika 21, Slika 22, Slika 23).



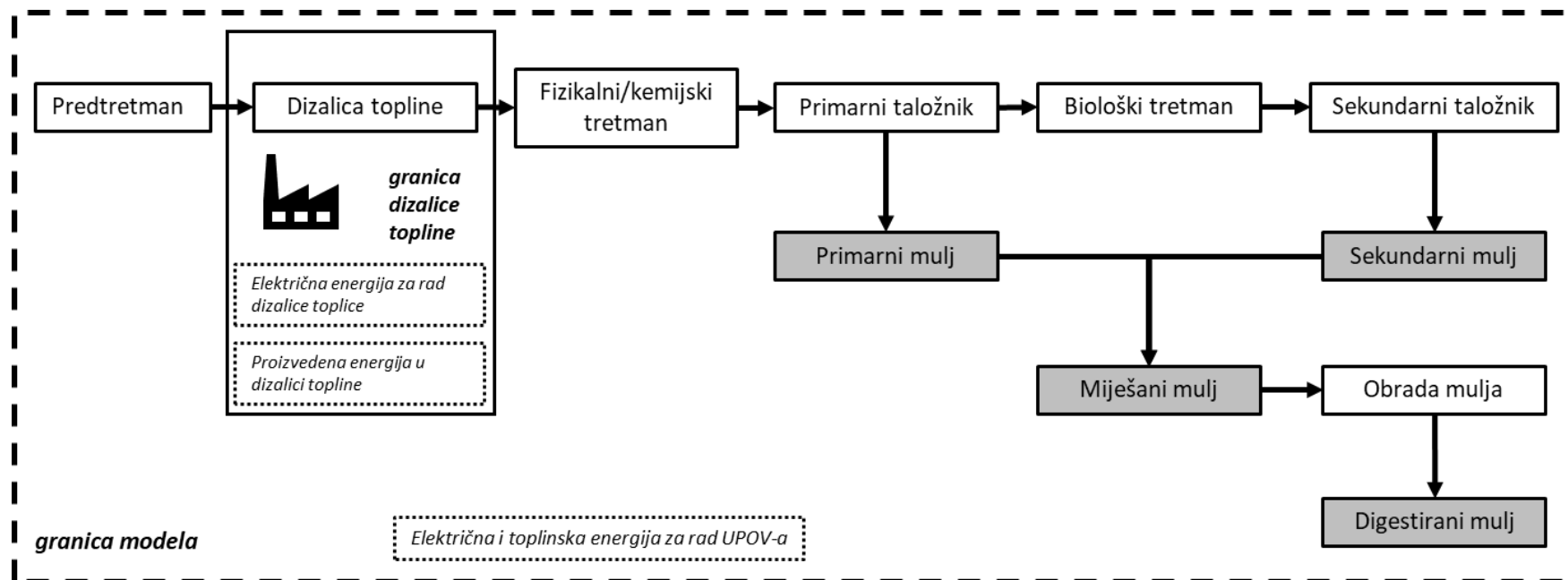
Slika 19 Granica modela za tehnologiju I (spaljivanje digestata)



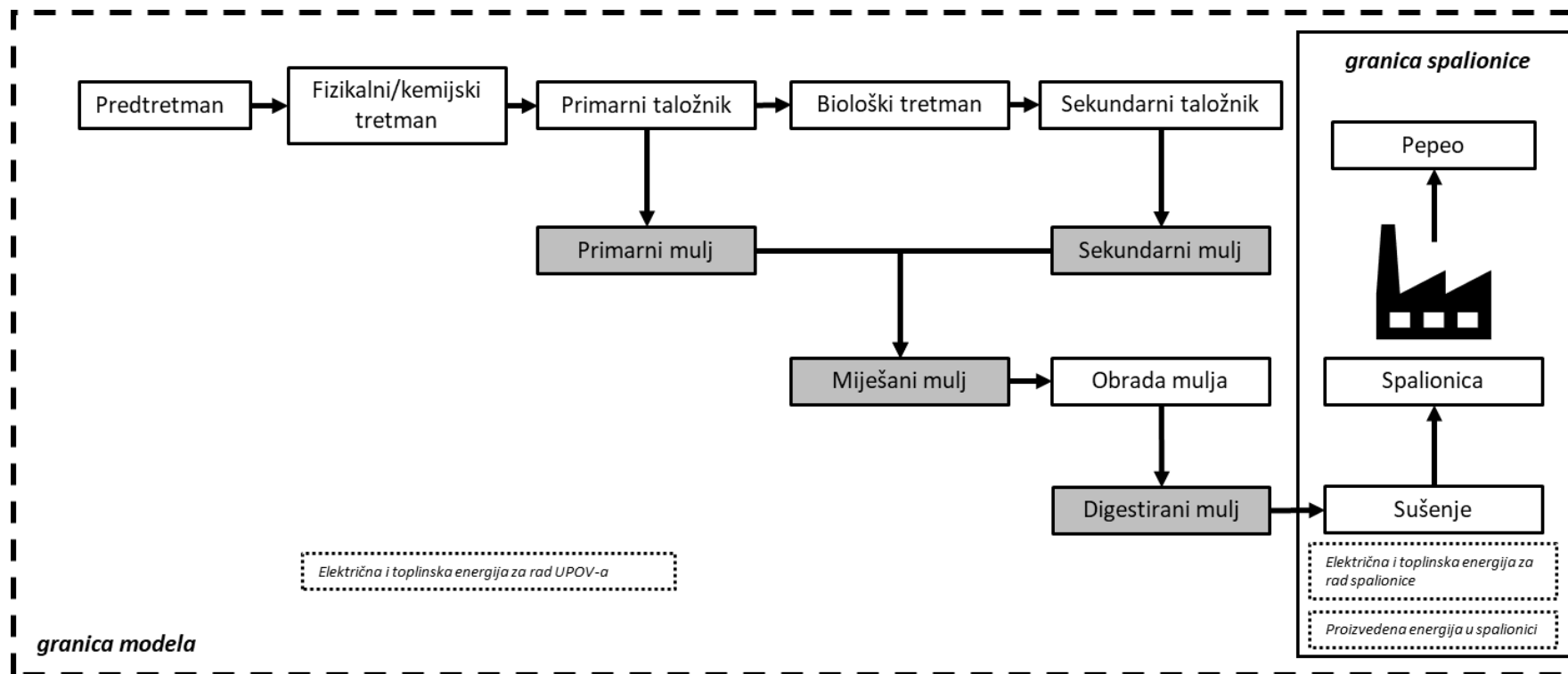
Slika 20 Granica modela za tehnologiju II-a (recirkulacija digestata)



Slika 21 Granica modela za tehnologiju II-b (proizvodnja poboljšivača tla sa struvitom)



Slika 22 Granica sustava za tehnologiju III (dizalica topline)



Slika 23 Granica sustava za tehnologiju IV (spaljivanje otpadnog mulja)

3.8. 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 struja – digestata, otpadne vode te otpadnog mulja.

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

1. Kvaliteta podataka o alternativama: Sve alternative trebaju biti procijenjene po svim kriterijima na temelju vjerodostojnih izvora (literatura, mjerenja, ekspertize). U ovoj disertaciji je to osigurano ubacivanjem literaturno kompiliranih vrijednosti za tehnologije. Bitno je da su ti podaci uporedivi i relevantni za konkretan slučaj (regiju). U slučaju disertacije, svi brojevi su prilagođeni na jednake uvjete (npr. za 0,5 MWel bioplinско postrojenje, 40.000 ES UPOV, itd.) kako bi usporedba bila pravedna.
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 bar 5% u funkciji. Ako je to krivo postavljeno (npr. $q=0$ pa i mala razlika prelazi u prednost), rang može biti iskrivljen. 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 ste 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.

3.8.1. Raspon vrijednosti kriterija

Tehnologije (opcije) koje će se razmatrati su sljedeće: energetska uporaba digestata procesom spaljivanja (**I**); recirkulacija digestata u svrhu poboljšanja proizvodnje bioplina te proizvodnje energije iz istog (**II-a**¹); materijalna uporaba digestata u svrhu proizvodnje kvalitetnog gnojiva za poljoprivredne površine (**II-b**); energetska uporaba toplinske energije iz otpadne vode (**III**); proizvodnja energije iz otpadnog mulja procesom spaljivanja (**IV**). Iako su provedena istraživanja provedena u Hrvatskoj, navedeni scenariji osvrću se na stanje u Italiji (sjeverna regija Italije), zbog dostupnosti podataka i postojećih postrojenja.

Pregledom literature za navedene tehnologije, definirani su rasponi koji se najčešće pojavljuju na komercijalnoj i pilot razini postrojenja. Iako postoje različite veličine i dimenzije navedenih tehnologija te je moguće proširiti navedene raspone, otkriveno je kako se na nacionalnoj i lokalnoj razini u EU najčešće primjenjuju tehnologije u prikazanim rasponima (Tablica 6). Zbog toga su isti odabrani za razmatrane granice modela (poglavlje 3.7.4), kako bi se donositeljima odluka omogućio odabir već ispitanih raspona, pristupa i tehnologija.

¹ Tehnologija II se fokusira na bioplinska postrojenja, ali razmatra energetska (opcija II-a) i materijalnu (opcija II-b) uporabu digestata.

Tablica 6 Literaturni pregled raspona navedenih kriterija za svaku od navedenih tehnologija

Kriterij		Dizalica topline ²	Spaljivanje otpadnog mulja	Spaljivanje digestata	Recirkulacija digestata	Proizvodnja gnojiva (struvit)	Jedinica	Izvor
1	Pouzdanost tehnologije	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	[135, 136]
2	Zrelost tehnologije	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	[135, 136]
3	Poznavanje tehnologije	ne – da (2 stupnja)					/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora
4	Energetska potražnja	634,00 – 2.500,00	7.424,84 – 9.700,00	900,00 – 3.700,00	900,00 – 4.953,23	193,23 – 2.653,23	MWh/god.	[132, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143]
5	Električna učinkovitost	100	20 – 35		30 – 35		%	[132, 144, 141, 145, 146, 147, 148]
6	Toplinska učinkovitost	100	35 – 60		40 – 70		%	[132, 144, 141, 145, 146, 149, 147]
7	Proizvodnja energije	880,00 – 1.760,00	30.000,00 – 65.340,00	1.760,00 – 5.867,00	1.604,39 – 13.959,20	1.119,20 – 6.225,00	MWh/god.	[140, 141, 139, 146, 132, 149, 150, 148, 151, 152]
8	Potreba za zemljištem	30.000,00 – 40.000,00	50.000,00 – 215.000,00		8.000,00 – 40.000,00		m ²	[108, 153, 132, 154]
9	Oporabljeni materijali	ne – da (2 stupnja)					/	[135, 136, 155, 156]
10	Potencijal za nadogradnju	ne – da (2 stupnja)					/	[135, 136, 156]
11	Pravno-administrativni okvir	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	[132, 157, 158, 159, 160, 161]

² Učinkovitosti dizalica topline prikazuju se pomoću COP faktora, no one su u ovom radu definirane kao 100%-tne.

Kriterij		Dizalica topline ²	Spaljivanje otpadnog mulja	Spaljivanje digestata	Recirkulacija digestata	Proizvodnja gnojiva (struvit)	Jedinica	Izvor
12	Radna mjesta	4 – 30	24	24	6 – 20	10 – 22	#	[162, 129, 163, 164, 152]
13	Javna prihvatljivost	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	[165, 166, 167, 168, 143, 169, 161]
14	Operativni troškovi	42.000,00 – 220.000,00	1 – 2 mil.	209.119,00 – 430.000,00	250.000,00 – 490.000,00	400.540,54 – 620.000,00	EUR/god	[139, 138, 129, 132, 142, 163, 170, 130, 171]
15	Kapitalni troškovi	2,6 – 5,8 mil.	54 – 60 mil.	3 – 7 mil.	2 – 4 mil.	2 – 4 mil.	EUR	[139, 138, 129, 132, 142, 163, 130, 172, 173]
16	Fit/Premium model	ne – da (2 stupnja)					/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora
17	Mirisi	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	[139, 172, 174, 175, 143, 176, 177, 178]
18	Buka	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	[177, 178, 175, 172, 179]
19	Emisije	234,58 – 8.124,00	7.173,91 – 9.323,00	888,32 – 3.226,50	152,00 – 3.000,00	2.144,00 – 3.600,00	t CO _{2eq}	[139, 172, 137, 174, 179, 132, 175, 180, 149, 143] [178, 181, 165, 182, 170]
20	Ekološki otisak	jako loše – jako dobro (5 stupnjeva)					/	Komunikacija sa stručnjacima i iskustvo autora

3.8.2. Postavljanje scenarija i težista

Navedene tehnologije razmotrene su kroz tri scenarija: *Javnost* (Slika 24), *Tehnički aspekt* (Slika 25) i *Okoliš* (Slika 26). 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, SWING, SMART i sl. da se izgradi konsenzus težina.

Kroz literaturu se vidi da PROMETHEE uglavnom nalazimo u:

- Akademskim studijama (istraživačke analize slučaja, doktorske disertacije, EU projekti koji testiraju metodologije).
- Savjetodavnim studijama (npr. JRC 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 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 3.4 (Slika 14), na Slika 24 su prikazani težine za scenarij *Javnost*, korištenjem načina „zvijezda“. Iako je na slici vidljivo kako hijerarhijske težine i dalje ima *Tehnička* skupina kriterija, koncentracija u ovom scenariju je na socio-ekonomskim kriterijima. Razlog tome leži u hijerarhijskoj raspodjeli kriterija, gdje prevladavaju tehnički kriteriji zbog njihove količine, u usporedbi s ostalim kriterijima.

Težine kriterija određene su uz pomoć softvera Visual PROMETHEE: svakom kriteriju dodijeljena je ocjena važnosti (tzv. *weights* u obliku zvjezdica), 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 uporabe 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 24 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 25).

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 25 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 26 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
 Set Equal
Apply
Cancel

Slika 26 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, do koje dolazi zbog uključenja 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.

3.8.3. Definiranje modela u PROMETHEE metodi

Nastavno na prethodna poglavlja, definirane su postavke PROMETHEE metode za izradu modela energetske i materijalne uporabe otpadnih struja. Grafički prikaz postavljenog modela prikazan je na Slika 27.

Fiksne vrijednosti modela označene su **crvenim** okvirom, a one su sljedeće:

- Kriteriji (raspoređeni po skupinama kriterija);
- Jedinice definirane za svaki kriterij;
- Minimalna i maksimalna vrijednost svakog navedenog kriterija, u skladu s Tablica 6;
- Tehnologije koje se razmatraju (I – IV) – crvenim kvadratima su označene tehnologije povezane s bioplinskim postrojenjima, dok su plavim kvadratima označene tehnologije povezane s otpadnim vodama.

Navedene vrijednosti su definirane kako bi se optimalno odabrala prikladna tehnologija energetske i materijalne uporabe otpadnih struja, a u skladu s potrebama donositelja odluka i korisnika modela. Nastavno na to, korisnik modela mora unijeti sljedeće parametre (na slici označene **plavim** okvirima):

- Težinske vrijednosti svakog kriterija – ovo je subjektivan unos podataka, gdje svaki korisnik unosi podatke koji su specifični na lokalnoj/nacionalnoj razini, a koje su u skladu s potrebama i mogućnostima korisnika;
- Kvantitativne i kvalitativne vrijednosti svakog od kriterija, sukladno dostupnim podacima i stanju na razmatranoj lokaciji.

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

	javnost	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uč...	Toplinska uč...	Potreba za z...	Oporabljeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Miris	Buka	Emisije	Ekološki otisak
Unit		5-point	5-point	MWh	%	%	5-point	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	max	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		3,00	3,00	190,00	20,00	35,00	2,00	0,00	880,00	0,00	0,00	2,00	337800,00	42000,00	4,00	3,00	0,00	3,00	2,00	152,00	3,00
Maximum		5,00	5,00	8500,00	100,00	100,00	4,00	1,00	40340,00	1,00	1,00	4,00	6000000,00	2000000,00	24,00	4,00	1,00	5,00	5,00	9323,00	5,00
Average		4,00	3,80	4537,06	42,00	70,00	3,20	0,60	17811,68	0,80	0,80	3,40	14448751,57	530897,91	28,00	3,60	0,60	3,80	3,20	3364,60	4,00
Standard Dev.		0,63	0,75	2507,18	29,77	15,17	0,75	0,49	23585,82	0,40	0,40	0,80	21191048,20	310144,98	9,72	0,49	0,49	0,75	1,17	2706,38	0,89
Evaluations																					
☑ Dizalica topline - ...	◆	dobro	dobro	2434,00	100,00	100,00	prosječno	ne	880,00	da	ne	dobro	5420000,00	82000,00	24,00	dobro	no	dobro	prosječno	1674,58	jako dobro
☑ Spaljivanje otpa...	◆	jako dobro	jako dobro	9224,84	20,00	60,00	loše	da	64340,00	da	da	dobro	56800000,00	1040000,00	44,00	prosječno	yes	prosječno	loše	8613,91	prosječno
☑ Spaljivanje diges...	◆	prosječno	dobro	3560,00	20,00	60,00	prosječno	da	5760,00	da	da	prosječno	3465000,00	426119,00	34,00	prosječno	yes	prosječno	loše	2230,50	prosječno
☑ Reciklacija dige...	◆	dobro	prosječno	4913,23	35,00	65,00	dobro	ne	12959,20	da	da	dobro	3320920,00	488830,00	18,00	dobro	yes	dobro	dobro	1156,00	dobro
☑ Proizvodnja gnojiva	◆	dobro	prosječno	2553,23	35,00	65,00	dobro	da	5119,20	ne	da	loše	3237837,84	617540,54	20,00	dobro	no	jako dobro	jako dobro	3148,00	jako dobro

Slika 27 Prikaz univerzalnog modela za odabir tehnologije energetske i materijalne oporabe otpadnih struja

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 struja. Iako su radovi na kojima se temelji ova disertacija izrađeni za hrvatske uvjete, 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. 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 3.8.2), u nastavku su navedene konkretne vrijednosti specifične za talijanske uvjete. Uz navedene kvalitativne skupine (Slika 16 i Slika 17), za određene kriterije bilo je moguće definirati kvantitativne (numeričke) vrijednosti. Navedene vrijednosti definirane su pomoću literaturnih podataka sa komercijalnih i pilot postrojenja (prikaz literature je dan u Tablica 9), a iste su prikazane u sljedećoj tablici (Tablica 7).

Tablica 7 Prikaz literaturnih kvantitativnih ocjena kriterija primjenjiv za UPOV-e i biopliniska postrojenja

	dizalica topline	spaljivanje digestata	spaljivanje otpadnog mulja	recirkulacija digestata	proizvodnja gnojiva	jedinica
energetska potražnja	634 ³	1.200,00	7.424,84	2.553,23	193,23	MWh/god.
električna učinkovitost	100	20	20	35	35	%
toplinska učinkovitost	100	60	60	65	65	%
proizvodnja energije	880	1.760,00	64.340,00	8.959,20	1.119,20	MWh/god.
radna mjesto	4	24	24	8	10	#
operativni troškovi	42.000,00	209.119,00	1.000.000,00	271.830,00	400.540,54	EUR/god.

³ Napomena: Kod dizalice topline, „energetska potražnja“ odnosi se na utrošak električne energije za pogon dizalice, a „proizvodnja energije“ na iskorištenu toplinsku energiju. Iz ovih vrijednosti proizlazi COP $\approx 1,4$ – ovi konzervativni podaci uzeti su iz [132], reflektirajući realnu učinkovitost sustava uključujući gubitke

	dizalica topline	spaljivanje digestata	spaljivanje otpadnog mulja	recirkulacija digestata	proizvodnja gnojiva	jedinica
kapitalni troškovi	2.620.000,00	565.000,00	54.000.000,00	420.920,00	337.837,84	EUR
emisije	234,58	1.226,50	7.173,91	152,00	2.144,00	t CO _{2eq}

U tablici su prikazani podaci za svaku pojedinačnu tehnologiju (**I, II-a/b, III, IV**), a koji prikazuju podatke unutar granica gledanih sustava (Slika 19 – Slika 23). Moguće je uočiti kako nisu prikazani podaci za svaki kriterij, svake od tehnologija. Razlog tome je što Tablica 7 prikazuje podatke vezane uz nadogradnje postojećih tehnologija. Kako bi se razmotrio kompletan učinak same tehnologije s nadogradnjom, potrebno je uzeti u obzir cjelokupno postrojenje, tj. podatke o svim komponentama unutar granica sustava (Slika 19 – Slika 23).

U sljedećoj tablici su prikazane „osnove“ na kojima se vrši nadogradnja sustava – UPOV i bioplinsko postrojenje (Tablica 8).

Tablica 8 Prikaz osnovnih kvantitativnih parametara za UPOV i bioplinsko postrojenje

UPOV	za postrojenje 40.000 ES	
CAPEX	2.800.000,00	EUR
OPEX	40.000,00	EUR/god.
energetska potražnja	1.800,00	MWh/god.
proizvodnja energije	/	MWh/god.
radna mjesta	20	#
emisije	1.440,00	t CO _{2eq}
bioplinsko postrojenje	za postrojenje 0,5 MW_{el}	
CAPEX	2.900.000,00	EUR
OPEX	217.000,00	EUR/god.
energetska potražnja	2.360,00	MWh/god.
proizvodnja energije	4.000,00	MWh/god.
radna mjesta	10	#
emisije	1.004,00	t CO _{2eq}

Vrijednosti unesene u model označavaju zbroj vrijednosti osnove (UPOV ili bioplinsko postrojenje) te promatrane nadogradnje (dizalica topline, spalionica, itd.), tj. prikazano u obliku jednadžbe (Tablica 9):

$$\text{Osnova (Tablica 8) + nadogradnja (Tablica 7) = unos u model (Tablica 9)}$$

Tablica 9 Prikaz podataka za unos u model

	dizalica topline	spaljivanje digestata	spaljivanje otpadnog mulja	recirkulacija digestata	proizvodnja gnojiva	jedinica
pouzdanost tehnologije	dobro	prosječno	jako dobro	prosječno	dobro	/
zrelost tehnologije	dobro	dobro	jako dobro	prosječno	prosječno	/
poznavanje tehnologije	da	da	da	da	prosječno	/
energetska potražnja	2.434,00	3.560,00	9.224,84	4.913,23	2.553,23	MWh/god.
električna učinkovitost	100	20	20	35	35	%
toplinska učinkovitost	100,00	60,00	60,00	65,00	65,00	%
proizvodnja energije	880,00	5.760,00	64.340,00	12.959,20	5.119,20	MWh/god.
potreba za zemljištem	40.000,00	215.000,00	215.000,00	40.000,00	40.000,00	m ²
oporabljeni materijali	ne	da	da	ne ⁴	da	/
potencijal za nadogradnju	ne	da	da	da	da	/
pravno-administrativni okvir	dobro	prosječno	dobro	dobro	loše	/
radna mjesta	24	24	24	18	20	#
javna prihvatljivost	dobro	prosječno	prosječno	dobro	dobro	/
operativni troškovi	82.000,00	426.119,00	1.040.000,00	488.830,00	617.540,54	EUR/god.
kapitalni troškovi	5.420.000,00	3.465.000,00	56.800.000,00	3.320.920,00	3.237.837,84	EUR
FiT/premium model	ne	da	da	da	ne	/
mirisi	dobro	prosječno	prosječno	dobro	jako dobro	/

⁴ 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 energetska 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 II-b).

	dizalica topline	spaljivanje digestata	spaljivanje otpadnog mulja	recirkulacija digestata	proizvodnja gnojiva	jedinica
buka	prosječno	loše	loše	dobro	jako dobro	/
emisije	1.674,58	2.230,50	8.613,91	1.156,00	3.148,00	t CO _{2eq}
ekološki otisak	jako dobro	prosječno	prosječno	dobro	jako dobro	/
literatura	[173, 131, 132, 183]	[143, 149, 145]	[155, 184, 185, 186]	[151, 187, 90, 150, 142]	[90, 151, 188]	/

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 (Tablica 7 i Tablica 8) 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 tri scenarija – Slika 28, Slika 29 i Slika 30.

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 uč...	Toplinska uč...	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	%	%	5-point	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	max	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	3,00	3,00	2434,00	20,00	60,00	2,00	0,00	880,00	0,00	0,00	2,00	3237837,84	82000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	2,00	1156,00	3,00	
Maximum	5,00	5,00	9224,84	100,00	100,00	4,00	1,00	64340,00	1,00	1,00	4,00	56800000,00	1040000,00	44,00	4,00	1,00	5,00	5,00	8613,91	5,00	
Average	4,00	3,80	4537,06	42,00	70,00	3,20	0,60	17811,68	0,80	0,80	3,40	14448751,57	530897,91	28,00	3,60	0,60	3,80	3,20	3364,60	4,00	
Standard Dev.	0,63	0,75	2507,18	29,77	15,17	0,75	0,49	23585,82	0,40	0,40	0,80	21191048,20	310144,98	9,72	0,49	0,49	0,75	1,17	2706,38	0,89	
Evaluations																					
Dizalica topline - ...	■	dobro	dobro	2434,00	100,00	100,00	prosječno	ne	880,00	da	ne	dobro	5420000,00	82000,00	24,00	dobro	ne	dobro	prosječno	1674,58	jako dobro
Spaljivanje otpa...	■	jako dobro	jako dobro	9224,84	20,00	60,00	loše	da	64340,00	da	da	dobro	56800000,00	1040000,00	44,00	prosječno	da	prosječno	loše	8613,91	prosječno
Spaljivanje diges...	■	prosječno	dobro	3560,00	20,00	60,00	prosječno	da	5760,00	da	da	prosječno	3465000,00	426119,00	34,00	prosječno	da	prosječno	loše	2230,50	prosječno
Recirkulacija dige...	■	dobro	prosječno	4913,23	35,00	65,00	dobro	ne	12959,20	da	da	dobro	3320920,00	488830,00	18,00	dobro	da	dobro	dobro	1156,00	dobro
Proizvodnja gnojiva	■	dobro	prosječno	2553,23	35,00	65,00	dobro	da	5119,20	ne	da	loše	3237837,84	617540,54	20,00	dobro	ne	jako dobro	jako dobro	3148,00	jako dobro

Slika 28 Prikaz težinskih omjera za scenarij Javnost

tehnički aspekt	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uč...	Toplinska uč...	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	%	%	5-point	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	max	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	3,00	3,00	2434,00	20,00	60,00	2,00	0,00	880,00	0,00	0,00	2,00	3237837,84	82000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	2,00	1156,00	3,00	
Maximum	5,00	5,00	9224,84	100,00	100,00	4,00	1,00	64340,00	1,00	1,00	4,00	56800000,00	1040000,00	44,00	4,00	1,00	5,00	5,00	8613,91	5,00	
Average	4,00	3,80	4537,06	42,00	70,00	3,20	0,60	17811,68	0,80	0,80	3,40	14448751,57	530897,91	28,00	3,60	0,60	3,80	3,20	3364,60	4,00	
Standard Dev.	0,63	0,75	2507,18	29,77	15,17	0,75	0,49	23585,82	0,40	0,40	0,80	21191048,20	310144,98	9,72	0,49	0,49	0,75	1,17	2706,38	0,89	
Evaluations																					
Dizalica topline - ...	■	dobro	dobro	2434,00	100,00	100,00	prosječno	ne	880,00	da	ne	dobro	5420000,00	82000,00	24,00	dobro	ne	dobro	prosječno	1674,58	jako dobro
Spaljivanje otpa...	■	jako dobro	jako dobro	9224,84	20,00	60,00	loše	da	64340,00	da	da	dobro	56800000,00	1040000,00	44,00	prosječno	da	prosječno	loše	8613,91	prosječno
Spaljivanje diges...	■	prosječno	dobro	3560,00	20,00	60,00	prosječno	da	5760,00	da	da	prosječno	3465000,00	426119,00	34,00	prosječno	da	prosječno	loše	2230,50	prosječno
Recirkulacija dige...	■	dobro	prosječno	4913,23	35,00	65,00	dobro	ne	12959,20	da	da	dobro	3320920,00	488830,00	18,00	dobro	da	dobro	dobro	1156,00	dobro
Proizvodnja gnojiva	■	dobro	prosječno	2553,23	35,00	65,00	dobro	da	5119,20	ne	da	loše	3237837,84	617540,54	20,00	dobro	ne	jako dobro	jako dobro	3148,00	jako dobro

Slika 29 Prikaz težinskih omjera za scenarij Tehnički aspekt

okolis	Pouzdanost ...	Zrelost tehn...	Energetska ...	Električna uč...	Toplinska uč...	Potreba za z...	Oporabljeni ...	Proizvodnja ...	Poznavanje ...	Potencijal za...	Pravno-admi...	Kapitalni troš...	Operativni tr...	Radna mjesta	Javna prihva...	FIT / Premiu...	Mirisi	Buka	Emisije	Ekološki otsak	
Unit	5-point	5-point	MWh	%	%	5-point	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	max	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	3,00	3,00	2434,00	20,00	60,00	2,00	0,00	880,00	0,00	0,00	2,00	3237837,84	82000,00	18,00	3,00	0,00	3,00	2,00	1156,00	3,00	
Maximum	5,00	5,00	9224,84	100,00	100,00	4,00	1,00	64340,00	1,00	1,00	4,00	56800000,00	1040000,00	44,00	4,00	1,00	5,00	5,00	8613,91	5,00	
Average	4,00	3,80	4537,06	42,00	70,00	3,20	0,60	17811,68	0,80	0,80	3,40	14448751,57	530897,91	28,00	3,60	0,60	3,80	3,20	3364,60	4,00	
Standard Dev.	0,63	0,75	2507,18	29,77	15,17	0,75	0,49	23585,82	0,40	0,40	0,80	21191048,20	310144,98	9,72	0,49	0,49	0,75	1,17	2706,38	0,89	
Evaluations																					
Dizalica topline - ...	■	dobro	dobro	2434,00	100,00	100,00	prosječno	ne	880,00	da	ne	dobro	5420000,00	82000,00	24,00	dobro	ne	dobro	prosječno	1674,58	jako dobro
Spaljivanje otpa...	■	jako dobro	jako dobro	9224,84	20,00	60,00	loše	da	64340,00	da	da	dobro	56800000,00	1040000,00	44,00	prosječno	da	prosječno	loše	8613,91	prosječno
Spaljivanje diges...	■	prosječno	dobro	3560,00	20,00	60,00	prosječno	da	5760,00	da	da	prosječno	3465000,00	426119,00	34,00	prosječno	da	prosječno	loše	2230,50	prosječno
Recirkulacija dige...	■	dobro	prosječno	4913,23	35,00	65,00	dobro	ne	12959,20	da	da	dobro	3320920,00	488830,00	18,00	dobro	da	dobro	dobro	1156,00	dobro
Proizvodnja gnojiva	■	dobro	prosječno	2553,23	35,00	65,00	dobro	da	5119,20	ne	da	loše	3237837,84	617540,54	20,00	dobro	ne	jako dobro	jako dobro	3148,00	jako dobro

Slika 30 Prikaz težinskih omjera za scenarij Okoliš

4.2. Rezultati primijenjenog modela

4.2.1. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Javnost*

Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju (3.8), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najpogodnija energetska uporaba otpada u pogledu korištenja dizalice topline na temelju tehnološkog procesa **III**. Za navedenom tehnologijom slijede recirkulacija digestata (**II-a**), proizvodnja gnojiva (**II-b**), energetska uporaba otpadnog mulja (**IV**) te energetska uporaba digestata (**I**) (Slika 41, Slika 42).

Iz kompletnog rangiranja (Slika 42), vidljivo je kako su prve tri tehnologije 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.

Iz parcijalnog rangiranja (Slika 41) moguće je vidjeti kako se „jakosti“ i „slabosti“ tehnologija recirkulacije digestata, proizvodnje gnojiva i dizalice topline isprepliću, čime se ukazuje na visok stupanj konkurentnosti tih tehnologija na talijanskom tržištu.

Specifičnog ovog scenarija leži u činjenici da se tehnologije spaljivanja isprepliću. To je moguće vezati sa zanimljivom činjenicom da je javnosti prihvatljivija opcija spaljivanja digestata, nego otpadnog mulja. Otpadni mulj je smatran „prljavijom“ sirovinom, dok se digestat već primjenjuje u nekim postrojenjima kao sirovina za proizvodnju energije. Također, digestat ima povijest korištenja kao gnojiva na poljoprivrednim površinama bez prethodne obrade, tako da je javnosti poznatiji i prihvatljiviji kao nova sirovina i proizvod.

4.2.2. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Tehnički aspekt*

Definiranjem kriterija i njihovih težina u ovom specifičnom scenariju te ocjenjivanjem istih na temelju navedenih razloga u prethodnom poglavlju (3.8), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najpogodnija energetska uporaba otpadnih voda putem dizalice topline (**III**). Drugo rangirana tehnologija je recirkulacija digestata (**II-a**), za kojom slijede proizvodnja gnojiva (**II-b**) te spaljivanje otpadnog mulja (**IV**) i energetska uporaba digestata spaljivanjem (**I**) (Slika 43, Slika 44).

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 proizvodnje energije iz

otpadnih voda, uz pomoć dizalica topline. Navedena tehnologija je vrlo jednostavna za primjenu, a već je na europskoj i svjetskoj razini korištena u raznim kontekstima (iz otpadnih voda, morske vode, geotermalne energije, itd.).

Iako su tehnologije spalionica 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 [189]).

U parcijalnom rangiranju (Slika 43) u ovom slučaju je moguće vidjeti razlog zašto tehnologija dizalica topline prednjači u ukupnom rangiranju – jedina se sa svojim „slabostima“ nalazi vrlo blizu pozitivne zone Phi , što znači da ima vrlo malo nedostataka gledano s tehničkog aspekta.

Također je moguće uočiti zanimljivost u pogledu tehnologije recirkulacije digestata. 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 II i njenom inovativnom pristupu, koji dosad nije dovoljno primijenjen u praksi.

U parcijalnom rangiranju ovog scenarija je moguće vidjeti još jednu specifičnost, u pogledu tehnologije spaljivanja otpadnog mulja i spaljivanja digestata, gdje dolazi do paralelnih bliskih razina „jakosti“ i „slabosti“ tehnologije. To je moguće povezati sa sličnošću tehnologije koje se koriste, a razlike su uzrokovane količinama sirovina koje su uključene u proces (otpadnog mulja u UPOV-ima ima u značajnijim količinama nego digestata s bioplinskih postrojenja).

4.2.3. Rezultati izrađenog modela – scenarij *Okoliš*

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 naglaska 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 (6.5.), dobiveno je kako je na nacionalnoj razini u Italiji najprikladnija tehnologija proizvodnje gnojiva (**II-b**). Drugo rangirana tehnologija je recirkulacija digestata (**II-a**), za kojom slijedi proizvodnja energije iz dizalica topline (**III**). Kao što je bilo i za očekivati, tehnologije spaljivanja su manje poželjne i one su rangirane kao zadnje (**I** i **IV**) (Slika 46).

Procesi spaljivanja 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 (4.2.2).

S druge strane, tehnologije koje su u parcijalnom rangiranju (Slika 45) 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 (**II-b**). 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 smanjen utjecaj na okoliš.

4.2.4. Rezultati izrađenog modela – ukupni rezultat

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju (4.2.3), 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*: recirkulacija digestata (**II-a**) je optimalna tehnologija, za kojom slijede proizvodnja energije iz dizalica topline (**III**) te proizvodnja gnojiva (**II-b**), dok su tehnologije spaljivanja, koje su manje poželjne (**I** i **IV**) (Slika 48).

No, ovdje je moguće vidjeti razlike u redoslijedu prihvatljivosti, u usporedbi sa scenarijem *Okoliša*, a to je prvenstveno povezano s komercijalnom naravi tehnologije dizalica topline te njihovom visokom učinkovitošću.

U parcijalnom rangiranju (Slika 47) je zanimljivo preklapanje prve tri 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*).

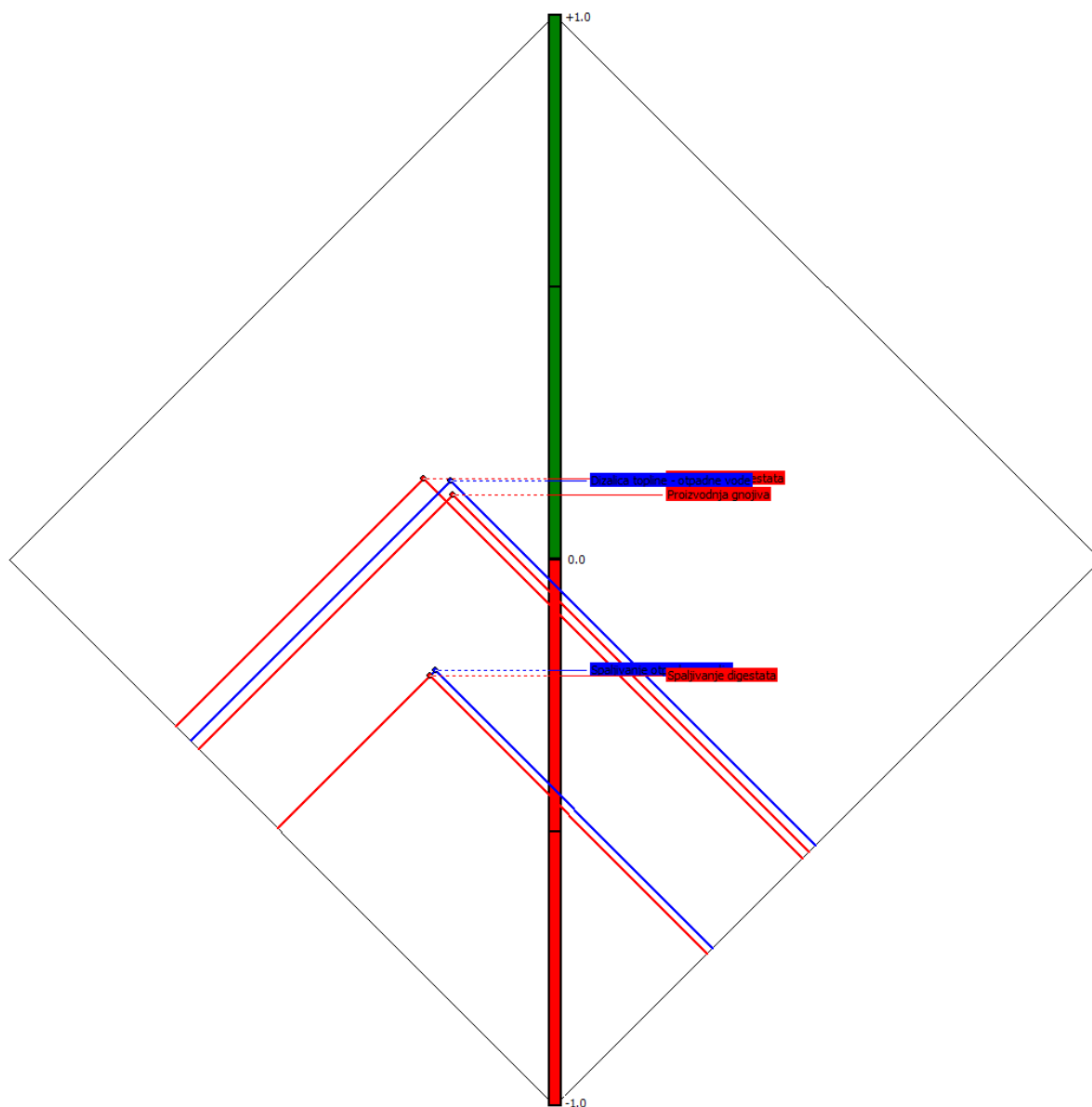
U slučaju proizvodnje gnojiva i recirkulacije digestata (**II**) dolazi do smanjenja emisija tako da se otpad koristi kao nova sirovina, vraćajući time vrijedne hranjive tvari u sustav i zatvarajući time ciklus kruženja hranjivih tvari, čime se umjesto nekontroliranog ispuštanja digestata u okoliš putem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

Razmatranjem tehnologije spaljivanja (**I** i **IV**), 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.

Također, tehnologija dizalice topline (**III**) ima relativno nizak izračunati COP (~1,4) prema korištenim literaturnim podacima, što znači da neto dobivena toplota nije znatno veća od utrošene pogonske energije. Ipak, ova tehnologija i dalje je visoko rangirana zahvaljujući drugim prednostima (npr. zrelost – TRL 9, pouzdanost, niske emisije na mjestu primjene). U praksi, COP dizalice topline iz otpadne vode može biti i viši ovisno o uvjetima; konzervativni pretpostavljeni podaci korišteni u ovoj disertaciji osiguravaju da ne precijenimo ovu tehnologiju.

Slika 31 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. U ovom slučaju možemo uočiti kako do jedinog preklapanja dolazi u slučaju tehnologije **II-a** sa tehnologijama **II-b** i **III**. Preklapanje u kontekstu PROMETHEE *Diamond* prikaza označava neusporedivost tehnologija, no u pogledu različitih kriterija. To bi u ovom slučaju značilo da je tehnologija recirkulacije digestata bolja u nekim kriterijima (npr. *emisije*), dok je tehnologija dizalice topline 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 [190]. Sukladno tome, pomoću ovog prikaza je moguće uočiti kako prethodno prikazani grafovi mogu samo opisati svaku tehnologiju na temelju njihovih ocjena kriterija.

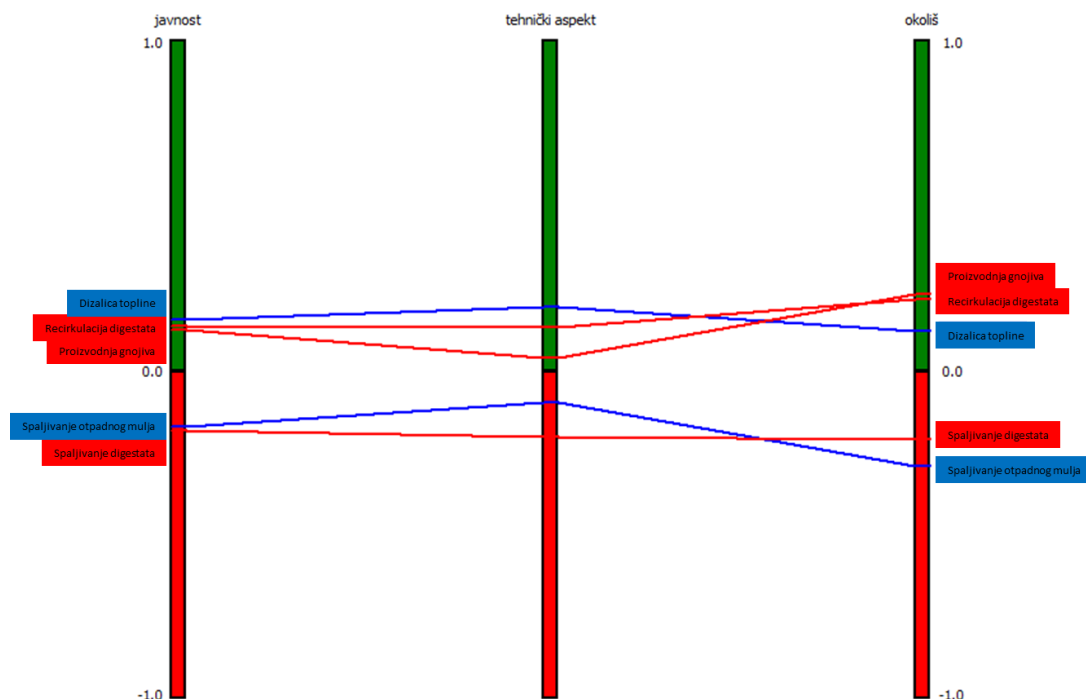


Slika 31 PROMETHEE Diamond prikaz tehnologija svih scenarija

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 32. Iako se različito ponašaju u različitim scenarijima, iz prikaza je vidljivo kako materijalna i energetska oporaba otpada (proizvodnja gnojiva, proizvodnja energije recirkulacijom digestata te korištenjem toplinskih pumpi) i dalje prevladavaju nad procesima spaljivanja otpadnog mulja i digestata. Moguće je uočiti kako se tehnologije spaljivanja u skupini kriterija *Tehnički aspekt* prikazuju kao bolje opcije (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 uporaba otpadnih struja. Prvenstveno tu veliku ulogu imaju socio-ekonomski aspekt te javno mišljenje, koje se aktivno protivi takvim tehnologijama.



Slika 32 Međusobna usporedba svih scenarija

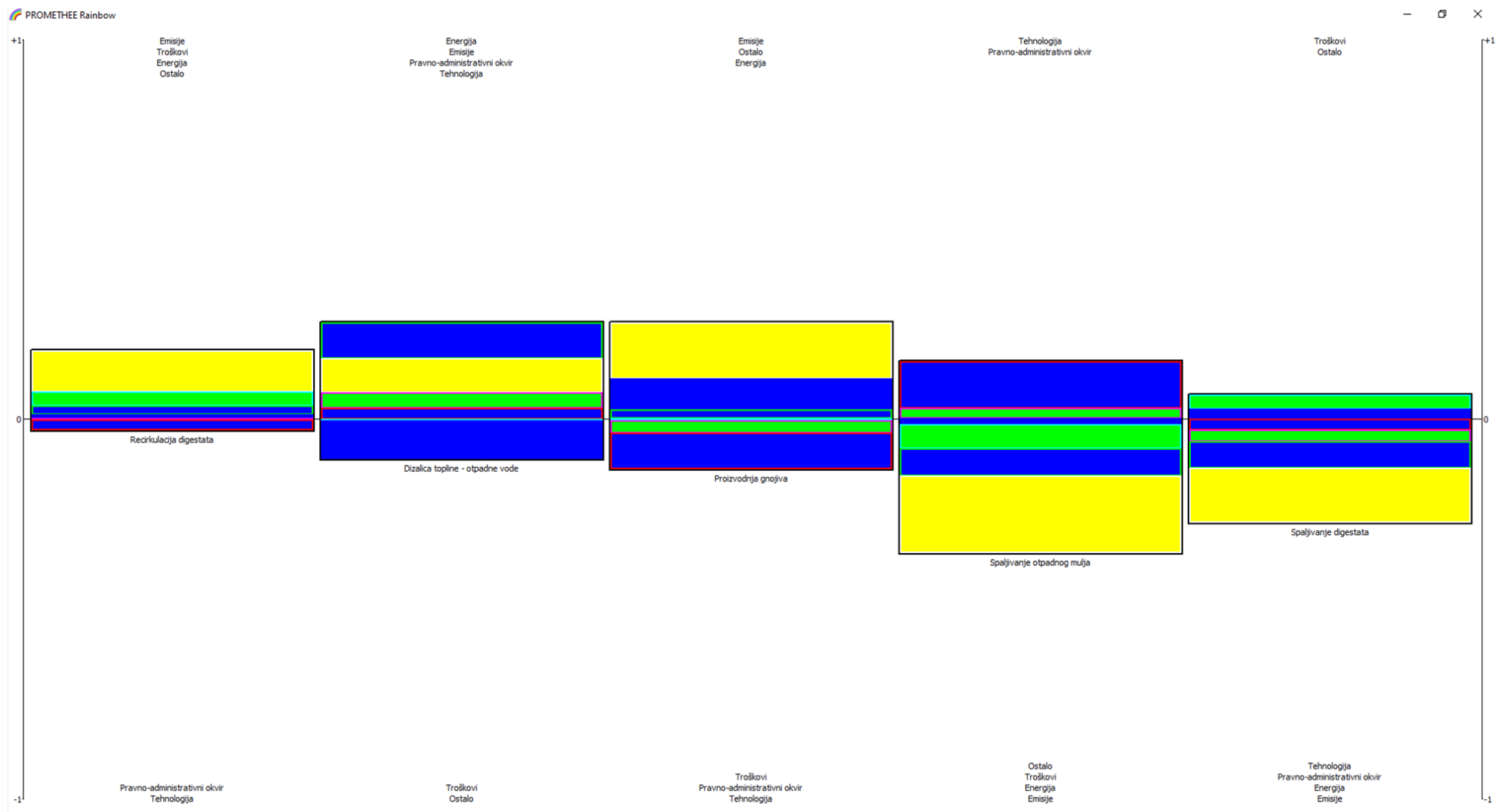
Kako bismo prikazali utjecaj svakog od kriterija u konačnom rezultatu, koristi se PROMETHEE *Rainbow* grafički prikaz (Slika 33). U ovakvom prikazu, za svaku tehnologiju definiran je po jedan stupac. Različiti dijelovi svakog stupca obojeni su prema specifičnoj boji kriterija (definirano na Slika 28). 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 kompletnog 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 kompletnog rangiranja u PROMETHEE II rangiranju.

U kontekstu tehnologija sagledanih u ovoj disertaciji, očigledno je vidljivo kako tehnologija recirkulacije digestata (**II-a**) ima više „jakosti“, tj. pozitivna je u većem broju kriterija, nego što ima „slabosti“. Sličan slučaj je i sa tehnologijom dizalica topline (**III**), no ona se pozicionirala kao drugi izbor zbog nedostatka FiT/Premium modela te viših kapitalnih troškova. Tehnologije spaljivanja imaju više „slabosti“ nego „jakosti“ te je to razlog njihova svrstavanja na zadnje mjesto.

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



Slika 33 PROMETHEE Rainbow prikaz tehnologija svih scenarija

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).

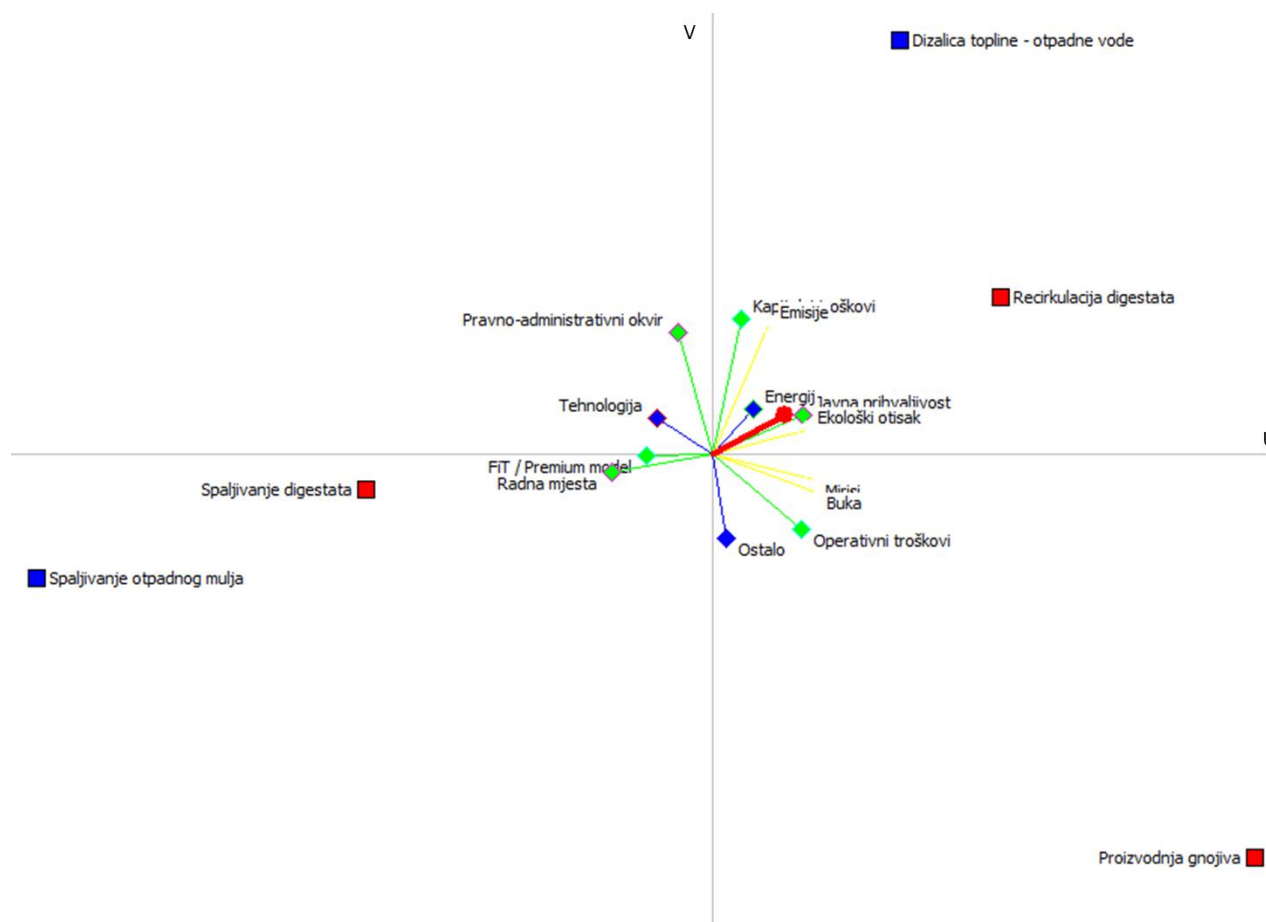
U promatranom prikazu tehnologije (opcije) su prikazane kvadratićima, kriteriji osima, a težine kriterija i PROMETHEE II rangiranje putem osi odluke (engl. *Decision Axis*, podebljana crvena linija), pomoću koje je moguće definirati usmjerenje kompletnog rangiranja te prikazati koji su kriteriji u skladu 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%, tj. 34,1% za W-V prikaze, 69,4% za U-W prikaz i 78,2% za U-V prikaz (Slika 34).

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 34, 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

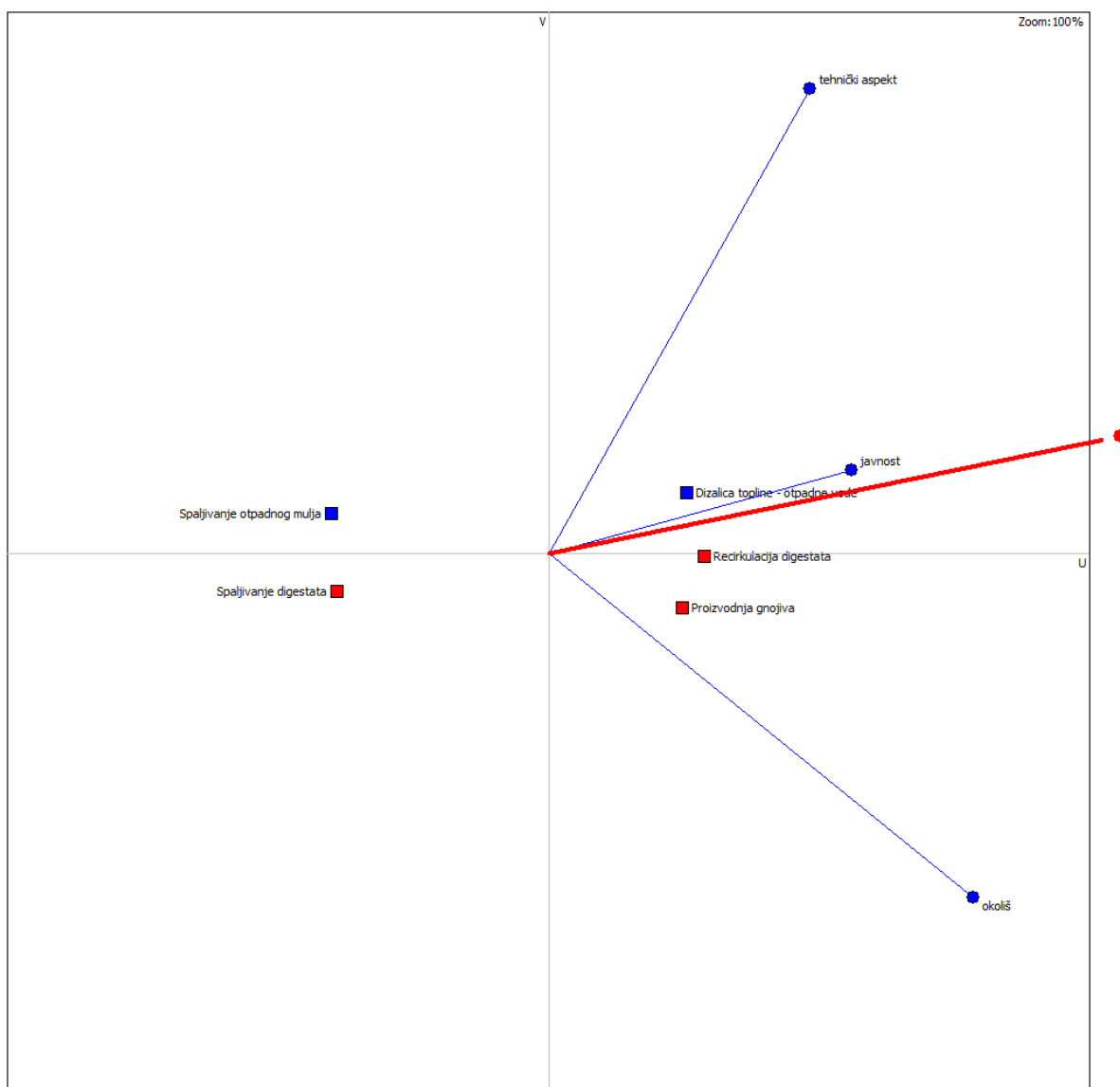
može uočiti kojoj će tehnologiji konačna odluka težiti (*Walking Weights* opcija u PROMETHEE metodi [85]).



Slika 34 Ukupni GAIA prikaz po kriterijima

Također je moguće prikazati i usporedbu težinskih omjera kriterija putem scenarija (Slika 35). Princip prikaza je sličan kao i u prikazu po kriterijima. Os odluke u ovom slučaju usmjerena je prema scenarijima *Okoliš* i *Javnost*, 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 99,9%.



Slika 35 GAIA prikaz po scenarijima

Iz svega navedenog, moguće je uočiti kako (i zašto) su dobiveni rezultati kojima se odabire tehnologija recirkulacije digestata (**II-a**).

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.

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 uporabi:** Disertacija je orijentirana na pronalaženje optimalne tehnologije energetske/materijalne uporabe za određene otpadne struje. 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 novija tehnika povećanja energetskeg outputa bioplinskog postrojenja, što se uklapa u cilj disertacije da maksimizira energetske iskoristivost otpada (digestata u ovom slučaju).
- **Lokalni propisi i ograničenja:** U nekim regijama (npr. Lombardija, koja je studija slučaja), primjena digestata može biti limitirana preko godine zbog ograničenja skladištenja i Nitratne direktive. Nitratna direktiva (91/676/EEZ) 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. <1000 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. [90] 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 struje, 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 struje (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 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 smo dodatno povećali njegovu energetske iskoristivost prije te finalne primjene, kao i smanjili volumen i dobili 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 sljedećem poglavlju bit će prikazana analiza osjetljivosti modela.

4.2.5. Analiza osjetljivosti

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.

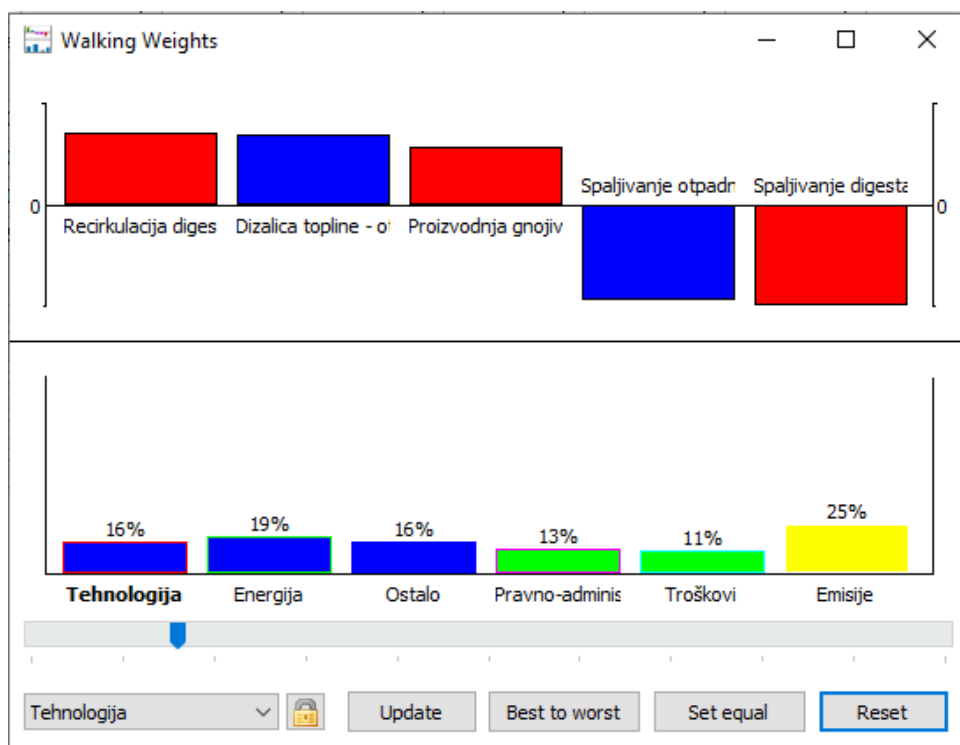
Zbog toga je provedba analize osjetljivosti kriterija neophodna te PROMETHEE uključuje nekoliko alata kako bi ista bila provediva. U ovom radu će se koristiti *Visual Stability Intervals* alat, koji omogućava korisniku iscrpnu analizu osjetljivosti težina kriterija – on prikazuje kako *Phi* rezultat 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. 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 (Slika 48).

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.

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 36 su prikazani rezultati za razmatran slučaj i prethodno definirane težinske vrijednosti kriterija.



Slika 36 Prikaz odabira tehnologije u slučaju prethodno definiranih težina grupa kriterija za Italiju

Grupa kriterija Tehnologija

U pogledu grupe kriterija *Tehnologija* (Slika 49), 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 **II-a** 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 15,54% i 17,35%. Izvan tog intervala, dolazi do promjene – što ukazuje na osjetljivost odluke na tehničke kriterije: oni su trenutno postavljeni na ~16,5%, i pomak od $\sim \pm 1\%$ mogao bi izmijeniti pobjedničku opciju.

Razlog za to može se pronaći u „uhodanosti“ i većoj pouzdanosti procesa spaljivanja (u ovom slučaju tehnologije **IV**) i dizalica topline (**III**), gdje komercijalna postrojenja već postoje u većem broju razvijenih država. Također je moguće uočiti kako tehnologije recirkulacije digestata i proizvodnje gnojiva (**II-b**) postaju manje poželjne zbog inovativnosti tehnologija i procesa, što je nedostatak u ovoj grupi kriterija, gdje se teži pouzdanim i komercijalnim tehnologijama. Tehnologija spaljivanja digestata (**I**) ne mijenja svoju funkciju, bez obzira na sličnost s tehnologijom spaljivanja otpadnog mulja (**IV**), zbog kriterija *Pouzdanost tehnologije*. Iako se radi o bliskim tehnologijama koje primjenjuju proces spaljivanja otpadne biomase, tehnologija spaljivanja otpadnog mulja (**IV**) je već komercijalna i korištena tehnologija, dok spaljivanja digestata (**I**) predstavlja relativno inovativan proces, koji je potrebno komercijalizirati.

Grupa kriterija Energija

U ovu grupu kriterija spadaju sljedeći kriteriji: *Energetska potražnja*, *Električna učinkovitost*, *Toplinska učinkovitost* i *Proizvodnja energije*.

U pogledu grupe kriterija *Energija* (Slika 50) postoji veći raspon unutar koje je moguće mijenjati težine kriterija (12,10% do 14,65%), bez promjene odabira i donošenja druge odluke, u usporedbi s prethodnom grupom kriterija. Prelaskom ispod ili iznad granica tog raspona, dolazi do pomaka dizalice topline na višu poziciju. Razlog većeg raspona leži u činjenici da sve razmatrane tehnologije imaju malen raspon vrijednosti kriterija koje se nalaze u ovoj grupi. No, iz Slika 50 je također moguće vidjeti kako od ostalih tehnologija najviše odskoče tehnologija **III**, zbog svoje izrazito visoke električne i toplinske učinkovitosti.

Za grupu kriterija *Energija*, utvrđen je znatno širi raspon stabilnosti – težina te grupe može varirati u širem intervalu (reda veličine $\pm 5\%$ ili više od nominalne vrijednosti) bez promjene ranga. To znači da je odluka robusna na promjenu prioriteta vezanih uz energetske učinkovitost – što je očekivano jer sve razmatrane tehnologije imaju slične vrijednosti energetskih pokazatelja, pa niti jedna ne bi drastično iskočila čak i uz veće promjene težine.

Grupa kriterija Ostalo

Slučaj grupe kriterija *Ostalo* (Slika 51), 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 malom rasponu vrijednosti težine kriterija, 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 čak i manje promjene težinskih vrijednosti (do 5%) mogu doprinijeti promjeni odluke, tj. odabiru druge tehnologije.

Kao što je već prikazano prethodnim rezultatima (Slika 48), 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 (70% i više), postiže se i razmatranje tehnologije spaljivanja digestata (I) kao prihvatljive opcije jer postoji mogućnost uporabe pepela, tj. vraćanja hranjivih tvari koje se u njemu nalaze u ciklus kruženja tvari (korištenje kao poboljšivač tla na poljoprivrednim zemljištima). Međutim, sa tehnologijom spaljivanja otpadnog mulja to nije slučaj, jer se u samoj sirovini (otpadni mulj) nalaze visoke koncentracije štetnih tvari (teški metali, farmaceutici), koji mogu imati negativan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje.

Grupa kriterija *Pravno-administrativni okvir*

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 52 (broj preklapanja linija tehnologija). 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 8,90% i 10,50%. Promjene izvan tog raspona uzrokuju preokret između tehnologija koje se razlikuju u regulatornoj kompleksnosti (npr. spaljivanje u usporedbi sa dizalicom topline). To pokazuje da ova grupa kriterija ima ograničen, ali strateški važan utjecaj kod odlučivanja u politički osjetljivim područjima ili tržištima s visokom razinom regulacije.

Grupa kriterija *Troškovi*

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 13,25% do 15,90% nije došlo do promjene redoslijeda. Kada težina premaši gornju granicu, spaljivanje digestata 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.

S obzirom na činjenicu da kriterij *FiT/Premium model* u svim tehnologijama, osim **II-a**, nije uključiv, koncentracija je na druga dva kriterija. Sukladno tome, na Slika 53 se može uočiti sličnost operativnih i kapitalnih troškova zbog usporedivosti i paralelnosti linija određenih tehnologija.

Grupa kriterija *Emisije*

Grupa kriterija *Emisije* sadrži sljedeće kriterije: *Mirisi, Buka, Emisije* te *Ekološki otisak*. Iz Slika 54 je vidljivo kako se tehnologije mogu razvrstati u dvije grupe – ekološki prihvatljive i neprihvatljive, tj. na tehnologije koje imaju manje negativan učinak na okoliš (**II**, **III**) i tehnologije koje imaju značajne količine emisija koje nastaju termičkim procesima (**I**, **IV**). 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.

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. No, također je moguće prikazati i stabilnost odabrane tehnologije, ukoliko se razmatra samo utjecaj skupina kriterija na istu (*Stability level* = 1), što je prikazano na sljedećim slikama. 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 uporabe ovisi o kriterijima vrednovanja:

- Ako nam je prioritet obnovljiva energija, recirkulacija je bolje rješenje (više bioplina).
- Ako razmatramo poljoprivrednu korist i jednostavnost, direktna primjena digestata 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. Gnojidba digestatom 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 i kompleksnosti kombinacije različitih tehnika na jednoj lokaciji.

Kada bismo uračunali potencijalne vanjske koristi vraćanja hranjiva u tlo, rangiranje opcija moglo bi se promijeniti. Konkretno, studija u sklopu [106] dokazala je da mono-spaljivanje mulja s obaveznim oporavkom 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 zagađenja su manji. Nasuprot tome, spaljivanje bez oporavka P ima negativne učinke (gubitak resursa). U razrađenom modelu, opcije spaljivanja su rangirane najniže 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 smo dodali monetarnu vrijednost oporabljenog fosfora i organske tvari, opcije spaljivanja mulja (IV) i digestata (I) vjerojatno bi poboljšale svoj rang.

Međutim, vrijedi primijetiti da je i uz te benefite spaljivanje skupa opcija; studija [106] navodi da bi prelazak na obavezno mono-spaljivanje mulja u EU povećao godišnje troškove za 138–569 milijuna EUR (ovisno o obuhvatu postrojenja), što je poskupljenje od ~1–3% u procesu pročišćavanja voda. To znači da, čak i ako eksterne koristi opravdavaju spaljivanje 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-oporavak – jer tržišno to ne bi zaživjelo zbog troškova pa je država intervenirala. Ukratko, uključivanje eksternih koristi (poput uštede mineralnog fosfora) pomaknulo bi ocjenu spaljivanja 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 tu stoje bolje.

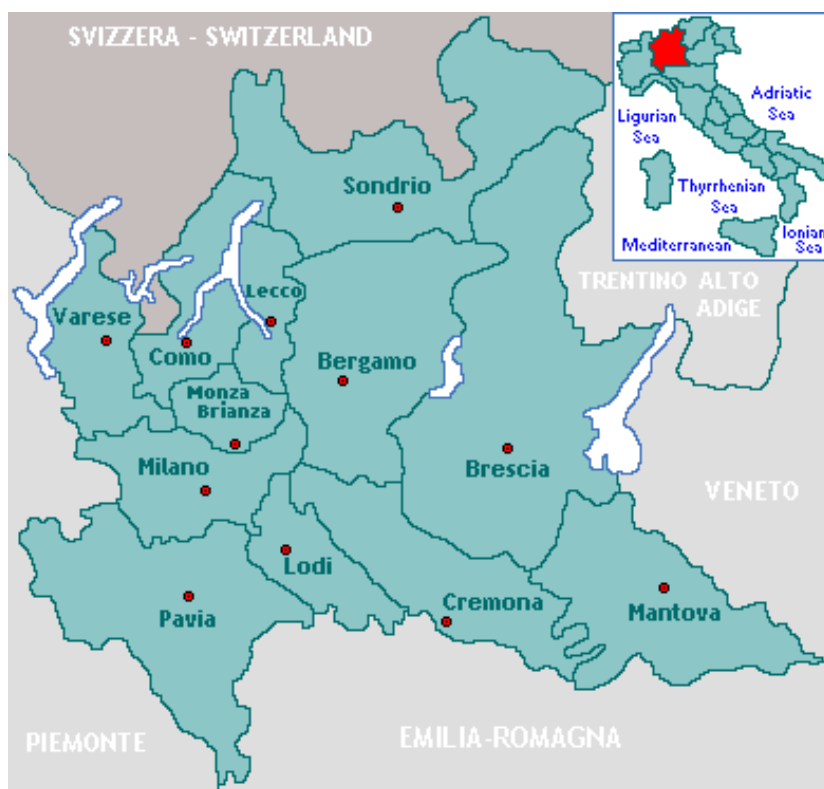
Prilikom odabira tehnologije, cilj za donositelja odluke je u ovakvom tipu prikaza imati što širi raspon stabilnosti optimalne tehnologije, koja je prikazana kao konačno rješenje modela, a u usporedbi s ostalim tehnologijama. Na taj način je prikazano rješenje stabilno u širem rasponu kriterija i manje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

4.3. Dokaz rezultata modela – studija slučaja

U ovom poglavlju prikazat će se studija slučaja za tehnologiju recirkulacije digestata komercijalnog postrojenja velikih razmjera (engl. *full-scale*) u regiji Lombardija, u Italiji, koje je odabrano kao najbolje rješenje za razmatranu lokaciju, u usporedbi s ostalim tehnologijama u ovom radu [151].

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 [159], 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 polazimo 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. Najnaseljenija je regija Italije (više od 10 milijuna stanovnika), a glavni grad regije je istovremeno i drugi najveći grad Italije: Milano.



Slika 37 Smještaj i okruženje regije Lombardija u Italiji [191]

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 [192]. 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 [193]. 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 uporabe otpadnih struja, razmatranima u ovoj disertaciji, u ovom slučaju biti orijentirane prema uporabi digestata iz bioplinskih postrojenja.

Kao što je slučaj sa većinom EU država gdje se primjenjuje Nitrarna 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 povećan utjecaj 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 manje negativan utjecaj na okoliš. Stoga je razmotreno sljedeće rješenje: Balsari et al. [194] su predložili recirkulaciju tretiranog digestata u proces AD. Prema njihovim izračunima, takva opcija bi mogla smanjiti proizvodnju emisija stakleničkih plinova, istovremeno poboljšavajući energetske i okolišnu iskoristivost procesa AD. Đurđević et al. [90] su također proveli istraživanje i izradili koncept recirkulacije digestata uz korištenje otpadnih struja 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 38). 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 [151]. 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.

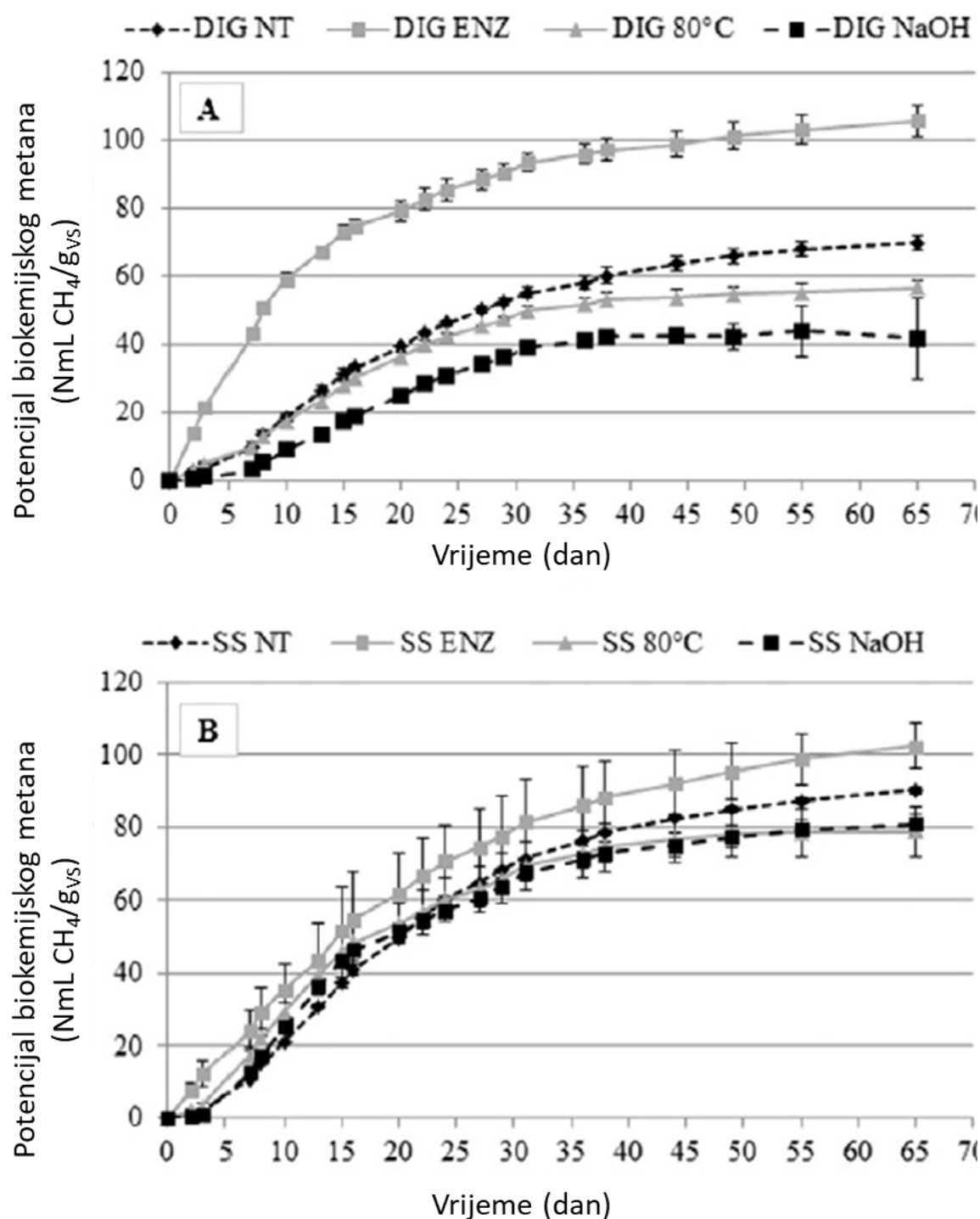


Slika 38 Prikaz bioplinskog postrojenja s recirkulacijom digestata [195]

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 39) 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 [196].

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 je potvrđen i istraživanjem Đurđević et al. [90], na temelju kojega se razmatra navedena tehnologija i koja je uvrštena u model.

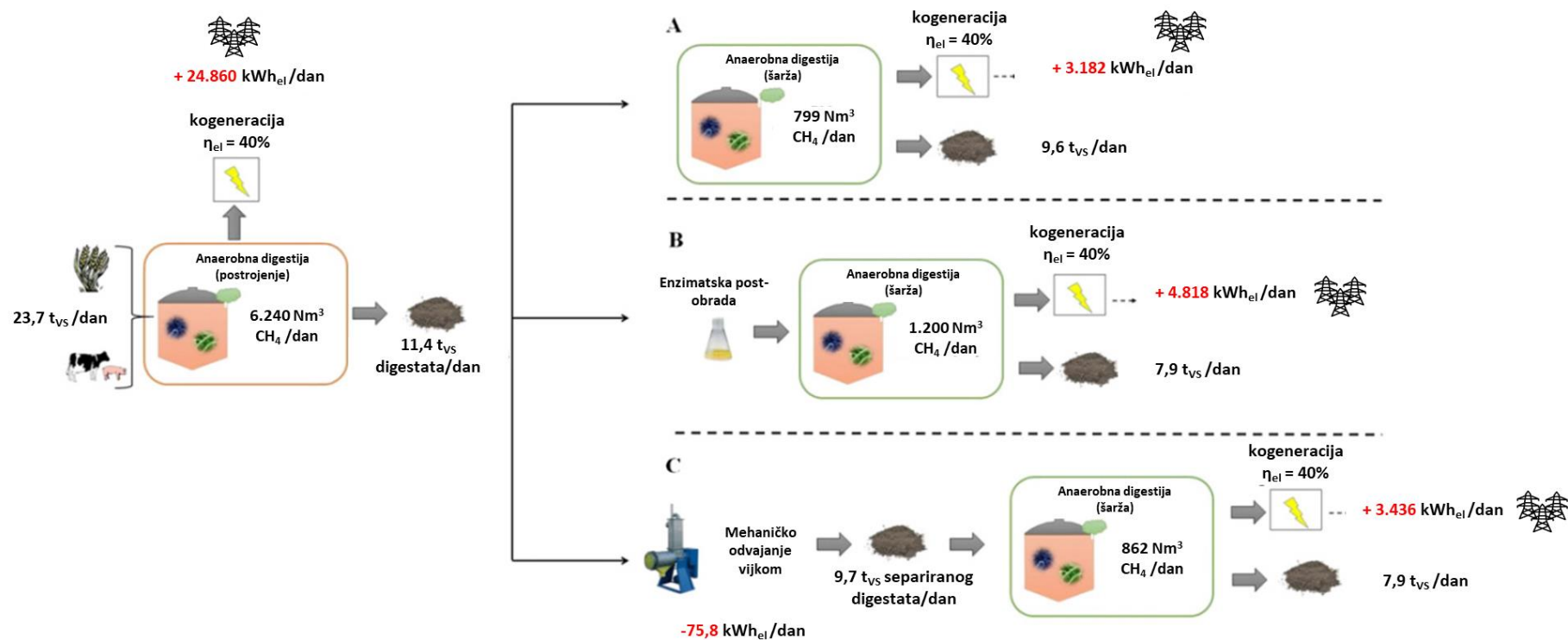


Slika 39 Kumulativni prinos metana pri uvjetima normalne temperature i tlaka neobrađenog i obrađenog digestata (A) te separirane krute frakcije (B) [151]

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 40) 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;
- C. Proizvodnja dodatnih 3.436 kWh_{el} po danu, ako se primjenjuje recirkulacija neobrađene separirane krute frakcije digestata.



Slika 40 Energetska bilanca proizvodnje dodatne energije uz recirkulaciju: A) neobrađenog digestata, B) enzimatski obrađene separirane krute frakcije digestata te C) neobrađene separirane krute frakcije digestata [151]

Iako se navedena studija slučaja neznatno razlikuje od istraživanja u sklopu ove disertacije, u pogledu korištenja sirovina i kombinacije tretmana, princip recirkulacije digestata je identičan. Također, ono što je najznačajnije za operatera bioplinskog postrojenja jest činjenica da je ovim procesom i tehnologijom obrade, dobivena veća količina proizvedene električne energije.

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 € po danu za operatera bioplinskog postrojenja [151], 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-oporavka) 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 prihvaćaju 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.

Usto, zemlje s visokom ekološkom svijješću 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, rezultati modela su donekle kontekstualni. Da je model rađen pod perspektivom njemačkog zakonodavca, vjerojatno bi kriterij „usklađenost s regulativom“ pomaknuo tehnologiju spaljivanja s P-oporavkom prema odabiru preferiranog rješenja. U razmatranom slučaju (Lombardijam, Italijac), recirkulacija digestata bolje odgovara lokalnom pristupu i prioritetima (više obnovljive energije, manja ovisnost o deponijima, korištenje postojeće mreže bioplinskih postrojenja).

U svakom slučaju, iz prikazanog je vidljivo kako je model pružio dobar rezultat, odabirom tehnologije recirkulacije digestata, u svrhu njegove energetske uporabe. Prikazana studija slučaja bioplinskog postrojenja u regiji Lombardija u Italiji je dokaz da je model prikazao optimalan rezultat, na temelju podataka na talijanskoj nacionalnoj razini. Potrebno je uzeti u obzir da, iako su podaci uneseni u model bili razmatrani za nacionalnu razinu, promatrana regija Lombardija se vrlo kvalitetno uklapa u istu jer je riječ o velikom industrijskom i tehnološki razvijenom središtu. Zbog toga je u regiji bila moguća primjena bilo koje tehnologije koja je razmatrana ovom disertacijom, no u regiji je u konačnici izgrađeno bioplinsko postrojenje sa recirkulacijom digestata, što je u skladu rezultatima modela.

5. ZAKLJUČAK *(prva stranica sljedećeg lista)*

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, koncept kružnog gospodarstva je postao nepovratan, svjetski „mega-trend“.

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 velike razmjere (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 visoko ovisi o lokalnim uvjetima i kriterijima održivosti, što opravdava potrebu za formalnim modelom odlučivanja koji je razvijen u ovom radu. Tehnologije za energetske i materijalne oporabe navedenih otpadnih struja 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 četiri tehnologije koje primjenjuju principe energetske i materijalne oporabe otpadnih struja – digestata, otpadnih voda i mulja s UPOV-a.

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.

Unosom podataka, model je odabrao tehnologiju recirkulacije digestata kao optimalni izbor za sustav gospodarenja razmatranih otpadnih struja na nacionalnoj razini. 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 oporaba otpadnih struja. 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 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.

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.

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 struja (dodatne tehnologije i mogućnost za energetske i materijalnu uporabu 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 koja je lako komunicirati. Također, dobar je u scenarijskim analizama, što su korištene 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 struja 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 materijalnu 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). Također, 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 specifičnu otpadnu struju (npr. da li kuhinjski biootpad u AD ili u kompost, i sl.). Također, postoji potreba za dodatnom objektivizacijom kriterija i težinskih vrijednosti istih, s obzirom da su oni podosta subjektivni i prvenstveno ovise o odlukama korisnika.

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 nadamo 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.

6. 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. Sloot, 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. Sharholi, 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. Fytli 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] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] M. Zielinska i K. Bulkowska, »Sustainable Management and Advanced Nutrient Recovery from Biogas Energy Sector Effluents,« *Energies*, svez. 17, br. 15, p. 3705, 2024.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] C. Achillas, N. Moussiopoulos, A. Karagiannidis, G. Baniias 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.
- [53] 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.
- [54] 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.

- [55] 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.
- [56] M. Trolborg, 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.
- [57] 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.
- [58] C. Kahraman i I. Kaya, »A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives,« *Expert Systems with Applications*, svez. 37, pp. 6270-6281, 2010.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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].
- [65] 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].
- [66] Europska Komisija, »Zatvaranje kruga — akcijski plan EU-a za kružno gospodarstvo,« Bruxelles, 2015.
- [67] 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].

- [68] L. Lett, »Global threats, waste recycling and the circular economy concept,« *Revista Argentina de Microbiología*, svez. 46, br. 1, pp. 1-2, 2014.
- [69] F. Zhijun i Y. Nailing, »Putting a circular economy into practice in China,« *Sustainability Science*, br. 2, pp. 95-101, 2007.
- [70] 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.
- [71] 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].
- [72] 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.
- [73] 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=The%20circular%20material%20use%20rate,change%20of%20the%20CMUR%20ies>. [Pokušaj pristupa 9 11 2025].
- [74] 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].
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] G. Souza, »Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research,« *Decision Sciences*, svez. 44, br. 1, pp. 7-38, 2012.
- [80] Ministarstvo zaštite okoliša i zelene tranzicije, »Nacionalno izvješće o komunalnom otpadu za 2024. godinu,« MZOZT, Zagreb, 2025..

- [81] 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.
- [82] J. Wardekker, J. v. d. Sluijs, P. Janssen, P. Klopprogge 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.
- [83] J. Brans, B. Mareschal i P. Vincke, »PROMETHEE - a new family of outranking methods in multicriteria analysis,« u *Operational Research IFORS 84*, Amsterdam, 1984.
- [84] 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.
- [85] VPSolutions, »Visual PROMETHEE 1.4 Manual,« VPSolutions, 2013.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] Europska okolišna agencija, »Sludge Treatment and Disposal: Management Approaches and Experiences,« EOA, Copenhagen, 1997.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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].
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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. 203-2016, 2001.
- [100 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.
- [101 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.
- [102 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.
- [103 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.
- [104 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.
- [105 Stručna agencija za obnovljive resurse (FNR), »Priručnik o biogasu: Od proizvodnje do korišćenja,« FNR, Berlin, 2016.

- [106 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.
- [107 V. Vutai, C. Ma i M. Lu, »The Role of Anaerobic Digestion in Wastewater Management,« *EM Magazine*, pp. 12-16, 2016.
- [108 T. A. Saedi, D. Rutz, H. Prassl, M. Kottner, T. Finsterwalder, S. Volk i R. Janssen, Priručnik za bioplin, Intelligent Energy Europe, 2008.
- [109 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.
- [110 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.
- [111 A. Elsayed, F. Kakar, A. Abdelrahman, N. Ahmed, A. AlSayed, M. Zaghloul, 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.
- [112 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.
- [113 B. Radetic, Cogeneration in Anaerobic Sludge Digestion, Biogas Pretreatment, Desulfurization, and Utilization, Springer, 2022.
- [114 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.
- [115 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.
- [116 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.
- [117 Z. Ma, »Development and Trend of Sewage Sludge Incineration Technology,« *Applied and Computational Engineering*, svez. 124, pp. 54-60, 2025.
- [118 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.
- [119 L. Tong i Q. Hu, »Chapter 9 - Physicochemical properties of municipal solid waste incineration fly ash,« u *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes*, 2022, pp. 129-139.

- [120 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.
- [121 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.
- [122 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.
- [123 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.
- [124 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.
- [125 A. Held, B. Pfluger i M. Ragwitz, »Evaluation of Heat Pump Applications in Europe,« Fraunhofer ISI, 2019.
- [126 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.
- [127 Europska Komisija, »Direktiva Vijeća od 12. prosinca 1991. o zaštiti voda od onečišćenja uzrokovanog nitratima iz poljoprivrednih izvora,« EU, Bruxelles, 1991.
- [128 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.
- [129 D. Schneider, D. Lončar i Ž. Bogdan, »Cost Analysis of Waste-to-Energy Plant,« *Strojarstvo*, svez. 52, br. 3, pp. 369-378, 2010.
- [130 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.
- [131 J. Spriet i P. Hendrick, »Wastewater as a Heat Source for Individual Residence Heating: A Techno-economic Feasibility Study in the Brussels Capital Region,« *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, svez. 5, br. 3, pp. 289-308, 2017.
- [132 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.

- [133 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].
- [134 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.
- [135 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].
- [136 Joint Research Centre, »Waste Treatment,« Europska Komisije, 2018. [Mrežno]. Available:
] <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/wt.html>. [Pokušaj pristupa 17 10 2019].
- [137 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.
- [138 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.
- [139 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.
- [140 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.
- [141 D. Rutz, R. Mergner i R. Janssen, Održivo korištenje toplinske energije iz bioplinskih
] postrojenja, München: WIP Renewable Energies, 2012.
- [142 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.
- [143 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.
- [144 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.
- [145 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.

- [146 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.
- [147 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.
- [148 S. Achinas, V. Achinas i G. Euverink, »A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste,« *Engineering*, svez. 3, br. 3, pp. 299-307, 2017.
- [149 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.
- [150 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.
- [151 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.
- [152 J. Nyers, »COP and Economic Analysis of the Heat Recovery from Waste Water using Heat Pumps,« *Acta Polytechnica Hungarica*, svez. 13, br. 5, pp. 135-154, 2016.
- [153 The World Bank, »Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration,« The World Bank, Washington D.C., 2000.
- [154 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.
- [155 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.
- [156 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.
- [157 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].
- [158 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.
- [159 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.

- [160] 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].
- [161] 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.
- [162] T. Nowak i S. Jaganjacova, »European Heat Pump Market and Statistics Report 2013,« The European Heat Pump Association, Bruxelles, 2013.
- [163] 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.
- [164] 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.
- [165] 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.
- [166] F. Kemausuor, A. Addo i L. Darkwah, »Technical and Socioeconomic Potential of Biogas from Cassava Waste in Ghana,« *Biotechnology Research International*, 2015.
- [167] 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].
- [168] M. Soland, N. Steimer i G. Walter, »Local acceptance of existing biogas plants in Switzerland,« *Energy Policy*, svez. 61, pp. 802-810, 2013.
- [169] 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.
- [170] 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.
- [171] A. Mazur, »The impact of using of a DWHR heat exchanger on operating costs for a hot water preparation system and the amount of carbon dioxide emissions entering the atmosphere,« u *VI International Conference of Science and Technology INFRAEKO 2018 Modern Cities. Infrastructure and Environment*, 2018.
- [172] Victoria State Government, »Turning waste into energy: Join the discussion,« The State of Victoria Department of Environment, Land, Water and Planning, Victoria, 2017.

- [173 U. Sohail, C. Kwiatek, A. Fung i D. Joksimovic, »Techno-Economic Feasibility of Wastewater Heat Recovery for A Large Hospital in Toronto, Canada†,« *Proceedings*, svez. 23, br. 1, pp. 1-7, 2019.
- [174 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.
- [175 P. Kiss, »Efficient solution for large heat pumps: wastewater heat recovery,« u *12th IEA Heat Pump Conference 2017*, Rotterdam, 2017.
- [176 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.
- [177 V. Lapčik i M. Lapčikova, »Biogas stations and their environmental impact,« *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, svez. 23, pp. 9-14, 2011.
- [178 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].
- [179 B. Wiechmann, C. Dienemann, C. Kabbe, S. Brandt, I. Vogel i A. Roskosch, »Sewage sludge management in Germany,« Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015.
- [180 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.
- [181 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.
- [182 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 NNFFCC, York, 2016.
- [183 S. Cipolla i M. Maglionico, »Heat Recovery from Urban Wastewater: Analysis of the Variability of Flow Rate and Temperature in the Sewer of Bologna, Italy,« *Energy Procedia*, svez. 45, pp. 288-297, 2014.
- [184 L. Nghiem, K. Koch, D. Bolzonella i J. Drewes, »Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: Bottlenecks and possibilities,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 72, pp. 354-362, 2017.
- [185 D. Papepinto i G. Genon, »Perspectives for energetic valorization of wastewater sewage sludge: The Turin case,« *Environmental Engineering and Management Journal*, svez. 13, br. 7, pp. 1679-1686, 2014.
- [186 M. Ragazzi, »Production, treatment and disposal of sludge in Italy,« *European Water Pollution Control*, svez. 7, br. 2, pp. 42-46, 1997.

- [187 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.
- [188 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.
- [189 Ž. Bogdan, »Analiza tehnologija za energetska iskorištavanje krutog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [190 J. Brans i B. Mareschal, »Promethee Methods,« u *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, New York, Springer, 2005, pp. 163-186.
- [191 Enchanting Italy, »Lombardy Region, Italy,« 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.enchantingitaly.com/regions/lombardia/>. [Pokušaj pristupa 20 02 2020].
- [192 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].
- [193 Cremonafiore, »The Lombardy region hosts 361 biogas plants. Cremona occupies the first place with 137 plants,« [Mrežno]. Available: <http://www.cremonafiore.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].
- [194 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.
- [195 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].
- [196 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.

7. Popis tablica (prva stranica sljedećeg lista)

Tablica 1 Višekriterijska tablica [66]	45
Tablica 2 Jednokriterijska tablica GAIA softvera	48
Tablica 4 Opis i pregled tehnoloških kriterija	54
Tablica 4 Opis i pregled socio-ekonomskih kriterija.....	57
Tablica 5 Opis i pregled okolišnih kriterija	59
Tablica 6 Literaturni pregled raspona navedenih kriterija za svaku od navedenih tehnologija	68
Tablica 7 Prikaz literaturnih kvantitativnih ocjena kriterija primjenjiv za UPOV-e i bioplinska postrojenja	77
Tablica 8 Prikaz osnovnih kvantitativnih parametara za UPOV i bioplinsko postrojenje.....	78
Tablica 9 Prikaz podataka za unos u model.....	79

8. Popis slika

Slika 1 Procjena životnog ciklusa sustava nula-otpada [63].....	7
Slika 2 Hijerarhija gospodarenja otpadom [64]	8
Slika 3 Slikoviti prikaz koncepta kružnog gospodarstva [65].....	13
Slika 4 Usporedba linearnog (lijevo) i kružnog koncepta (desno) gospodarstva [81].....	18
Slika 5 Primjer sheme korištenja digestata za poljoprivredne svrhe [88]	21
Slika 6 Shema proizvodnje struvita iz obrade otpadnih voda [91].....	23
Slika 7 Shema recirkulacije digestata sa ciljem povećanja energetske učinkovitosti bioplinskog postrojenja [100]	26
Slika 8 Shema proces digestije otpadnog mulja s UPOV-a [110].....	30
Slika 9 Shema postrojenja za termičku obradu otpada [119]	33
Slika 10 Shema korištenja energije iz otpadnih voda putem dizalica topline [122].....	34
Slika 11 Grafički prikaz primjera osnovnog sučelja PROMETHEE metode [85]	41
Slika 12 Definiranje opcija (lijevo) i kriterija (desno) [85]	42
Slika 13 Hijerarhijska raspodjela kriterija [85].....	43
Slika 14 Primjer unosa podataka o težinskim kriterijima [85].....	44
Slika 15 Primjer GAIA prikaza rezultata modela [85]	49
Slika 16 Pet-stupanjski sustav ocjenjivanja kriterija (iz PROMETHEE metode)	50
Slika 17 Da/ne sustav ocjenjivanja kriterija (iz PROMETHEE metode).....	51
Slika 18 Hijerarhija kriterija za model energetske i materijalne uporabe otpada.....	52
Slika 19 Granica modela za tehnologiju I (spaljivanje digestata)	61
Slika 20 Granica modela za tehnologiju II-a (recirkulacija digestata)	62
Slika 21 Granica modela za tehnologiju II-b (proizvodnja poboljšivača tla sa struvitom).....	63
Slika 22 Granica sustava za tehnologiju III (dizalica topline).....	64
Slika 23 Granica sustava za tehnologiju IV (spaljivanje otpadnog mulja)	65
Slika 24 Weighing Assistant prikaz za scenarij Javnost	72
Slika 25 Weighing Assistant prikaz za scenarij Tehnički aspekt.....	73
Slika 26 Weighing Assistant prikaz za scenarij Okoliš.....	74
Slika 27 Prikaz univerzalnog modela za odabir tehnologije energetske i materijalne uporabe otpadnih struja.....	76
Slika 28 Prikaz težinskih omjera za scenarij Javnost.....	81
Slika 29 Prikaz težinskih omjera za scenarij Tehnički aspekt.....	82
Slika 30 Prikaz težinskih omjera za scenarij Okoliš.....	83
Slika 31 PROMETHEE Diamond prikaz tehnologija svih scenarija	88
Slika 32 Međusobna usporedba svih scenarija	89
Slika 33 PROMETHEE Rainbow prikaz tehnologija svih scenarija.....	91
Slika 34 Ukupni GAIA prikaz po kriterijima.....	93
Slika 35 GAIA prikaz po scenarijima	94
Slika 36 Prikaz odabira tehnologije u slučaju prethodno definiranih težina grupa kriterija za Italiju...	97
Slika 37 Smještaj i okruženje regije Lombardija u Italiji [191].....	102
Slika 38 Prikaz bioplinskog postrojenja s recirkulacijom digestata [195].....	104
Slika 39 Kumulativni prinos metana pri uvjetima normalne temperature i tlaka neobrađenog i obrađenog digestata (A) te separirane krute frakcije (B) [151]	105
Slika 40 Energetska bilanca proizvodnje dodatne energije uz recirkulaciju: A) neobrađenog digestata, B) enzimatski obrađene separirane krute frakcije digestata te C) neobrađene separirane krute frakcije digestata [151].....	107

Slika 41	Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost).....	138
Slika 42	Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost).....	139
Slika 43	Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt).....	140
Slika 44	Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt).....	141
Slika 45	Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš).....	142
Slika 46	Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš).....	143
Slika 47	Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno).....	144
Slika 48	Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno).....	145
Slika 49	Analiza osjetljivosti grupe kriterija Tehnologija	146
Slika 50	Analiza osjetljivosti grupe kriterija Energija	147
Slika 51	Analiza osjetljivosti grupe kriterija Ostalo	148
Slika 52	Analiza osjetljivosti grupe kriterija Pravno-administrativni okvir	149
Slika 53	Analiza osjetljivosti grupe kriterija Troškovi	150
Slika 54	Analiza osjetljivosti grupe kriterija Emisije	151
Slika 55	Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Tehnologija (sa razinom stabilnosti 1).....	152
Slika 56	Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Energija (sa razinom stabilnosti 1)	152
Slika 57	Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Ostalo (sa razinom stabilnosti 1)	153
Slika 58	Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Pravno-administrativni okvir (sa razinom stabilnosti 1)	153
Slika 59	Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Troškovi (sa razinom stabilnosti 1)	154
Slika 60	Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Emisije (sa razinom stabilnosti 1)	154

9. Popis objavljenih znanstvenih radova (prva stranica sljedećeg lista)

- 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 Blelich: *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>

10. Životopis autora (prva stranica sljedećeg lista + popis objavljenih radova)

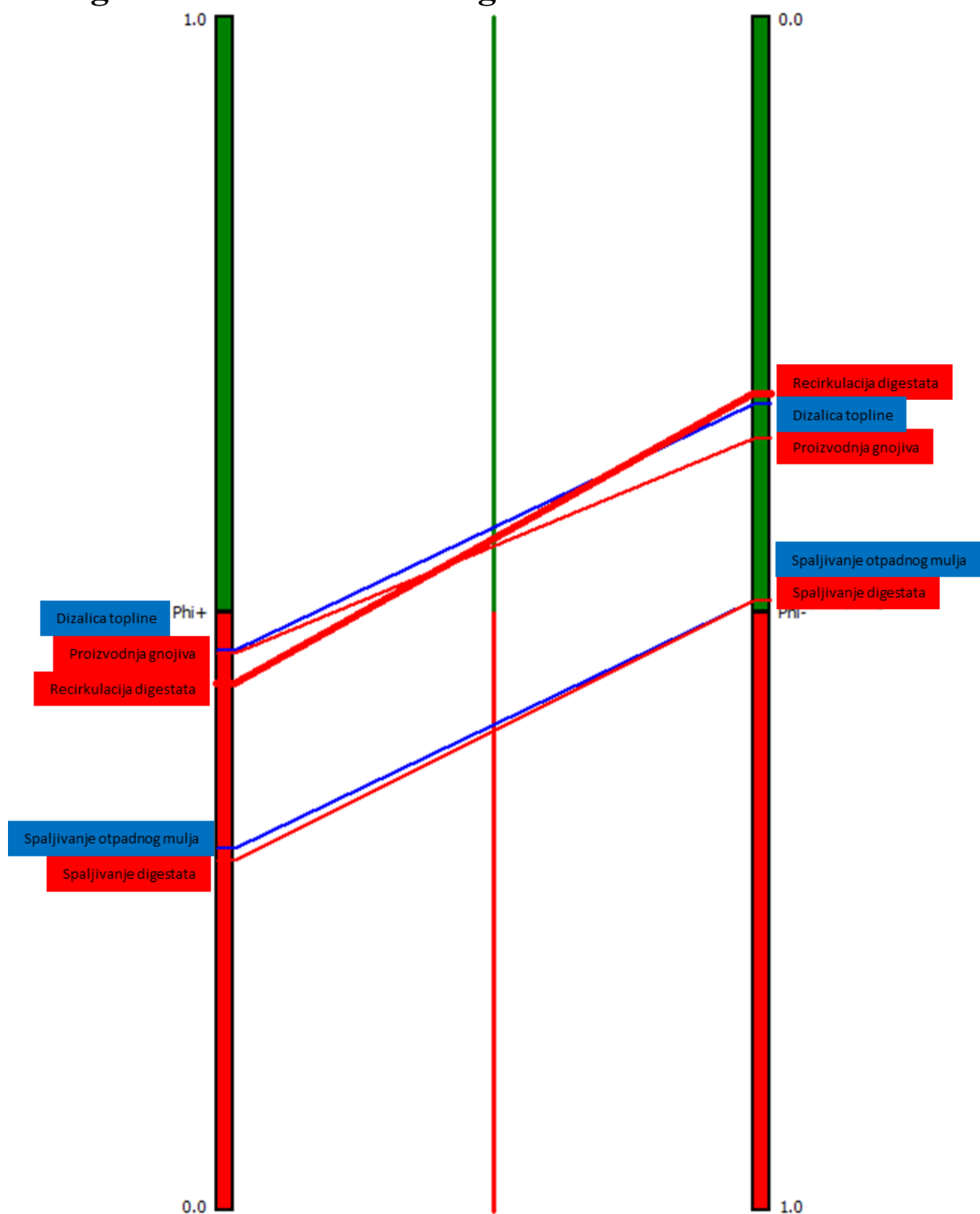
Dinko Đurđević diplomirao je na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, smjer Ekoinženjerstvo. Karijeru je započeo 2015. godine u Energetskom institutu Hrvoje Požar (EIHP), u Odjelu za obnovljive izvore energije, energetske učinkovitost i zaštitu okoliša. U okviru EIHP-a radio je na 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 pretvorbom 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:

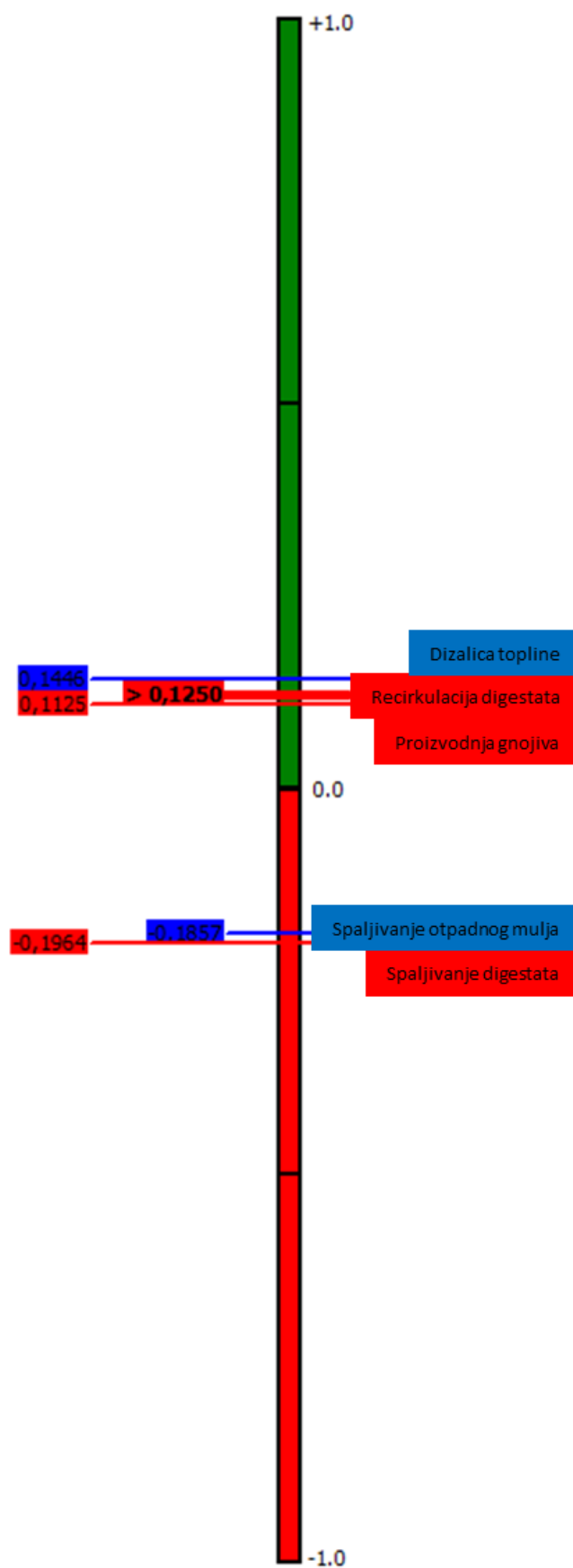
- B. Kulišić, D. Đurđević, I. Ivić: „Povećanje ekonomičnosti poslovanja bioplinskog postrojenja kroz inovativno vrednovanje digestata“; Znanstveno-stručna radionica Proizvodnja bioplina, 15. lipanj 2016. Zagreb
- D. Đurđević: „Bioplinska postrojenja kao mjesto ponora stakleničkih plinova uz proizvodnju 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>

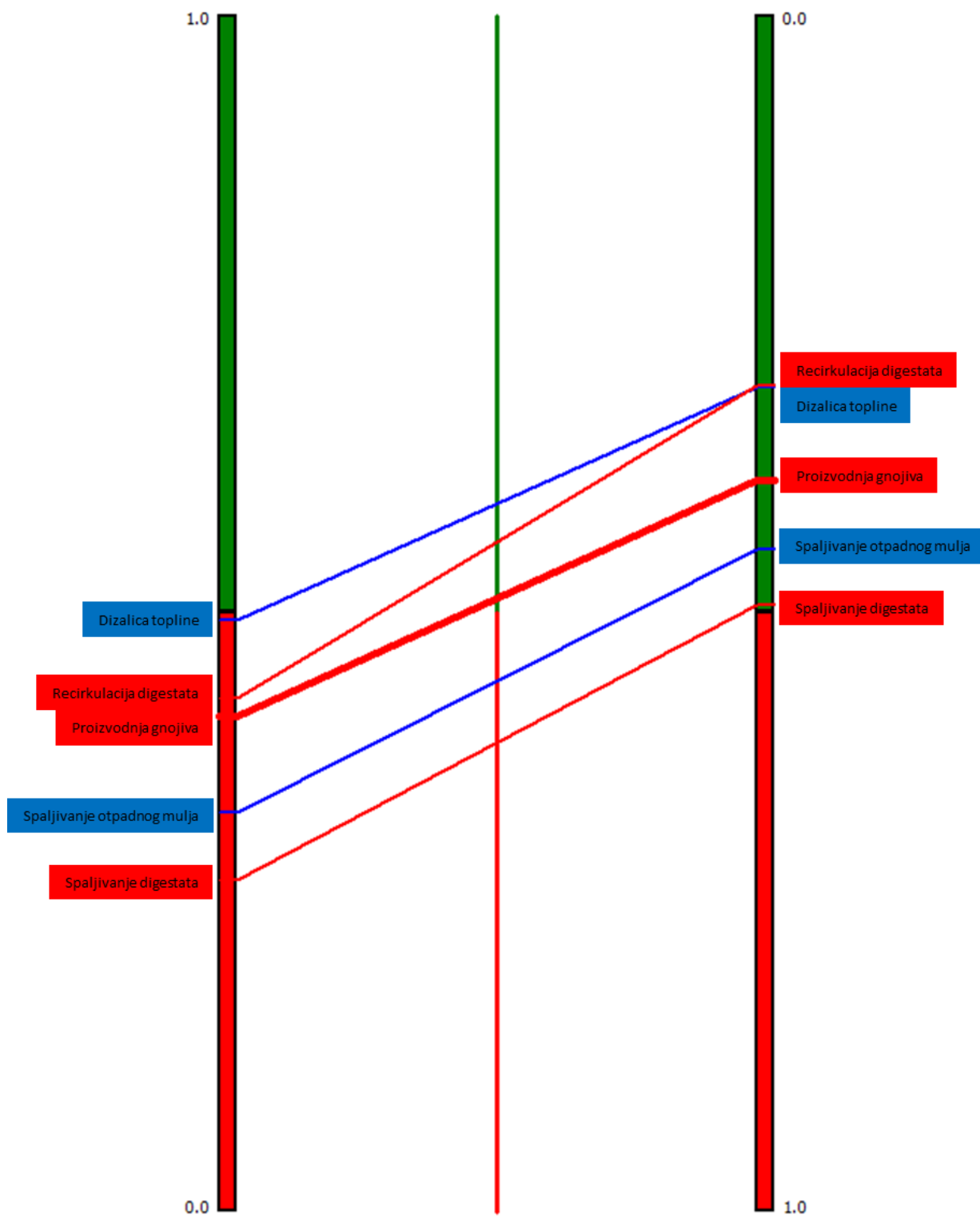
Prilog 1 – Rezultati izrađenog modela



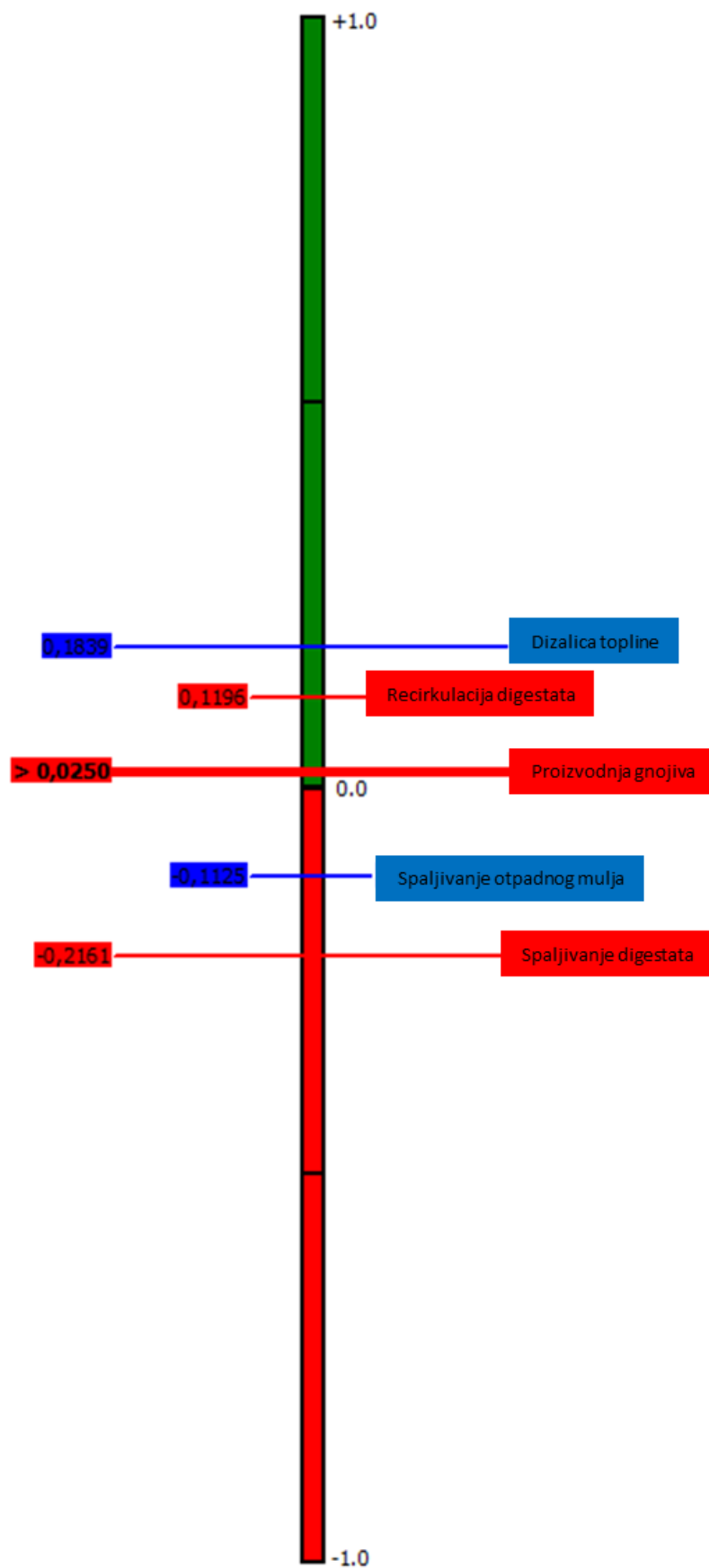
Slika 41 Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost)



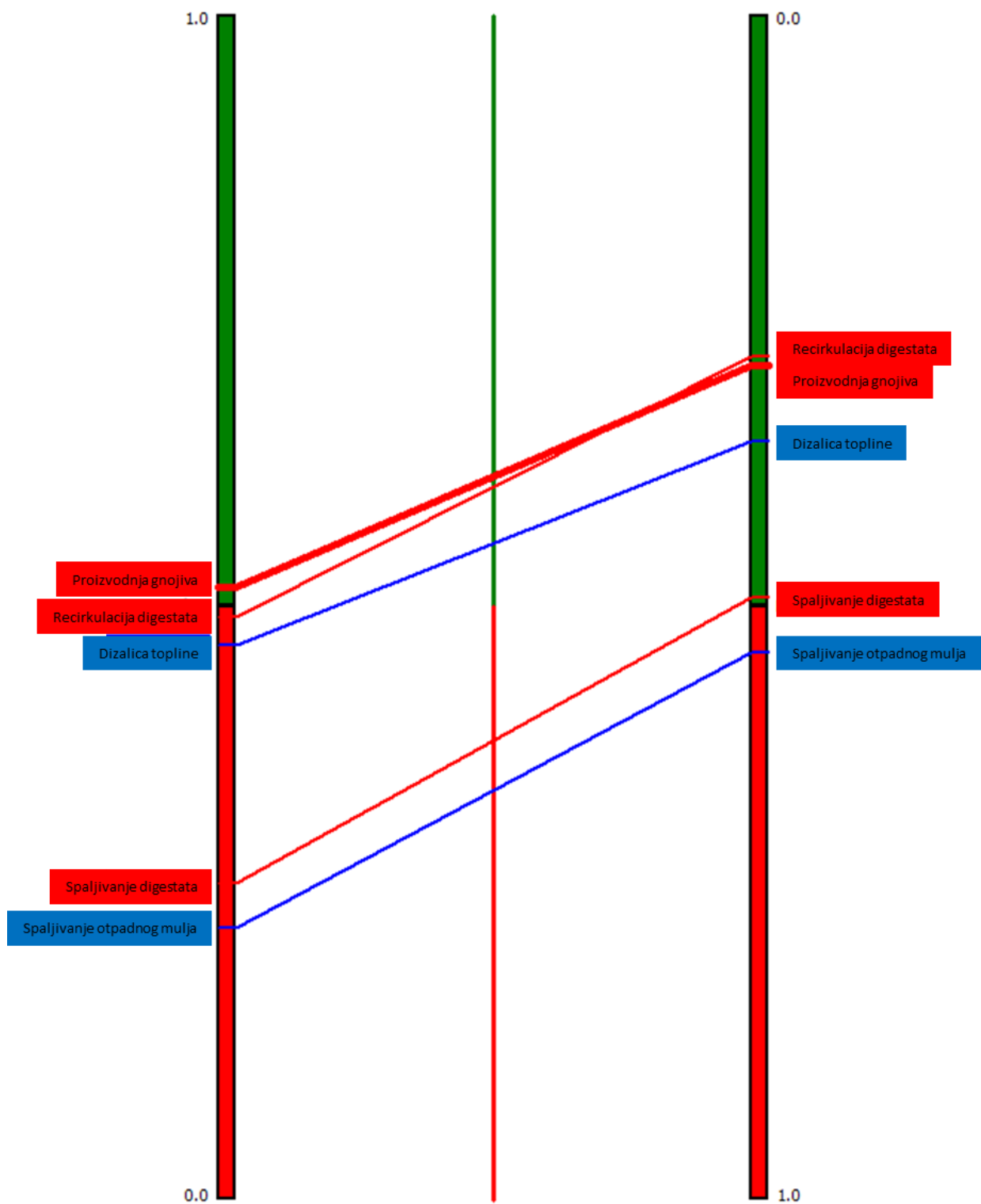
Slika 42 Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Javnost)



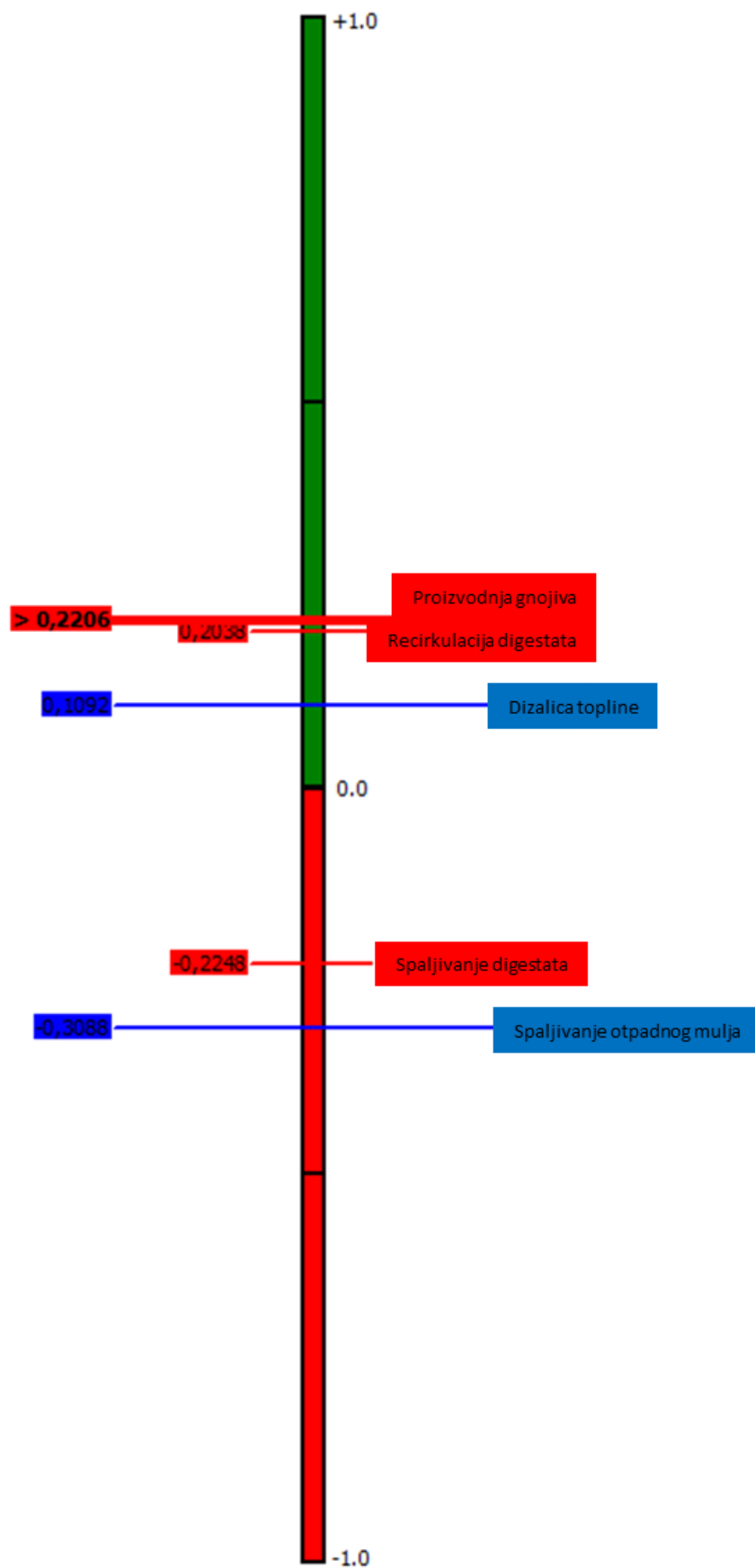
Slika 43 Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt)



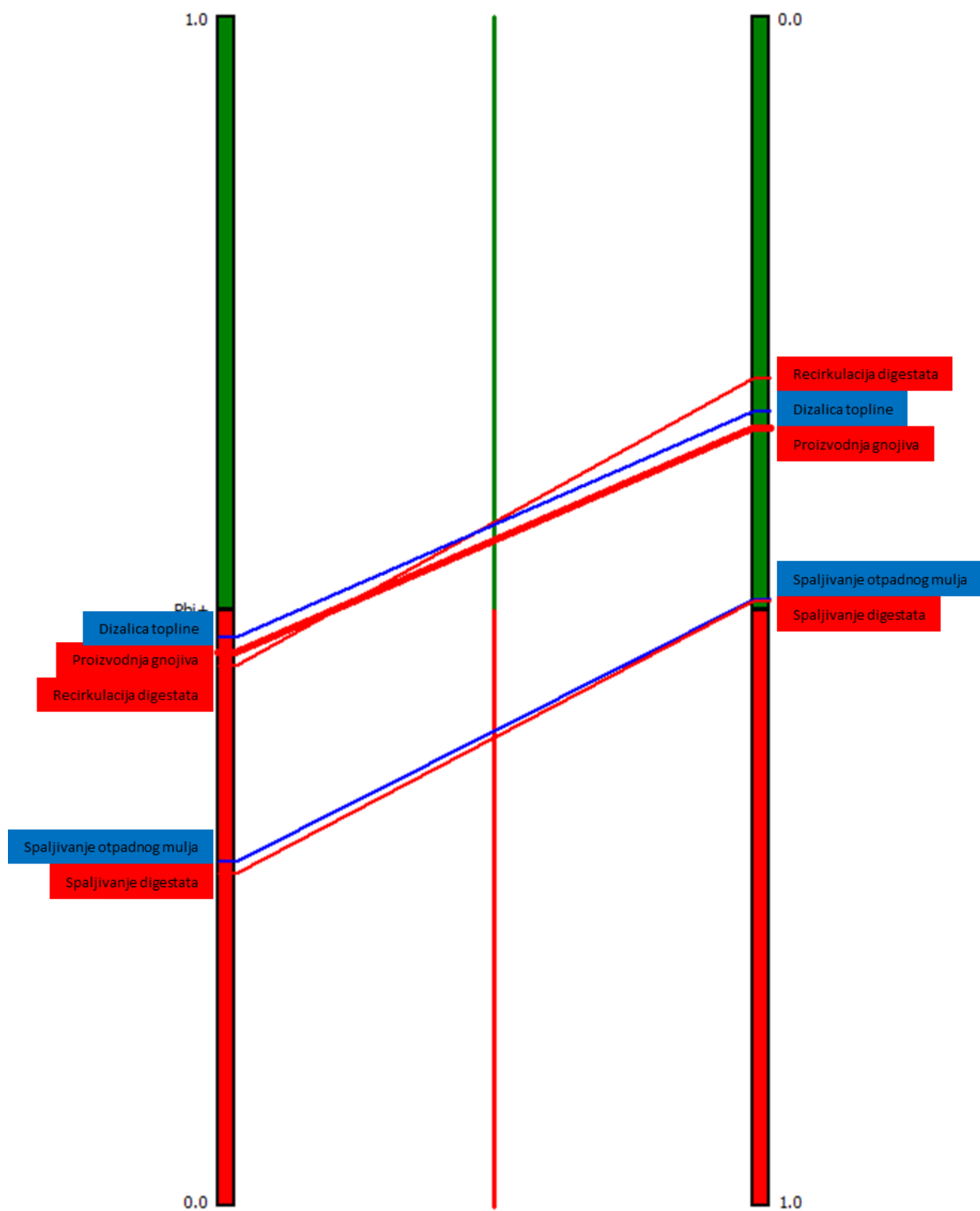
Slika 44 Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Tehnički aspekt)



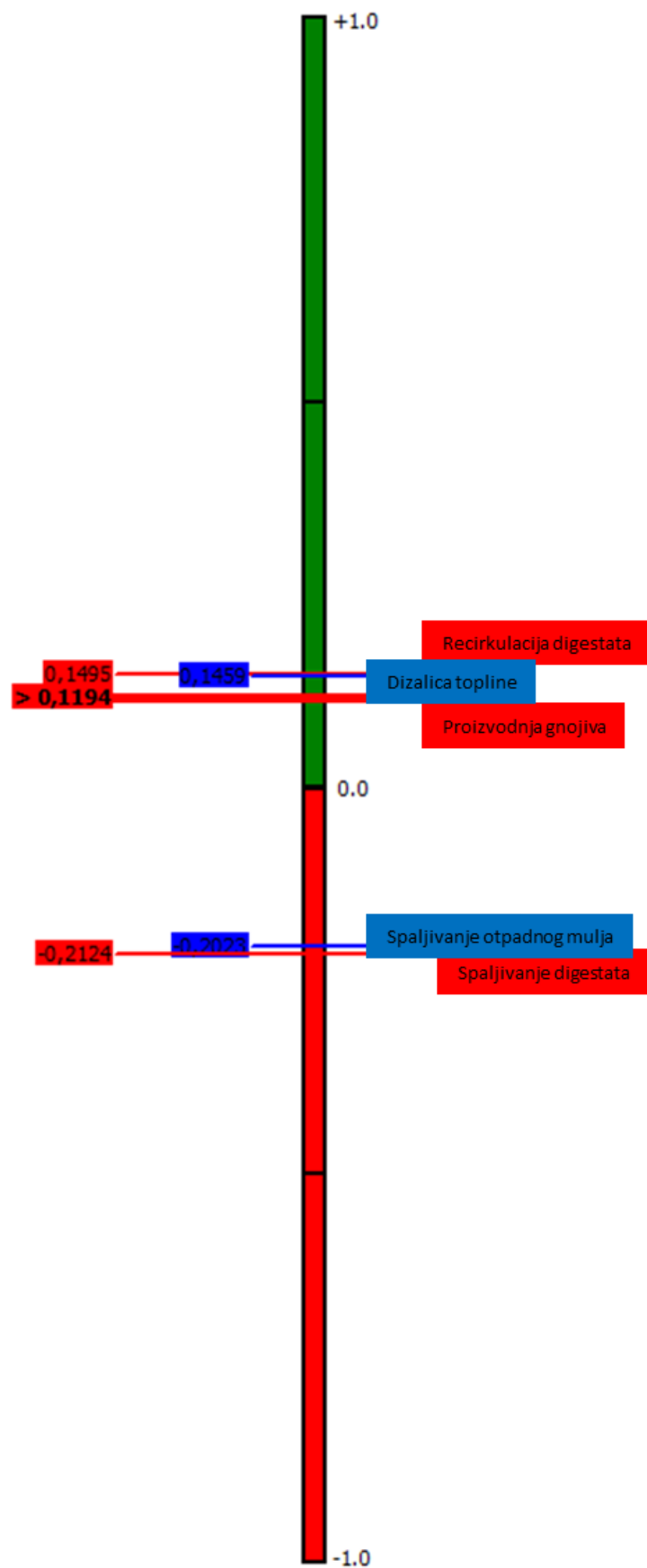
Slika 45 Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš)



Slika 46 Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (scenarij: Okoliš)

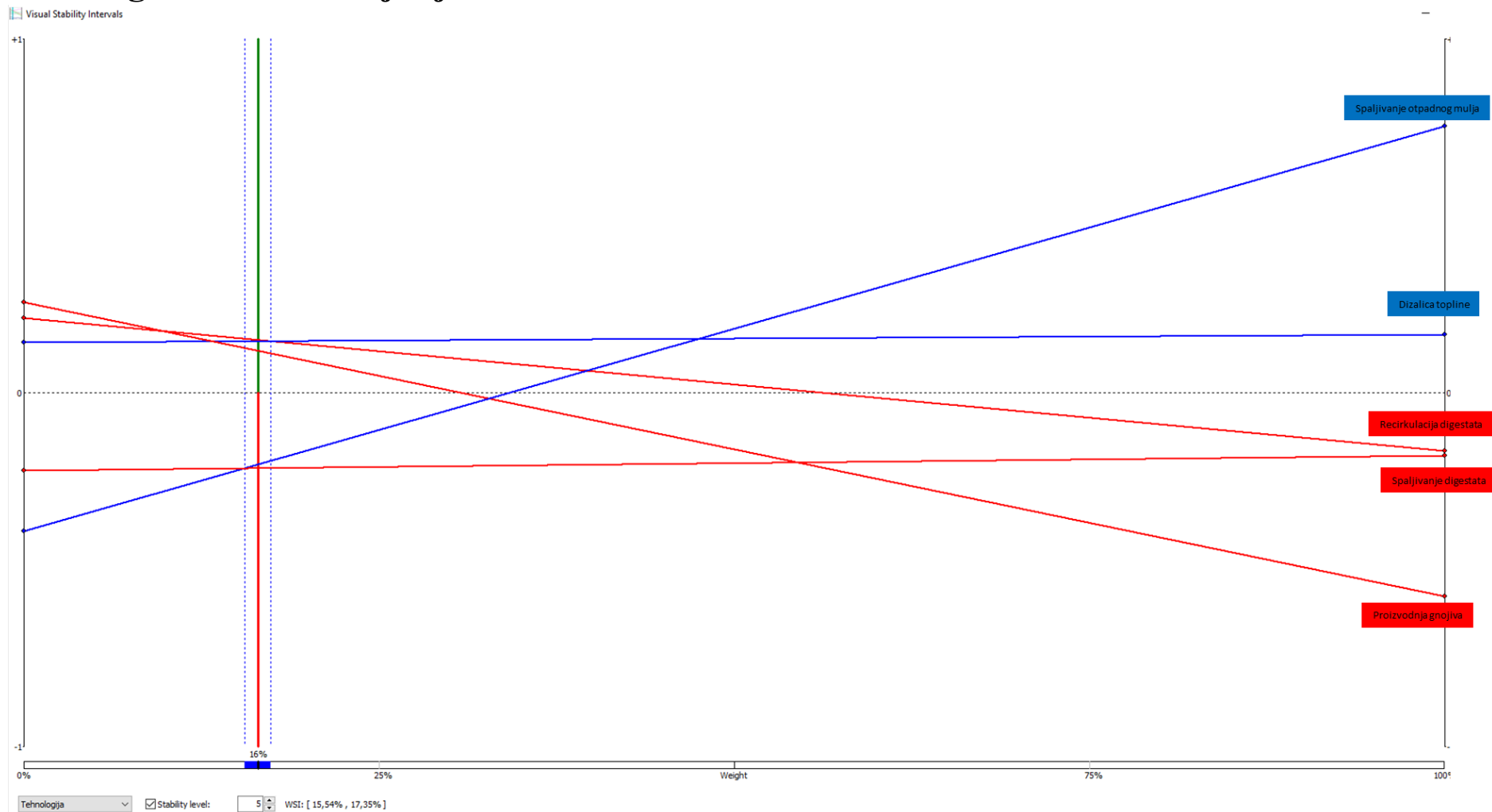


Slika 47 Parcijalno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno)

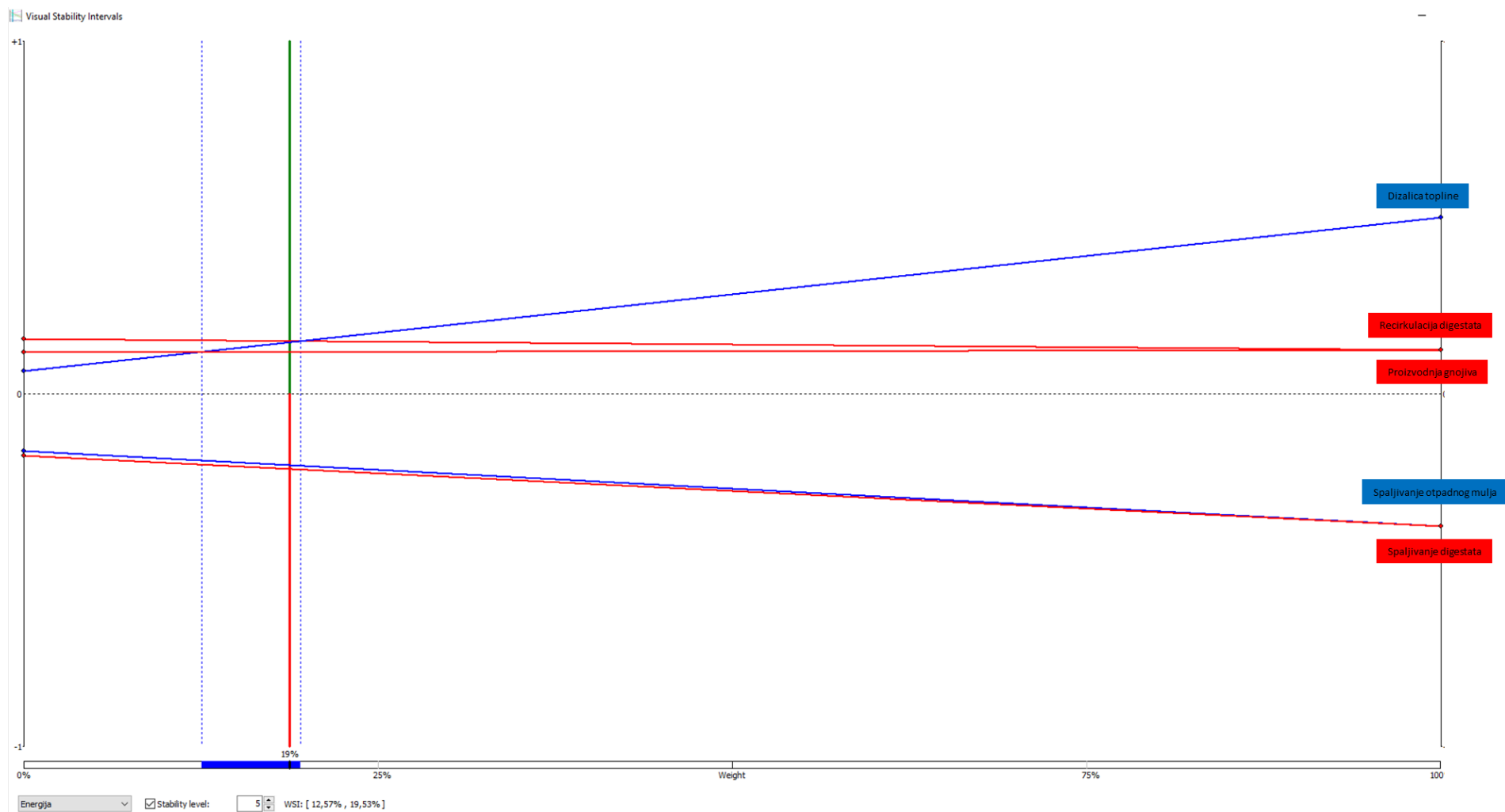


Slika 48 Kompletno rangiranje u PROMETHEE modelu (ukupno)

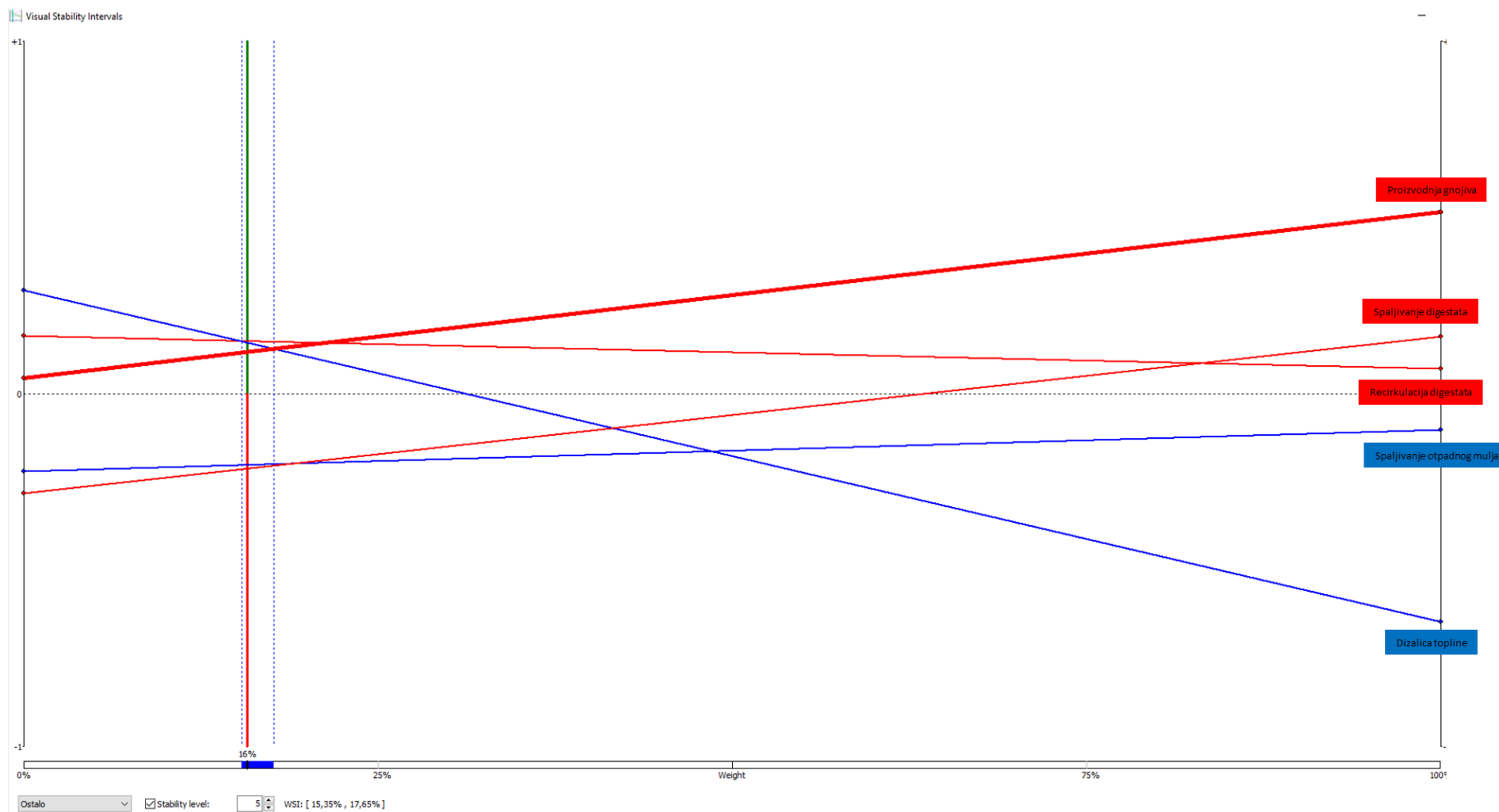
Prilog 2 – Analiza osjetljivosti



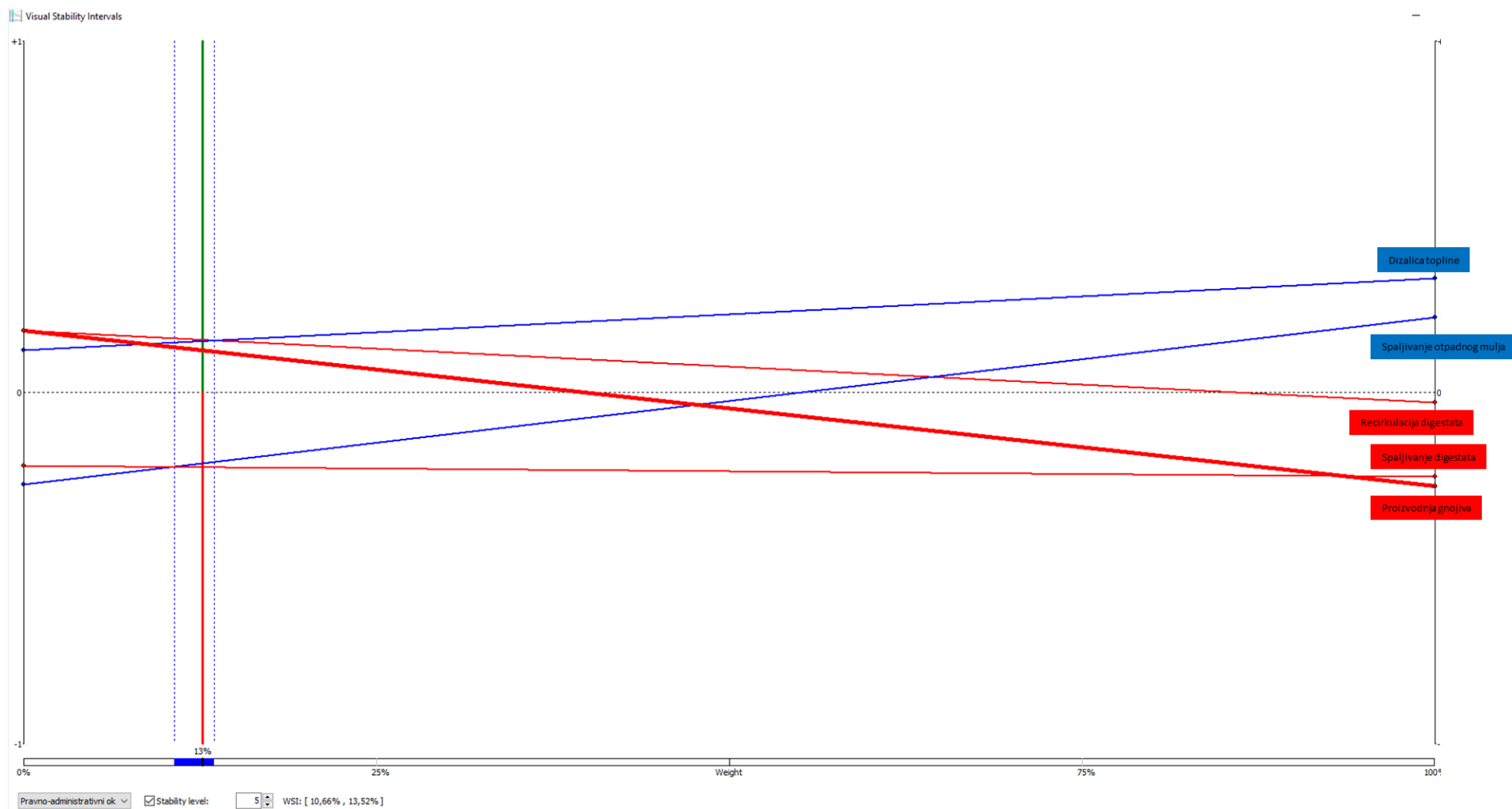
Slika 49 Analiza osjetljivosti grupe kriterija Tehnologija



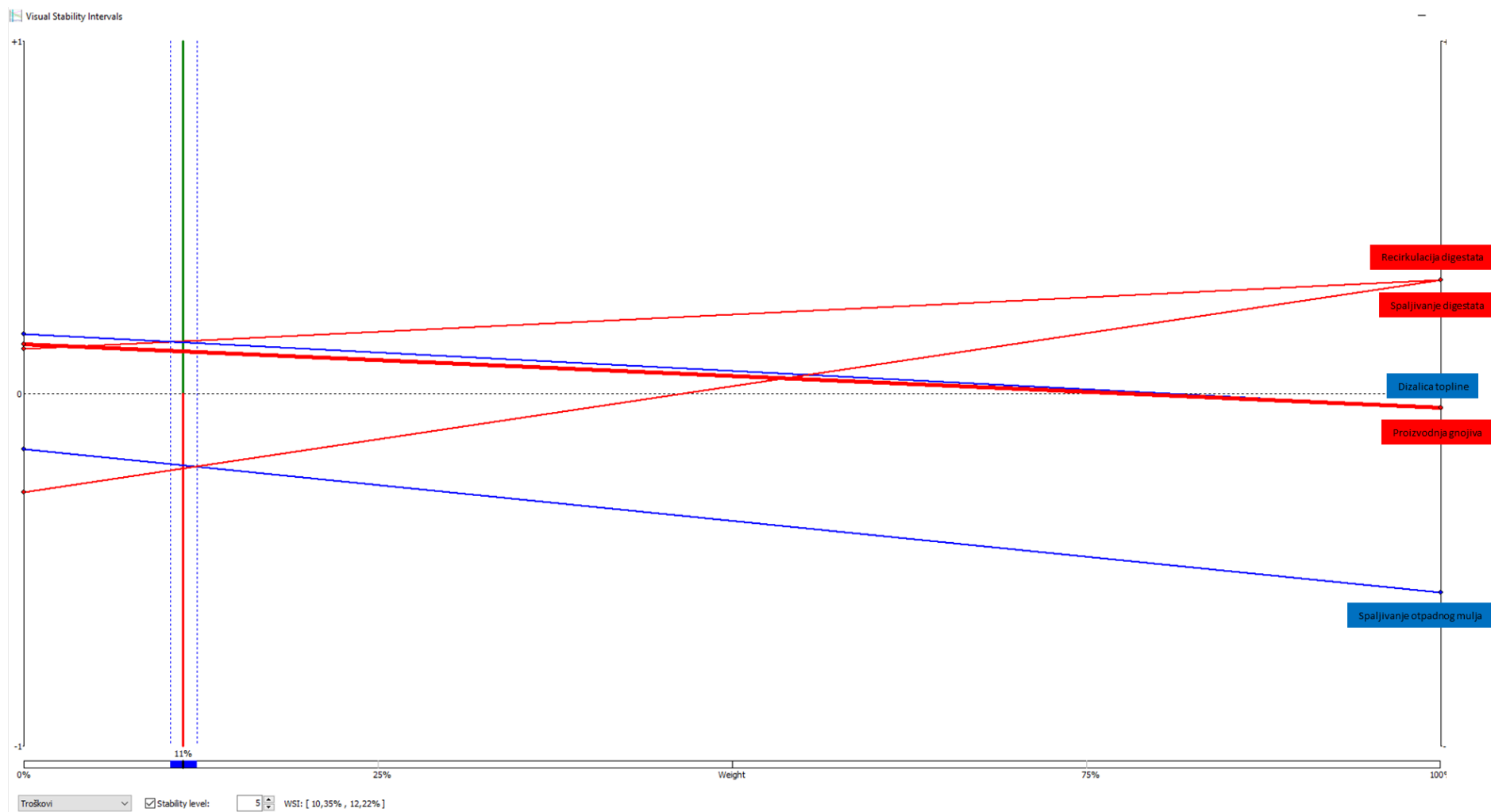
Slika 50 Analiza osjetljivosti grupe kriterija Energija



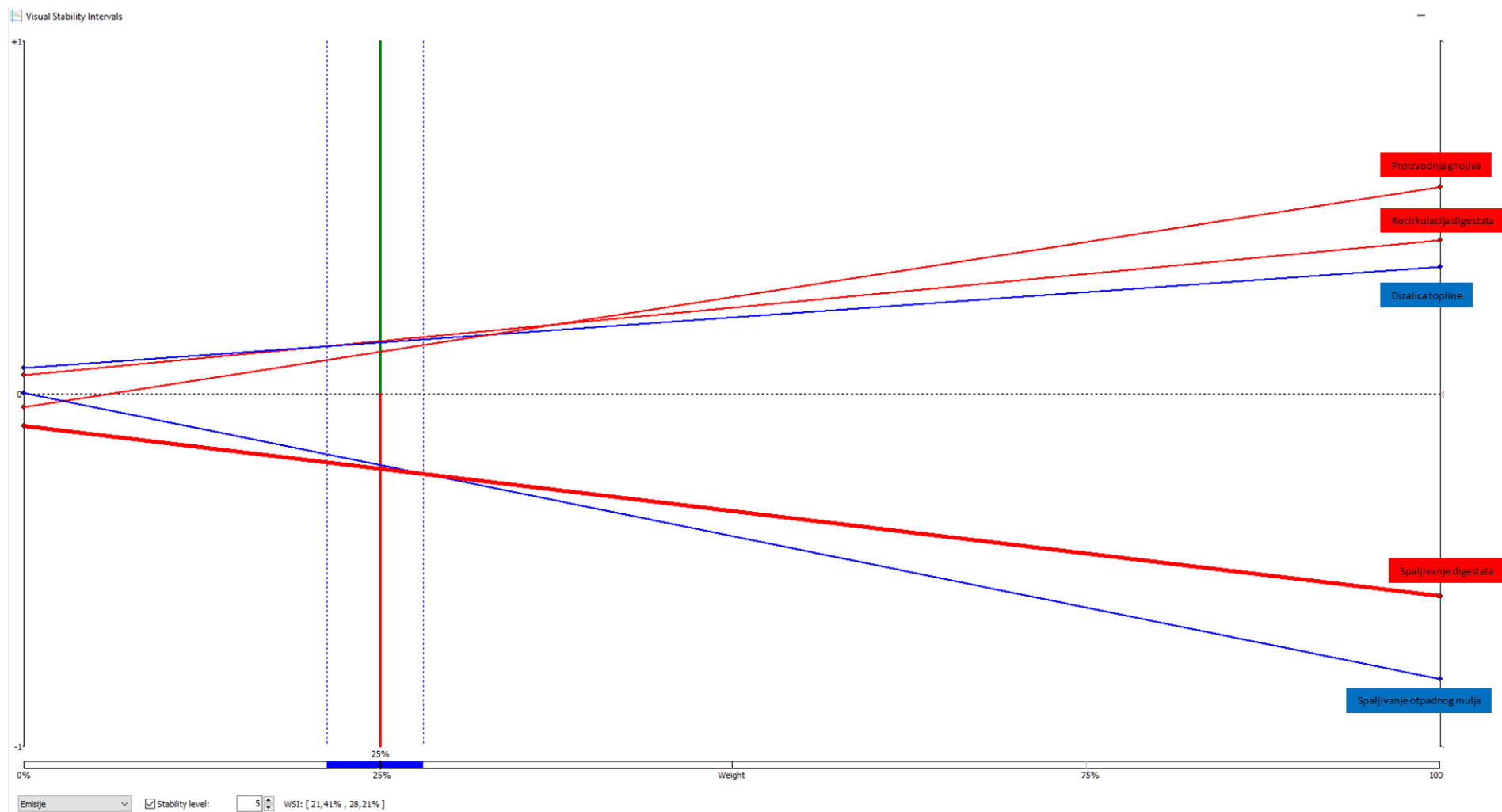
Slika 51 Analiza osjetljivosti grupe kriterija Ostalo



Slika 52 Analiza osjetljivosti grupe kriterija Pravno-administrativni okvir

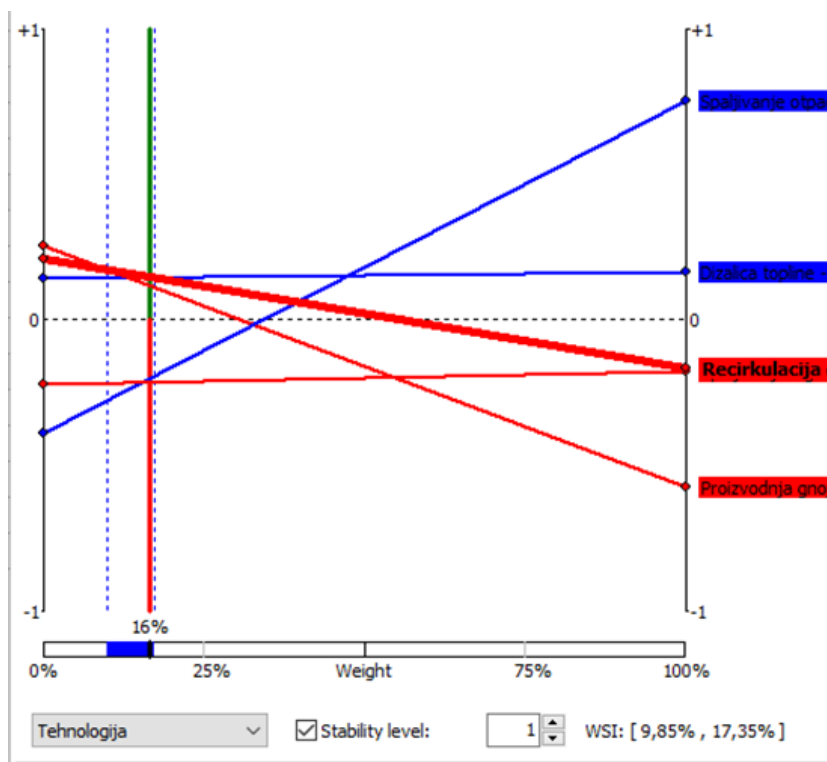


Slika 53 Analiza osjetljivosti grupe kriterija Troškovi

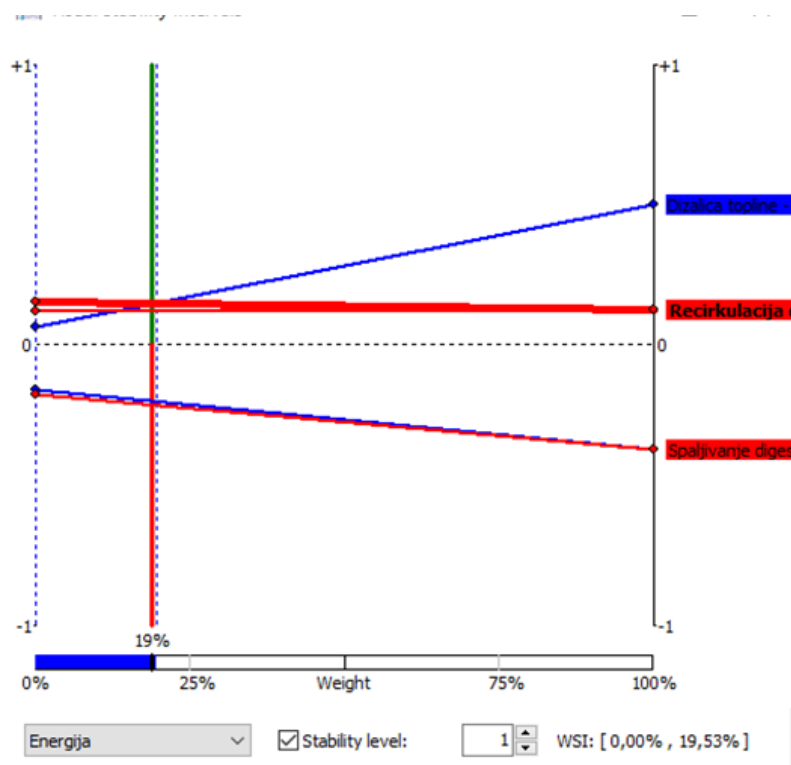


Slika 54 Analiza osjetljivosti grupe kriterija Emisije

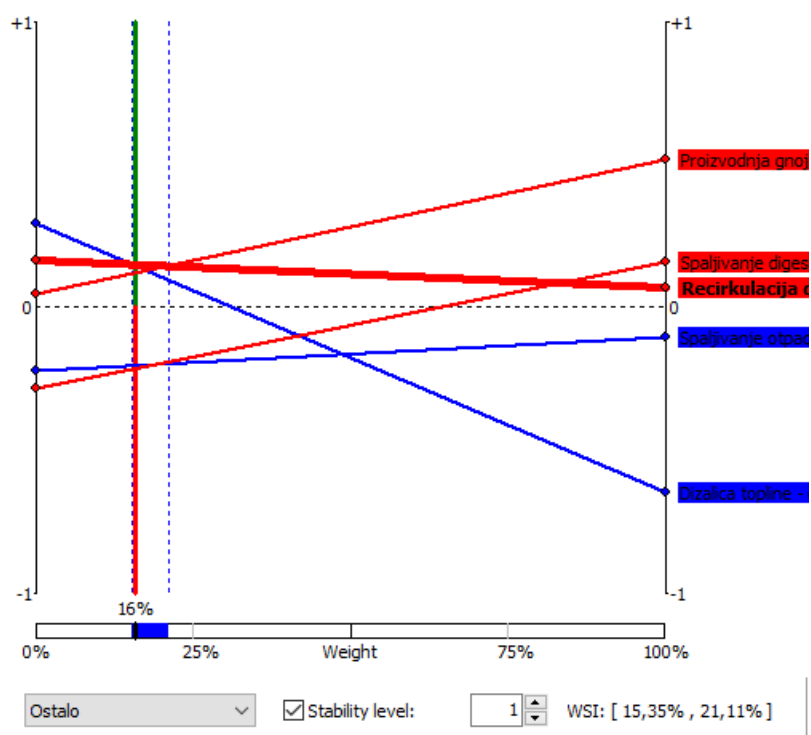
Prilog 3 – Intervali stabilnosti



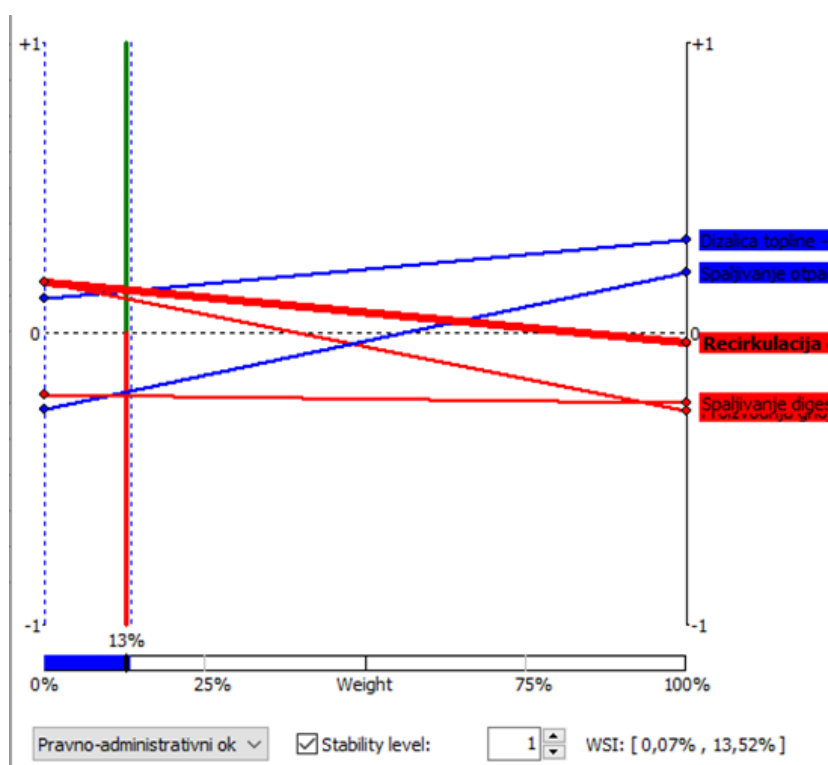
Slika 55 Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Tehnologija (sa razinom stabilnosti 1)



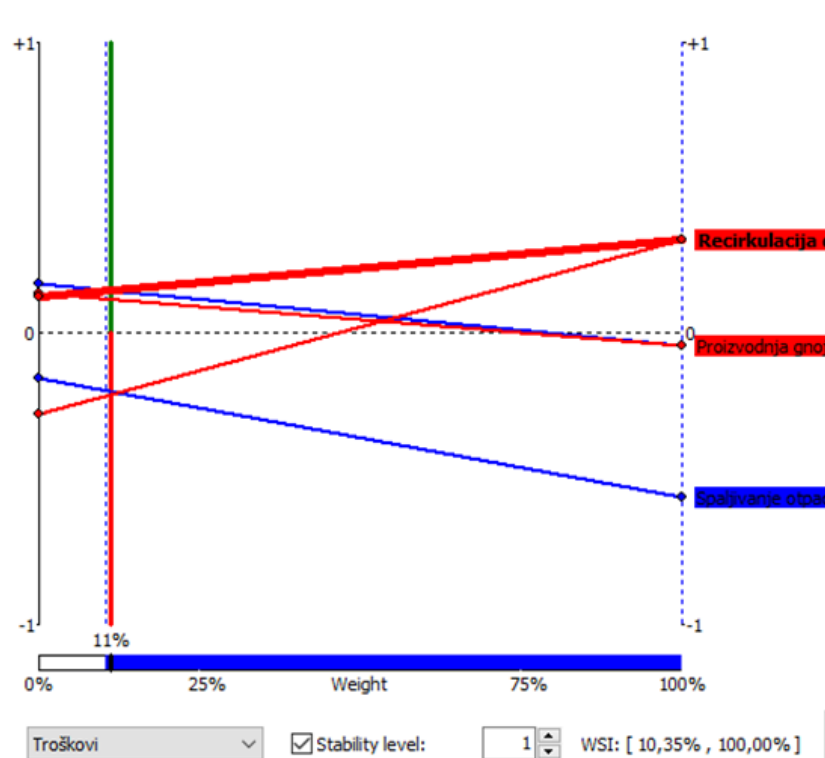
Slika 56 Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Energija (sa razinom stabilnosti 1)



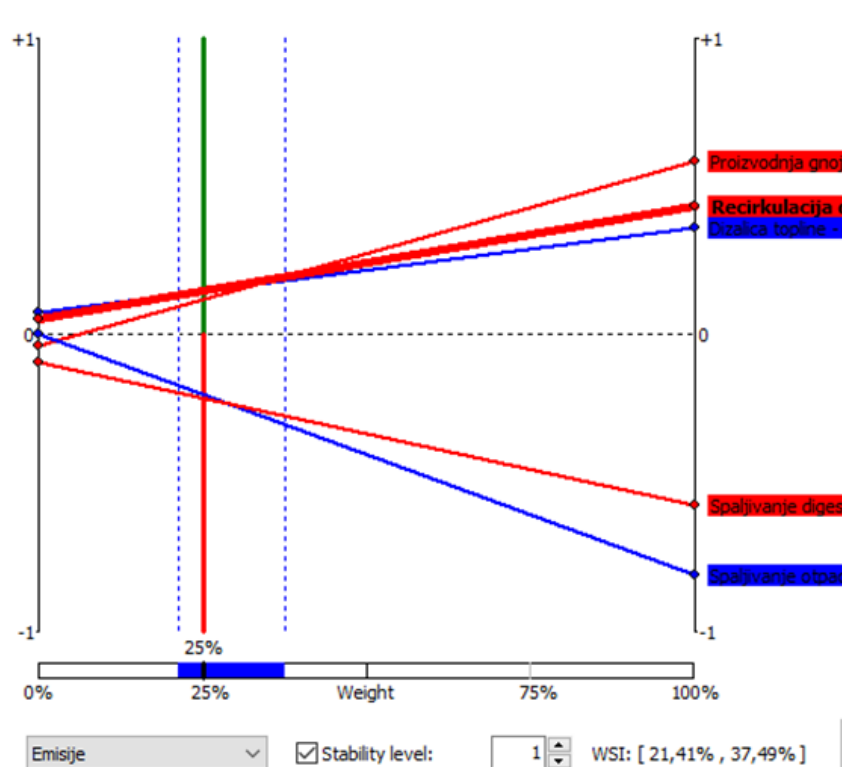
Slika 57 Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Ostalo (sa razinom stabilnosti 1)



Slika 58 Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Pravno-administrativni okvir (sa razinom stabilnosti 1)



Slika 59 Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Troškovi (sa razinom stabilnosti 1)



Slika 60 Prikaz intervala stabilnosti za grupu kriterija Emisije (sa razinom stabilnosti 1)