



UNIVERZITET U NOVOM SADU

FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



**PRIMENA DISKRETNIH METODA  
VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE U  
CILJU DEFINISANJA ODRŽIVOG  
SISTEMA SAKUPLJANJA  
ELEKTRIČNOG I ELEKTRONSKOG  
OTPADA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:  
prof. dr Bojan Batinić

Kandidat:  
Tijana Marinković

Novi Sad, 2026. godine

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
 НАВЕСТИ НАЗИВ ФАКУЛТЕТА ИЛИ ЦЕНТРА

ОБРАЗАЦ – 5а

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА<sup>1</sup>

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Тијана Маринковић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Бојан Батинић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Примена дискретних метода вишекритеријумске анализе у циљу дефинисања одрживог система сакупљања електричног и електронског отпада
Језик и писмо рада:	Српски језик, латинично писмо
Физички опис рада:	Унети број: Страница 159 Поглавља 8 Референци 139 Табела 53 Слика 9 Графикона 24 Прилога 1
Научна област:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Ужа научна област (научна дисциплина):	Инжењерство заштите животне средине
Кључне речи / предметна одредница:	Електрични и електронски отпад, е-отпад, управљање посебним токовима отпада, вишекритеријумска анализа, <i>AHP</i> , <i>TOPSIS</i> , <i>PROMETHEE II</i>
Апстракт на језику рада:	Електрични и електронски отпад (е-отпад) представља један од најбрже растућих токова отпада на глобалном нивоу, са значајним негативним утицајима на животну средину и здравље људи, али и великим потенцијалом као извор секундарних сировина. У условима недовољно развијених система управљања у земљама у развоју, посебно се истиче потреба за унапређењем система сакупљања као кључне фазе у ланцу управљања е-отпадом. Предмет истраживања ове докторске дисертације јесте дефинисање оптималног и одрживог система сакупљања електричног и електронског отпада применом метода вишекритеријумске анализе, са фокусом на услове Републике Србије и града Новог Сада као студије случаја. У раду су анализирана три алтернативна система сакупљања: стационарни систем, мобилни систем и систем рециклажних дворишта, који се разликују у погледу логистичких решења, инфраструктурних захтева и перформанси система. Методолошки оквир истраживања заснива се на примени метода вишекритеријумског одлучивања, укључујући <i>AHP</i> методу за одређивање тежинских коефицијената критеријума, као и <i>TOPSIS</i> и <i>PROMETHEE II</i> методе за рангирање алтернатива. Евалуација система извршена је на основу

<sup>1</sup> Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају у институцији у штампаном и електронском облику и не коришће се са радом.

	<p>дефинисаних критеријума који обухватају социо-економске, техничке, социјалне, инфраструктурне и еколошке аспекте. Додатно, процена утицаја система на животну средину спроведена је моделовањем емисија загађујућих материја применом <i>COPERT</i> софтвера. Резултати истраживања указују на значајне разлике у перформансама анализираних система, при чему мобилни систем сакупљања показује најбоље резултате у погледу ефикасности и обухвата услуге, док стационарни систем представља компромисно решење између трошкова и логистичке организације. Систем рециклажних дворишта показује најнижи ниво доступности и највеће оптерећење за кориснике, упркос одређеним инфраструктурним предностима. Добијени резултати потврђују да примена метода вишекритеријумске анализе омогућава систематско сагледавање комплексних проблема управљања е-отпадом и идентификацију оптималних решења у условима вишеструких и међусобно конфликтних критеријума. Предложени модел представља основу за унапређење система сакупљања е-отпада у урбаним срединама и може послужити као алат за подршку доносиоцима одлука у процесу планирања одрживих система управљања отпадом.</p>
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	30.06.2022.
Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	<p>Председник: др Немања Станисављевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду  Члан: др Маја Петровић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду  Члан: др Ненад Медић, доцент, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду  Члан: др Горан Бошковић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу  Члан: др Вељко Алексић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу  Ментор: др Бојан Батинић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p>
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OR CENTER**

**KEY WORD DOCUMENTATION<sup>2</sup>**

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Tijana Marinković
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Bojan Batinić, Ph.D., Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title in English:	Application of discrete multicriteria analysis methods in order to define a sustainable system of electrical and electronic waste collection
Language and script:	Serbian, Latin
Physical description:	Number of: Pages 159 Chapters 8 References 139 Tables 53 Illustrations 9 Graphs 24 Appendices 1
Scientific field:	Environmental Engineering and Occupational Safety and Health
Scientific subfield (scientific discipline):	Environmental Engineering
Subject, Key words:	Electrical and electronic waste, e-waste, special waste stream management, multicriteria analysis, AHP, TOPSIS, PROMETHEE II
Abstract in English:	Electrical and electronic waste (e-waste) represents one of the fastest-growing waste streams globally, with significant negative impacts on the environment and human health, but also considerable potential as a source of secondary raw materials. In conditions of insufficiently developed management systems in developing countries, particular emphasis is placed on improving collection systems as a key stage in the e-waste management chain. The subject of this doctoral dissertation is the definition of an optimal and sustainable e-waste collection system through the application of multi-criteria decision-making methods, with a focus on the conditions of the Republic of Serbia and the city of Novi Sad as a case study. The study analyzes three alternative collection systems: a stationary system, a mobile system, and a recycling yard system, which differ in terms of logistical solutions, infrastructure requirements, and system performance. The methodological framework of the research is based on the application of multi-criteria decision-making methods, including the Analytic Hierarchy Process (AHP) for determining criteria weights, as well as the TOPSIS and PROMETHEE II methods for ranking alternatives. The evaluation of the system was carried out based on defined criteria encompassing socio-economic, technical, social, infrastructural, and environmental aspects. Additionally, the environmental impact assessment was performed by modeling pollutant emissions using the COPERT software. The research results indicate

<sup>2</sup> The author of the doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authorship,

5B – Statement that the printed and e-version of the doctoral dissertation are identical and authorization to use personal data,

5r – Copyright statement.

The paper and e-versions of Statements are held at the institution and are not included into the printed thesis.

	<p>significant differences in the performance of the analyzed systems, with the mobile collection system achieving the best results in terms of efficiency and service coverage, while the stationary system represents a compromise solution between costs and logistical organization. The recycling yard system shows the lowest level of accessibility and the highest burden for users, despite certain infrastructural advantages. The obtained results confirm that the application of multi-criteria decision-making methods enables a systematic understanding of complex e-waste management problems and the identification of optimal solutions under multiple and often conflicting criteria. The proposed model provides a basis for improving e-waste collection systems in urban areas and can serve as a decision-support tool for policymakers in the planning of sustainable waste management systems.</p>
Date of endorsement by the scientific board:	30.06.2022.
Date of defence: (Filled in by the institution)	
Thesis defence board: (title, first name, last name, position, institution)	<p>Chair: Nemanja Stanisavljević, PhD, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad  Member: Maja Petrović, PhD, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad  Member: Nenad Medić, PhD, Assistant Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad  Member: Goran Bošković, PhD, Full Professor, Faculty of Engineering, University of Kragujevac  Member: Veljko Aleksić, PhD, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences Čačak, University of Kragujevac  Supervisor: Bojan Batinić, PhD, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p>
Note:	

*Zahvalnica*

Izradu doktorske disertacije ne bih mogla da ostvarim bez podrške, razumevanja i vere ljudi koji su me pratili tokom ovog puta.

Posebnu zahvalnost upućujem *prof. dr Bojanu Batiniću*, sa kojim sam započela rad na ovoj temi i napravila prve korake u istraživanju koje je dovelo do nastanka ove disertacije. Njegovo znanje, kontinuirana podrška i dragocene smernice tokom svih faza doktorskih studija predstavljaju čvrst temelj za dalji razvoj mog naučnog rada.

Veliku zahvalnost dugujem i *doc. dr Nenadu Mediću*, koji je nesebično pružio podršku u realizaciji ove doktorske disertacije, doprinoseći svojim znanjem i stručnošću, naročito u metodološkom i eksperimentalnom delu rada.

Hvala članovima komisije na izdvojenom vremenu i konstruktivnim sugestijama koje su doprinele unapređenju disertacije.

Posebno mesto zauzimaju moje kolegice, koje su bile uz mene tokom svake faze izrade ove doktorske disertacije. Njihovo razumevanje, strpljenje i spremnost da me saslušaju i pruže podršku bili su mi dragoceni.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici — mom ocu *Dušanu*, sestrama *Vanji i Milici*, kao i zetovima *Milošu i Nikoli* — koji su bili moj oslonac. Posebnu zahvalnost upućujem svom vereniku *Ognjenu*, na strpljenju, podršci i ljubavi koja me je nosila kroz svaki izazov. Ti si bio moja stabilnost u trenucima najveće neizvesnosti.

*Ovu disertaciju posvećujem svojoj majci, Slavici. Iako više nije sa nama, njena čelična snaga i neizmerna ljubav bile su moj najsnažniji podsticaj da istrajem i zauvek su utkane u sve što jesam i što sam postigla. ♡*

## APSTRAKT

Električni i elektronski otpad (e-otpad) predstavlja jedan od najbrže rastućih tokova otpada na globalnom nivou, sa značajnim negativnim uticajima na životnu sredinu i zdravlje ljudi, ali i velikim potencijalom kao izvor sekundarnih sirovina. U uslovima nedovoljno razvijenih sistema upravljanja e-otpadom u zemljama u razvoju, posebno se ističe potreba za unapređenjem sistema sakupljanja kao ključne faze u lancu njegovog upravljanja.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije jeste definisanje optimalnog i održivog sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada primenom metoda višekriterijumske analize, sa fokusom na uslove Republike Srbije i grada Novog Sada kao studije slučaja. U radu su analizirana tri alternativna sistema sakupljanja: stacionarni sistem, mobilni sistem i sistem reciklažnih dvorišta, koji se razlikuju u pogledu logističkih rešenja, infrastrukturnih zahteva i performansi sistema.

Metodološki okvir istraživanja zasniva se na primeni metoda višekriterijumskog odlučivanja, uključujući AHP metodu za određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma, kao i TOPSIS i PROMETHEE II metode za rangiranje alternativa. Evaluacija sistema izvršena je na osnovu definisanih kriterijuma koji obuhvataju socio-ekonomske, tehničke, infrastrukturne i ekološke aspekte. Dodatno, procena uticaja sistema na životnu sredinu sprovedena je modelovanjem emisija zagađujućih materija primenom COPERT softvera.

Rezultati istraživanja ukazuju na značajne razlike u performansama analiziranih sistema, pri čemu mobilni sistem sakupljanja pokazuje najbolje rezultate u pogledu efikasnosti i obuhvata usluge, dok stacionarni sistem predstavlja kompromisno rešenje između troškova i logističke organizacije. Sistem reciklažnih dvorišta pokazuje najniži nivo dostupnosti i najveće opterećenje za korisnike, uprkos određenim infrastrukturnim prednostima.

Dobijeni rezultati potvrđuju da primena metoda višekriterijumske analize omogućava sistematsko sagledavanje kompleksnih problema upravljanja e-otpadom i identifikaciju optimalnih rešenja u uslovima višestrukih i međusobno konfliktnih kriterijuma. Predloženi model predstavlja osnovu za unapređenje sistema sakupljanja e-otpada u urbanim sredinama i može poslužiti kao alat za podršku donosiocima odluka u procesu planiranja održivih sistema upravljanja ovim tokom otpada.

## LISTA SKRAĆENICA

AHP (eng. *Analytic Hierarchy Process*) – Analitički hijerarhijski proces

COPERT (eng. *Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe*) – Računarski program za proračun emisija iz drumskog saobraćaja

DEMATEL (eng. *Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory*) – Metoda za analizu uzročno-posledičnih odnosa između kriterijuma

DO – Donosilac odluka

EAR (de. *Elektro-Altgeräte Register*) – Nemački registar proizvođača električne i elektronske opreme

EC (eng. *European Commission*) – Evropska komisija

EEA (eng. *European Environment Agency*) – Evropska agencija za životnu sredinu

ELECTRE (eng. *Elimination and Choice Expressing Reality*) – Metoda višekriterijumskog odlučivanja zasnovana na relacijama nadmoći

E-oprema – Električna i elektronska oprema

E-otpad – Električni i elektronski otpad

EPR (eng. *Extended Producer Responsibility*) – Princip proširene odgovornosti proizvođača

EU (eng. *European Union*) – Evropska unija

GAIA (eng. *Geometrical Analysis for Interactive Aid*) – Grafički alat za vizualizaciju rezultata PROMETHEE metode

LCA (eng. *Life Cycle Assessment*) – Analiza životnog ciklusa

MZŽS – Ministarstvo zaštite životne sredine

PROMETHEE (eng. *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*) – Metoda rangiranja zasnovana na preferencijama

RAEE (it. *Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche*) – Električni i elektronski otpad (italijanski termin)

TOPSIS (eng. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) – Metoda rangiranja alternativa na osnovu bliskosti idealnom rešenju

UNEP (eng. *United Nations Environment Programme*) – Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu

VIKOR (srp./hrv. *Višekriterijumska optimizacija i KOmpromisno Rešenje*) – Metoda za izbor kompromisnog rešenja u uslovima konflikta između kriterijuma

VKA – Višekriterijumska analiza

WHO (eng. *World Health Organization*) – Svetska zdravstvena organizacija

## LISTA TABELA

Tabela 2.1 Usporedni prikaz klasifikacije e-opreme prema EU Direktivi 2012/19/EU i regulativi Republike Srbije

Tabela 2.2. Struktura e-otpada prema kategorijama

Tabela 4.1 Karakteristike TOPSIS I PROMETHEE II metoda

Tabela 4.2 Saaty-jeva skala relativne važnosti

Tabela 4.3 Slučajni indeks RI

Tabela 4.4 Tipovi funkcija preferencije u PROMETHEE II metodi

Tabela 5.1 Osnovni ulazni parametri sistema za sakupljanje na nivou Novog Sada

Tabela 5.2 Ulazni podaci za definisanje Stacionarnog sistema

Tabela 5.3 Procenjena adekvatna pozicija jednog kontejnera po jedinici površine

Tabela 5.4 Ulazni parametri za definisanje Mobilnog sistema

Tabela 5.5 Skala za ocenjivanje kvalitativnih podkriterijuma

Tabela 5.6 Vrednosti podkriterijuma u okviru finansijskog aspekta za razmatrane alternative

Tabela 5.7 Vrednosti podkriterijuma u okviru efikasnosti sistema za razmatrane alternative

Tabela 5.8 Rezultati ankete među građanima Novog Sada

Tabela 5.9 Vrednosti podkriterijuma u okviru socijalnog aspekta za razmatrane alternative

Tabela 5.10 Vrednosti podkriterijuma u okviru infrastrukturnog aspekta za razmatrane alternative

Tabela 5.11 Podaci o voznom parku korišćeni za modelovanje

Tabela 5.12 Podaci potrebni za modelovanje u COPERT softveru

Tabela 5.13 Prosečna dužina i trajanje putovanja

Tabela 5.14 Procentualni udeo emisija zagađujućih materija po alternativama

Tabela 5.15 Vrednosti podkriterijuma u okviru aspekta uticaj sistema za sakupljanje na životnu sredinu i zdravlje ljudi za razmatrane alternative

Tabela 6.1 Individualne težine kriterijuma i normalizovane geometrijski osrednjene težine kriterijuma u odnosu na cilj

Tabela 6.2 Individualne vektor težina F1, F2 u odnosu na C1; normalizovane geometrijski osrednjene težine F1, F2 u odnosu na C1; težine F1, F2 u odnosu na cilj

Tabela 6.3 Individualne vektor težina E1, E2, E3 u odnosu na C2; normalizovane geometrijski osrednjene težine E1, E2, E3 u odnosu na C2; težine E1, E2, E3 u odnosu na cilj

Tabela 6.4 Individualne vektor težina S1, S2, S3 u odnosu na C3; normalizovane geometrijski osrednjene težine S1, S2, S3 u odnosu na C3; težine S1, S2, S3 u odnosu na cilj

Tabela 6.5 Individualne vektor težina I1, I2 i I3 u odnosu na C4; normalizovane geometrijski osrednjene težine I1, I2 i I3 u odnosu na C4; težine I1, I2 i I3 u odnosu na cilj

Tabela 6.6 Individualne vektor težina  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  u odnosu na  $C_5$ ; normalizovane geometrijski osrednjene težine  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  u odnosu na  $C_5$ ; težine  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  u odnosu na cilj

Tabela 6.7 Matrica performansi podkriterijuma koje je potrebno minimizirati.

Tabela 6.8 Matrica performansi podkriterijuma koje je potrebno maksimizirati

Tabela 6.9 Normalizovana matrica performansi podkriterijume tipa MIN

Tabela 6.10 Normalizovana matrica performansi podkriterijume tipa MAX

Tabela 6.11 Ponderisana normalizovana matrica podkriterijuma tipa MIN; idealna i negativno-idealna rešenja

Tabela 6.12 Ponderisana normalizovana matrica podkriterijuma tipa MAX; idealna i negativno-idealna rešenja

Tabela 6.13 Udaljenost alternativa  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  od idealnih i negativno-idealnih rešenja i rangiranje alternativa

Tabela 6.14 Pojedinačni neto tok preferencija

Tabela 6.15 Rangiranje alternativa prema PROMETHEE II metodi

Tabela 6.16 Rezultati analize osetljivosti TOPSIS metode za prvi scenario

Tabela 6.17 Rezultati analize osetljivosti PROMETHEE II metode za prvi scenario

Tabela 6.18 Rang alternativa TOPSIS metode za drugi scenario

Tabela 6.19 Rang alternativa PROMETHEE II metode za drugi scenario

Tabela 6.20 Provera osetljivosti TOPSIS metode za treći scenario

Tabela 6.21 Rang alternativa PROMETHEE II metode za treći scenario

Tabela P1 Procena potrebnog broja kontejnera na osnovu prostornih i demografskih pokazatelja

Tabela P2 Osnovne prostorne i demografske karakteristike mesnih zajednica

Tabela P3 Emisije zagađujućih materija iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P4 Emisija teških metala iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P5 Emisije alifatičnih ugljovodonika (alkana) iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P6 Emisije alifatičnih ugljovodonika (alkena i diena) iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P7 Emisije alkina iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P8 Emisije aldehida iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P9 Emisije aromatičnih ugljovodonika iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P10 Emisije policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Tabela P11 Emisije organskih kiselina iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

## LISTA GRAFIKA

Grafik 2.1 E-oprema stavljena na tržište i otpadna e-oprema sakupljena, tretirana, iskorišćena, reciklirana i pripremljena za ponovnu upotrebu, EU (2012-2023)

Grafik 2.2 E-oprema stavljena na tržište u prethodne tri godine, generisan i sakupljen e-otpad, 2023

Grafik 2.3 Stopa sakupljanja otpadne električne i elektronske opreme, 2023

Grafik 2.4 Organizaciona šema i tokovi u nacionalnom sistemu za e-opremom i e-otpadom

Grafik 4.1 Opšti hijerarhijski model u AHP

Grafik 4.2 Geometrijski prikaz određivanja udaljenosti alternativa od idealnog i anti-idealnog rešenja u TOPSIS metodi

Grafik 5.1 Raspodela domaćinstava na prema tipu domaćinstva

Grafik 5.2 Raspodela mesnih zajednica prema površini

Grafik 5.3 Raspodela gustine naseljenosti prema mesnim zajednicama

Grafik 5.4 Komparativna analiza vremenskih komponenti procesa sakupljanja otpada po transportnim rutama

Grafik 5.5 Pređena distanca i vreme putovanja u zavisnosti od lokacije domaćinstva i pripadajućeg reciklažnog dvorišta

Grafik 5.6 Raspodela putničkih vozila prema vrsti pogonskog goriva (SAUVD, 2025)

Grafik 6.1 PROMETHEE I delimično rangiranje (levo) i PROMETHEE II kompletno rangiranje (desno)

Grafik 6.2 Doprinos podkriterijuma ukupnom rangiranju Alternative 1 (stacionarni sistem)

Grafik 6.2 Doprinos podkriterijuma ukupnom rangiranju Alternative 2 (mobilni sistem)

Grafik 6.4 Prikaz pojedinačnih neto tokova preferencije za Alternativu 3 (sistem reciklažnih dvorišta)

Grafik 6.5 PROMETHEE II "Rainbow" dijagram

Grafik 6.6 GAIA dijagram za stacionarni sistem

Grafik 6.7 GAIA dijagram za mobilni sistem

Grafik 6.8 GAIA dijagram za sistem reciklažnih dvorišta

Grafik 6.9 Rang alternativa i vrednosti težinskih koficijenata u nultom scenariju

Grafik 6.10 Rang alternativa i izjednačene težine podkriterijuma za prvi scenario

Grafik 6.11 Rang alternativa i težine podkriterijuma za drugi scenario

Grafik 6.12 Rang alternativa i težine podkriterijuma za treći scenario

## LISTA SLIKA

Slika 2.1 Šematski prikaz sistema depo kontejnera

Slika 2.2 Šematski prikaz preuzimanja otpada od vrata do vrata (slika levo) i donošenja na sabirno mesto (slika desno)

Slika 5.1 Prostorna organizacija grada sa granicama stambenih zona

Slika 5.2 Područja stanovanja, rasprostranjenost i osnovni oblici stanovanja

Slika 5.3 Određivanje površine mesne zajednice Bratstvo Telep

Slika 5.4 Primer kontejnera za odlaganje električnog i elektronskog otpada sa dimenzijom otvora 50x20 cm

Slika 5.5 Ruta mobilnog sakupljanja: reciklažno dvorište u Futog – južni deo grada

Slika 5.6 Ruta mobilnog sakupljanja: reciklažno dvorište na deponiji – severni deo grada

Slika 5.7 Ruta mobilnog sakupljanja: reciklažno dvorište Petrovaradin – Sremska Kamenica

## Sadržaj

<b>APSTRAKT</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTA SKRAĆENICA</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA TABELA</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTA GRAFIKA</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA SLIKA</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. UVODNA RAZMATRANJA</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED AKTUELNOG STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>6</b>
2.1 KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNOG I ELEKTRONSKOG OTPADA.....	7
2.1.1 Definicija i podela električne i elektronske opreme i otpada.....	7
2.1.2 Količine električne i elektronske opreme i otpada u EU i Srbiji .....	9
2.1.3 Sastav električne i elektronske opreme i otpada .....	11
2.2 SAKUPLJANJE ELEKTRIČNOG I ELEKTRONSKOG OTPADA .....	13
2.2.1 Organizacija sistema proširene odgovornosti proizvođača.....	15
2.3 PODELA SISTEMA SAKUPLJANJA ELEKTRIČNOG I ELEKTRONSKOG OTPADA .....	17
2.3.1 Stacionarni sistem .....	17
2.3.2 Mobilni sistem .....	19
2.3.3 Sistem reciklažnih dvorišta .....	20
2.4 OPIS TRENUTNOG SISTEMA UPRAVLJANJA E-OTPADOM U REPUBLICI SRBIJI.....	20
2.4.1 Opis trenutnog sistema upravljanja e-otpadom u Novom Sadu .....	23
<b>3. MOTIV I CILJ ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>25</b>
3.1 HIPOTEZE I STRUKTURA DISERTACIJE .....	26
<b>4. METODOLOŠKI OKVIR ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>28</b>
4.1 PRIMENA VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE U OBLASTI UPRAVLJANJA E-OTPADOM.....	30
4.2 METODOLOŠKI OKVIR AHP METODE .....	32
4.3 METODOLOŠKI OKVIR RANGIRANJA ALTERNATIVA PRIMENOM TOPSIS METODE .....	38
4.4 METODOLOŠKI OKVIR RANGIRANJA ALTERNATIVA PRIMENOM PROMETHEE II METODE.....	43
4.5 MODELOVANJE EMISIJA GASOVA PRIMENOM COPERT SOFTVERA.....	49
4.5.1 Metodologija za proračun emisija izduvnih gasova .....	51
<b>5. DEFINISANJE OPTIMALNOG SISTEMA SAKUPLJANJA E-OTPADNA NA PRIMERU GRADA NOVOG SADA</b> .....	<b>54</b>
5.1 DEFINISANJE PROSTORNIH I DEMOGRAFSKIH KARAKTERISTIKA SISTEMA SAKUPLJANJA .....	54
5.2 RAZVOJ ALTERNATIVNIH REŠENJA .....	59
5.2.1 Alternativa 1 – Stacionarno sakupljanje (A1).....	60
5.2.2 Alternativa 2 – Mobilno sakupljanje (A2).....	63
5.2.3 Alternativa 3 – Reciklažna dvorišta (A3).....	67
5.3 DEFINISANJE KRITERIJUMA I PODKRITERIJUMA ZA OCENU ALTERNATIVA .....	68
5.3.1 Finansijski aspekt .....	69
5.3.2 Efikasnost sistema .....	71
5.3.3 Socijalni aspekt .....	72
5.3.4 Infrastrukturni aspekt.....	74
5.3.5 Uticaj sistema za sakupljanje na životnu sredinu i zdravlje ljudi.....	75
<b>6. REZULTATI I DISKUSIJA</b> .....	<b>82</b>
6.1 REZULTATI EVALUACIJE KRITERIJUMA I PODKRITERIJUMA PRIMENOM AHP METODE.....	82

6.2	MATRICE PERFORMANSI TOPSIS I PROMETHEE II METODA .....	88
6.3	REZULTATI DOBIJENI TOPSIS METODOM .....	89
6.4	REZULTATI DOBIJENI PROMETHEE II METODOM.....	92
6.4.1	<i>Interpretacija rezultata dobijenih PROMETHEE metodom</i> .....	96
6.5	ANALIZA OSETLJIVOSTI TOPSIS I PROMETHEE II METODE.....	107
6.5.1	<i>Scenario I – izjednačene težine</i> .....	107
6.5.2	<i>Scenario II – povećanje značaja operativnih troškova</i> .....	109
6.5.3	<i>Scenario III – povećanje značaja pokrivenosti uslugom sakupljanja i jednostavnosti logistike i transporta.....</i>	110
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>112</b>
<b>8.</b>	<b>PREGLED LITERATURE .....</b>	<b>116</b>
<b>PRILOG</b>	<b>.....</b>	<b>VI</b>

## 1. UVODNA RAZMATRANJA

Upotreba električne i elektronske opreme (e-oprema) snažno je povezana sa globalnim ekonomskim razvojem i rastom životnog standarda. Električna i elektronska oprema postala je neophodna u savremenim društvima, ali njena proizvodnja i upotreba imaju značajan uticaj na potrošnju resursa i životnu sredinu (Forti i dr., 2020; EC, 2020a). Sve veća zavisnost od tehnologije, ubrzana urbanizacija i intenzivna industrijalizacija doprinose kontinuiranom rastu potrošnje e-opreme (Kaza i dr., 2018). Zbog brzog tehnološkog napretka i čestih inovacija, električnu i elektronsku opremu karakteriše kratak životni vek, dodatno skraćen ograničenim mogućnostima popravke usled neadekvatnog dizajna proizvoda (Bakker i dr., 2014). Kao posledica ovih trendova, količina e-otpada globalno raste za oko 2,6 miliona tona godišnje, dok je u periodu od 2010. do 2022. zabeležen rast od čak 82% (Baldé i dr., 2024). Električni i elektronski otpad prepoznat je kao jedan od najbrže rastućih tokova otpada, sa prosečnom godišnjom stopom rasta od 3% do 5%, što je značajno više u odnosu na tokove komunalnog otpada (Forti i dr., 2020; WHO, 2021). Procenjuje se da je 2022. godine proizvedeno oko 62 miliona tona e-otpada širom sveta, od čega je samo 22,3% formalno sakupljeno i reciklirano (Baldé i dr., 2024).

Električni i elektronski otpad sadrži brojne toksične i potencijalno opasne supstance, zbog čega se svrstava u kategoriju posebnih tokova otpada. Ukoliko, usled neadekvatnog upravljanja, dospe u životnu sredinu, može imati značajan negativan uticaj na ekosisteme i zdravlje ljudi (WHO, 2021; Robinson, 2009). Ovaj otpad sadrži teške metale kao što su olovo (Pb), antimon (Sb), živa (Hg), kadmijum (Cd) i nikal (Ni), kao i polibromovane difenil etre (PBDEs), polihlorovane bifenile (PCBs), heksavalentni hrom, ftalate i bromirane inhibitore gorenja (Widmer i dr., 2005; Robinson, 2009). Sa druge strane, e-otpada predstavlja i značajan izvor sekundarnih sirovina, jer komponente kao što su štampane ploče sadrže vredne metale poput aluminijuma, bakra, srebra, zlata, platine i paladijuma (Forti i dr., 2020). Međutim, zbog neadekvatnog sistema upravljanja i niskih stopa sakupljanja, veliki deo ovih materijala završava na deponijama, što osim negativnog uticaja na životnu sredinu predstavlja i značajan gubitak resursa (Baldé i dr., 2024). Uzimajući u obzir kompleksnost hemijskog sastava e-otpada i njegove potencijalne negativne uticaje, neophodno je razviti efikasne sisteme sakupljanja sa minimalnim emisijama u životnu sredinu, koji doprinose smanjenju zagađenja i unapređenju cirkularne ekonomije kroz korišćenje sekundarnih sirovina (EC, 2020a).

U uslovima rastuće globalne nestašice resursa, naročito u pogledu kritičnih i retkih metala u Evropi, otpad od električne i elektronske opreme sve više dobija na značaju kao sekundarni izvor sirovina u okviru koncepta urbanog rudarenja (EC, 2023; EC, 2020a). Savremeni urbani sistemi mogu se posmatrati kao kompleksni metabolički sistemi koji kontinuirano troše resurse i generišu otpadne tokove (Kennedy i dr., 2011). Koncept urbanog rudarenja ima za cilj optimizaciju ovog urbanog metabolizma kroz reintegraciju otpadnih tokova u proizvodne cikluse, čime se uspostavlja cirkularni model upravljanja resursima, za razliku od tradicionalnog linearnog pristupa zasnovanog na principu „uzmi–proizvedi–odbači“ (Cossu i Williams, 2015; EC, 2020a; Meadows i dr., 1972). Ovaj pristup podrazumeva iskorišćenje vrednih materijala, uključujući aluminijum, bakar, plemenite i retke metale, iz antropogenih izvora, prvenstveno odbačenih elektronskih uređaja (Forti i dr., 2020; Baldé i dr., 2024). U poređenju sa konvencionalnim rudarenjem, urbano rudarenje predstavlja održiviju alternativu, s obzirom na niže ekološke uticaje i manju energetska zahtevnost (Zeng i dr., 2018; Islam i dr., 2020). Iako elektronski otpad sadrži opasne i teško razgradive komponente, on istovremeno predstavlja izuzetno vredan resurs, čija se ukupna tržišna vrednost procenjuje na milijarde evra godišnje (Baldé i dr., 2024). Povećanjem stope iskorišćenja ovih materijala smanjuje se potreba za eksploatacijom primarnih resursa, ublažavaju negativni uticaji na životnu sredinu i podstiče razvoj održivih modela upravljanja otpadom. Pored toga, efikasno upravljanje otpadom doprinosi stvaranju novih radnih mesta, jačanju lokalnog socio-ekonomskog razvoja i zaštiti ekosistema (Kaza i dr., 2018; EC, 2020a). Sa druge strane, zavisnost od neobnovljivih resursa, ograničena dostupnost primarnih sirovina, kao i nedostatak prostora za odlaganje otpada, ukazuju na potrebu za paradigmatiskim pomakom ka modelima zasnovanim na povraćaju vrednosti iz otpada (Xavier i dr., 2021; EC, 2020a). Ipak, ograničenost prirodnih resursa, kao i kompleksnost upravljanja generisanim otpadom, zahtevaju integrisana tehnička, institucionalna i ekonomska rešenja (Marshall i Farahbakhsh, 2013; Wilson i dr., 2006)

Kao i mnoge zemlje u razvoju, Republika Srbija se suočava sa brojnim izazovima u oblasti upravljanja e-otpadom, uključujući nedovoljno razvijenu infrastrukturu za sakupljanje i tretman otpada, ograničene institucionalne kapacitete i nedovoljnu koordinaciju među zainteresovanim stranama (Marinković i dr., 2025). Značajne količine e-otpada ostaju akumulirane u domaćinstvima ili se obrađuju u okviru neformalnog sektora, što predstavlja ozbiljne rizike po životnu sredinu i zdravlje ljudi (Widmer i dr., 2005). Istovremeno, paralelno delovanje više aktera na istom geografskom prostoru, bez jasne podele odgovornosti i

operativne koordinacije, dovodi do preklapanja aktivnosti, povećanja troškova i smanjenja ukupne efikasnosti sistema (Marinković i dr., 2025).

Efikasnost sistema sakupljanja e-otpada u velikoj meri zavisi od institucionalnog okvira i načina implementacije principa proširene odgovornosti proizvođača (EPR), koji predstavlja ključni mehanizam za finansiranje i organizaciju sistema upravljanja otpadom (OECD, 2016; Direktiva 2012/19/EU). U razvijenim državama Evropske unije, lokalne samouprave imaju centralnu ulogu u organizaciji sistema sakupljanja, obezbeđujući građanima pristupačne i funkcionalne modele odlaganja e-otpada (Parajuly i dr., 2019).

U Republici Srbiji, jedan od ključnih izazova u oblasti upravljanja e-otpadom predstavlja uspostavljanje adekvatnog i održivog sistema sakupljanja. Prvi korak u rešavanju ovog problema podrazumeva definisanje optimalnog modela sakupljanja, što zahteva analizu različitih alternativa i donošenje odluke o izboru rešenja najpogodnijeg za konkretne lokalne uslove. Donošenje takve odluke podrazumeva razmatranje velikog broja međusobno povezanih faktora koji utiču na performanse sistema.

Na osnovu pregleda stručne literature i analize sistema implementiranih u razvijenim zemljama, identifikovana su tri osnovna sistema sakupljanja e-otpada koja mogu biti primenjena u uslovima Srbije, konkretno na teritoriji grada Novog Sada. Ovi sistemi se razlikuju u pogledu socijalnih, logističkih i infrastrukturnih rešenja, kao i po svojoj efikasnosti i ekološkim karakteristikama.

Socijalni aspekti predstavljaju značajan faktor u funkcionisanju sistema sakupljanja otpada, posebno u zemljama u razvoju. Nizak nivo ekološke svesti, nedovoljna motivacija građana za pravilno odlaganje otpada, kao i izražena uloga neformalnog sektora, značajno utiču na efikasnost sistema (Medina, 2000; Saphores i dr., 2006; Chi i dr., 2011; Kaza i dr., 2018). Pored toga, komfor korisnika i dostupnost usluga direktno utiču na nivo učešća građana u sistemu (Gatersleben i dr., 2002; Quinto, 2025).

Značajne količine e-otpada u zemljama u razvoju nisu obuhvaćene formalnim sistemima upravljanja, već se skladište u domaćinstvima ili obrađuju u okviru neformalnog sektora, što predstavlja ozbiljne rizike po životnu sredinu i zdravlje ljudi (Abha, 2025; Quinto, 2025; WHO, 2021). U Srbiji, značajnu ulogu u sakupljanju e-otpada imaju neformalni sakupljači, zbog čega je prilikom planiranja novih sistema neophodno uzeti u obzir otpornost sistema na uticaj ovog sektora i mogućnost njegove integracije u formalne tokove upravljanja.

Poseban izazov predstavlja i integracija novih sistema sakupljanja u postojeće infrastrukturne i organizacione okvire. Efikasnost implementacije u velikoj meri zavisi od mogućnosti prilagođavanja postojećim logističkim mrežama, kao i od fleksibilnosti sistema da odgovori na specifične lokalne uslove (Chung i Zhang, 2011). Jednostavnost logističke organizacije, dostupnost sabirnih mesta i optimizacija transportnih ruta predstavljaju ključne faktore za povećanje stope sakupljanja i unapređenje performansi sistema.

Infrastrukturni i organizacioni faktori predstavljaju značajan izazov u upravljanju električnim i elektronskim otpadom, posebno u zemljama u razvoju. Nedostatak adekvatnih sabirnih mesta, ograničeni logistički kapaciteti i nedovoljna koordinacija između aktera sistema otežavaju efikasno funkcionisanje sistema sakupljanja i tretmana e-otpada (Widmer i dr., 2005; Khetriwal i dr., 2009). Ovakvi nedostaci često rezultiraju smanjenom dostupnošću sistema za korisnike i povećanjem operativnih i transportnih troškova.

Savremeni pristupi upravljanju e-otpadom sve više naglašavaju potrebu za integrisanim sistemima koji kombinuju tehničke, organizacione i institucionalne aspekte, uz primenu principa cirkularne ekonomije i produžene odgovornosti proizvođača (Direktiva 2012/19/EU; Kaza i dr., 2018). U tom kontekstu, razvoj efikasnih logističkih rešenja i unapređenje infrastrukture predstavljaju osnovne preduslove za uspostavljanje održivog sistema upravljanja e-otpadom.

Ekološki aspekti su takođe od velikog značaja, imajući u vidu da nepravilno upravljanje e-otpadom može dovesti do emisije štetnih materija i ugroziti zdravlje ljudi i životnu sredinu. Ekološki i bezbednosni aspekti transporta električnog i elektronskog otpada predstavljaju značajan segment u okviru sistema sakupljanja. Transport e-otpada doprinosi emisijama zagađujućih materija, pre svega gasova sa efektom staklene bašte i drugih polutanata iz izduvnih gasova vozila, pri čemu obim emisija direktno zavisi od pređenih udaljenosti, frekvencije sakupljanja i efikasnosti logističkog sistema (EEA, 2019; Ekvall i dr., 2007). Pored emisija iz transporta, značajan rizik predstavlja potencijalno curenje rashladnih fluida (CFC/HCFC/HFC) iz oštećenih uređaja tokom transporta i manipulacije, što može dovesti do njihovog oslobađanja u atmosferu i negativnog uticaja na ozonski omotač i klimatske promene (Direktiva 2012/19/EU; WMO, 2022). Dodatno, nepravilno rukovanje tokom utovara i istovara otpada može predstavljati rizik po bezbednost građana i radnika, posebno usled prisustva oštrih komponenti, lomljivih materijala i potencijalno opasnih delova opreme. U tom smislu, organizacija sistema sakupljanja mora obuhvatiti adekvatne logističke procedure, obučeno osoblje i odgovarajuću opremu, kako bi se minimizirali rizici po životnu sredinu i zdravlje ljudi

(WHO, 2021). Stoga, optimizacija transportnih ruta, smanjenje udaljenosti sakupljanja i unapređenje uslova rukovanja e-otpadom predstavljaju ključne mere za smanjenje emisija i povećanje bezbednosti u okviru sistema upravljanja e-otpadom.

Uprkos brojnim istraživanjima u oblasti upravljanja e-otpadom, uočava se nedostatak studija koje integrisano razmatraju različite modele sakupljanja u uslovima zemalja u razvoju, uz istovremeno uključivanje ekonomskih, tehničkih, socijalnih i ekoloških kriterijuma u proces donošenja odluka. Zbog kompleksnosti problema i postojanja velikog broja međusobno konfliktnih kriterijuma, primena metoda višekriterijumskog odlučivanja predstavlja adekvatan pristup za evaluaciju alternativnih rešenja (Belton i Stewart, 2002; Triantaphyllou, 2000). Metode kao što su TOPSIS (Hwang i Yoon, 1981) i PROMETHEE II (Brans i Vincke, 1985; Brans i Mareschal, 2005) omogućavaju sistematsko vrednovanje alternativa i identifikaciju optimalnog rešenja u uslovima višekriterijumskog odlučivanja.

Polazeći od navedenih izazova i teorijskih okvira, doktorska disertacija ima za cilj da analizira socio-ekonomske, tehničke i ekološke determinante unapređenja sistema sakupljanja e-otpada, koristeći Novi Sad kao studiju slučaja. U radu se razmatraju različiti sistemi sakupljanja e-otpada, uz evaluaciju njihovih troškova, efikasnost, socijalni, infrastrukturni aspekti kao i uticaja na životnu sredinu, sa ciljem identifikacije optimalnog i održivog modela sakupljanja e-otpada u urbanim sredinama. Krajnji cilj istraživanja jeste kvantifikacija uticaja različitih kriterijuma na performanse sistema sakupljanja i identifikacija najpovoljnijeg modela primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja.

Razvoj ovakvih modela, doprinosi boljem razumevanju upravljanja otpadom pre svega u zemljama u razvoju i kreira bazu znanja o vezi između različitih parametara. Dobijene informacije mogu predstavljati veoma dobru osnovu za određivanje glavnih smernica i pomoć za donosiocima odluka iz oblasti upravljanja otpadom.

## 2. PREGLED AKTUELNOG STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

Radi uspostavljanja efikasnog sistema upravljanja i kontrole električnog i elektronskog otpada, Evropska unija (EU) je usvojila Direktivu o otpadnoj električnoj i elektronskoj opremi 2002/96/EC, kasnije unapređenu Direktivom 2012/19/EU (Direktiva 2002/96/EC; Direktiva 2012/19/EU). Osnovni cilj ove direktive jeste prevencija nastajanja e-otpada i smanjenje njegovog odlaganja na deponijama, kroz dodelu odgovornosti proizvođačima i drugim akterima uključenim u životni ciklus električne i elektronske opreme, posebno onima koji učestvuju u sakupljanju i tretmanu (Widmer i dr., 2005; Khetriwal i dr., 2009). Prebacivanje odgovornosti na proizvođače doprinosi unapređenju ekoloških standarda u fazi dizajna i proizvodnje, uz podsticanje razvoja proizvoda koji omogućavaju lakšu popravku, ponovnu upotrebu, demontažu i reciklažu (Direktiva 2012/19/EU; OECD, 2016). Na taj način se podstiče efikasnije korišćenje resursa i oporavak vrednih sekundarnih sirovina. Direktiva definiše kriterijume za sakupljanje, tretman i iskorišćenje e-otpada, kao i metodologije za praćenje uspešnosti sistema.

Evropska unija je, u okviru zelene i digitalne tranzicije, identifikovala kritične sirovine kao ključne za razvoj strateških tehnologija, uključujući obnovljive izvore energije, baterije i električna vozila (EC, 2023). Međutim, visoka zavisnost od ograničenog broja dobavljača predstavlja značajan rizik za stabilnost lanaca snabdevanja (EC, 2020). U cilju ublažavanja ovih rizika, Evropska unija je uspostavila regulatorni okvir koji obuhvata definisanje liste kritičnih i strateških sirovina, kao i postavljanje ciljeva za povećanje njihove eksploatacije, prerade i reciklaže (EU, 2024). U tom kontekstu, e-otpad dobija poseban značaj kao sekundarni izvor kritičnih sirovina, imajući u vidu visok sadržaj vrednih metala i potencijal za njihovo ponovno iskorišćenje u okviru cirkularne ekonomije (Forti i dr., 2020; EC, 2020). Razvoj naprednih tehnologija za reciklažu i ekstrakciju metala iz e-otpada omogućava povećanje efikasnosti oporavka i bolje iskorišćenje sekundarnih resursa (Meskers i Hagelüken, 2009). Dok, integracija ovih procesa u lanac snabdevanja doprinosi smanjenju geopolitičkih, ekonomskih i ekoloških rizika povezanih sa eksploatacijom primarnih sirovina. Paralelno sa tim, Evropska komisija sprovodi reviziju Direktive o otpadnoj električnoj i elektronskoj opremi sa ciljem procene njene efikasnosti, pojednostavljenja regulatornog okvira i identifikacije potreba za daljim unapređenjem (EC, 2025). Rezultati javnih konsultacija ukazuju na potrebu za unapređenjem regulative u oblasti ponovne upotrebe i produženja životnog veka proizvoda, što može doprineti smanjenju emisija CO<sub>2</sub> i efikasnijem korišćenju resursa. Poseban fokus

usmeren je na unapređenje upravljanja kritičnim sirovinama, koje su od ključnog značaja za zelenu tranziciju, ali su istovremeno izložene rizicima u lancima snabdevanja. Predložene izmene uključuju uvođenje strožih ciljeva iskorišćenja za opremu bogatu kritičnim sirovinama, unapređenje informisanja potrošača o pravilnom odlaganju, kao i jačanje sistema proširene odgovornosti proizvođača u cilju povećanja stopa sakupljanja i reciklaže. Ovi ciljevi su dodatno potvrđeni kroz novi regulatorni okvir Evropske unije za obezbeđenje sigurnog i održivog snabdevanja kritičnim sirovinama (EU, 2024), koji naglašava značaj reciklaže i efikasnog upravljanja otpadom kao ključnih izvora sekundarnih sirovina u okviru cirkularne ekonomije. Dodatno, Direktiva o ograničenju upotrebe opasnih supstanci (Direktiva 2011/65/EU) usmerena je na smanjenje negativnih uticaja e-otpada na zdravlje ljudi i životnu sredinu kroz ograničavanje upotrebe opasnih materija u električnoj i elektronskoj opremi. Ove mere doprinose povećanju mogućnosti reciklaže, jer smanjuju prisustvo štetnih komponenti u otpadnim tokovima.

Republika Srbija je uskladila svoje propise sa direktivama Evropske unije kroz primenu odgovarajućih zakona, pravilnika i uredbi. Zakon o upravljanju otpadom Republike Srbije („Službeni glasnik RS”, br. 109/2025), koji je zamenio prethodni zakon iz 2009., usklađen je sa savremenim zahtevima Evropske unije i uvodi unapređeni okvir za upravljanje posebnim tokovima otpada, uključujući električni i elektronski otpad.

## 2.1 Karakteristike električnog i elektronskog otpada

### 2.1.1 Definicija i podela električne i elektronske opreme i otpada

Postoji više načina definisanja električnog i elektronskog otpada, pri čemu su najznačajnije definicije propisane zakonodavnim okvirom Evropske unije i Republike Srbije. Prema Direktivi 2012/19/EU, električna i elektronska oprema obuhvata opremu čiji pravilan rad zavisi od električne struje ili elektromagnetnih polja, kao i opremu namenjenu za proizvodnju, prenos i merenje tih struja i polja, projektovanu za upotrebu pri naponu do 1000 V za naizmjeničnu i 1500 V za jednosmernu struju (Direktiva 2012/19/EU). Otpad od električne i elektronske opreme definiše se kao e-oprema koja predstavlja otpad u skladu sa propisima o upravljanju otpadom, uključujući sve sastavne delove, sklopove i potrošni materijal koji su deo proizvoda u trenutku odbacivanja (Direktiva 2012/19/EU; Zakon o upravljanju otpadom Republike Srbije, 2025).

U zakonodavnom okviru Republike Srbije, ove definicije su usklađene sa evropskim propisima, pri čemu se e-otpad prepoznaje kao poseban tok otpada koji zahteva specifičan način sakupljanja i tretmana (Zakon o upravljanju otpadom Republike Srbije, 2025). Program upravljanja otpadom za period od 2022-2031. godine (“Službeni glasnik RS”, br. 30/18) dodatno definiše e-otpad kao otpadnu električnu i elektronsku opremu koju vlasnik odbacuje, uključujući i komponente i sklopove koji nastaju u industrijskim procesima (Program upravljanja otpadom u Republici Srbiji, 2022). Katalog otpada Republike Srbije zasnovan je na Evropskoj listi otpada i u velikoj meri je usklađen sa njenom strukturom i klasifikacijom (EC, 2000; MZŽS, 2010a). Međutim, određene kategorije otpada, poput grupe 09 koja se odnosi na fotografski otpad, nisu značajno zastupljene u praksi, što ukazuje na određena odstupanja u primeni u odnosu na evropski sistem. Uprkos tome, ključne kategorije koje se odnose na električni i elektronski otpad (grupe 16 02 i 20 01) u potpunosti su usklađene.

U cilju unapređenja harmonizacije podataka i praćenja tokova e-otpada, razvijen je UNU-KEY sistem klasifikacije od strane Univerziteta Ujedinjenih nacija, koji obuhvata više od 900 proizvoda grupisanih u 54 homogenih kategorija, na osnovu njihovih karakteristika, sastava i ponašanja na kraju životnog veka (Baldé i dr, 2015; Forti i dr., 2020). Ove kategorije dalje su objedinjene u šest osnovnih grupa definisanih Direktivom 2012/19/EC. Ovakva klasifikacija omogućava standardizovano izveštavanje i unapređuje uporedivost podataka između država. Nasuprot tome, nacionalna regulativa Republike Srbije i dalje koristi klasifikaciju zasnovanu na deset kategorija električne i elektronske opreme (MZŽS 2010b), što predstavlja stariji pristup u odnosu na aktuelni evropski model sa šest kategorija (Tabela 2.1). Ova razlika ukazuje na potrebu za daljim usklađivanjem sistema klasifikacije i izveštavanja sa savremenim evropskim standardima.

Tabela 2.1 Uporedni prikaz klasifikacije e-opreme prema EU Direktivi 2012/19/EU i regulativi Republike Srbije

<b>EU (6 kategorija)</b>	<b>Republika Srbija (10 kategorija)</b>
1. Oprema za razmenu temperature	1. Veliki kućni aparati
2. Ekрани i monitori	2. Mali kućni aparati
3. Lampe	3. IT i telekomunikaciona oprema
4. Velika oprema	4. Potrošačka oprema
5. Mala oprema	5. Oprema za osvetljenje
6. Mala IT i telekomunikaciona oprema	6. Električni i elektronski alati
	7. Igračke, oprema za razonodu i sport
	8. Medicinski uređaji
	9. Instrumenti za praćenje i kontrolu
	10. Automati

Struktura e-otpada prikazana u Tabeli 2.2 ukazuje na neravnomernu zastupljenost pojedinih kategorija, pri čemu dominiraju kategorije sa većim masenim udelom. Prema izveštaju Global E-waste Monitor 2020 (Forti i dr., 2020), najveći udeo ima kategorija velike opreme, dok lampe imaju najmanju zastupljenost. Međutim, najnoviji podaci iz izveštaja Global E-waste Monitor 2024 (Baldé i dr., 2024) ukazuju na promenu ovog odnosa, pri čemu kategorija male opreme postaje dominantna, što ima značajne implikacije na organizaciju sistema sakupljanja i logistike.

Tabela 2.2. Struktura e-otpada prema kategorijama (Forti i dr., 2020 uz potvrdu trenda Baldé i dr., 2024)

Kategorija (EU – 6)	Učešće (%) – 2020	Trend potvrđen – 2024
<b>Velika oprema</b>	~50%	↓ smanjenje učešća
<b>Mala oprema</b>	~20%	↑ postaje dominantna
<b>Oprema za razmenu temperature</b>	~17%	stabilno
<b>Ekрани i monitori</b>	~12%	blagi pad
<b>Mala IT i telekom oprema</b>	~7%	blagi rast
<b>Lampe</b>	~2%	zanemarljivo

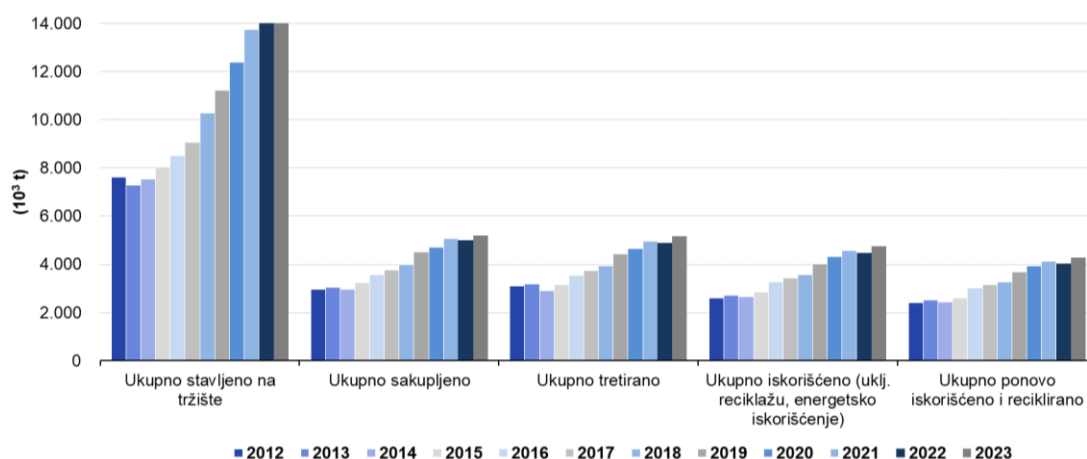
### 2.1.2 Količine električne i elektronske opreme i otpada u EU i Srbiji

Električni i elektronski otpad postaje sve značajniji izazov usled sinergijskog dejstva tehnološkog razvoja, socio-ekonomskih promena i tržišnih mehanizama, uključujući i implementaciju principa proširene odgovornosti proizvođača, koji zajedno oblikuju savremene obrasce potrošnje i generisanja otpada. Uvođenje „pametnih“ funkcija i atraktivniji dizajni učinili su električnu i elektronsku opremu privlačnijom za potrošače, ali u isto vreme ovo je dovelo do skraćivanja veka trajanja proizvoda, što za posledicu ima stvaranje većih količina e-otpada.

Prema izveštaju (Baldé i dr., 2024), u 2022. godini globalno je generisano oko 62 miliona tona e-otpada, odnosno prosečno 7,8 kg po stanovniku. Od ove količine, svega 22,3% je evidentirano kao adekvatno sakupljeno i reciklirano u okviru formalnih sistema upravljanja otpadom. U poređenju sa 2010. godinom, kada je generisano 34 miliona tona e-otpada, može se zaključiti da količina e-otpada raste prosečno za oko 2,3 miliona tona godišnje. Istovremeno, količina formalno sakupljenog i recikliranog otpada raste znatno sporijim tempom, približno

0,5 miliona tona godišnje, zbog čega je rast generisanja e-otpada gotovo pet puta brži od rasta formalnih stopa reciklaže (Baldé i dr., 2024).

Između 2015. i 2023. godine, količina električne i elektronske opreme plasirane na tržište Evropske unije značajno se povećala, porastavši za 78%, sa 18,1 kg po stanovniku u 2015. godini na 32,2 kg po stanovniku u 2023. godini. Holandija je zabeležila najviši plasman e-opreme po stanovniku (45,4 kg), dok je Kipar imao najnižu vrednost (14,8 kg po stanovniku). U istom periodu, količina sakupljenog e-otpada porasla je za 60%, sa 7,3 kg na 11,6 kg po stanovniku. Ipak, među državama članicama EU postoje značajne razlike u performansama sistema upravljanja e-otpadom, pri čemu su pojedine zemlje dostigle ciljeve sakupljanja definisane Direktivom 2012/19/EU (65% prosečne količine e-opreme plasirane na tržište u prethodne tri godine), dok druge zemlje i dalje zaostaju. Ove razlike ukazuju na značaj institucionalnog okvira, organizacije sistema sakupljanja i stepena implementacije principa proširene odgovornosti proizvođača (Eurostat, 2025). U značajnom broju slučajeva, e-otpad se i dalje odlaže na deponije ili spaljuje, što je u suprotnosti sa principima hijerarhije upravljanja otpadom. Dodatni problem predstavlja prekogranično kretanje e-otpada, najčešće iz razvijenih ka zemljama u razvoju, što povećava rizike po životnu sredinu i zdravlje ljudi (Baldé i dr., 2024; WHO, 2023). Sledeći Grafik 2.1 prikazuje trendove u količinama električne i elektronske opreme stavljene na tržište, kao i količine e-otpada koje su sakupljene, tretirane, iskorišćene, reciklirane i pripremljene za ponovnu upotrebu u Evropskoj uniji u periodu od 2012. do 2023. godine u hiljadama tona.



*Grafik 2.1 E-oprema stavljena na tržište i otpadna e-oprema sakupljena, tretirana, iskorišćena, reciklirana i pripremljena za ponovnu upotrebu, EU (2012-2023) (Eurostat, 2025)*

Količina e-opreme stavljene na tržište u Evropskoj uniji pokazuje izražen rast u posmatranom periodu, povećavši se sa približno 7,6 miliona tona u 2012. godini na oko 14,4 miliona tona u 2022. i 2023. godini, što predstavlja ukupno povećanje od približno 89%. Ovaj trend ukazuje na kontinuirani rast potrošnje e-opreme i intenziviranje tehnološkog razvoja. Paralelno sa tim, količina sakupljene otpadne e-opreme porasla je sa oko 3,0 na 5,2 miliona tona (+75%), dok je količina tretiranog otpada povećana sa 3,1 na 5,2 miliona tona (+66%). Takođe, količina iskorišćenog e-otpada (uključujući reciklažu i energetska iskorišćenje) porasla je sa 2,6 na 4,8 miliona tona (+83%), dok je količina recikliranog i ponovo upotrebljenog otpada povećana sa 2,4 na 4,3 miliona tona (+77%) (Eurostat, 2025).

Iako svi posmatrani tokovi beleže značajan rast, uočava se da dinamika povećanja količine e-opreme stavljene na tržište prevazilazi rast količine sakupljenog i tretiranog e-otpada. Kao posledica toga, razlika između generisanih i količina e-otpada sa kojima se upravlja na adekvatan način se povećava tokom vremena, što ukazuje na postojanje strukturnog jaza u efikasnosti sistema upravljanja e-otpadom u Evropskoj uniji. Ovaj jaz može biti posledica nedovoljne dostupnosti infrastrukture za sakupljanje, neujednačene implementacije EPR-a, kao i nedovoljnog učešća korisnika u sistemima sakupljanja e-otpada (Eurostat, 2025).

### 2.1.3 Sastav električne i elektronske opreme i otpada

Složenost strukture otpada od električnih i elektronskih proizvoda predstavlja veliki izazov za proces održivog upravljanja ovim posebnim tokom otpada. Sa jedne strane, e-otpad se klasifikuje kao opasan tok otpada zbog prisustva toksičnih materija kao što su olovo, kadmijum, živa i bromirani usporivači gorenja, koji mogu imati značajne negativne efekte na životnu sredinu i zdravlje ljudi (WHO, 2023) i čije neadekvatno upravljanje, posebno u neformalnom sektoru, dovodi do emisije štetnih materija u vazduh, vodu i zemljište, kao i do dugoročnih ekoloških i zdravstvenih posledica. U tom kontekstu, savremena istraživanja ukazuju i na dodatne rizike povezane sa prisustvom mikroplastike i metala u e-otpadu, čija međusobna interakcija može povećati njihovu mobilnost i toksičnost u životnoj sredini (Dawan i dr., 2025). Autori naglašavaju da se metali adsorbuju na površini mikroplastike, pri čemu ona deluje kao vektor zagađujućih materija, čime se povećava njihova biodostupnost i intenziviraju rizici od bioakumulacije i negativnih uticaja na ekosisteme i zdravlje ljudi.

Sa druge strane, e-otpad predstavlja izuzetno vredan sekundarni resurs. Procene pokazuju da je u 2022. godini globalno generisani e-otpad sadržao oko 31 milijardu kg metala,

od čega je približno 19 milijardi kg uspešno iskorišćeno, dok je značajan deo resursa izgubljen usled neefikasnog upravljanja (Baldé i dr., 2024). Električna i elektronska oprema može sadržati do 69 elemenata iz periodnog sistema, uključujući plemenite metale (npr. zlato, srebro, bakar, platina, paladijum, rutenijum, rodijum, iridijum i osmijum), kritične sirovine (npr. kobalt, paladijum, germanijum, bizmut, antimon i druge) i bazne sirovine, poput aluminijuma i gvožđa (Forti i dr., 2020; Baldé i dr., 2024). U okviru paradigme cirkularne ekonomije, e-otpada treba smatrati važnim izvorom sekundarnih sirovina. Zbog problema koji se odnose na primarno rudarstvo, promenu tržišnih cena, nedostatak materijala, dostupnost i pristup resursima, postalo je neophodno poboljšati eksploataciju sekundarnih resursa kao što je e-otpad i smanjiti pritisak na rudno bogatstvo.

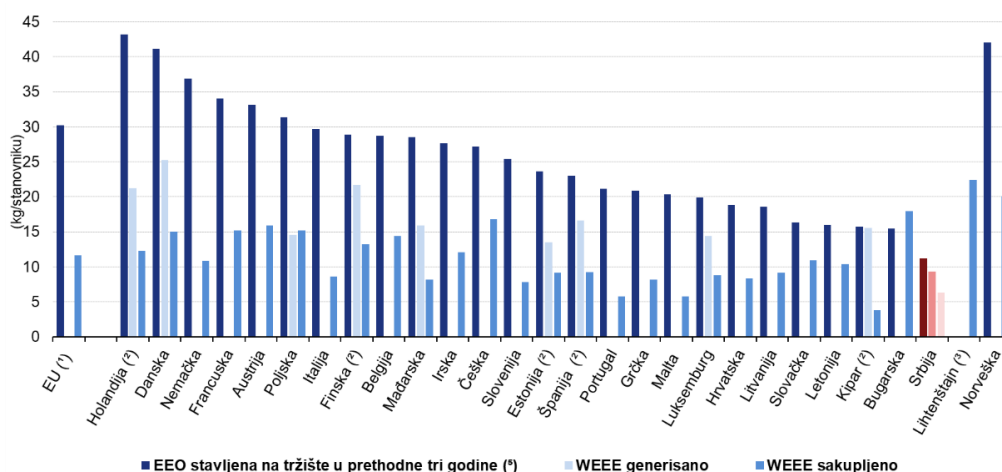
Savremena istraživanja dodatno naglašavaju značajan potencijal e-otpada kao izvora vrednih sekundarnih sirovina u okviru cirkularne ekonomije. Gomez i dr. (2026) analiziraju različite tehnologije predtretmana štampanih ploča i ukazuju da one sadrže znatno veće koncentracije metala u poređenju sa prirodnim rudama, pri čemu se pojedini metali mogu nalaziti i do nekoliko redova veličine iznad koncentracija u primarnim izvorima. Analize štampanih ploča mobilnih telefona pokazuju značajnu varijabilnost u sadržaju zlata, koji se kreće u rasponu od 142 do 700 g po toni materijala (Kasper i Veit, 2018). Na nivou kompletnih uređaja, procenjuje se da jedna tona mobilnih telefona može sadržati približno 53 kg bakra, 141 g zlata, 270 g srebra, 10 g platine, 18 g paladijuma i oko 3,3 kg retkih zemnih elemenata (Gomez i dr., 2023). Istovremeno, savremene tehnologije oporavka, poput kombinacije mikrotalasne pirolize i hidrometalurških procesa, omogućavaju izdvajanje približno 168 g zlata po toni štampanih ploča (Huang i dr., 2022).

Pored visokog sadržaja vrednih metala, značaj e-otpada kao sekundarnog izvora sirovina ogleda se i u njegovim ekološkim prednostima. Proizvodnja plemenitih metala iz primarnih ruda povezana je sa visokim emisijama CO<sub>2</sub>, dok reciklaža e-otpada omogućava značajno smanjenje emisija, koje u pojedinim slučajevima može dostići i preko 80% (EC, 2020; Meskers i Hagelüken, 2009).

Međutim, uprkos značajnom potencijalu, stope sakupljanja i reciklaže e-otpada i dalje su nedovoljne, posebno za male uređaje bogate kritičnim sirovinama (Baldé i dr., 2024). Gubici resursa dodatno su izraženi zbog neefikasnih sistema sakupljanja, nedostatka infrastrukture i prisustva neformalnog sektora. Zbog toga unapređenje sistema sakupljanja, predtretmana i reciklaže predstavlja ključni element zaštite životne sredine, očuvanja resursa i razvoja cirkularne ekonomije.

## 2.2 Sakupljanje električnog i elektronskog otpada

Na nivou Evropske unije, procenjena količina sakupljenog e-otpada iznosila je 11,6 kg po stanovniku, dok je prosečna količina e-opreme stavljena na tržište u periodu 2020–2022 iznosila 30,2 kg po stanovniku (Eurostat, 2025). U Republici Srbiji, prema dostupnim podacima, količina e-opreme plasirane na tržište iznosila je približno 11,5 kg po stanovniku, dok je količina generisanog e-otpada procenjena na 9,3 kg po stanovniku (Iattoni i dr., 2023). Tokom poslednje decenije ostvaren je značajan napredak u razvoju kapaciteta za tretman i reciklažu e-otpada, pri čemu je količina recikliranog otpada povećana sa 7.084 tone u 2011. godini na 35.373 tone u 2023. godini (Đorđević i dr., 2024). Međutim, uprkos ovom rastu, količina sakupljenog e-otpada i dalje ostaje relativno niska. Procenjena količina sakupljenog e-otpada je oko 6,3 kg po stanovniku godišnje, što odgovara približno 44% količine e-opreme stavljene na tržište u prethodne tri godine (Iattoni i dr., 2023). Uočene razlike između zemalja ukazuju na značajne varijacije kako u nivou potrošnje e-opreme, tako i u efikasnosti sistema sakupljanja e-otpada, koje su uslovljene institucionalnim okvirom, organizacijom sistema i stepenom implementacije EPR-a. Grafik 2.2 prikazuje količinu sakupljenog e-otpada u 2023. godini u poređenju sa količinom e-opreme stavljene na tržište u prethodne tri godine (2020–2022), kao i sa količinom generisanog e-otpada u 2023. godini. Sve vrednosti izražene su u kilogramima po stanovniku.



Napomena: Zemlje su rangirane na osnovu podataka o električnoj i elektronskoj opremi (EEO) stavljenoj na tržište u prethodne tri godine.

(\*) Procena Eurostata.

(\*) Podaci o proizvedenom OEEO se daju na dobrovoljnoj osnovi.

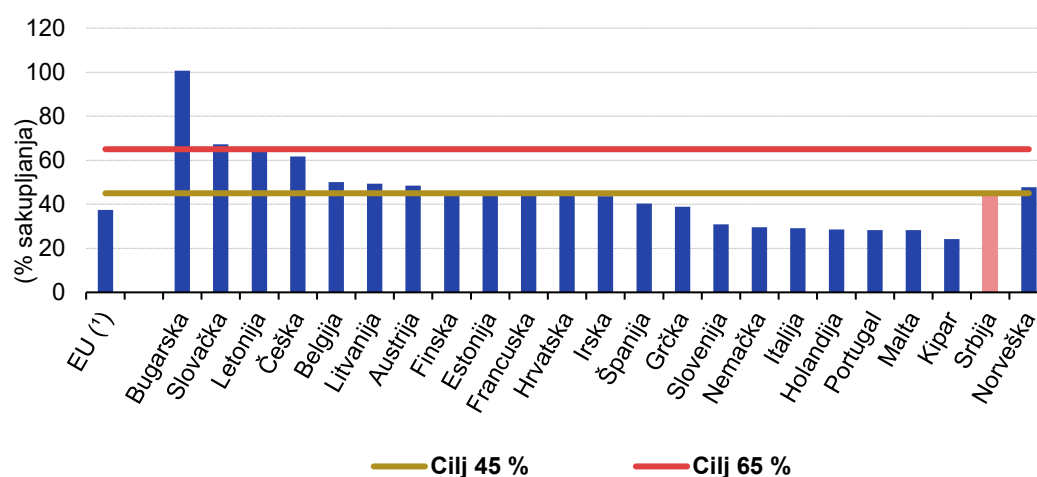
(\*) „Pušteno na tržište“ se ne primenjuje.

Grafik 2.2 E-oprema stavljena na tržište u prethodne tri godine, generisan i sakupljen e-otpad, 2023 (Eurostat, 2025)

Direktiva o otpadnoj električnoj i elektronskoj opremi (Direktiva 2012/19/EU) uvodi postepeno povećanje ciljeva sakupljanja, pri čemu je od 2016. godine definisan cilj od 45% u odnosu na prosečnu količinu e-opreme stavljene na tržište u prethodne tri godine, dok je od 2019. godine ovaj cilj povećan na 65% (Direktiva 2012/19/EU). Pojednim državama članicama omogućeno je odlaganje dostizanja ovog cilja do 2021. godine.

Za razliku od Evropske unije, u Republici Srbiji cilj u oblasti upravljanja e-otpadom definisan je Programom upravljanja otpadom za period 2022–2031. godine i predviđa dostizanje minimalne stope sakupljanja od 45% do 2031. godine. Ovaj cilj je niži u odnosu na važeći cilj EU, što ukazuje na postojanje značajnog prostora za unapređenje sistema sakupljanja e-otpada u Srbiji, posebno u pogledu razvoja infrastrukture, organizacije sistema i institucionalne podrške (Program upravljanja otpadom u Republici Srbiji za period 2022–2031, 2022).

Na Grafiku 2.3 prikazana je stopa sakupljanja e-otpada u odnosu na količinu e-opreme stavljene na tržište. Prema zvaničnim podacima u 2023. godini, devet država članica EU premašilo je cilj sakupljanja od 45%, dok su tri države (Bugarska, Slovačka i Letonija) dostigle ambiciozniji cilj od 65%. Češka je ostvarila stopu od 61,7%, što je blizu ovog cilja (Eurostat, 2025). Na osnovu prikazanih rezultata, može se uočiti pozicija Republike Srbije u odnosu na države članice EU, pri čemu ostvarena stopa sakupljanja ukazuje na potrebu za daljim unapređenjem sistema, kako bi se dostigli ciljevi definisani evropskom regulativom.



(\*) Procena Eurostata.

Grafik 2.3 Stopa sakupljanja otpadne električne i elektronske opreme, 2023 (Eurostat, 2025)

Visoke stope sakupljanja e-otpada, koje u pojedinim slučajevima dostižu ili premašuju 100%, ne odražavaju nužno stvarnu efikasnost sistema, već su često posledica primene različitih metodologija obračuna, naročito onih zasnovanih na proceni generisanog otpada. U takvim slučajevima, odstupanja mogu nastati usled nesigurnosti u proceni količine otpada, kao i uključivanja dodatnih tokova u zvaničnu statistiku.

Stopa sakupljanja e-otpada može se izražavati u odnosu na procenjenu količinu generisanog otpada, što predstavlja alternativni pristup definisan Direktivom 2012/19/EU. U okviru ove metodologije, cilj je da se prikupi najmanje 85% ukupno generisanog e-otpada u određenom vremenskom periodu. Generisana količina e-otpada ne meri se direktno, već se procenjuje na osnovu modela koji uzimaju u obzir količinu električne i elektronske opreme stavljene na tržište u prethodnim godinama, kao i pretpostavljeni životni vek proizvoda. Na taj način se određuje potencijalna količina otpada koja ulazi u tok upravljanja.

Stopa sakupljanja se zatim izračunava kao odnos između količine formalno sakupljenog e-otpada i procenjene količine generisanog otpada, pri čemu vrednost od 85% predstavlja cilj koji države članice treba da dostignu. Ovakav pristup omogućava realističniju procenu efikasnosti sistema sakupljanja, jer uzima u obzir stvarne tokove otpada, ali je istovremeno podložan određenim nesigurnostima usled zavisnosti od modela procene generisanog otpada.

U tom kontekstu, cilj od 65%, koji se odnosi na količinu električne i elektronske opreme stavljene na tržište, nije primenljiv za pojedine države (npr. Dansku, Luksemburg, Mađarsku i Poljsku) koje koriste alternativnu metodologiju zasnovanu na generisanom e-otpadu. Takođe, dostupnost podataka nije ujednačena za sve države i posmatrane godine (Eurostat, 2025).

### 2.2.1 Organizacija sistema proširene odgovornosti proizvođača

Jedan od ključnih nedostataka postojećeg zakonodavnog okvira u oblasti upravljanja električnim i elektronskim otpadom ogleda se u nedovoljno precizno definisanoj odgovornosti proizvođača u skladu sa zahtevima Direktive 2012/19/EU o otpadnoj električnoj i elektronskoj opremi. Iako direktiva postavlja osnovne principe upravljanja, ona državama članicama ostavlja određeni stepen fleksibilnosti u pogledu organizacije sistema, posebno u vezi sa raspodelom fizičke i finansijske odgovornosti (Direktiva 2012/19/EU).

U pogledu fizičke odgovornosti, direktiva ne definiše jasno ko je nadležan za uspostavljanje infrastrukture za sakupljanje e-otpada, dok se distributerima nameće obaveza preuzimanja otpada od potrošača prilikom kupovine novih proizvoda, uz mogućnost

odstupanja ukoliko se obezbede alternativna rešenja. Sa druge strane, finansijska odgovornost proizvođača odnosi se prvenstveno na faze od mesta sakupljanja nadalje, čime se ostavlja prostor za različita nacionalna rešenja u organizaciji prikupljanja otpada iz domaćinstava (Sander i dr., 2007) .

Ovakav regulatorni okvir rezultirao je razvojem različitih modela sistema proširene odgovornosti proizvođača u Evropskoj uniji. U praksi, proizvođači mogu ispuniti svoje obaveze putem individualnih sistema ili kroz kolektivne šeme, pri čemu su kolektivni sistemi dominantni (Khetriwal i dr., 2011; Bilitewski i dr., 2018).

Kooperativni pristup karakteriše centralizovana organizacija sistema, u kojoj jedna ili ograničen broj organizacija upravlja celokupnim logističkim i operativnim procesima. Ovaj model primenjuje se, između ostalog, u Švedskoj, gde organizacija El-Kretsen koordinira aktivnosti sakupljanja i tretmana otpada (Sander i dr., 2007). Nasuprot tome, kompetitivni pristup podrazumeva postojanje više organizacija koje se međusobno takmiče na tržištu, kao što je slučaj u Nemačkoj, gde veći broj operatera učestvuje u organizaciji sistema (Hobohm, 2017). Iako oba modela funkcionišu u okviru principa kolektivne odgovornosti proizvođača, između njih postoje značajne razlike u pogledu efikasnosti i troškova. Kooperativni sistemi omogućavaju optimizaciju logističkih tokova i smanjenje troškova kroz izbegavanje dupliranja aktivnosti, dok kompetitivni sistemi mogu podstaći inovacije i unapređenje efikasnosti, ali uz povećanje složenosti sistema i logističkog opterećenja (Hobohm, 2017; Friege i dr., 2015).

Važan element organizacije sistema u državama članicama EU predstavlja postojanje centralnih koordinacionih tela, kao što su EAR (*de. Elektro-Altgeräte Register*) u Nemačkoj, Centro di Coordinamento RAEE (*It. Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche*) u Italiji i El-Kretsen u Švedskoj, koja omogućavaju efikasniju implementaciju EPR principa i praćenje tokova otpada (Hobohm, 2017). Za razliku od ovih sistema, u Srbiji ne postoji centralizovano regulatorno telo koje bi vršilo koordinaciju i nadzor nad sistemom upravljanja e-otpadom, što predstavlja značajno ograničenje za njegov dalji razvoj (Diedler i dr., 2018).

U cilju identifikacije optimalnog modela za primenu u Srbiji, sprovedena je komparativna analiza sistema upravljanja e-otpadom karakterističnih za Švedsku i Nemačku, kao predstavnika kooperativnog i kompetitivnog pristupa. Ova analiza predstavljena je u radu Marinković i dr. (2025), koji je sastavni deo istraživanja u okviru doktorske disertacije. Evaluacija analiziranih sistema izvršena je primenom višekriterijumske metode odlučivanja TOPSIS (*eng. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), pri čemu je razmatrano jedanaest kriterijuma relevantnih za funkcionisanje sistema proširene odgovornosti proizvođača. Rezultati analize ukazuju na značajne razlike u performansama različitih modela,

posebno u pogledu organizacije sistema, logističke efikasnosti i institucionalnog okvira, što dodatno potvrđuje potrebu za optimizacijom sistema sakupljanja u zemljama u razvoju. Na osnovu dobijenih rezultata, definisan je predlog okvira za implementaciju EPR sistema u oblasti upravljanja e-otpadom u Srbiji, uz identifikaciju ključnih izazova i preporuka za njihovo prevazilaženje.

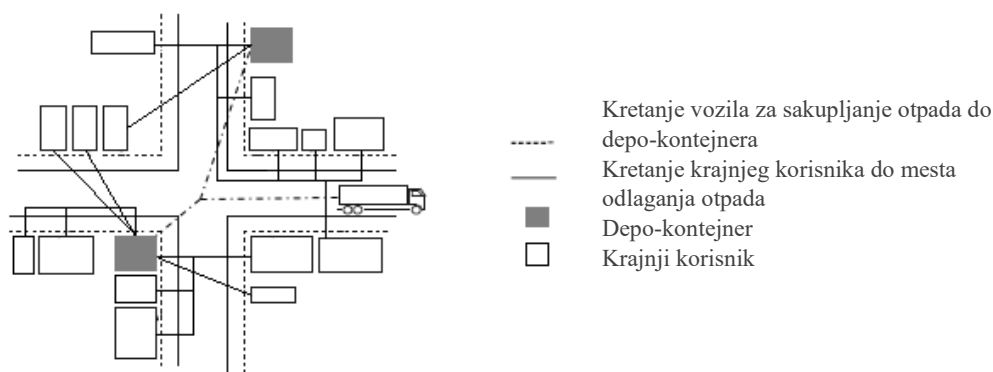
Istraživanje primene principa proširene odgovornosti proizvođača u upravljanju e-otpadom ima značajan teorijski i praktični značaj, jer omogućava sagledavanje uticaja regulatornih mehanizama na smanjenje negativnih efekata po životnu sredinu i efikasnije korišćenje resursa (Forti i dr., 2020). Rezultati ovakvih analiza mogu poslužiti kao osnova za unapređenje postojećih sistema i donošenje informisanih odluka u procesu razvoja održivih modela upravljanja e-otpadom.

## 2.3 Podela sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada

Analiza postojećih sistema u razvijenim zemljama ukazuje na postojanje različitih modela organizacije sakupljanja e-otpada, koji se razlikuju u pogledu logističkih rešenja, infrastrukture i uključenosti korisnika. Na osnovu pregleda literature i prakse identifikovana su tri osnovna sistema primenljiva u uslovima Srbije: stacionarni sistem, mobilni sistem, i sistem reciklažnih dvorišta.

### 2.3.1 Stacionarni sistem

Karakteristika stacionarnog sakupljanja je odlaganje otpada u centralne kontejnere, koji su postavljeni blizu lokalnih generatora otpada za razliku od mobilnih sistema koje karakteriše decentralizovano sakupljanje na mestu nastanka otpada, npr. u domaćinstvima. Stacionarni sistem predstavlja kombinaciju sistema reciklažnih dvorišta gde građani samostalno donose svoj otpad i mobilnog sistema u kom je određena kompanija zadužena za preuzimanje sakupljenog otpada sa sabirnih mesta, kao što je prikazano na Slici 2.1.



Slika 2.1 Šematski prikaz sistema depo kontejnera  
(Hobohm, 2017)

Za implementaciju ovakvog sistema neophodno je obezbediti adekvatne lokacije za pozicioniranje kontejnera, koje se nalaze u blizini mesta stanovanja i ispunjavaju određene infrastrukturne uslove, poput betonske podloge, nadstrešnice ili specijalizovanih depo-kontejnera (Nowakowski i Mrówczyńska, 2013). Stacionarni sistem je prvenstveno namenjen sakupljanju manjih uređaja, kao što su lampe, IT i telekomunikaciona oprema, kao i mali kućni aparati dimenzija do 50 cm (Sander i dr., 2007; Direktiva 2012/19/EU). Logistika je organizovana tako da vozila za sakupljanje obilaze centralne lokacije i prazne kontejnere. Ovakav pristup je najefikasniji u gusto naseljenim područjima, dok u urbanim zonama sa ograničenim prostorom i u udaljenim područjima može biti logistički i finansijski zahtevniji.

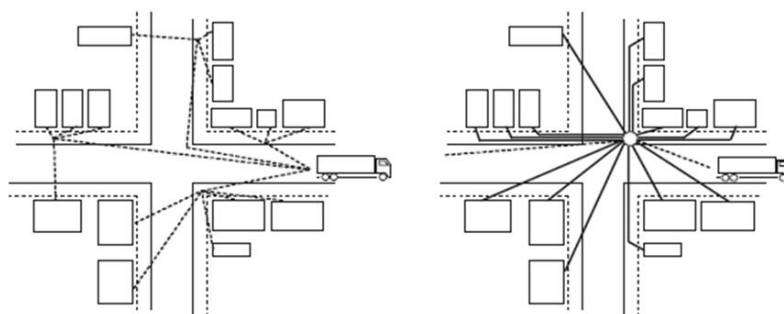
Lokacije sabirnih mesta treba pažljivo birati kako bi bile lako dostupne i uklopljene u svakodnevne aktivnosti građana, poput odlaska u kupovinu ili na posao. Najpogodnije su lokacije sa velikom frekvencijom ljudi, kao što su tržni centri, parking prostori, supermarketi, prodavnice bele tehnike, škole i javne institucije. Istovremeno, neophodno je obezbediti kontrolu pristupa, sprečiti nelegalno preuzimanje otpada i održavati lokacije urednim (Nowakowski i Mrówczyńska, 2013). U ovom sistemu troškovi se dele između korisnika i operatera. Dok operater snosi troškove nabavke i održavanja kontejnera, centralizovane lokacije omogućavaju smanjenje logističkih troškova. Međutim, veća udaljenost sabirnih mesta od korisnika smanjuje komfor i zahteva viši nivo motivacije za odlaganje otpada, što može negativno uticati na količinu prikupljenog e-otpada. Povećanje udaljenosti direktno dovodi do smanjenja pokrivenosti sistema i efikasnosti sakupljanja (Bilitewski i dr, 2018). Negativni efekti udaljenosti sabirnih mesta mogu se ublažiti pažljivim i strateškim izborom lokacija za postavljanje kontejnera. Posebno efikasno rešenje predstavljaju tzv. „reciklažna ostrva“, gde su depo-kontejneri za e-otpad postavljeni zajedno sa kontejnerima za druge vrste

otpada, poput stakla, plastike i papira. Na ovaj način se povećava dostupnost sistema, podstiče učešće građana i unapređuje ukupna efikasnost sakupljanja.

### 2.3.2 Mobilni sistem

Mobilni sistem sakupljanja podrazumeva prikupljanje otpada putem vozila koja se kreću duž unapred definisanih ruta, kao i organizovanje specijalnih akcija sakupljanja ili integraciju sa sistemom sakupljanja kabastog otpada. Što podrazumeva preuzimanje otpada iz domaćinstava i komercijalnih izvora, uključujući glomazni otpad (npr. nameštaj, građevinski i otpad od rušenja), ali i tokove otpada koji zahtevaju poseban način rukovanja, kao što su biootpad ili opasni otpad.

Sakupljanje se obavlja direktno na mestu nastanka otpada, odnosno u neposrednoj blizini korisnika, pri čemu uslugu pružaju specijalizovane kompanije ili javna komunalna preduzeća. Mobilni sistem zahteva visok nivo organizacije i pažljivo planiranje ruta kako bi se izbegle neefikasnosti i dodatni troškovi. Njegova realizacija podrazumeva angažovanje obučenog osoblja i korišćenje specijalizovanih vozila, naročito u slučaju e-otpada koji zahteva bezbedno rukovanje tokom transporta (npr. fluorescentne lampe, mali ekrani i uređaji sa opasnim komponentama). U cilju povećanja efikasnosti, korisnici mogu odložiti otpad ispred ili u neposrednoj blizini stambenih objekata, što predstavlja tzv. "kerbside" sakupljanje (Slika 2.2). Ovakav pristup skraćuje vreme zadržavanja vozila na pojedinačnim lokacijama. Sistem je povoljan iz perspektive građana jer smanjuje njihove troškove i povećava komfor, posebno kada je reč o uređajima većih dimenzija i korisnicima bez sopstvenog vozila. Međutim, ukoliko otpad ostane bez nadzora na javnim površinama, postoji rizik od neovlašćenog preuzimanja od strane neformalnog sektora, što može negativno uticati na ukupnu efikasnost sistema.



Slika 2.2 Šematski prikaz preuzimanja otpada od vrata do vrata (slika levo) i donošenja na sabirno mesto (slika desno)  
(Bilitewski i Härdtle, 2013)

### 2.3.3 Sistem reciklažnih dvorišta

U sistemu reciklažnih dvorišta ne postoji kompanija za sakupljanje otpada, već članovi domaćinstava samostalno transportuju otpad do sabirnih mesta. S obzirom na to da su korisnici odgovorni za obezbeđivanje prevoza, otpad se najčešće akumulira tokom dužeg vremenskog perioda, nakon čega se, kada se prikupi dovoljna količina, odlaže u reciklažno dvorište (Nowakowski i Mrówczyńska, 2013). Ovakav pristup podrazumeva aktivno učešće građana i viši nivo njihove motivacije za pravilno upravljanje otpadom.

Jedna od ključnih prednosti ovog sistema jeste mogućnost odlaganja različitih posebnih tokova otpada na jednom mestu. Pored e-otpada, građanima je omogućeno da predaju baterije, otpadna ulja, boje i lakove, gume, farmaceutski otpad i druge vrste opasnog iz domaćinstva. Time se pojednostavljuje logistika za korisnike i smanjuju ukupni troškovi, jer se različite vrste otpada mogu odložiti tokom jedne posete reciklažnom dvorištu.

Dodatna prednost ovog sistema ogleda se u višem kvalitetu prikupljenog otpada. S obzirom na to da se prijem otpada vrši pod nadzorom, omogućena je kontrola vrste i stanja otpada već na ulazu u reciklažno dvorište, čime se smanjuje kontaminacija i povećava mogućnost izdvajanja vrednih materijala (Nowakowski i Mrówczyńska, 2013). Takođe, prisustvo obučenog osoblja omogućava pravilno rukovanje opasnim komponentama, čime se dodatno unapređuje bezbednost i efikasnost sistema (Sander i dr., 2007).

Međutim, osnovni nedostatak ovog sistema odnosi se na smanjenu dostupnost i niži nivo komfora za korisnike, jer zahteva dodatno vreme, organizaciju i troškove transporta. Udaljenost reciklažnog dvorišta od mesta stanovanja direktno utiče na spremnost građana da učestvuju u sistemu, što može dovesti do nižih stopa sakupljanja. Zbog toga je za uspešnu primenu ovog modela od ključnog značaja adekvatno planiranje lokacija, kao i sprovođenje edukativnih i promotivnih aktivnosti usmerenih ka povećanju svesti građana.

## 2.4 Opis trenutnog sistema upravljanja e-otpadom u Republici Srbiji

Upravljanje električnim i elektronskim otpadom u Republici Srbiji karakteriše nedovoljna razvijenost, ograničena dostupnost pouzdanih podataka i nedovoljna organizovanost sistema sakupljanja. Prema javnim podacima, ne postoje precizne procene ukupno generisanih količina e-otpada, dok su podaci o sakupljenim i tretiranim količinama nepotpuni i metodološki neujednačeni. Dodatni problem predstavlja činjenica da se podaci za

pojedine kategorije električne i elektronske opreme iskazuju u tonama, dok se za druge izražavaju u broju komada, što otežava analizu i poređenje, kao i pouzdano utvrđivanje stopa reciklaže.

Sakupljanje komercijalnog električnog i elektronskog otpada u najvećoj meri obavljaju ovlašćeni operateri za upravljanje otpadom, koji organizuju direktno preuzimanje otpada od pravnih lica. U skladu sa principom proširene odgovornosti proizvođača, proizvođači i uvoznici električne i elektronske opreme imaju obavezu da obezbede adekvatno sakupljanje i tretman otpada, najčešće putem ugovora sa specijalizovanim sakupljačima (Sander i dr., 2007; Corsini i dr., 2017). Pored toga, određeni tokovi otpada mogu se prikupljati i putem distributera kroz sistem povrata prilikom kupovine nove opreme, sistem "1-1", dok su krajnji korisnici iz komercijalnog sektora obavezni da otpad predaju ovlašćenim operaterima.

Iako se sakupljanje e-otpada u Republici Srbiji odvija pretežno kroz aktivnosti ovlašćenih operatera i privatnih kompanija, sistem organizovanog sakupljanja iz domaćinstava od strane lokalnih komunalnih preduzeća nije dovoljno razvijen. Iako značajan broj kompanija poseduje dozvolu za sakupljanje e-otpada, prikupljanje iz domaćinstava ostaje na niskom nivou. Najveći deo e-otpada prikuplja se kroz povremene akcije koje organizuju reciklažne kompanije, uključujući sisteme preuzimanja otpada po pozivu ili na unapred određenim lokacijama (Đorđević i dr., 2024; Diedler i dr., 2018; Marinković i dr., 2025).

Infrastruktura za tretman e-otpada u Srbiji postoji, ali je ograničenih kapaciteta i dominantno obuhvata osnovne procese, kao što su ručna demontaža, tretman rashladnih uređaja, izdvajanje kablova i uklanjanje opasnih komponenti. Kapaciteti za napredniju obradu materijala su ograničeni, zbog čega se određene frakcije, posebno one sa većim sadržajem vrednih materijala ili opasnih komponenti, izvoze na dalji tretman. Opasne komponente, poput CRT uređaja i fluorescentnih materija, najčešće se skladište i izvoze, dok se deo otpada odlaže ili koristi za energetska iskorišćenje (Đorđević, 2024). Najveći udeo u strukturi tretiranog otpada čine veliki kućni aparati, sa učešćem većim od 50% ukupnih količina (Đorđević, 2024).

Prema zaključcima Programa upravljanja otpadom Republike Srbije za period 2022–2031. godine, ograničen broj kompanija aktivno učestvuje u reciklaži e-otpada, dok veći broj poseduje dozvole za tretman opasnog i neopasnog otpada. U praksi, samo deo ovih kapaciteta je u potpunosti iskorišćen, dok se aktivnosti ponovne upotrebe i iskorišćenja sekundarnih sirovina sprovode u ograničenom obimu (Program upravljanja otpadom u Republici Srbiji, 2022). Jedan od ključnih izazova predstavlja nedovoljna razvijenost sistema primarne separacije i nedostatak dostupne infrastrukture za sakupljanje, naročito u ruralnim područjima. Dodatno, prisustvo neformalnog sektora utiče na gubitak vrednih materijala, smanjuje

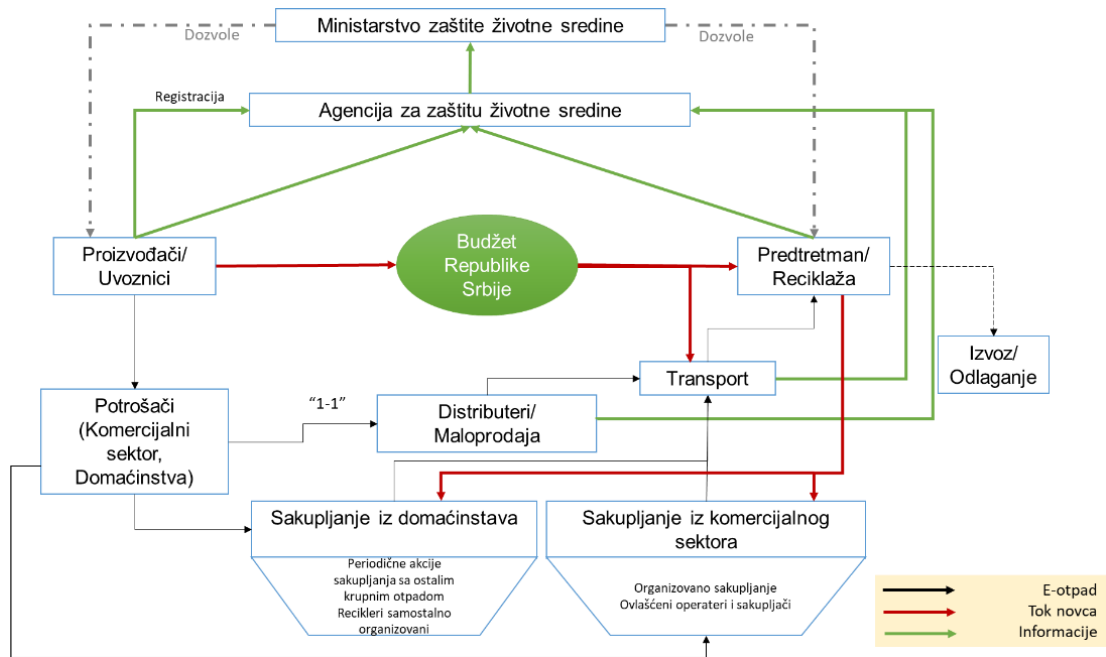
efikasnost reciklaže i otežava ostvarivanje ciljeva cirkularne ekonomije (Widmer i dr., 2005; Forti i dr., 2020). Istovremeno, formalno sakupljene količine i dalje su relativno niske u odnosu na procenjene količine opreme stavljene na tržište, što ukazuje na značajan prostor za unapređenje sistema.

Republika Srbija se nalazi u procesu usklađivanja zakonodavstva u oblasti upravljanja e-otpadom sa pravnim tekovinama Evropske unije. Direktiva 2012/19/EU je delimično prenetu u nacionalno zakonodavstvo kroz relevantne zakone i podzakonske akte, ali određeni elementi sistema još uvek nisu u potpunosti usklađeni sa evropskom praksom. Na primer, evidencija o e-otpadu i dalje se vodi prema klasifikaciji od 10 kategorija, dok prelazak na savremeni EU-6 sistem još uvek nije u potpunosti implementiran (Iattoni i dr., 2023; Direktiva 2012/19/EU).

U skladu sa zakonskim obavezama, proizvođači, uvoznici i operateri dužni su da evidentiraju i dostavljaju podatke o količinama električne i elektronske opreme stavljene na tržište i generisanog otpada nadležnim institucijama (Diedler i dr., 2018; Direktiva 2012/19/EU). Finansijski aspekt sistema zasniva se na naplati ekoloških taksi od strane proizvođača i uvoznika, što predstavlja osnovni mehanizam finansiranja upravljanja e-otpadom. Međutim, model raspodele sredstava putem nekadašnjeg Zelenog fonda već duži niz godina nije u funkciji, a odsustvo podsticaja dodatno je narušilo stabilnost sistema. Novi model finansiranja je još uvek u fazi uspostavljanja, što predstavlja dodatni izazov za efikasno funkcionisanje sistema upravljanja e-otpadom u Srbiji (Program upravljanja otpadom u Republici Srbiji, 2022; Marinković i dr., 2025). Analiza usklađenosti pokazuje da je nivo transpozicije Direktive o otpadnoj električnoj i elektronskoj opremi i dalje ograničen, pri čemu mnoge ključne odredbe nisu u potpunosti implementirane (Oberdörfer i dr., 2017). Ne postoje jasno definisana pravila za ispunjavanje obaveza proizvođača, niti funkcionalan sistem kolektivne odgovornosti. Takođe, ne postoji poseban registar proizvođača, niti su u potpunosti definisane finansijske garancije i obaveze izveštavanja u skladu sa zahtevima EU (Marinković i dr., 2025; Direktiva 2012/19/EU). Podaci o uvozu pribavljaju se od Uprave carina, ali se roba evidentira prema carinskim tarifnim oznakama koje mogu obuhvatiti više različitih proizvoda, što otežava precizno praćenje tokova opreme po kategorijama.

Uprkos formalnom uvođenju principa „zagađivač plaća“ i „produžene odgovornosti proizvođača“, zakonodavni okvir u Republici Srbiji još uvek ne obezbeđuje potpunu implementaciju kolektivnih i individualnih sistema zasnovanih na principima EPR-a u skladu sa zahtevima Direktive 2012/19/EU. Iako je pravno uveden koncept kolektivnog operatera, koji bi trebalo da osnuju proizvođači i uvoznici sa značajnim tržišnim udelom, ovakav sistem u praksi još uvek nije u potpunosti uspostavljen (Marinković i dr., 2025; Oberdörfer i dr., 2017).

U nastavku je predstavljen integrisani prikaz tokova e-otpada, finansijskih tokova i informacija u sistemu upravljanja e-opremom i e-otpadom u Republici Srbiji.



Grafik 2.4 Organizaciona šema i tokovi u nacionalnom sistemu za e-opremom i e-otpadom

Na osnovu dostupnih podataka, može se zaključiti da je sistem upravljanja e-otpadom u Srbiji još uvek u fazi razvoja i da zahteva značajna unapređenja u pogledu organizacije sakupljanja, unapređenja infrastrukture, poboljšanja kvaliteta podataka i smanjenja uticaja neformalnog sektora. Unapređenje ovih aspekata predstavlja ključni preduslov za povećanje stope reciklaže, efikasnije korišćenje sekundarnih sirovina i usklađivanje sa evropskim standardima upravljanja otpadom.

#### 2.4.1 Opis trenutnog sistema upravljanja e-otpadom u Novom Sadu

Novi Sad predstavlja reprezentativan primer urbanog sistema srednje veličine u Republici Srbiji, u kojem su jasno izraženi ključni izazovi u upravljanju električnim i elektronskim otpadom. Postojeći sistem u velikoj meri se oslanja na tržišne mehanizme i aktivnosti privatnih operatera, uz ograničenu infrastrukturu i nedovoljnu institucionalnu koordinaciju, što utiče na njegovu efikasnost i obuhvat. Ove karakteristike čine Novi Sad pogodnim za analizu i modelovanje unapređenja sistema upravljanja e-otpadom. Dodatno, dostupnost relevantnih podataka, postojanje lokalnih planskih dokumenata i potencijal za implementaciju unapređenih rešenja dodatno opravdavaju izbor ovog grada kao studije slučaja.

Sistem upravljanja e-otpadom u Novom Sadu karakteriše nedovoljno razvijen i delimično decentralizovan model, u kojem dominiraju privatni operateri. Prikupljanje e-otpada najčešće se realizuje putem ovlašćenih kompanija i otkupljivača, koji organizuju preuzimanje otpada direktno od korisnika ili na sopstvenim sabirnim mestima. Iako ovakav pristup omogućava određeni nivo dostupnosti usluge, on je u velikoj meri uslovljen ekonomskom isplativošću, odnosno količinom i vrstom otpada, što ograničava njegov teritorijalni obuhvat i ukupnu efikasnost sistema. U praksi, građani i pravna lica mogu predati e-otpad različitim operaterima koji se bave njegovim sakupljanjem, transportom i tretmanom. Sakupljeni otpad se potom transportuje u postrojenja za tretman, gde se vrši demontaža i razdvajanje na materijalne frakcije, poput metala i plastike, pri čemu se deo materijala dalje reciklira, dok se ostatak prosleđuje drugim operaterima ili odlaže. Dodatno, u sistemu je prisutan i neformalni sektor, kao i individualni sakupljači, što doprinosi smanjenoj transparentnosti i otežava praćenje tokova otpada.

Jedan od ključnih problema predstavlja nedovoljno razvijena infrastruktura za sakupljanje, uključujući ograničen broj sabirnih mesta i odsustvo organizovanog sistema prikupljanja na nivou grada. Trenutno na teritoriji grada postoji jedno reciklažno dvorište na lokaciji deponije, dok je izgradnja dodatnih kapaciteta planirana, uključujući reciklažno dvorište u Futogu, a jedno je planirano u Petrovaradinu. Međutim, dodatni sistemi, kao što su mreže kontejnera za male električne uređaje, nisu razvijeni niti planirani, što dodatno ograničava dostupnost sistema građanima. U skladu sa Lokalnim planom upravljanja otpadom grada Novi Sad (Lokalni plan upravljanja otpadom, 2023), unapređenje sistema sakupljanja opasnog otpada iz domaćinstava (baterije, akumulatori, lekovi, ambalaža od boja i lakova i dr.) predviđeno je kroz organizovanje periodičnih akcija i uvođenje mobilnih stanica za sakupljanje. Planirani mobilni sistem bi podrazumevao korišćenje specijalizovanih vozila koja se kreću po unapred definisanim rutama i zaustavljaju na određenim lokacijama, gde građani mogu predati opasan otpad. Nakon prikupljanja, otpad bi se transportovao do regionalnih skladišta, a zatim upućivao na tretman u centralizovana postrojenja ili, u slučaju nedostatka odgovarajućih kapaciteta, izvezio u skladu sa važećim propisima.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da je sistem upravljanja e-otpadom u Novom Sadu i dalje u fazi razvoja, sa izraženom zavisnošću od privatnih inicijativa i bez jasno definisane centralizovane organizacije. Ključni pravci unapređenja obuhvataju razvoj infrastrukture za sakupljanje, jačanje institucionalnog okvira, kao i povećanje svesti građana o značaju pravilnog odlaganja e-otpada, čime bi se doprinelo većoj efikasnosti sistema i ostvarivanju ciljeva cirkularne ekonomije.

### 3. MOTIV I CILJ ISTRAŽIVANJA

Upravljanje električnim i elektronskim otpadom predstavlja jedan od ključnih izazova savremenih sistema upravljanja otpadom, posebno u zemljama u razvoju kao što je Republika Srbija. Postojeći sistem karakterišu fragmentisanost, nedovoljna koordinacija i relativno niske stope sakupljanja, što dovodi do gubitka vrednih resursa, uključujući kritične sirovine.

Istovremeno, različiti modeli organizacije sistema sakupljanja (mobilni, stacionarni i reciklažna dvorišta) imaju različite prednosti i ograničenja u pogledu ekonomskih, tehničkih, socijalnih i ekoloških aspekata. Donošenje odluke o optimalnom sistemu dodatno je otežano postojanjem više konfliktnih kriterijuma i različitih interesa aktera. Zbog toga se javlja potreba za primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja koje omogućavaju objektivnu i sistematsku evaluaciju alternativa.

Cilj ovog istraživanja je da se, primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja Analitički hijerarhijski proces (*eng. Analytic Hierarchy Process – AHP*), Tehnika za rangiranje alternativa na osnovu njihove bliskosti idealnom rešenju (*eng. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS*) i Metod organizacije rangiranja zasnovan na preferencijama za evaluaciju (*eng. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation – PROMETHEE*), izvrši evaluacija i rangiranje alternativnih sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada u uslovima Republike Srbije, odnosno još specifičnije na nivou grada Novog Sada.

#### **Specifični ciljevi istraživanja obuhvataju:**

- definisanje relevantnih kriterijuma i podkriterijuma koji obuhvataju finansijske, tehničke, socijalne, infrastrukturne i ekološke aspekte sistema,
- određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma primenom AHP metode,
- rangiranje alternativa (mobilni sistem, stacionarni sistem i reciklažna dvorišta) primenom TOPSIS i PROMETHEE II metoda,
- analiza stabilnosti i konzistentnosti rezultata kroz poređenje različitih scenarija,
- identifikaciju najpogodnijeg sistema sakupljanja u kontekstu postojećih uslova u Republici Srbiji.

### 3.1 Hipoteze i struktura disertacije

Na osnovu teorijskih postavki i prethodnih istraživanja, formulisane su sledeće hipoteze:

#### **Opšta hipoteza**

**H0:** Primena integrisanog modela višekriterijumskog odlučivanja predstavlja adekvatan pristup za evaluaciju i izbor optimalnog sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada u uslovima Republike Srbije.

#### **Pomoćne hipoteze**

**H1:** Primena AHP metode omogućava određivanje relativnog značaja definisanih kriterijuma i podkriterijuma relevantnih za evaluaciju sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada, uz identifikaciju ključnih faktora koji utiču na proces donošenja odluka.

**H2:** Primena TOPSIS i PROMETHEE II metoda omogućava konzistentno i pouzdano rangiranje alternativnih sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada na osnovu definisanih kriterijuma.

**H3:** Na osnovu višekriterijumske evaluacije definisanih kriterijuma moguće je identifikovati optimalni scenario sakupljanja električnog i elektronskog otpada za uslove u Republici Srbiji, na primeru grada Novog Sada.

#### **Struktura istraživanja**

Istraživanje je realizovano kroz nekoliko međusobno povezanih faza:

##### **Identifikacija i definisanje problema**

Procena količine električnog i elektronskog otpada u Republici Srbiji zasnovana je na analizi statističkih podataka i izveštaja nadležnih institucija. Na osnovu pregleda literature i primera dobre prakse iz razvijenih zemalja, kao i konsultacija sa ekspertima iz oblasti upravljanja otpadom, identifikovani su ključni problemi koji utiču na efikasnost sistema. Dodatno, podaci o navikama korisnika i njihovoj spremnosti da učestvuju u savremenim sistemima sakupljanja prikupljeni su anketiranjem domaćinstava.

##### **Definisanje modela**

Model odlučivanja formiran je kroz hijerarhijsku strukturu koja obuhvata tri nivoa:

1. alternative (tri alternative)
2. kriterijume (pet kriterijuma) i

### 3. podkriterijume (četnaest podkriterijuma).

Studija slučaja sprovedena je za teritoriju grada Novog Sada, uzimajući u obzir relevantne socio-ekonomske, demografske i infrastrukturne karakteristike.

#### **Utvrđivanje alternativnih rešenja**

Na osnovu analize postojećih sistema u razvijenim zemljama i uslova u Republici Srbiji definisana su tri alternativna modela sakupljanja e-otpada. Ovi modeli su koncipirani tako da omogućće ispunjenje zakonskih ciljeva sakupljanja, uz uvažavanje zahteva zaštite životne sredine i potreba korisnika.

#### **Definisanje kriterijuma i podkriterijuma**

Za potrebe evaluacije definisano je 5 kriterijuma i 14 podkriterijuma koji obuhvataju ključne aspekte sistema:

- finansijski aspekt,
- efikasnost sistema,
- socijalni aspekt,
- infrastrukturni aspekt i
- uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi.

#### **Određivanje težinskih koeficijenata**

Težinski koeficijenti podkriterijuma određeni su na osnovu ekspertskih ocena, prikupljenih putem strukturisanog AHP upitnika. Na ovaj način kvantifikovan je relativni značaj pojedinih faktora u procesu donošenja odluka.

#### **Izbor i primena metoda**

U cilju obezbeđenja pouzdanosti rezultata primenjene su dve metode višekriterijumskog odlučivanja:

- TOPSIS metoda, koja se zasniva na udaljenosti od idealnog i anti-idealnog rešenja,
- PROMETHEE II metoda, koja koristi funkcije preferencije i neto tokove preferencije.

Kombinovana primena ovih metoda omoguććava upoređivanje rezultata i povećava robusnost donete odluke.

#### **Primena modela i izbor optimalne alternative**

Model je primenjen na uslove grada Novog Sada, pri čemu je izvršena evaluacija i rangiranje alternativa.

## 4. METODOLOŠKI OKVIR ISTRAŽIVANJA

Realne situacije koje se javljaju prilikom definisanja optimalnog sistema sakupljanja otpada karakteriše veliki broj, često međusobno konfliktnih kriterijuma, čija istovremena optimizacija nije moguća. U takvim uslovima, primena sistema za podršku odlučivanju zasnovanih na višekriterijumskoj analizi (VKA) omogućava donosiocima odluka da, kroz integraciju različitih kriterijuma, preferencija i suprotstavljenih interesa, identifikuju najpovoljnije kompromisno rešenje (Roy, 1996; Belton i Stewart, 2002). Ovi sistemi predstavljaju značajan alat u procesu odlučivanja, jer omogućavaju efikasnu obradu složenih matematičkih modela, analizu rezultata i njihovu vizuelizaciju, čime se u velikoj meri olakšava donošenje složenih, često strateških odluka (Saaty, 1980; Triantaphyllou, 2000).

Primena metoda višekriterijumskog odlučivanja podrazumeva izbor jedne od više mogućih alternativa u odnosu na unapred definisane ciljeve. U tom procesu neophodno je definisati skup kriterijuma, kao i njihove relativne težine, koje odražavaju značaj svakog kriterijuma u procesu odlučivanja. Težinski koeficijenti omogućavaju kvantifikaciju doprinosa pojedinih kriterijuma ukupnoj oceni alternativa. Određivanje kriterijuma i njihovih težina predstavlja jedan od najosetljivijih koraka u procesu višekriterijumskog odlučivanja i najčešće se zasniva na ekspertskom znanju, iskustvu i preferencijama donosioca odluka (Saaty, 1980; Keeney i Raiffa, 1993).

Problemi višekriterijumskog odlučivanja mogu se klasifikovati u dve osnovne grupe. Prva grupa obuhvata probleme sa konačnim skupom alternativa (diskretni problemi), gde je cilj izbor najbolje alternative iz unapred definisanog skupa. Druga grupa odnosi se na probleme sa kontinuiranim skupom rešenja, gde se optimalno rešenje traži unutar neprekidnog prostora mogućnosti (Figueira i dr., 2005). U ovom istraživanju primenjuju se metode diskretne višekriterijumske analize, s obzirom na to da se razmatra ograničen broj alternativa.

Metode višekriterijumskog odlučivanja mogu se podeliti na kompenzacione i nekompenzacione (Figueira i dr., 2005; Triantaphyllou, 2000). U kompenzacionim metodama, smanjenje performansi po jednom kriterijumu može biti nadoknađeno boljim performansama po drugim kriterijumima, što ih čini pogodnim za rešavanje problema u uslovima konflikta između kriterijuma (Hwang i Yoon, 1981). U ovu grupu spadaju metode kao što su TOPSIS, AHP i VIKOR (*Višekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Rešenje*) (Saaty, 1980; Opricović i Tzeng, 2004). Nasuprot njima, metode zasnovane na principu nadržavanja, poput PROMETHEE i ELECTRE (*eng. Elimination and Choice Expressing Reality*), pripadaju

nekompenzacionim pristupima, jer ograničavaju mogućnost potpune kompenzacije između kriterijuma (Brans i Vincke, 1985; Roy, 1991).

Prednosti primene višekriterijumskih metoda ogleda se u njihovoj sposobnosti da efikasno rešavaju probleme koji uključuju veliki broj međusobno povezanih atributa (kriterijuma), često organizovanih u hijerarhijsku strukturu. Pojedini kriterijumi mogu se dalje razlagati na podkriterijume, čime se formiraju složene hijerarhije odlučivanja. Istovremeno, kriterijumi su često u međusobnom konfliktu, što dodatno komplikuje proces donošenja odluka. Na primer, smanjenje broja sabirnih mesta za sakupljanje e-otpada može negativno uticati na komfor građana, ali istovremeno doprinosi efikasnijem planiranju transportnih ruta u urbanim sredinama (Belton i Stewart, 2002; Figueira i dr., 2005). Jedna od ključnih karakteristika ovih metoda jeste mogućnost integracije kvantitativnih i kvalitativnih kriterijuma u jedinstven model odlučivanja. Tako se, na primer, troškovi transporta izražavaju numerički, dok se dostupnost ili pristupačnost sistema može oceniti kvalitativno, primenom odgovarajuće ordinalne skale. Ovakav pristup omogućava sveobuhvatnu evaluaciju alternativa u realnim uslovima (Saaty, 1980; Keeney i Raiffa, 1993).

Međutim, kombinovanje različitih kriterijuma podrazumeva i integraciju različitih mernih sistema, što može dovesti do problema neuporedivosti podataka. Ovaj izazov je posebno izražen kada se istovremeno koriste kvantitativni i kvalitativni pokazatelji, na primer kada se potrošnja goriva izražava u jedinicama (l/h), dok se performanse sistema ocenjuju opisno (npr. „zadovoljavajuće“). Zbog toga je neophodna odgovarajuća transformacija i normalizacija podataka kako bi se obezbedila njihova međusobna uporedivost u okviru modela višekriterijumskog odlučivanja (Triantaphyllou, 2000; Hwang i Yoon, 1981).

Karakteristike TOPSIS i PROMETHEE II metode prikazane u Tabeli 4.1 zasnovane su na njihovim metodološkim osnovama definisanim u literaturi (Hwang i Yoon, 1981; Brans i Vincke, 1985; Brans i Mareschal, 2005; Behzadian i dr., 2010).

Detaljno poređenje kompenzacionih i „outranking“ metoda potvrđuje da TOPSIS omogućava potpunu kompenzaciju između kriterijuma, dok PROMETHEE II naglašava dominaciju alternativa kroz preferencijalne tokove (Velasquez i Hester, 2013; Zavadskas i Turskis, 2011).

Tabela 4.1 Karakteristike TOPSIS I PROMETHEE II metoda  
(Velasquez i Hester, 2013; Zavadskas i Turskis, 2011)

Karakteristika	TOPSIS	PROMETHEE II
<b>Tip metode</b>	Kompenzaciona metoda	Outranking metoda
<b>Osnovni princip</b>	Alternativa treba da bude najbliža idealnom i najdalja od anti-idealnog rešenja	Rangiranje se zasniva na stepenu preferencije između alternativa
<b>Matematička osnova</b>	Udaljenost od idealnog i anti-idealnog rešenja	Preferencijalni tokovi
<b>Vrsta poređenja</b>	Indirektno poređenje preko idealnog rešenja	Direktno poređenje alternativa
<b>Tip rezultata</b>	Koeficijent relativne blizine idealnom rešenju	Neto tok preferencije
<b>Opseg rezultata</b>	0 – 1	Pozitivne i negativne vrednosti
<b>Interpretacija rezultata</b>	Veća vrednost znači bolju alternativu	Veći neto tok znači bolju alternativu
<b>Uloga težinskih koeficijenata</b>	Težine utiču na udaljenost od idealnog rešenja	Težine utiču na preferencijalne tokove
<b>Osetljivost na normalizaciju</b>	Visoka	Manja
<b>Funkcije preferencije</b>	Ne koristi	Koristi 6 tipova funkcija preferencije
<b>Prag indiferencije i preferencije</b>	Ne postoji	Postoji
<b>Analiza konflikta kriterijuma</b>	Ograničena	Vrlo dobra
<b>Kompleksnost primene</b>	Relativno jednostavna	Složenija
<b>Softverska podrška</b>	Excel, MATLAB, Python	Visual PROMETHEE, Decision Lab
<b>Pogodnost za veliki broj alternativa</b>	Vrlo pogodna	Pogodna
<b>Transparentnost rezultata</b>	Visoka	Visoka uz dodatnu interpretaciju
<b>Tip rangiranja</b>	Potpuno rangiranje	Potpuno rangiranje
<b>Mogućnost vizuelne analize</b>	Ograničena	GAIA analiza
<b>Primena u ekološkim analizama</b>	Česta	Veoma česta
<b>Stabilnost rezultata</b>	Osetljiva na ekstremne vrednosti	Stabilnija zbog preferencijalnih funkcija

#### 4.1 Primena višekriterijumske analize u oblasti upravljanja e-otpadom

Primena metoda višekriterijumske analize u oblasti upravljanja električnim i elektronskim otpadom široko je zastupljena u savremenim istraživanjima, s obzirom na kompleksnost odlučivanja koje podrazumeva istovremeno razmatranje ekonomskih, ekoloških

i tehničkih kriterijuma. U tom kontekstu razvijeni su brojni modeli i pristupi koji omogućavaju sistematsku evaluaciju alternativa i unapređenje procesa donošenja odluka.

Jedan od značajnih pravaca istraživanja odnosi se na primenu matematičkog programiranja i optimizacionih modela. Achillas i dr. (2012) razvili su model višekriterijumske optimizacije zasnovan na višeciljnom linearnom programiranju, dok Aidonis i dr. (2019) predlažu model za izbor optimalnog scenarija upravljanja e-otpadom uz simultano razmatranje finansijskih, tehničkih, socijalnih i ekoloških kriterijuma. Savremeniji pristupi uključuju i modele zatvorenih lanaca snabdevanja, pri čemu Diaz i Amin (2025) razvijaju višeciljni model koji integriše principe održivosti i omogućava analizu kompromisa između ekonomskih, ekoloških i društvenih ciljeva.

Analitički hijerarhijski proces predstavlja jednu od najčešće primenjivanih metoda u ovoj oblasti. Lin i dr. (2010) demonstriraju njegovu primenu u procesu kreiranja politika upravljanja e-otpadom, dok Kim i dr. (2013) unapređuju ovaj pristup integracijom sa Delphi metodom u cilju smanjenja subjektivnosti u odlučivanju. Dodatno, istraživanja koja kombinuju analizu životnog ciklusa (LCA) i višekriterijumsko odlučivanje ukazuju na značaj sistemskog pristupa u upravljanju e-otpadom. Kim i dr. (2004) integrišu AHP i LCA metode radi sveobuhvatnije procene potencijala reciklaže na osnovu ekoloških i ekonomskih pokazatelja. Wang i dr. (2025) razvijaju integrisani model za procenu ekoloških, ekonomskih i društvenih aspekata upravljanja štampanim pločama, pri čemu rezultati pokazuju da scenariji koji uključuju oporavak metala imaju značajno bolje performanse u pogledu emisija i održivosti u odnosu na spaljivanje ili odlaganje.

Outranking metode, poput PROMETHEE i ELECTRE, imaju značajnu primenu u analizi sistema upravljanja e-otpadom. PROMETHEE metoda (Brans i Vincke, 1985) omogućava rangiranje alternativa na osnovu funkcija preferencije i često se koristi u situacijama konflikta između kriterijuma, što je potvrđeno u primeni na scenarije upravljanja e-otpadom (Rousis i dr., 2008; Queiruga i dr., 2008). Pored toga, metode zasnovane na idealnom rešenju, kao što je TOPSIS, predstavljaju važan alat za rangiranje alternativa, pri čemu Baral i dr. (2025) predlažu unapređeni TOPSIS okvir zasnovan na intervalnim podacima i entropijskim težinama, čime se povećava pouzdanost donošenja odluka u uslovima neizvesnosti.

Pored metoda za rangiranje alternativa, značajnu ulogu imaju i metode za analizu međuzavisnosti faktora. Rahman i Subramanian (2012), kao i Kumar i Dixit (2018), koriste DEMATEL metod za identifikaciju ključnih barijera u upravljanju e-otpadom, pri čemu su regulatorni, infrastrukturni i socio-ekonomski faktori identifikovani kao dominantni.

U savremenim istraživanjima sve češće se primenjuju fuzzy varijante ovih metoda, pa Kumar i Dixit (2019) razvijaju hibridni model zasnovan na fuzzy AHP i VIKOR metodama za izbor partnera u reciklaži e-otpada, dok Karuppiah i Sankaranarayanan (2023) predlažu integrisani pristup koji kombinuje AHP, DEMATEL i TOPSIS metode u fuzzy okruženju, čime se omogućava određivanje težina kriterijuma, analiza međusobnih odnosa i rangiranje alternativa. Takođe, Yildirim i dr. (2025) razvijaju model za izbor lokacija postrojenja za reciklažu otpada.

Najnoviji trendovi u literaturi ukazuju na integraciju višekriterijumskih metoda sa naprednim tehnologijama, naročito u oblasti veštačke inteligencije. Jano i dr. (2026) ističu značaj primene AI pristupa u optimizaciji sistema upravljanja e-otpadom, kroz unapređenje procesa detekcije, sortiranja i upravljanja tokovima materijala, uz identifikaciju ključnih izazova kao što su nedostatak podataka, regulatorne barijere i ograničena interoperabilnost sistema.

S druge strane, Habib i Hwang (2025) dodatno unapređuju postojeće pristupe primenom naprednog fuzzy programiranja, koje omogućava efikasnije modelovanje i upravljanje neizvesnošću u procesima odlučivanja, posebno u uslovima nedovoljno preciznih ili lingvistički izraženih podataka.

Na osnovu pregleda literature može se zaključiti da višekriterijumske metode predstavljaju efikasan alat za rešavanje kompleksnih problema upravljanja e-otpadom, koji uključuju međusobno konfliktne ekonomske, ekološke i društvene ciljeve. Njihova primena omogućava sistematsko, transparentno i pouzdano donošenje odluka, kao i integraciju ekspertskog znanja u uslovima neizvesnosti, čime se značajno doprinosi razvoju održivih sistema upravljanja električnim i elektronskim otpadom.

## 4.2 Metodološki okvir AHP metode

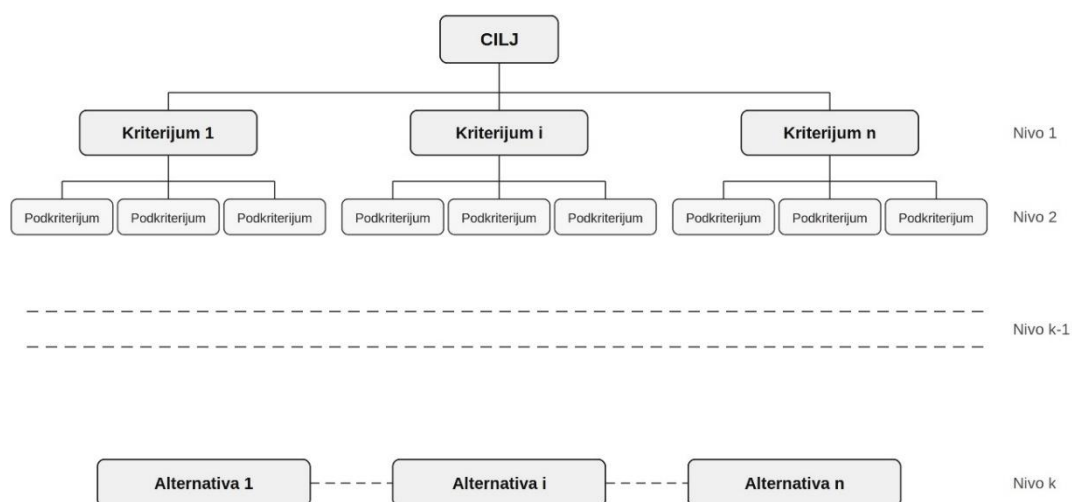
Analitički hijerarhijski proces, koji je razvio Thomas L. Saaty početkom sedamdesetih godina, predstavlja jedan od najznačajnijih i najšire primenjivanih pristupa u oblasti višekriterijumskog odlučivanja. Ova metoda omogućava rešavanje složenih problema kroz njihovo strukturiranje u hijerarhijski organizovan sistem (Grafik 4.1), čime se olakšava analiza i donošenje odluka u uslovima postojanja više, često konfliktnih kriterijuma (Saaty, 1980; Saaty, 1986).

Osnovna ideja AHP metode zasniva se na dekompoziciji problema odlučivanja na više nivoa hijerarhije, koji obuhvataju cilj, kriterijume, podkriterijume i alternative. Na ovaj način omogućava se sistematično sagledavanje problema i poređenje elemenata unutar svakog nivoa. Relativni značaj kriterijuma i podkriterijuma određuje se postupkom parnog poređenja, pri čemu donosilac odluke procenjuje njihov doprinos ostvarenju cilja koristeći definisanu skalu preferencija (Saaty, 1980; Saaty, 1984).

Metoda integriše subjektivne procene eksperata i objektivne karakteristike problema, čime omogućava sveobuhvatnu evaluaciju alternativa. Rezultat ovog procesa je određivanje prioriteta, odnosno težinskih koeficijenata, koji kvantifikuju značaj pojedinačnih kriterijuma u procesu odlučivanja. Posebna prednost AHP metode ogleda se u mogućnosti provere konzistentnosti donetih procena, čime se povećava pouzdanost rezultata i smanjuje uticaj subjektivnih grešaka (Saaty, 1980; Saaty i Kearns, 1985).

AHP se zasniva na tri osnovna principa: strukturiranje problema u hijerarhiju, određivanje prioriteta putem parnih poređenja i provera konzistentnosti procena. Ova metodologija je posebno pogodna za rešavanje složenih višekriterijumskih problema u kojima je potrebno kombinovati različite tipove podataka i ekspertska znanja (Keeney i Raiffa, 1993; Triantaphyllou, 2000).

Zbog svoje fleksibilnosti i robusnosti, AHP metoda se često koristi kao deo hibridnih modela, u kombinaciji sa drugim metodama višekriterijumskog odlučivanja, kao što su TOPSIS i PROMETHEE, gde se najčešće primenjuje za određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma (Mardani i dr., 2015).



Grafik 4.1 Opšti hijerarhijski model u AHP

Relativni prioritet, odnosno značaj svakog elementa u hijerarhiji, određuje se postupkom parnog poređenja elemenata na istom nivou u odnosu na elemente višeg nivoa sa kojima su funkcionalno povezani. Donosilac odluke pri tome koristi Saaty-jevu skalu relativne važnosti, koja obuhvata vrednosti od 1 do 9 (Tabela 4.2), kako bi kvantifikovao intenzitet preferencije između posmatranih elemenata. Na osnovu ovih procena formira se matrica parnih poređenja, koja predstavlja osnovu za izračunavanje težinskih koeficijenata kriterijuma (Saaty, 1980; Saaty, 1987).

*Tabela 4.2 Saaty-jeva skala relativne važnosti  
(Saaty, 1980)*

<b>Intenzitet značajnosti</b>	<b>Definicija</b>	<b>Objašnjenje</b>
<b>1</b>	Istog značaja	Dva elementa su jednako važna
<b>3</b>	Slaba dominantnost	Dati element je neznatno važniji od drugog
<b>5</b>	Jaka dominantnost	Dati element je znatno važniji od drugog
<b>7</b>	Veoma jaka dominantnost	Dati element je još važniji u odnosu na drugi
<b>9</b>	Apsolutna dominantnost	Dati element je apsolutno važniji od drugog
<b>2, 4, 6, 8</b>	Međuvrednosti	Koristi se kada je potreban kompromis

Viša vrednost težine označava veći relativni značaj kriterijuma u hijerarhijskoj strukturi. Nakon toga, primenom postupka parnog poređenja određuju se prioriteta alternativa u odnosu na svaki kriterijum. Dobijene vrednosti odražavaju stepen preferencije, pri čemu veće vrednosti ukazuju na povoljniju alternativu. Konačna evaluacija alternativa dobija se sintezom težina kriterijuma i vrednosti dodeljenih alternativama, čime se omogućava njihovo rangiranje i izbor optimalnog rešenja (Saaty, 1980; Triantaphyllou, 2000).

Teorijska osnova AHP metode zasniva se na aksiomima koje je definisao Saaty (1980):

- Aksiom recipročnosti: Ako je element A  $n$  puta značajniji od elementa B, tada je element B  $1/n$  puta značajniji od elementa A.
- Aksiom homogenosti: Poređenje ima smisla jedino ako su elementi uporedivi.
- Aksiom očekivanja: Svaka promena u strukturi hijerarhije zahteva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji.
- Aksiom zavisnosti: Dozvoljava se poređenje među grupom elemenata jednog nivoa u odnosu na element višeg nivoa.

Numeričke ocene poređenja parova elemenata na datom nivou hijerarhije unose se u matricu poređenja koja je recipročna, odnosno elementi iz gornjeg trougla su simetrično

recipročni elementima iz donjeg trougla, dok su elementi na glavnoj dijagonali jednaki 1. U nastavku je naveden metodološki osnov AHP metode (Saaty, 1980).

### Formiranje matrica parnih poređenja dimenzije $n \times n$ :

$$A^{(k)} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12}^{(k)} & \dots & a_{1n}^{(k)} \\ \frac{1}{a_{12}^{(k)}} & 1 & \dots & a_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}^{(k)}} & \frac{1}{a_{2n}^{(k)}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

gde je:

- $a_{ij}^k$  relativna važnost kriterijuma (i) u odnosu na kriterijum (j),
- (k) indeks ispitanika,
- (n) broj kriterijuma.

### Provera konzistentnosti

Konzistentnost matrice ocenjuje se pomoću indeksa konzistentnosti (*Consistency Index* – CI), koji se izračunava prema izrazu:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

gde je:

- ( $\lambda_{max}$ ) maksimalna sopstvena vrednost matrice,
- (n) broj kriterijuma.

Na osnovu vrednosti indeksa konzistentnosti izračunava se odnos konzistentnosti (*Consistency Ratio* – CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

gde je:

- (RI) slučajni indeks konzistentnosti (*Random Index*).

Slučajni indeks RI zavisi od reda matrice, a preuzima se iz tabele u kojoj prvi red predstavlja red matrice poređenja, a drugi slučajne indekse.

*Tabela 4.3 Slučajni indeks RI  
(Saaty, 1980)*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,0	0,0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Procene se smatraju prihvatljivo konzistentnim ukoliko je:

$$(CR < 0.10)$$

U slučaju veće vrednosti, procene se smatraju nedovoljno konzistentnim.

### **Određivanje težinskih koeficijenata podkriterijuma**

Na osnovu agregirane matrice parnih poređenja određuju se težinski koeficijenti kriterijuma izračunavanjem sopstvenog vektora matrice. Prioritetni vektor ( $w$ ) dobija se normalizacijom sopstvenog vektora koji odgovara maksimalnoj sopstvenoj vrednosti matrice:

$$A * w = \lambda_{max} * w$$

gde je:

- ( $w$ ) vektor težinskih koeficijenata kriterijuma.

Dobijeni vektor prioriteta se zatim normalizuje tako da važi:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

### **Konačno rangiranje kriterijuma**

Na osnovu izračunatih težinskih koeficijenata vrši se rangiranje kriterijuma prema njihovom relativnom značaju. Veća vrednost težinskog koeficijenta ukazuje na veći značaj kriterijuma u procesu odlučivanja. Dobijeni rezultati predstavljaju kvantitativnu osnovu za dalje analize i donošenje odluka.

U AHP metodi kod grupnog odlučivanja, normalizovane geometrijski osrednjene težine kriterijuma u odnosu na cilj dobijaju se kroz sledeći postupak.

### Agregacija procena više eksperata

Ako u odlučivanju učestvuje  $m$  eksperata, njihove matrice parnih poređenja se prvo agregiraju pomoću geometrijske sredine.

Za svaki element matrice:

$$a_{ij}^{group} = \left( \prod_{k=1}^m a_{ij}^{(k)} \right)^{1/m}$$

gde je:

- $a_{ij}^{(k)}$  procena eksperta  $k$
- $m$  broj eksperata

Na taj način se dobija grupna matrica parnih poređenja.

### Izračunavanje geometrijske sredine redova

Za svaki kriterijum  $i$  računa se geometrijska sredina elemenata reda:

$$GM_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n}$$

gde je:

- $n$  broj kriterijuma
- $a_{ij}$  element grupne matrice poređenja.

### Normalizacija geometrijskih sredina

Dobijene geometrijske sredine se zatim normalizuju da bi se dobile težine kriterijuma.

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum_{i=1}^n GM_i}$$

gde je:

- $w_i$  normalizovana težina kriterijuma
- $GM_i$  geometrijska sredina reda.

Važi:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

### Konačne normalizovane geometrijski osrednjene težine

Dobijeni vektor:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

predstavlja normalizovane geometrijski osrednjene težine kriterijuma u odnosu na cilj.

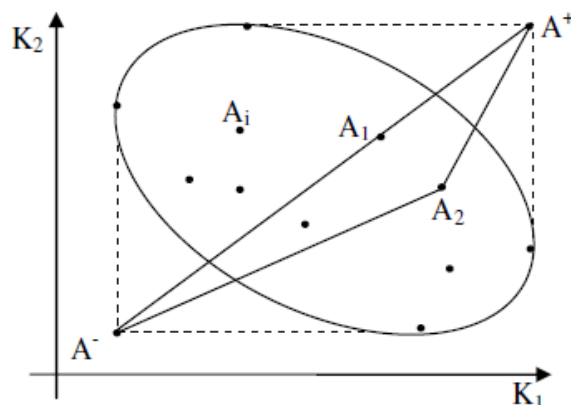
## 4.3 Metodološki okvir rangiranja alternativa primenom TOPSIS metode

Tehnika za određivanje redosleda preferencija prema sličnosti sa idealnim rešenjem (eng. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) TOPSIS predstavlja značajan alat za donosiocce odluka koji se suočavaju sa složenim problemima izbora u uslovima višekriterijumskog odlučivanja. Osnovni princip metode zasniva se na izboru alternative koja je istovremeno najbliža idealnom rešenju i najudaljenija od anti-idealnog rešenja, pri čemu se alternative rangiraju na osnovu njihove geometrijske udaljenosti od ovih referentnih tačaka (Hwang i Yoon, 1981; Chakraborty i Yeh, 2009; Chakraborty i Yeh, 2012; Chakraborty, 2022).

Idealno pozitivno rešenje definiše se kao skup najboljih vrednosti kriterijuma, odnosno maksimalnih vrednosti za benefit kriterijume i minimalnih vrednosti za troškovne kriterijume. Nasuprot tome, idealno negativno rešenje predstavlja skup najnepovoljnijih vrednosti kriterijuma. Interpretacija pojmova „najbolje” i „najgore” vrši se za svaki kriterijum pojedinačno, u zavisnosti od toga da li se kriterijum maksimizira ili minimizira (Hwang i Yoon, 1981; Triantaphyllou, 2000).

Na narednoj Slici 4.2 prikazan je geometrijski raspored alternativa u prostoru definisanom sa dva kriterijuma tipa maksimizacije. Može se uočiti da alternativa  $A_1$ , iako bliža idealnom rešenju ( $A^+$ ) u odnosu na alternativu  $A_2$ , istovremeno može biti bliža i anti-idealnom rešenju ( $A^-$ ). Ova situacija ukazuje na potrebu za integrisanjem obe udaljenosti u jedinstvenu meru evaluacije.

U skladu sa tim, autori metode, Hwang i Yoon (1981), definišu ukupnu meru kvaliteta alternative kao relativnu bliskost idealnom rešenju, koja istovremeno uzima u obzir udaljenost od idealnog ( $A^+$ ) i anti-idealnog ( $A^-$ ) rešenja. Ova mera uključuje i težinske koeficijente kriterijuma, čime se omogućava uvažavanje njihove relativne važnosti u procesu odlučivanja. Na taj način, TOPSIS metoda obezbeđuje balansirano vrednovanje alternativa u uslovima konflikta između kriterijuma (Hwang i Yoon, 1981; Triantaphyllou, 2000).



*Grafik 4.2 Geometrijski prikaz određivanja udaljenosti alternativa od idealnog i anti-idealnog rešenja u TOPSIS metodi (Hwang i Yoon, 1981)*

U okviru TOPSIS metode, težinski koeficijenti (ponderi) odražavaju relativne preferencije donosioca odluke u odnosu na posmatrane kriterijume (Hwang i Yoon, 1981; Chakraborty, 2022). U doktorskoj disertaciji dodeljivanje težinskih koeficijenata ima ključni značaj, jer oni definišu relativnu važnost svakog kriterijuma u procesu odlučivanja i omogućavaju prilagođavanje modela specifičnim uslovima analize. Izmena vrednosti težinskih koeficijenata može značajno uticati na konačan rang alternativa, s obzirom na to da kriterijumi sa većim težinama imaju snažniji uticaj na ukupni rezultat (Triantaphyllou, 2000; Agarski, 2015; Marinković i dr., 2025).

Procedura TOPSIS metode može se prikazati kroz sledeće korake (Hwang i Yoon, 1981; Triantaphyllou, 2000):

## 1. Formiranje matrice performansi

U prvom koraku formira se početna matrica performansi (matrica odlučivanja), koja sadrži vrednosti alternativa u odnosu na definisane kriterijume:

$$X = (x_{ij})_{m \times n}$$

gde je:

- $m$ — broj alternativa,
- $n$ — broj kriterijuma,
- $x_{ij}$ — vrednost alternative  $A_i$  prema kriterijumu  $C_j$ .

Svaki red matrice odgovara jednoj alternativni, a svaka kolona jednom kriterijumu. Element  $x_{ij}$  predstavlja rejting (performansu) alternative  $A_i$  u odnosu na kriterijum  $C_j$ .

Opšti oblik matrice performansi prikazan je izrazom:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

## 2. Normalizacija matrice performansi

Pošto kriterijumi mogu biti izraženi u različitim jedinicama mere, vrši se normalizacija početne matrice. U TOPSIS metodi najčešće se koristi vektorska normalizacija:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Normalizovana matrica označava se kao:

$$R = (r_{ij})_{m \times n}$$

odnosno:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

### 3. Formiranje ponderisane normalizovane matrice

Nakon normalizacije, svaki element normalizovane matrice množi se odgovarajućim težinskim koeficijentom kriterijuma:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

gde je:

- $w_j$ — težinski koeficijent kriterijuma  $C_j$ ,
- $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

Na taj način dobija se ponderisana normalizovana matrica:

$$V = (v_{ij})_{m \times n}$$

odnosno:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \cdots & v_{2n} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & \cdots & v_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

### 4. Određivanje idealnih rešenja

Idealno rešenje  $A^+$  i negativno idealno rešenje  $A^-$  određuju se na osnovu:

$$\begin{aligned} A^+ &= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \\ A^- &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \end{aligned}$$

gde je:

$$v_j^+ = \begin{cases} \max_i v_{ij}, & j \in G \\ \min_i v_{ij}, & j \in G' \end{cases}$$

$$v_j^- = \begin{cases} \min_i v_{ij}, & j \in G \\ \max_i v_{ij}, & j \in G' \end{cases}$$

gde je:

- $G$ — skup kriterijuma tipa „max“
- $G'$ — skup kriterijuma tipa „min“

Najbolje su alternative koje imaju najveće  $v_{ij}$  u odnosu na kriterijume tipa "max", i najmanje  $v_{ij}$  u odnosu na kriterijume tipa "min".  $A^+$  ukazuje na najbolju alternativu – idealno rešenje, a po istoj logici  $A^-$  ukazuje na idealno negativno rešenje.

## 5. Određivanje rastojanja alternativa od idealnih rešenja

U petom koraku se izračunavaju  $n$ -dimenziona Euklidska rastojanja svih alternativa od idealnog i idealnog negativnog rešenja.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, \dots, n$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, n$$

## 6. Određivanje relativne blizine alternativa idealnom rešenju

Za svaku alternativu određuje se relativna blizina (engl. *Relative Closeness*  $RC_i^+$ )

$$RC_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, i = 1, \dots, m$$

gde je:

$$0 \leq RC_i^+ \leq 1$$

Alternativa  $A_i$  je bliža idealnom rešenju ako je  $RC_i^+$  bliže vrednosti 1, ili takođe, ako je  $D_i^+$  bliže vrednosti 0.

## 7. Rangiranje alternativa

Alternative se rangiraju po opadajućim vrednostima  $RC_i^+$ . Veća vrednost  $RC_i^+$  označava povoljniju alternativu.

#### 4.4 Metodološki okvir rangiranja alternativa primenom PROMETHEE II metode

PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) metoda spada u grupu outranking metoda i zasniva se na parnom poređenju alternativa po svakom kriterijumu, sa ciljem utvrđivanja dominacije među alternativama. Ova metoda predstavlja jednu od najčešće korišćenih metoda višekriterijumskog odlučivanja zasnovanih na outranking pristupu. PROMETHEE II verzija omogućava potpuno rangiranje alternativa primenom neto toka preferencije, koji predstavlja razliku između pozitivnog i negativnog toka preferencije. Za razliku od nje, PROMETHEE I metoda omogućava samo parcijalno (delimično) rangiranje alternativa (Brans i Vincke, 1985; Brans i Mareschal, 2005).

Za primenu PROMETHEE II metode potrebno je definisati osnovne informacije za svaki kriterijum, koje obuhvataju smer optimizacije (maksimizacija ili minimizacija), težinski koeficijent i tip funkcije preferencije. Smer optimizacije određuje da li se kriterijum posmatra kao benefit ili troškovni, dok funkcija preferencije omogućava transformaciju razlike između alternativa u stepen preferencije u intervalu (0,1). Ovakav pristup omogućava fleksibilno modelovanje odnosa između alternativa i uvažavanje različitih tipova kriterijuma u procesu odlučivanja (Brans i Mareschal, 2005; Behzadian i dr., 2010).

U okviru PROMETHEE II metode koristi se šest standardnih tipova funkcija preferencije, koje omogućavaju različito modelovanje odnosa između alternativa. Izbor odgovarajuće funkcije zavisi od prirode kriterijuma i percepcije donosioca odluke o značaju razlika između alternativa. Standardni tipovi funkcija preferencije su:

- običan kriterijum (*eng. Usual criterion*),
- kvazi-kriterijum (*eng. Quasi criterion*),
- kriterijum sa linearnom preferencijom (*eng. V-shape criterion*),
- nivo-kriterijum (*eng. Level criterion*),
- kriterijum linearne preferencije sa područjem indiferentnosti (*eng. Linear criterion with indifference area*)
- Gausova funkcija (*eng. Gaussian criterion*).

U okviru PROMETHEE II metode funkcija preferencije transformiše razliku između performansi alternativa  $a$  i  $b$  prema kriterijumu  $j$  u vrednost preferencije u intervalu od 0 do 1:

$$P_j(a, b) = F_j(d_j(a, b))$$

gde je:

- $d_j(a, b)$  razlika između performansi alternativa,
- $P_j(a, b)$  predstavlja stepen preferencije alternative  $a$  u odnosu na alternativu  $b$  prema kriterijumu  $j$ .

U nastavku je prikazana Tabela 4.4, koja obuhvata šest tipova funkcija preferencije koje se primenjuju u okviru PROMETHEE II metode. Ove funkcije omogućavaju modelovanje različitih intenziteta preferencije između alternativa u zavisnosti od prirode kriterijuma i karakteristika problema odlučivanja.

Tabela 4.4 Tipovi funkcija preferencije u PROMETHEE II metodi (Brans i Vincke, 1985; Mareschal i Brans, 1994; Brans i Mareschal 2005)

Tip funkcije	Naziv funkcije	Parametri	Matematička definicija	Karakteristike
Tip I	Usual criterion	—	$P(d) = 0$ ako $d \leq 0$ ; $P(d) = 1$ ako $d > 0$	Najjednostavnija funkcija; svaka pozitivna razlika daje potpunu preferenciju
Tip II	Quasi criterion (U-shape)	$q$	$P(d) = 0$ ako $d \leq q$ ; $P(d) = 1$ ako $d > q$	Male razlike se zanemaruju; preferencija nastaje tek kada razlika pređe prag
Tip III	V-shape criterion	$p$	$P(d) = 0$ ako $d \leq 0$ ; $P(d) = d/p$ ako $0 < d < p$ ; $P(d) = 1$ ako $d \geq p$	Preferencija raste linearno do praga preferencije
Tip IV	Level criterion	$q, p$	$P(d) = 0$ ako $d \leq q$ ; $P(d) = 0.5$ ako $q < d \leq p$ ; $P(d) = 1$ ako $d > p$	Tri nivoa preferencije: indiferencija, slaba i potpuna preferencija
Tip V	Linear criterion	$q, p$	$P(d) = 0$ ako $d \leq q$ ; $P(d) = \frac{d-q}{p-q}$ ako $q < d < p$ ; $P(d) = 1$ ako $d \geq p$	Najčešće korišćena funkcija; preferencija raste linearno između pragova
Tip VI	Gaussian criterion	$\sigma$	$P(d) = 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}$	Kontinuirana funkcija bez naglih prelaza

gde je:

- $d = f(a) - f(b)$  razlika performansi između alternativa
- $q$  prag indiferencije
- $p$  prag preferencije
- $\sigma$  parametar Gaussove funkcije.

Prag indiferencije  $q$  predstavlja maksimalnu razliku između alternativa koja se smatra zanemarljivom, dok prag preferencije  $p$  označava minimalnu razliku pri kojoj se javlja potpuna preferencija jedne alternative u odnosu na drugu.

Procedura PROMETHEE II metode može se prikazati kroz sledeće korake (Brans i Vincke, 1985; Brans i Mareschal, 2005):

### 1. Formiranje matrice performansi

Prvi korak u primeni PROMETHEE II metode je formiranje matrice odlučivanja (matrice performansi) koja sadrži vrednosti alternativa prema posmatranim kriterijumima.

$$X = (x_{ij})_{m \times n}$$

gde je:

- $m$ — broj alternativa
- $n$ — broj kriterijuma
- $x_{ij}$ — vrednost alternative  $A_i$  prema kriterijumu  $C_j$

Opšti oblik matrice performansi je:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Izbor funkcije preferencije koja služi da prevede razlike između alternativa utvrđene u procesu poređenja po svakom kriterijumu na interval od nula do jedan. Za svaki kriterijum definiše se smer optimizacije (maksimizacija ili minimizacija), čime se određuje način poređenja alternativa.

## 2. Određivanje odstupanja na osnovu poređenja alternativa u parovima

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$$

gde je:

- $d_j(a, b)$  – razlika između alternativa  $a$  i  $b$  po svakom kriterijumu
- $g_j(a)$ — vrednost alternative  $a$  prema kriterijumu  $j$
- $g_j(b)$ — vrednost alternative  $b$  prema kriterijumu  $j$

Ove razlike predstavljaju osnovu za određivanje preferencijalnih funkcija.

## 3. Definisane funkcije preferencije

PROMETHEE II metoda koristi preferencijalne funkcije koje pretvaraju razliku između alternativa u stepen preferencije.

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad j=1, \dots, k$$

gde je:

$P_j(a, b)$  preferencija alternative  $a$  u odnosu na alternativu  $b$  po svakom kriterijumu kao funkciju od  $d_j(a, b)$ .

Za svaku funkciju preferencije definišu se prag indiferencije ( $q$ ) i prag preferencije ( $p$ ), koji određuju osetljivost modela na razlike između alternativa.

## 4. Izračunavanje indeksa preferencije

Za svaku kombinaciju alternativa računa se agregirani indeks preferencije:

$$\forall a, b \in A, \quad \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j$$

gde je:

$\pi(a, b)$  alternativa  $a$  u odnosu na alternativu  $b$  definisana kao ponderisana suma  $P_j(a, b)$  po svakom kriterijumu,

$w_j$  predstavlja težinski koeficijent kojim donosilac odluke izražava preferenciju, odnosno relativnu važnost  $j$ -og kriterijuma.

Pri čemu važi:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

## 5. Formiranje matrice preferencije

Na osnovu izračunatih indeksa preferencije formira se matrica preferencije:

$$\Pi = \begin{bmatrix} 0 & \pi(a_1, a_2) & \pi(a_1, a_3) & \cdots & \pi(a_1, a_m) \\ \pi(a_2, a_1) & 0 & \pi(a_2, a_3) & \cdots & \pi(a_2, a_m) \\ \pi(a_3, a_1) & \pi(a_3, a_2) & 0 & \cdots & \pi(a_3, a_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi(a_m, a_1) & \pi(a_m, a_2) & \pi(a_m, a_3) & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Element matrice predstavlja stepen preferencije jedne alternative u odnosu na drugu.

## 6. Izračunavanje tokova preferencije

Pozitivni tok pokazuje koliko je određena alternativa bolja od drugih alternativa:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

Negativni tok pokazuje koliko su druge alternative bolje od posmatrane alternative:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

## 7. Izračunavanje neto toka preferencije

PROMETHEE II metoda koristi neto tok preferencije za rangiranje alternativa:

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

gde je:

- $\phi(a)$ — neto tok preferencije alternative  $a$

## 8. Rangiranje alternativa

Konačno rangiranje alternativa vrši se na osnovu neto toka preferencije gde alternativa sa najvećim neto tokom ima najviši rang.

$$\phi(a_1) > \phi(a_2) > \phi(a_3)$$

Analiza je sprovedena primenom PROMETHEE II metode korišćenjem softverskog paketa Visual PROMETHEE (*eng. Decision Lab*), koji omogućava izračunavanje tokova preferencija i grafičku interpretaciju rezultata putem GAIA dijagrama. Softver je razvijen na Université Libre de Bruxelles od strane profesora Bertranda Mareschala, u saradnji sa profesorom Jean-Pierre Bransom, tvorcem PROMETHEE metode.

Visual PROMETHEE omogućava:

- primenu PROMETHEE I i PROMETHEE II metoda
- izbor 6 tipova funkcija preferencije
- definisanje težinskih koeficijenata podkriterijuma
- određivanje pozitivnih i negativnih tokova preferencije
- izračunavanje neto toka preferencije ( $\phi$ ) i rangiranje alternativa
- GAIA vizuelnu analizu
- analizu osetljivosti (sensitivity analysis)
- upravljanje različitim modelima odlučivanja.

GAIA metoda omogućava grafičku interpretaciju odnosa između podkriterijuma, alternativa i težina kriterijuma.

U okviru doktorske disertacije analiza je sprovedena primenom PROMETHEE II metode, korišćenjem softverskog paketa Visual PROMETHEE, koji omogućava izračunavanje tokova preferencije i grafičku interpretaciju rezultata putem GAIA dijagrama. Softver je

razvijen na Université Libre de Bruxelles od strane Bertrand Mareschal, u saradnji sa Jean-Pierre Brans, autorom PROMETHEE metode (Brans i Mareschal, 2005).

U skladu sa prethodno definisanom metodologijom PROMETHEE II metode, softver omogućava implementaciju svih ključnih koraka analize, uključujući definisanje težinskih koeficijenata kriterijuma, izbor funkcija preferencije i određivanje smera optimizacije (maksimizacija/minimizacija). Takođe, omogućava izračunavanje agregiranih indeksa preferencije, kao i pozitivnih ( $\phi^+$ ), negativnih ( $\phi^-$ ) i neto tokova preferencije ( $\phi$ ), na osnovu kojih se vrši potpuno rangiranje alternativa.

Prednosti primene softverskog alata Visual PROMETHEE posebno se ogledaju u sledećem:

- mogućnosti primene PROMETHEE I i PROMETHEE II metoda
- grafičkoj interpretaciji rezultata putem GAIA ravni
- sprovođenju analize osetljivosti
- upravljanju različitim scenarijima odlučivanja

GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) metoda omogućava vizuelnu interpretaciju odnosa između kriterijuma, alternativa i težinskih koeficijenata, čime se dodatno olakšava analiza konflikata između kriterijuma i identifikacija dominantnih alternativa (Brans i Mareschal, 2005; Behzadian i dr., 2010).

#### 4.5 Modelovanje emisija gasova primenom COPERT softvera

U okviru doktorske disertacije izvršena je statistička analiza i kvantifikacija parametara ključnih za procenu negativnog uticaja na životnu sredinu, pri čemu su upoređene emisije izduvnih gasova iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem za tri različite alternative sistema sakupljanja. Kao jedan od relevantnih i široko prihvaćenih modela za proračun emisija iz drumskog saobraćaja primenjen je softverski alat COPERT (*eng. Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe*). Ovaj model se koristi u većini evropskih zemalja na preporuku Evropske agencije za životnu sredinu i predstavlja standardni alat za izradu nacionalnih inventara emisija iz sektora transporta (EEA, 2023). Njegova primena usvojena je i u Republici Srbiji, gde se koristi kao referentni model za

procenu emisija iz drumskog saobraćaja, te zbog toga predstavlja nezaobilazan alat u okviru ovog istraživanja.

Za određivanje količina emitovanih zagađujućih materija korišćen je softver COPERT 5 (verzija 5.9.1), razvijen u okviru Evropske agencije za životnu sredinu i Evropskog tematskog centra za vazduh i klimatske promene. COPERT predstavlja alat baziran na MS Windows platformi, koji omogućava detaljnu procenu emisija u drumskom saobraćaju na osnovu kombinacije podataka o voznom parku, aktivnosti i uslova eksploatacije (EC/JRC, 2023). U ovom istraživanju primenjen je Tier 3 pristup, koji predstavlja najdetaljniji nivo metodologije za proračun emisija. U okviru ovog pristupa, emisije se izračunavaju kombinovanjem tehničkih podataka (faktori emisije specifični za tip vozila, gorivo i tehnologiju) i podataka o aktivnosti (npr. ukupno pređeni kilometri vozila), čime se obezbeđuje visoka tačnost procene emisija (EEA, 2023). Struktura COPERT modela sastoji se od tri osnovna segmenta: (1) ulaznog modula, koji obuhvata sve potrebne ulazne podatke, (2) baze faktora emisije, definisanih u skladu sa vodičem Evropske agencije za životnu sredinu i odgovarajućim Tier pristupima, i (3) izlaznog modula, koji prikazuje rezultate proračuna u vidu ukupnih emisija i njihove raspodele po kategorijama vozila i zagađujućih materija.

Primena COPERT modela omogućava proračun emisija širokog spektra zagađujućih materija, uključujući ugljen-monoksid (CO), azotne okside (NO<sub>x</sub>), nemetanska isparljiva organska jedinjenja (NMVOC), suspendovane čestice (PM), kao i gasove sa efektom staklene bašte, kao što su ugljen-dioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) i azot-suboksid (N<sub>2</sub>O) (EEA, 2023).

Za sprovođenje analize emisija poreklom iz drumskog saobraćaja primenom COPERT modela neophodno je obezbediti obimne i pouzdane ulazne podatke. Pre pokretanja modela potrebno je prikupiti sledeće informacije:

- klimatske karakteristike (temperatura i drugi meteorološki parametri tokom godine),
- strukturu voznog parka, klasifikovanu prema kategorijama vozila, podkategorijama i tehnologijama emisije (broj vozila),
- prosečan godišnji pređeni put po kategorijama vozila,
- prosečne brzine kretanja vozila u zavisnosti od tipa saobraćajnice,
- raspodelu saobraćaja prema tipu puteva (gradski, vangradski i autoput) izraženu u procentima.

Ovakav pristup omogućava detaljno modelovanje emisija u realnim uslovima eksploatacije i predstavlja pouzdanu osnovu za poređenje alternativnih sistema upravljanja otpadom sa aspekta njihovog uticaja na životnu sredinu.

#### 4.5.1 Metodologija za proračun emisija izduvnih gasova

U okviru doktorske disertacije, ukupna emisija zagađujućih materija iz drumskog saobraćaja određena je primenom COPERT modela, pri čemu se emisija računa kao proizvod faktora emisije i ukupne pređene distance vozila:

$$E_i = E_i \times D$$

gde je:

$E_i$ — emisija zagađujuće materije  $i$  (g)

$E_i$ — faktor emisije za zagađujuću materiju  $i$  (g/km)

$D$ — ukupna pređena distanca (km).

U okviru Tier 3 metodološkog pristupa, ukupna emisija izduvnih gasova definiše se kao zbir emisija koje nastaju tokom stabilizovanog (toplog) režima rada motora i dodatnih emisija koje se javljaju tokom hladnog starta:

$$E_{ukupno} = E_{toplo} + E_{hladno}$$

gde je:

$E_{ukupno}$  - ukupna emisija (g) zagađujuće supstance,

$E_{toplo}$  - emisija (g) u periodu stabilizovanog (toplog) radnog režima motora,

$E_{hladno}$  - emisija (g) u periodu dok se motor ne zagreje (hladan start).

S obzirom na različite režime vožnje, ukupna emisija može se dodatno razložiti prema tipu puta:

$$E_{ukupno} = E_{grdska} + E_{vangradska} + E_{autoput}$$

Ukupna emisija izračunata je kombinovanjem podataka o aktivnostima za svaku kategoriju vozila sa odgovarajućim emisijama i faktorima. Emisioni faktori razlikuju se u zavisnosti od ulaznih podataka (uslova vožnje, klimatskih uslova). Od ulaznih podataka najveći uticaj na količinu i učestalost emisije tokom „hladnog starta“ ima prosečna minimalna temperatura

vazduha (posebno tokom hladnih meseci), ali i prosečna (godišnja) dužina putovanja ( $l_{trip}$ ) na nacionalnoj teritoriji.

Topla emisija izduvnih gasova zavisi od različitih faktora, uključujući i pređeni put pojedinačnog vozila, njegovu brzinu (ili tip puta), godišnje, zapreminu motora i dozvoljenu masu. Osnovna formula za procenu tople emisije za dati vremenski period primenom eksperimentalno utvrđenih emisionih faktora jeste:

$$E_{toplo,i,k,r} = N_k * M_{k,r} * e_{toplo,i,k,r}$$

gde je:

$E_{(toplo,i,k,r)}$  - topla emisija izduvnih gasova zagađujuće supstance  $i$  (g), vozila tehnologije  $k$  u datom vremenskom periodu na putu tipa  $r$ ,

$N_k$  - broj vozila (voz) tehnologije  $k$  koja su bila registrovana u datom vremenskom periodu,

$M_{k,r}$  - pređeni put po vozilu (km/voz) za vozila tehnologije  $k$  na putu tipa  $r$ ,

$e_{toplo,i,k,r}$  - emisioni faktor u (g/km) zagađujuće supstance  $i$ , za vozilo tehnologije  $k$  na putu tipa  $r$ .

Brzina vozila, koja je uvedena u proračun preko načina vožnje, ima veliki uticaj na emisiju izduvnih gasova. Za emisione faktore, koji su predstavljeni u ovom poglavlju, mogu da se koriste dve alternativne metode:

- izabrati po jednu reprezentativnu prosečnu brzinu za svaki tip puta: "gradski", "vangradski" i "autoput" (npr. 20 km/h, 60 km/h i 100 km/h), te primeniti faktore emisije;
- definisati krive raspodele prosečnih brzina  $f_{jk}(V)$  i integrisati ih preko kriva emisije.

$$e_{toplo-i,k,r} = \int [e(v) * f_{k,r}(v)] dv$$

$v$  - brzina vozila na "vangradskom", "gradskom" putu i "autoputu",

$e(v)$  – emisioni faktor koji zavisi od brzine to jest od

$f_{k,r}(v)$  - formula (npr. formula najpribližnije krive) koja opisuje frekvenciju raspodele prosečnih brzina, za određeni način vožnje na "vangradskom", "gradskom" putu i "autoputu". Izraz  $f_{k,r}(v)$  je u funkciji tehnologije vozila  $k$  i tipa puta  $r$ .

Evidentno je da je prvi, gore navedeni pristup, mnogo lakši i verovatno najčešće primenjivan u mnogim državama. S obzirom na određeni stepen nepouzdanosti procene emisionih faktora, poboljšanja koja donosi drugi pristup nisu uvek evidentna.

U periodu dok se motor ne zagreje (pri hladnom startu) nastaje dodatna emisija izduvnih gasova (u sva tri načina vožnje). Ovakva emisija najčešće se javlja u gradskoj i vangradskoj vožnji zbog toga što je broj vožnji koje se započinju na autoputu mali (uglavnom se vožnja započinje sa prostora za parkiranje koji se nalazi u neposrednoj blizini autoputa).

Emisija pri hladnom startu uvedena je u proračun kao dodatna emisija po km, primenom sledeće formule:

$$E_{hladno,i,k} = \beta_{i,k} \cdot N_k \cdot M_k \cdot e_{toplo,i,k} \cdot \left( \frac{e_{hladno}}{e_{toplo}} - 1 \right)$$

gde je:

- $\beta_{i,k}$ — udeo vožnje sa hladnim motorom
- $\frac{e_{HLADNO}}{e_{TOPLO}}$  odnos hladne i tople emisije

### Izvori emisionih faktora

Emisioni faktori u okviru Tier 3 metodologije zasnovani su na rezultatima međunarodnih istraživačkih projekata i baza podataka, uključujući:

- CORINAIR (EEA, 2000)
- ARTEMIS (André, 2004)
- MEET (Hickman, 1999)

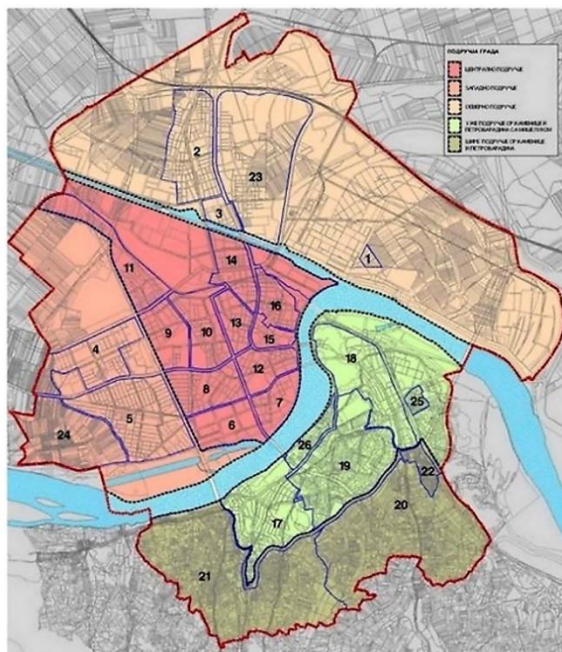
## 5. DEFINISANJE OPTIMALNOG SISTEMA SAKUPLJANJA E-OPTADA NA PRIMERU GRADA NOVOG SADA

### 5.1 Definisavanje prostornih i demografskih karakteristika sistema sakupljanja

Grad Novi Sad, zajedno sa sedam okolnih opština, predstavlja jedan od predviđenih regiona za upravljanje otpadom u Srbiji, koji pokriva ukupnu površinu od približno 2861 km<sup>2</sup>. Grad se prostire na površini od približno 129,4 km<sup>2</sup>. Prema važećem generalnom urbanističkom planu (Generalni urbanistički plan, 2022), gradsko građevinsko područje je podeljeno na dve glavne prostorne celine: bački i sremski deo grada.

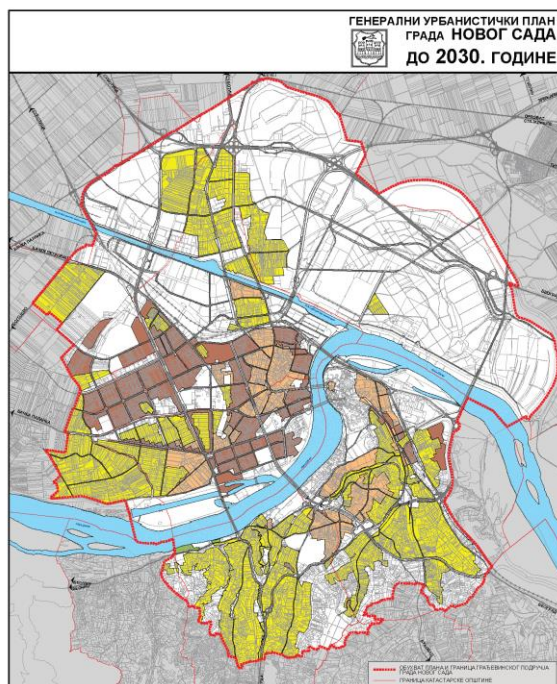
Bački deo podeljen je na severno, zapadno i centralno područje, a sremski na uže područje Sremske Kamenice i Petrovaradina sa Mišelukom i šire područje Sremske Kamenice i Petrovaradina. Prostorna organizacija grada je ilustrovana na kartografskom prikazu izvedenom iz studije Krišanović i dr. (2009). Na Slici 5.1, centralna zona je označena crvenom bojom i predstavlja najgušće izgrađeni deo grada, uključujući istorijski centar i šire gradsko jezgro. Zapadna zona, prikazana narandžastom bojom, pretežno je stambenog karaktera. Severna zona, označena svetlo žutom bojom, sastoji se uglavnom od novijih ili manje gusto razvijenih urbanih struktura. Područja označena zelenom bojom odražavaju zone sa jačim prirodnim i stambenim karakterom, dok tamnije zelena označava stanovanje niske gustine u bliskoj interakciji sa prirodnim okruženjem. Plave linije ocrtavaju granice stambenih zona, a brojevi od 1 do 26 označavaju specifične prostorne jedinice unutar urbane strukture.

Na nivou Generalnog urbanističkog plana izdvajaju se dva osnovna tipa stanovanja: porodično i višeporodično. Između ovih osnovnih kategorija javlja se čitav spektar prelaznih oblika koji poseduju karakteristike oba tipa. Pojedine prostorne i funkcionalne osobine, poput spratnosti objekata, načina prvobitnog korišćenja prostora i veličine parcele, bliže su konceptu porodičnog stanovanja. Sa druge strane, broj stambenih jedinica na parceli, vlasnički odnosi nad objektima, kao i pravo korišćenja zemljišta, približavaju ove oblike višeporodičnom stanovanju. Područja u kojima dominiraju ovakvi prelazni oblici definišu se kao zone mešovite izgradnje, odnosno opšte stambene zone. U ovu kategoriju svrstavaju se i prostorne celine u kojima, na nivou grupe blokova, nije moguće jasno izdvojiti homogena područja porodičnog ili višeporodičnog stanovanja (Krišanović i dr., 2009).



*Slika 5.1 Prostorna organizacija grada sa granicama stambenih zona  
(Generalni urbanistički plan, 2022)*

Na Slici 5.2 prikazane su površine namenjene stanovanju, kao i prostorna distribucija različitih oblika stanovanja. Svetlonarandžastom bojom označene su opšttestambene zone, koje obuhvataju delove sa očuvanim karakteristikama nasleđa u centralnim delovima Novog Sada, podgrađu Petrovaradina i centru Sremske Kamenice, kao i zone stanovanja u kontaktnim područjima centralne gradske zone i područja planirana za rekonstrukciju.



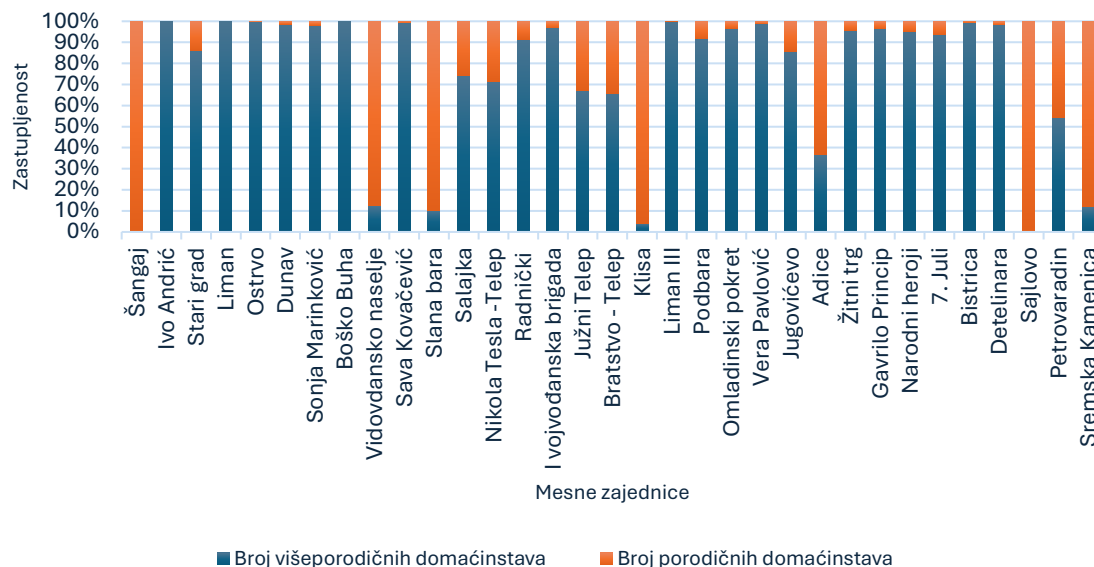
*Slika 5.2 Područja stanovanja, rasprostranjenost i osnovni oblici stanovanja  
(Generalni urbanistički plan, 2022)*

Tamno narandžastom bojom prikazana su područja višeporodičnog stanovanja. U okviru ovih zona izdvajaju se različite tipologije stambene izgradnje koje se razlikuju prema periodu nastanka, prostornom položaju, strukturi i načinu izgradnje. Među njima se izdvajaju starije višeporodično stanovanje, novije višeporodično stanovanje formirano kroz celine ortogonalno postavljenih objekata, kao i višeporodično stanovanje srednjih i visokih gustina koje je nastalo u zonama transformacije nekadašnjeg porodičnog stanovanja. Žutom bojom označene su zone namenjene porodičnom stanovanju. Na teritoriji grada zastupljeno je više tipova ovog oblika stanovanja, uključujući tradicionalno stanovanje sa porodičnim kućama, kao i novije oblike porodičnog stanovanja koji obuhvataju slobodnostojeće ili dvojne objekte postavljene na manjem rastojanju od regulacione linije. Ovaj tip izgradnje zauzima najveći deo površina namenjenih porodičnom stanovanju. Pored toga, prisutno je i stanovanje u prekinutom ili neprekinutom nizu, koje se javlja u manjim prostornim celinama. Zelenom bojom označena su područja vikend naselja (Krišanović i dr., 2009).

Od ukupno 47 mesnih zajednica na teritoriji Grada Novog Sada, njih 31 nalazi se u okviru naselja Novi Sad, dok se preostalih 16 mesnih zajednica nalazi u prigradskim i seoskim naseljima, uključujući Petrovaradin, Sremsku Kamenicu, Futog, Veternik, Kać i druga naselja u administrativnom sastavu grada. Za potrebe ove doktorske disertacije, pored 31 mesne zajednice u okviru naselja Novi Sad, u obzir su uzeta i područja Petrovaradina i Sremske Kamenice, kao prostorne celine koje se izdvajaju po stepenu urbanizacije i razvijenosti u odnosu na ostala naselja.

U nastavku su prikazani prikupljeni podaci na osnovu izveštaja Javnog komunalnog preduzeća JKP Informatika Novi Sad o broju stanovnika, kao i broju kolektivnih i individualnih domaćinstava po mesnim zajednicama. Na osnovu dostupnih podataka, ukupan broj stanovnika koji se uzima u obzir u okviru doktorske teze iznosi 330.189. Na Grafiku 5.1 prikazana je raspodela domaćinstava prema tipu domaćinstva. Struktura domaćinstava ukazuje na izraženu dominaciju višeporodičnih domaćinstava, čiji broj iznosi 132.746, što je gotovo pet puta više u odnosu na broj porodičnih domaćinstava, kojih ima 27.262. Na osnovu prikazanih podataka može se uočiti da su najveće vrednosti višeporodičnih domaćinstava zabeležene su u mesnim zajednicama kao što su Detelinara, Bistrica i Nova Detelinara, što je u skladu sa njihovim karakteristikama kao zonama intenzivne višeporodične stambene izgradnje. Nasuprot tome, porodična domaćinstva su relativno ravnomernije raspoređena i značajnije zastupljena u perifernim i prigradskim područjima, kao što su Petrovaradin i Sremska Kamenica. U pojedinim mesnim zajednicama uočavaju se i veće oscilacije u broju porodičnih domaćinstava, što može biti posledica heterogene strukture stanovanja i prisustva kombinovanih tipologija

(porodično i višeporodično stanovanje). Ukupno posmatrano, rezultati potvrđuju dominaciju kolektivnog stanovanja u urbanom jezgru grada, što ima direktne implikacije na planiranje i organizaciju sistema sakupljanja otpada, posebno u pogledu izbora tipa infrastrukture i učestalosti sakupljanja.



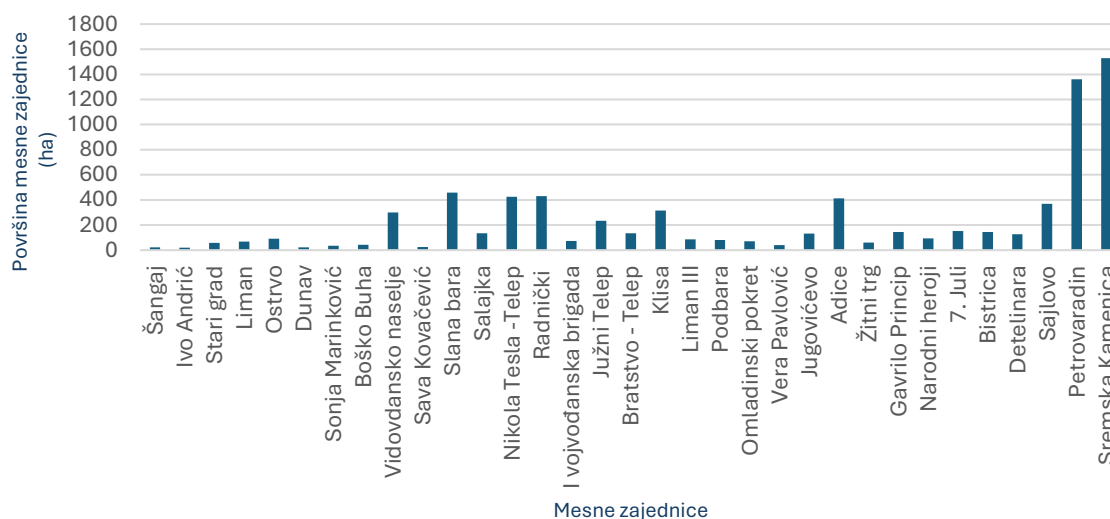
Grafik 5.1 Raspodela domaćinstava na prema tipu domaćinstva

Površine mesnih zajednica utvrđene su korišćenjem nacionalne digitalne platforme GeoSrbija, koja omogućava uvid u geoprostorne podatke i infrastrukturu Republike Srbije i predstavlja centralnu bazu geoprostornih informacija. Na osnovu dostupnih kartografskih prikaza unutar platforme izvršeno je merenje površina svih mesnih zajednica. Na slici 5.3 je dat primeri merenja površine mesne zajednice "Bratstvo Telep" upotrebom digitalne platforme GeoSrbija.



Slika 5.3 Određivanje površine mesne zajednice Bratstvo Telep

Na Grafiku 5.2 prikazane su površine mesnih zajednica na teritoriji Novog Sada, izražene u hektarima. Na osnovu prikazanih podataka može se uočiti izražena neujednačenost u veličini mesnih zajednica, što ukazuje na značajne razlike u prostornim karakteristikama analiziranog područja.

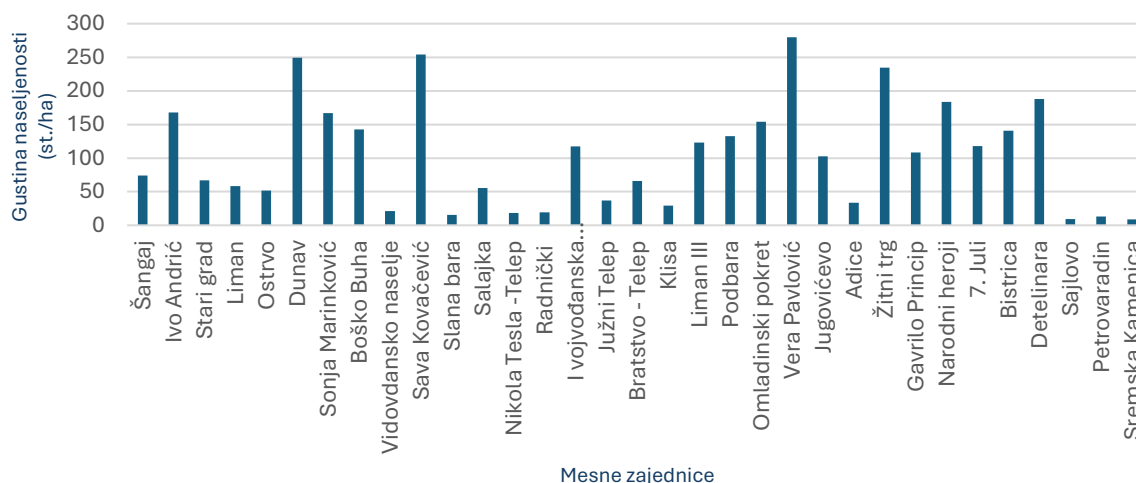


Grafik 5.2 Raspodela mesnih zajednica prema površini

Najveće površine zauzimaju mesne zajednice Petrovaradin i Sremska Kamenica, koje se značajno izdvajaju u odnosu na ostale, sa površinama koje prelaze 1.300 ha. Ove mesne zajednice karakteriše prostorno disperzivniji tip izgradnje, što je u skladu sa njihovim prigradskim i delimično ruralnim karakterom. Srednje vrednosti površina zabeležene su u mesnim zajednicama kao što su Adice, Telep, Liman i Novo naselje, koje obuhvataju kombinaciju višeporodičnog i porodičnog stanovanja i predstavljaju prelazne zone između centralnog urbanog jezgra i perifernih delova grada. Najmanje površine imaju mesne zajednice u centralnim delovima grada, poput Stari grad, Ivo Andrić i Šangaj, koje su prostorno ograničene.

Na Grafiku 5.3 prikazana je gustina naseljenosti izražena u broju stanovnika po hektaru. Na osnovu prikazanih podataka može se uočiti značajna prostorna neujednačenost u raspodeli stanovništva. Najveće vrednosti gustine naseljenosti zabeležene su u centralnim i urbanim mesnim zajednicama, kao što su Sava Kovačević, Vera Pavlović i Detelinara, što je u skladu sa dominantnim višeporodičnim stanovanjem i visokom koncentracijom stanovništva. Nasuprot tome, najniže vrednosti gustine naseljenosti uočavaju se u mesnim zajednicama kao

što su Petrovaradin i Sremska Kamenica, koje karakterišu veće površine i niža gustina izgradnje.



Grafik 5.3 Raspodela gustine naseljenosti prema mesnim zajednicama

Ukupno posmatrano, prostorna struktura mesnih zajednica ukazuje na postojanje jasne razlike između centralnih, kompaktnih urbanih zona i perifernih, prostorno razuđenih područja, što ima značajan uticaj na planiranje sistema sakupljanja otpada.

## 5.2 Razvoj alternativnih rešenja

Na osnovu prethodno sprovedene analize prostorne strukture grada, raspodele stanovništva, tipologije stanovanja i gustine naseljenosti po mesnim zajednicama, definisani su ključni ulazni parametri za planiranje sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada.

Polazeći od primera iz relevantne literature i u skladu sa identifikovanim karakteristikama istraživanog područja, razvijena su tri alternativna rešenja koja će u daljoj analizi biti evaluirana primenom metoda višekriterijumskog odlučivanja (AHP, TOPSIS i PROMETHEE II):

- stacionarni sistem,
- mobilni sistem,
- sistem reciklažnih dvorišta.

Procena ukupne količine e-otpada predstavlja osnovu za dimenzionisanje sistema sakupljanja i definisanje kapaciteta infrastrukture za svako od razmatranih alternativnih rešenja. Na osnovu prosečne godišnje količine generisanog električnog i elektronskog otpada po stanovniku u Republici Srbiji, koja iznosi 9,3 kg/stanovniku (Iattoni i dr., 2023), kao i podataka o broju stanovnika Novog Sada, procenjena je ukupna količina e-otpada koju je potrebno sakupiti na teritoriji grada, a koja iznosi 3.071 tonu.

U nastavku je prikazana tabela sa ključnim ulaznim parametrima koji su korišćeni u daljoj analizi i proračunima, a koji predstavljaju osnovu za kvantifikaciju potreba sistema i dalje modeliranje alternativnih rešenja.

*Tabela 5.1 Osnovni ulazni parametri sistema za sakupljanje na nivou Novog Sada*

<b>Parametar</b>	<b>Vrednost</b>
Broj stanovnika	330.189
Gustina naseljenosti (stanovnika/km <sup>2</sup> )	3.739
Površina grada (km <sup>2</sup> )	129,4
Količina generisanog otpada (tona/godišnje)*	3.071

*\*Količina generisanog otpada = količina koju je potrebno sakupiti*

### 5.2.1 Alternativa 1 – Stacionarno sakupljanje (A1)

Stacionarni sistem sakupljanja električnog i elektronskog otpada predstavlja jedan od najčešće primenjivanih modela u urbanim sredinama, zasnovan na postavljanju kontejnera na unapred definisanim lokacijama. Efikasnost ovog sistema direktno zavisi od tehničkih karakteristika kontejnera, prostorne raspodele stanovništva, kao i količine generisanog otpada po stanovniku. Poseban značaj ima dimenzija otvora kontejnera, koja ograničava vrstu otpada koji se može odložiti, čime se utiče na ukupni obuhvat sistema.

Kako je standardna dimenzija otvora kontejnera namenjenih za odlaganje električnog i elektronskog otpada 50×20 cm, u ove kontejnere mogu biti odloženi samo uređaji čije spoljne dimenzije ne prelaze navedene vrednosti. Na osnovu izvršenog proračuna utvrđeno je da ovakav sistem omogućava sakupljanje približno 38% otpadne e-opreme što ukazuje na značajno ograničenje u pogledu vrste otpada koji se može prikupiti putem ovog modela.



Slika 5.4 Primer kontejnera za odlaganje električnog i elektronskog otpada sa dimenzijom otvora 50x20 cm

(<https://www.eimsbuetteler-nachrichten.de/e-container-fuer-eimsbuettel/>)

U cilju dimenzionisanja sistema, definisani su ključni ulazni parametri koji obuhvataju broj stanovnika, strukturu stanovanja, broj domaćinstava, kao i prosečne količine generisanog električnog i elektronskog otpada. Analiza pokazuje da jedan kontejner zapremine 3 m<sup>3</sup> može da primi oko 617,10 kg e-otpada. Istovremeno, procenjeno je da je za popunjavanje jednog kontejnera u periodu od dve nedelje potrebno približno 1.681 domaćinstvo u individualnom stanovanju, odnosno oko 94 zgrade u kolektivnom stanovanju. U tabeli 5.2 su prikazani detaljni ulazni podaci koji su korišćeni u procesu projektovanja stacionarnog sistema sakupljanja električnog i elektronskog otpada. Ovi podaci obuhvataju demografske karakteristike stanovništva, strukturu stanovanja, kao i parametre koji se odnose na generisanje i kapacitet odlaganja e-otpada. Posebno su značajni podaci o broju domaćinstava i zgrada, kao i prosečnom broju stanovnika po stambenoj jedinici, jer direktno utiču na procenu količine otpada koja se generiše u određenom vremenskom periodu.

Tabela 5.2 Ulazni podaci za definisanje Stacionarnog sistema

Parametar	Vrednost
Broj stanovnika u individualnom stanovanju	73.814
Broj stanovnika u kolektivnom stanovanju	256.375
Broj domaćinstava u individualnom stanovanju	27.262
Broj domaćinstava u kolektivnom stanovanju	132.746
Broj zgrada u kolektivnom stanovanju	5.310
Prosečan br. stanovnika po kući	2,708
Prosečan br. stanovnika po stanu	1,931

Količina e-otpada koja stane u 1 kontejner od 3 m <sup>3</sup> (kg)	617,10
Količina generisanog e-otpada po prosečnom stanovniku (kg/dnevno)	0,010
Broj stanovnika koji je potreban da napuni kontejner za 2 nedelje	4.553

Ovi podaci, u kombinaciji sa informacijama o površinama mesnih zajednica i gustini naseljenosti, predstavljaju osnov za dalje planiranje broja i prostornog rasporeda kontejnera na teritoriji grada. Gustina naseljenosti predstavlja ključni parametar za određivanje optimalnog rasporeda kontejnera, kao i učestalosti njihovog pražnjenja. U skladu sa tim, definisane su zone stanovanja sa različitim nivoima gustine naseljenosti, na osnovu kojih je izvršena procena optimalne međusobne udaljenosti kontejnera po jedinici površine. Na osnovu gustine naseljenosti i broja stanovnika koje jedan kontejner može da opsluži u okviru jednog ciklusa pražnjenja, određena je potrebna udaljenost između kontejnera u zavisnosti od tipa urbanog područja.

Razlikuju se četiri osnovne zone: centralna gradska zona, koja obuhvata i administrativne centre i karakteriše je gustina veća od 200 stanovnika po hektaru; zatim urbanistička područja sa visokom gustinom naseljenosti (101–200 st/ha); područja sa srednjom gustinom (30–100 st/ha); kao i područja sa niskom gustinom naseljenosti (manje od 30 st/ha). Za svaku od navedenih zona određena je odgovarajuća međusobna udaljenost kontejnera, što je prikazano u narednoj tabeli 5.3.

*Tabela 5.3 Procenjena adekvatna pozicija jednog kontejnera po jedinici površine*

	<b>Parametar gustine naseljenosti (st/ha)</b>	<b>Udaljenost između kontejnera (1 kontejner/ha)</b>
<b>Centralna gradska zona, administrativni centri</b>	>200	12,30
<b>Urbanistička područja sa visokom gustinom naseljenosti</b>	101-200	22,65
<b>Urbanistička područja sa srednjom gustinom naseljenosti</b>	30-100	79,80
<b>Urbanistička područja sa niskom gustinom naseljenosti</b>	<30	243,45

Na osnovu prethodno definisanih podataka i izvršenih proračuna potrebnog broja kontejnera, kako sa aspekta površine, tako i sa aspekta broja domaćinstava, kuća i zgrada, utvrđeno je da je na teritoriji Novog Sada potrebno postaviti ukupno 169 kontejnera.

U okviru ove alternative predviđena je upotreba tri kamiona, koji su namenjeni za manipulaciju i transport velikih kontejnera. Svaka operativna tura započinje dopremanjem praznog kontejnera, kojim se zamenjuje prethodno napunjen kontejner na lokaciji sakupljanja, čime se obezbeđuje kontinuitet sistema. Prema Nowakowski i Mrówczyńska (2013), prosečno vreme utovara na jednoj lokaciji iznosi 6,88 minuta, dok vreme istovara iznosi 2,15 minuta. Procenjeno ukupno vreme jedne ture, koje obuhvata kretanje od reciklažnog dvorišta do lokacije kontejnera i povratak, iznosi oko 25 minuta, pri čemu je prosečna dužina rute približno 15 km. Na osnovu navedenih parametara, kao i operativnih performansi karakterističnih za posmatrani region, utvrđeno je da je u toku jednog radnog dana, organizovanog u dve smene, moguće realizovati 26 tura. Imajući u vidu da je ukupno potrebno isprazniti 169 kontejnera, procenjeno je da je za njihovo potpuno pražnjenje potrebno 48 radnih dana na godišnjem nivou, što odgovara učestalosti od približno četiri ciklusa mesečno.

### 5.2.2 Alternativa 2 – Mobilno sakupljanje (A2)

U okviru mobilnog sistema sakupljanja pretpostavljeno je da se postiže maksimalna efikasnost prikupljanja, odnosno da se prikupi celokupna količina generisanog električnog i elektronskog otpada. Na osnovu pretpostavke da svaki stanovnik Novog Sada generiše 9,3 kg e- otpada godišnje, procenjena je ukupna godišnja količina otpada koja iznosi 3.071 tona.

Model podrazumeva korišćenje tri dostavna vozila, čiji je kapacitet, na osnovu procene autora i rezultata studije Nowakowski i dr. (2017), oko 1,432 tone otpada po turi. Na osnovu ukupne količine otpada i pretpostavke da se sakupljanje vrši pet dana u nedelji (261 radni dan godišnje), izračunato je da je dnevno potrebno prikupiti približno 11,77 tona otpada.

Proračunom je utvrđeno da bi, uz korišćenje tri vozila, svaki kombi trebalo da realizuje približno tri ture dnevno kako bi se obezbedilo potpuno sakupljanje otpada. Ulazni parametri korišćeni za definisanje mobilnog sistema prikazani su u Tabeli 5.4.

*Tabela 5.4 Ulazni parametri za definisanje Mobilnog sistema*

<b>Parametar</b>	<b>Vrednost</b>
Količina otpada (tona/godišnje)	3.071
Efikasnost prikupljanja (%)	100,00
Mesečno za sakupljanje (tona/mesečno)	255,896
Količina otpada po jednom vozilu (tona/vozilu)	1,432
Broj tura dnevno sa 3 kamiona pet dana u nedelji za 100% otpada	2,739

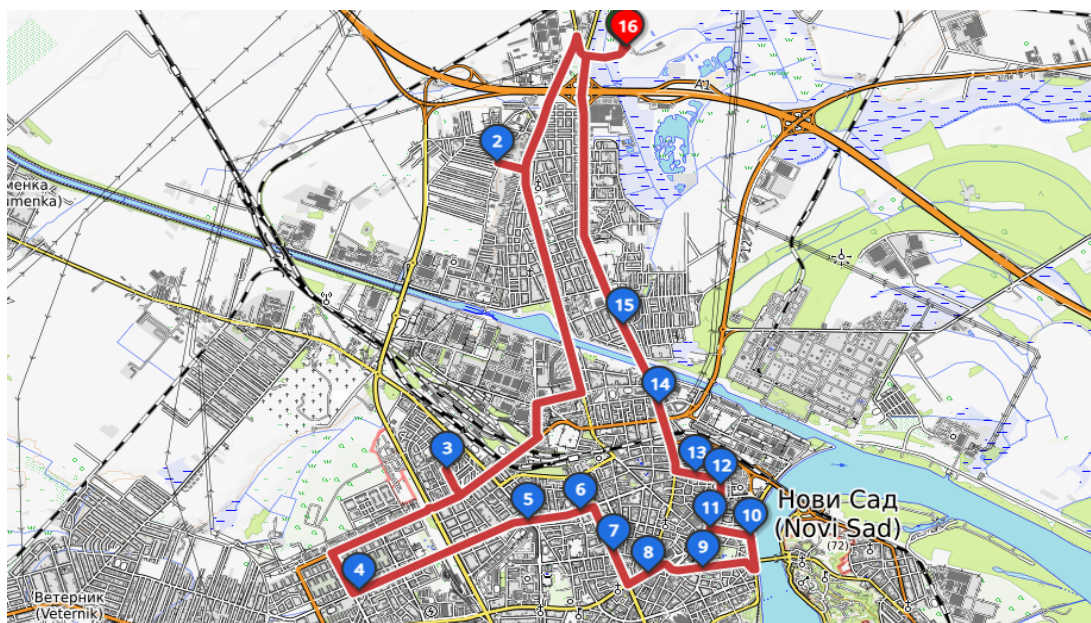
Za potrebe definisanja sistema, korišćen je alat dostupan na platformi *openrouteservice* (<https://maps.openrouteservice.org/>), putem kojeg su definisane potencijalne rute sakupljanja na teritoriji Novog Sada. Tačke označene brojevima predstavljaju maksimalan broj stanica koje bi jedno vozilo moglo da obiđe tokom jedne ture sakupljanja. Predložene rute obuhvataju tri prostorne celine: južni deo grada, severni deo grada i područje Petrovaradina i Sremske Kamenice. Ove rute su definisane u skladu sa postojećom infrastrukturom, koja obuhvata reciklažno dvorište na deponiji, kao i na osnovu dostupnih informacija o realizaciji i planiranju novih kapaciteta, uključujući izgradnju reciklažnog dvorišta u Futogu i planirano reciklažno dvorište u Petrovaradinu.

Slika 5.5 prikazuje potencijalnu rutu koja polazi od reciklažnog dvorišta u Futogu i obuhvata južni deo grada na bačkoj strani. Posmatrano područje prostire se od reciklažnog dvorišta u Futogu, duž Novosadskog i Futoškog puta, sve do Beogradskog keja.



Slika 5.5 Ruta mobilnog sakupljanja: reciklažno dvorište u Futog – južni deo grada  
(Autor, <https://maps.openrouteservice.org/>)

Slika 5.6 prikazuje rutu koja polazi od reciklažnog dvorišta lociranog na novosadskoj deponiji i obuhvata severni deo grada na bačkoj strani.



Slika 5.6 Ruta mobilnog sakupljanja: reciklažno dvorište na deponiji – severni deo grada  
(Autor, <https://maps.openrouteservice.org/>)

Slika 5.7 prikazuje potencijalnu rutu kamiona za mobilno sakupljanje električnog i elektronskog otpada u sremskom delu grada, koji je fizički odvojen Dunavom od bačkog dela.

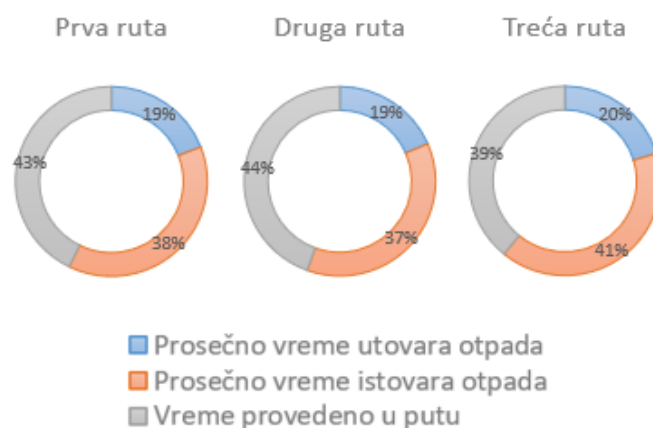
U skladu sa planiranim uspostavljanjem reciklažnog dvorišta u Petrovaradinu, predlaže se da se otpad sakupljen na teritoriji Petrovaradina i Sremske Kamenice transportuje u ovo postrojenje, čime se obezbeđuje logistička efikasnost sistema.



Slika 5.7 Ruta mobilnog sakupljanja: reciklažno dvorište Petrovaradin – Sremska Kamenica  
(Autor, <https://maps.openrouteservice.org/>)

Na osnovu definisanih ruta i operativnih parametara, utvrđeno je da je za realizaciju tri ture po vozilu dnevno potrebno ukupno 23,27 časova rada, dok ukupna dnevna pređena distanca iznosi 115,35 km. Na godišnjem nivou, ukupna pređena distanca iznosi 30.106,35 km.

Grafički prikaz raspodele vremenskih komponenti procesa sakupljanja otpada po pojedinačnim rutama, dat na Grafik 5.4, zasnovan je na podacima Nowakowski i Mrówczyńska (2013) koji se odnose na vreme utovara i istovara, kao i na proceni u pogledu trajanja jedne ture, koja zavisi od lokacije reciklažnog dvorišta. Iz prikaza se može uočiti da najveći deo vremena odlazi na transport između lokacija i reciklažnog dvorišta, zatim na operacije istovara, dok utovar na lokacijama čini najmanji deo ukupnog vremena. Ovakva struktura vremena ukazuje na značajan uticaj prostorne organizacije sistema i dužine transportnih ruta na ukupnu efikasnost mobilnog sistema sakupljanja.



*Grafik 5.4 Komparativna analiza vremenskih komponenti procesa sakupljanja otpada po transportnim rutama*

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da mobilni sistem sakupljanja omogućava visok stepen obuhvata generisanog električnog i elektronskog otpada, uz fleksibilnost u organizaciji transportnih ruta. Međutim, ovakav pristup zahteva značajne operativne resurse u pogledu vremena, angažovanja vozila i pređenih distanci, što može uticati na povećanje troškova sistema. Struktura vremenskih komponenti ukazuje da transport zauzima dominantan deo ukupnog vremena, što dodatno potvrđuje značaj optimizacije ruta za unapređenje efikasnosti mobilnog sistema.

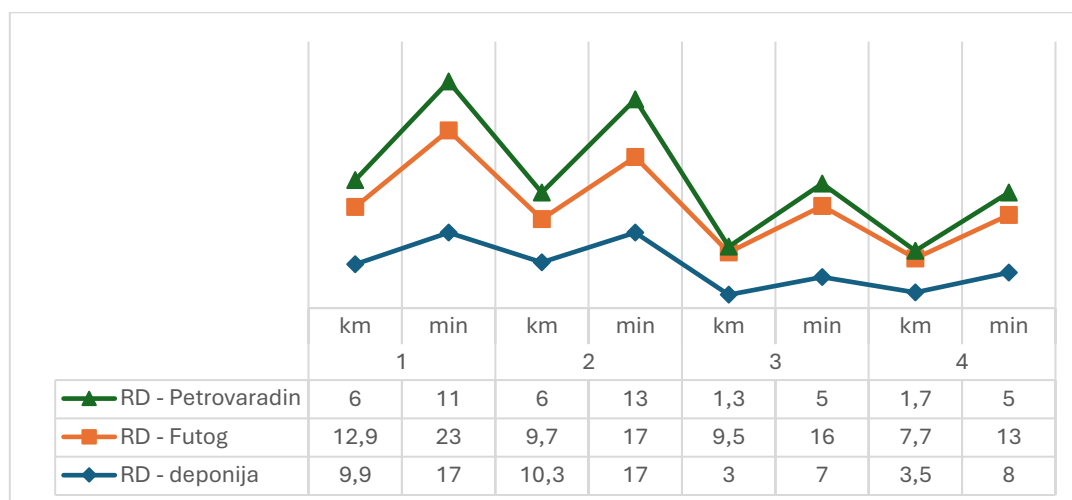
### 5.2.3 Alternativa 3 – Reciklažna dvorišta (A3)

U skladu sa planovima razvoja grada Novog Sada, predviđeno je uspostavljanje tri reciklažna dvorišta. Jedno reciklažno dvorište već postoji na teritoriji deponije, drugo je u fazi izgradnje u Futogu, dok je treće planirano na teritoriji Petrovaradina. Prema važećim planskim dokumentima, reciklažna dvorišta rade pet dana u nedelji.

Za potrebe ovog istraživanja pretpostavljeno je da je za funkcionisanje jedne smene u okviru jednog reciklažnog dvorišta potrebno angažovati dva radnika, od kojih je jedan zadužen za kontrolu i prijem na ulazu, dok je drugi odgovoran za preuzimanje i merenje otpada.

U okviru ove alternative nije predviđeno angažovanje komunalnih preduzeća za sakupljanje otpada, već se polazi od pretpostavke da članovi domaćinstava samostalno transportuju otpadnu električnu i elektronsku opremu do najbližeg reciklažnog dvorišta.

Za potrebe određivanja prosečne pređene distance i vremena putovanja, odabrane su po četiri reprezentativne tačke različite udaljenosti za svako od tri planirana reciklažna dvorišta, u skladu sa prostornom pripadnošću delova grada najbližem reciklažnom dvorištu. Rezultati analize prikazani su na Grafik 5.5, gde se može uočiti varijacija u pređenoj distanci i vremenu putovanja u zavisnosti od lokacije domaćinstva i pripadajućeg reciklažnog dvorišta.



Grafik 5.5 Pređena distanca i vreme putovanja u zavisnosti od lokacije domaćinstva i pripadajućeg reciklažnog dvorišta

Na osnovu prikazanih vrednosti procenjeno je da prosečna udaljenost do reciklažnog dvorišta iznosi približno 7,5 km, dok prosečno vreme putovanja iznosi približno 13 minuta, što se u okviru ovog modela smatra prihvatljivim za sopstveni transport otpada od strane domaćinstava.

U okviru analiziranog sistema polazi se od pretpostavke da domaćinstva privremeno skladište električni i elektronski otpad u okviru svojih stambenih jedinica, uz njegovo periodično odlaganje na lokacijama za reciklažu, u proseku dva puta godišnje, korišćenjem sopstvenih transportnih sredstava.

### 5.3 Definisane kriterijuma i podkriterijuma za ocenu alternativa

U literaturi je opšteprihvaćen stav da na efikasnost sistema upravljanja otpadom utiče veliki broj faktora, te da uspešnost njegove implementacije zavisi od načina upravljanja, logističkih i infrastrukturnih rešenja, uz istovremeno uvažavanje ekonomskih i socijalnih kriterijuma (Wilson i dr., 2012; Guerrero i dr., 2013; Kumar i Dixit, 2018). Poseban značaj ima prihvatanje sistema od strane lokalnog stanovništva, što direktno utiče na njegovu operativnu efikasnost i finansijsku održivost (Saphores i dr., 2006; Wilson i dr., 2006).

U tom kontekstu, uspešnost sistema ne zavisi isključivo od investicionih i operativnih troškova koje snosi kompanija za sakupljanje otpada, već u značajnoj meri i od troškova koje snose krajnji korisnici, kao i njihove spremnosti da aktivno učestvuju u procesu sakupljanja i pravilnog odlaganja otpada (Saphores i dr., 2006; Direktiva 2012/19/EU).

U okviru doktorske teze, identifikovano je pet kriterijuma kao ključnih faktora odlučivanja, kao i 14 podkriterijuma koji su korišćeni za njihovu kvantifikaciju i detaljniju procenu alternativa.

Podkriterijumi izraženi kvantitativno zadržavaju svoje izvorne numeričke vrednosti, dok je kvalitativno definisanim podkriterijumima neophodno dodeliti kvantitativna obeležja radi njihove dalje obrade u okviru višekriterijumske analize. U tu svrhu, ekspertske procene se kvantifikuju primenom diskretnih ordinalnih skala.

U okviru PROMETHEE II metode ne postoji striktno definisana univerzalna skala za ocenjivanje kriterijuma, kao što je to slučaj sa Saaty-jevom skalom u AHP metodi. Ipak, u praksi se često primenjuju diskretne ordinalne skale (npr. od 1 do 5 ili od 1 do 9) za vrednovanje kvalitativnih kriterijuma. Ove skale same po sebi nemaju direktno značenje u procesu odlučivanja, već se njihova interpretacija vrši kroz odgovarajuće funkcije preferencije, koje transformišu razlike između alternativa u stepen preferencije u intervalu (0,1) (Brans i dr., 1986; Brans i Mareschal, 2005).

Za razliku od toga, u TOPSIS metodi vrednosti kriterijuma se ne koriste direktno, već se transformišu kroz postupke normalizacije i ponderisanja, čime se obezbeđuje njihova međusobna uporedivost i omogućava određivanje udaljenosti alternativa od idealnog i anti-idealnog rešenja (Hwang i Yoon, 1981; Behzadian i dr., 2010; Behzadian i dr., 2012).

U okviru doktorske disertacije kvalitativni podkriterijumi ocenjeni su korišćenjem diskretne ordinalne skale od 1 do 5, pri čemu vrednost 1 označava najniži, a vrednost 5 najviši nivo performansi.

*Tabela 5.5 Skala za ocenjivanje kvalitativnih podkriterijuma*

<b>Vrednost</b>	<b>Značenje</b>	<b>Interpretacija</b>
<b>1</b>	veoma loše	najniži nivo performanse
<b>2</b>	loše	nizak nivo performanse
<b>3</b>	srednje	prosečan nivo performanse
<b>4</b>	dobro	visok nivo performanse
<b>5</b>	veoma dobro	najviši nivo performanse

U nastavku su detaljno opisani svi podkriterijumi, uz tabelarni prikaz njihovih kvantitativnih i kvalitativnih obeležja, koji čine osnovu za konstrukciju matrice odlučivanja. Kvantitativni podkriterijumi izraženi su numerički, dok su kvalitativni podkriterijumi predstavljeni deskriptivnim ocenama, koje se kvantifikuju primenom ordinalne skale, čime se obezbeđuje njihova dalja obrada u okviru TOPSIS i PROMETHEE II metoda.

### 5.3.1 Finansijski aspekt

U okviru finansijskog aspekta je bilo potrebno obuhvatiti ekonomske i organizacione parametre tri razmatrana sistema za sakupljanje otpada. Analiza obuhvata investicione troškove i godišnje operativne troškove. Investicioni troškovi uključuju nabavku kontejnera i kamiona u stacionarnom sistemu, kupovinu kombi vozila u mobilnom sistemu, kao i izgradnju i opremanje reciklažnih dvorišta u trećem sistemu, dok operativni troškovi obuhvataju zarade radnika, troškove goriva i troškove amortizacije po stopi od 2%.

Stacionarni sistem, koji koristi tri kamiona, zahteva veća početna ulaganja u odnosu na mobilni sistem. Investicioni troškovi iznose 1.504.448 evra, dok su godišnji operativni troškovi 95.881 evra. Sistem zahteva angažovanje 12 radnika i funkcioniše tokom 48 radnih dana godišnje. Ukupni troškovi alternative A1 koji iznose 1.600.329 evra izračunavaju se primenom sledeće formule:

$$C_{A1} = C_p + C_c + 2\%C_c + C_t + 2\%C_t + C_{tr}$$

gde je:

$C_p$  – trošak osoblja,

$C_c$  – trošak nabavke kontejnera,

$2\%C_c$  – trošak amortizacije kontejnera,

$C_t$  – trošak nabavke kamiona,

$2\%C_t$  – trošak amortizacije kamiona,

$C_{tr}$  – trošak transporta.

Mobilni sistem, koji podrazumeva korišćenje tri kombi vozila, ima najniže investicione troškove u iznosu od 229.578 evra. Zbog većeg broja zaposlenih (18 radnika) i većeg broja radnih dana tokom godine (261), operativni troškovi iznose 292.901 evra. Ukupni godišnji troškovi ovog sistema iznose 522.479 evra, što ga čini finansijski najpovoljnijom alternativom. Ukupni troškovi alternative A2 računaju se prema formuli:

$$C_{A2} = C_p + C_v + 2\%C_v + C_t$$

gde je:

$C_p$  – trošak osoblja,

$C_v$  – trošak nabavke kombi vozila,

$2\%C_v$  – trošak amortizacije kombi vozila,

$C_t$  – trošak transporta.

Sistem reciklažnih dvorišta predstavlja infrastrukturno najzahtevnije rešenje, sa investicionim troškovima od 5.683.564 evra. Iako zahteva manji broj zaposlenih (6 radnika) i ima umerene operativne troškove od 200.667 evra, visoka početna ulaganja značajno utiču na ukupne troškove sistema. Ukupni troškovi dostižu 5.884.231 evra, čime se ova alternativa izdvaja kao najskuplje rešenje. Ukupni troškovi alternative A3 određuju se prema izrazu:

$$C_{A3} = C_i + C_o$$

gde je:

$C_i$  – investicioni trošak,

$C_o$  – operativni trošak.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da mobilni sistem ima najniže ukupne troškove, dok sistem reciklažnih dvorišta zahteva najveća investiciona ulaganja. Stacionarni sistem predstavlja kompromis između ova dva pristupa i zauzima srednju poziciju među analiziranim alternativama. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za dalje poređenje alternativa u okviru višekriterijumske analize, pri čemu su definisani podkriterijumi F1 – investicioni troškovi i F2 – operativni troškovi.

*Tabela 5.6 Vrednosti podkriterijuma u okviru finansijskog aspekta za razmatrane alternative*

<b>Alternativa</b>	<b>F1 - Investicioni troškovi (EUR)</b>	<b>F2 - Operativni troškovi (EUR)</b>
<b>Stacionarni sistem</b>	1.504.448	95.881
<b>Mobilni sistem</b>	229.578	292.901
<b>Reciklažna dvorišta</b>	5.683.564	200.667

### 5.3.2 Efikasnost sistema

#### **Količina sakupljenog otpada (E1)**

Prilikom odabira odgovarajućeg sistema sakupljanja za određeno područje neophodno je uzeti u obzir nivo pokrivenosti uslugom, kao i kvalitet prikupljene opreme. Prema istraživanju sprovedenom u Hamburgu (Hobohm, 2017), visok kvalitet sakupljenih proizvoda obezbeđuje se primenom sistema depo-kontejnera, dok se ostvarenje propisanih kvota prikupljanja može postići uvođenjem sistema reciklažnih dvorišta. Rezultati ove doktorske disertacije pokazuju da se putem depo-kontejnera može prikupiti oko 38% odbačene opreme, odnosno 1443 tone. Ovakav rezultat posledica je ograničenih dimenzija otvora na kontejnerima, što uslovljava odlaganje uglavnom manjih uređaja. Sa druge strane, pretpostavka je da mobilni sistem i sistem reciklažnih dvorišta omogućavaju prikupljanje 100% otpadne električne i elektronske opreme, odnosno približno 3.071 tona.

#### **Potrebno vreme za sakupljanje (E2)**

Pri definisanju ovog podkriterijuma za stacionarni i mobilni sistem razmatrano je ukupno godišnje radno angažovanje kompanije za sakupljanje otpada potrebno za prikupljanje celokupne količine otpada. Stacionarni sistem je najbolji u ovom pogledu jer se sakupljanje obavlja 4 puta u toku meseca. Nasuprot tome, sistem reciklažnih dvorišta funkcioniše pet dana u nedelji i omogućava prijem različitih tokova otpada, uključujući i e-otpad. Za ovu opciju proračun je izvršen na osnovu ukupnog broja domaćinstava i vremena potrebnog za dopremanje otpada, pri čemu je pretpostavljeno da se odlaganje vrši dva puta godišnje.

### **Pokrivenost uslugom sakupljanja (E3)**

Prema Hobohm (2017), najveći nivo pokrivenosti ostvaruje se primenom sistema depokontejnera, pri čemu se pokrivenost smanjuje sa povećanjem udaljenosti kontejnera. Međutim, u doktorskoj disertaciji ovaj sistem predstavlja srednje povoljno rešenje, jer nije moguće odlaganje svih vrsta opreme u kontejnere. Najviši nivo pokrivenosti ostvaruje mobilni sistem, budući da vozila za sakupljanje dolaze direktno na adresu domaćinstva koje odlaže otpadnu električnu i elektronsku opremu. Nasuprot tome, sistem reciklažnih dvorišta ima najniži nivo pokrivenosti, jer se od građana zahteva da samostalno transportuju opremu do lokacije koja je udaljena oko 7,5 km od mesta stanovanja.

*Tabela 5.7 Vrednosti podkriterijuma u okviru efikasnosti sistema za razmatrane alternative*

<b>Alternativa</b>	<b>E1 - Količina sakupljenog otpada (t)</b>	<b>E2 - Potrebno vreme za sakupljanje (h)</b>	<b>E3 - Pokrivenost uslugom sakupljanja</b>
<b>Stacionarni sistem</b>	1.443	2.144	Prosečno
<b>Mobilni sistem</b>	3.797	6.073	Veoma dobro
<b>Reciklažna dvorišta</b>	3.797	135.118	Veoma loše

### 5.3.3 Socijalni aspekt

#### **Nova radna mesta (S1).**

Stacionarni sistem predviđa angažovanje 12 radnika, pri čemu jedan radnik po kamionu koji je ujedno vozač, a obavlja i manipulaciju kontejnerima. Sakupljanje otpada organizovano je na više centralnih lokacija u gradu, u dve smene sa po tri kamiona. Mobilni sistem zahteva ukupno 18 radnika, odnosno po jednog vozača i jednog pomoćnog radnika na vozilu, koji

učestvuje u utovaru e-otpada. Sakupljanje se realizuje po principu „od vrata do vrata“, takođe u dve smene sa tri vozila. U sistemu reciklažnih dvorišta predviđeno je angažovanje po dva radnika u svakom od tri reciklažna dvorišta. Njihova uloga obuhvata prijem otpada, kontrolu korisnika i usmeravanje građana pri manipulaciji otpadom. Za razliku od prethodna dva sistema, reciklažna dvorišta funkcionišu u jednoj smeni.

### **Otpornost sistema na uticaj neformalnog sektora (S2)**

Društveno-ekonomske prepreke koje je potrebno uzeti u obzir pri definisanju sistema odnose se na konkurenciju između formalnog i neformalnog sektora. Problem neformalnog sektora posebno je izražen u Novom Sadu, gde dolazi do oštećenja kontejnera i rasipanja otpada, dok se izdvajanje sekundarnih sirovina iz kontejnera javnog komunalnog sistema smatra nezakonitim prisvajanjem imovine. U tom kontekstu, stacionarni sistem je najosetljiviji na uticaj neformalnog sektora. Mobilni sistem može biti ugrožen samo u slučajevima kada se otpad ostavlja bez nadzora na javnim površinama. Nasuprot tome, sistem reciklažnih dvorišta u velikoj meri eliminiše ovaj rizik.

### **Komfor građana (S3)**

Za potrebe definisanja ovog indikatora sprovedena je anketa na teritoriji grada Novog Sada, u kojoj je učestvovalo ukupno 140 ispitanika. Ispitanici su ocenjivali koji sistem sakupljanja im najviše odgovara, pri čemu je bilo potrebno dodeliti ocenu od 1 do 4 (1 – najpoželjnija opcija, 4 – najmanje poželjna). Ponuđene opcije obuhvatale su: odlaganje otpada u reciklažnom dvorištu, preuzimanje otpada na adresi na poziv korisnika, preuzimanje po unapred definisanom mesečnom rasporedu, kao i korišćenje kontejnera za manje uređaje uz alternativne opcije za krupniji otpad.

Rezultati ankete pokazuju da je kao najpovoljnija opcija ocenjena usluga preuzimanja otpada na adresi na poziv operatera (srednja vrednost 1,89), zatim preuzimanje po fiksnom rasporedu (2,04). Korišćenje kontejnera za manje uređaje zauzima srednju poziciju (2,28), dok je najmanje prihvaćena opcija samostalno odnošenje otpada u reciklažno dvorište (3,00). Dobijeni rezultati ukazuju na to da građani preferiraju sisteme koji ne zahtevaju dodatni lični angažman i omogućavaju veću dostupnost usluge. Rezultati su prikazani u Tabeli 5.8:

*Tabela 5.8 Rezultati ankete među građanima Novog Sada*

	Minimum	Maksimum	Srednja vrednost	Standardna devijacija
<b>Pitanje 1</b>	1	4	3,00	1,23
<b>Pitanje 2</b>	1	4	1,89	0,99
<b>Pitanje 3</b>	1	4	2,04	0,90
<b>Pitanje 4</b>	1	4	2,28	1,06

*Tabela 5.9 Vrednosti podkriterijuma u okviru socijalnog aspekta za razmatrane alternative*

Alternativa	S1 - Nova radna mesta	S2 - Otpornost sistema na uticaj neformalnog sektor	S3 - Komfor građana
<b>Stacionarni sistem</b>	12	Loše	Dobro
<b>Mobilni sistem</b>	18	Prosečno	Veoma dobro
<b>Reciklažna dvorišta</b>	6	Veoma dobro	Loše

#### 5.3.4 Infrastrukturni aspekt

##### **Mogućnost nadogradnje i kompatibilnosti sa postojećim sistemom (I1)**

Na teritoriji grada Novog Sada trenutno je izgrađeno jedno reciklažno dvorište koje se nalazi na lokaciji deponije, dok je drugo u fazi izgradnje u Futogu, a treće je planirano u Petrovaradinu. Ostala dva razmatrana modela nisu obuhvaćena dugoročnim planovima razvoja sistema upravljanja otpadom, iako na tržištu postoji privatni sektor koji sakuplja e-otpada po principu „od vrata do vrata“.

##### **Jednostavnost logistike i transporta (I2)**

U zavisnosti od gustine naseljenosti i izabranog modela, menjaju se zahtevi u pogledu tipa vozila i planiranja ruta. U stacionarnom sistemu koriste se kamioni, čije je kretanje i manipulacija otežana u gusto naseljenim zonama, naročito u centru grada i administrativnim područjima. Nasuprot tome, mobilni sistem se zasniva na upotrebi kombi vozila, koja su prilagodljivija različitim delovima grada, ali zahtevaju pažljivo planiranje i optimizaciju ruta kako bi se obezbedila efikasnost sistema. U sistemu reciklažnih dvorišta ovaj problem je prevaziđen jer ne postoji kompanija koja vrši transport i logistiku, već građani samostalno donose otpad.

### Jednostavnost sabirnog mesta (I3)

Zahtevnost organizacije sabirnih mesta varira u zavisnosti od izabranog sistema. Najviši nivo kompleksnosti karakteriše sistem reciklažnih dvorišta, s obzirom na potrebu ispunjavanja infrastrukturnih, tehničkih i zakonskih zahteva (uređenje lokacije, kontrolisan pristup, bezbedno rukovanje različitim tokovima otpada, evidencija i nadzor). Postavljanje kontejnera na unapred definisanim lokacijama u urbanom prostoru predstavlja srednje zahtevan sistem, jer podrazumeva izbor adekvatnih lokacija, redovno održavanje, čišćenje i kontrolu korišćenja, kao i rešavanje potencijalnih problema poput nepropisnog odlaganja otpada. Mobilni sistem sakupljanja ima najmanju kompleksnost u pogledu sabirnog mesta, budući da se preuzimanje otpada vrši direktno na lokaciji korisnika, bez potrebe za stalnom infrastrukturom. Međutim, ovaj sistem zahteva dobru organizaciju i koordinaciju kako bi se obezbedila efikasna realizacija sakupljanja.

*Tabela 5.10 Vrednosti podkriterijuma u okviru infrastrukturnog aspekta za razmatrane alternative*

<b>Alternativa</b>	<b>I1 - Mogućnost nadogradnje i kompatibilnosti sa postojećim sistemom</b>	<b>I2 - Jednostavnost logistike i transporta</b>	<b>I3 - Jednostavnost sabirnog mesta</b>
<b>Stacionarni sistem</b>	Veoma loše	Prosečno	Loše
<b>Mobilni sistem</b>	Prosečno	Loše	Veoma dobro
<b>Reciklažna dvorišta</b>	Veoma dobro	Dobro	Veoma loše

#### 5.3.5 Uticaj sistema za sakupljanje na životnu sredinu i zdravlje ljudi

### Emisije u vazduh iz izduvnih gasova vozila za transport otpada (Z1)

Za procenu emisija zagađujućih materija iz vozila korišćen je COPERT model primenom Tier 3 pristupa. Ovaj pristup omogućava detaljan proračun emisija na osnovu tipa vozila, vrste goriva, emisijskog standarda i pređene distance. Ukupna emisija izduvnih gasova izračunata je kao zbir emisija tokom stabilnog rada motora i emisija tokom hladnog starta. Faktori emisije preuzeti su iz COPERT baze podataka i izraženi su u gramima po kilometru, dok su ukupne emisije dobijene množenjem faktora emisije sa ukupnom pređenom distancom vozila.

*Podaci o hidrometeorološkim uslovima*

U proračunu su korišćeni osnovni hidrometeorološki podaci za Novi Sad tokom 2025. godine, preuzeti iz Meteorološkog godišnjaka za 2024. godinu (RHMZ, 2025). Podaci obuhvataju maksimalne i minimalne mesečne temperature vazduha, kao i prosečnu relativnu vlažnost vazduha. Analiza podataka ukazuje na izražene sezonske razlike klimatskih uslova, pri čemu su najviše temperature zabeležene tokom letnjih meseci, posebno u avgustu (35,1 °C), dok su najniže temperature registrovane tokom zimskog perioda, naročito u januaru (-1,1 °C). Takođe, najveća relativna vlažnost vazduha prisutna je tokom zimskih meseci, dok su najniže vrednosti zabeležene tokom leta.

Navedeni ulazni podaci korišćeni su radi definisanja prosečnih mesečnih uslova rada vozila. Na osnovu njih procenjuje se uticaj hladnog starta na emisije vozila, kao i uticaj korišćenja klima-uređaja, kako za potrebe hlađenja tokom letnjeg perioda, tako i grejanja tokom zimskih meseci, uključujući i regulaciju vlažnosti vazduha tokom cele godine.

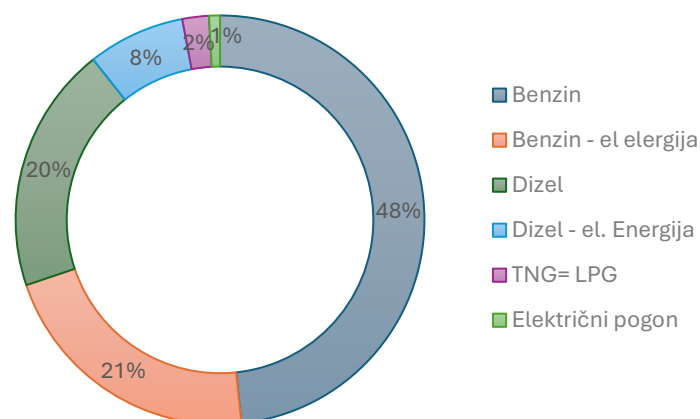
*Podaci o voznom parku*

U ovoj doktorskoj tezi je predviđena upotreba putničkih automobila za sopstveni prevoz otpada od mesta stanovanja do reciklažnih dvorišta, teška vozila bi bila korišćena u scenariju sa depo kontejnerima dok bi laka komercijalna vozila bila korišćena u scenariju sa mobilnim sakupljanjem. U tabeli 5.11 su prikazane karakteristike i broj vozila, s tim da su za putnička vozila date detaljnije specifikacije u nastavku teksta.

*Tabela 5.11 Podaci o voznom parku korišćeni za modelovanje*

<b>Alternativa</b>	<b>Tip vozila</b>	<b>Gorivo i tehnologija kontrole emisije</b>	<b>Broj vozila</b>
<b>Stacionarni sistem</b>	Teška vozila (>20-26 t)	Dizel, Euro VI A/B/C	3
<b>Mobilni sistem</b>	Laka komercijalna vozila (< 3.5 t)	Dizel, N1-1, Euro 6 a/b/c	3
<b>Sistem reciklažnih dvorišta</b>	Putnička vozila	Razno	160.008

Na osnovu analize tržišta i statističkih podataka procenjene su vrednosti broja putničkih vozila prema vrsti pogonskog goriva prisutnih na teritoriji Srbije.



Grafik 5.6 Raspodela putničkih vozila prema vrsti pogonskog goriva (SAUVD, 2025)

Međutim, za potrebe softvera je potrebna specifična podela na različite tipove goriva. Kako je ukupna količina domaćinstava koja je pokrivena uslugom sakupljanja otpada u Novom Sadu 160.008, a na osnovu prethodne podele na zastupljenost automobila prema vrsti goriva i kategorijama koje zahteva softver urađena je transakciona analiza zaliha. Računato je da će svako domaćinstvo dolaziti dva puta u toku godine do reciklažnog dvorišta i u skladu sa tim izračunata srednja vrednost pređenog puta godišnje.

Prosečna godišnja pređena kilometraža putničkog automobila u Republici Srbiji iznosi približno 20.000 km, što je relativno niska vrednost u poređenju sa pojedinim zapadnoevropskim zemljama, kao što je Holandija, gde godišnja kilometraža prelazi 29.000 km. Na osnovu dostupnih podataka, Srbija se nalazi u donjoj polovini evropskih zemalja po ovom pokazatelju (Eurostat, 2024; EEA, 2023). S obzirom na to da je prosečna starost putničkih automobila u R. Srbiji visoka (oko 16,9 godina), ukupna pređena kilometraža tokom životnog veka vozila je značajna i često prelazi 200.000 km za starija vozila (Agencija za bezbednost saobraćaja, 2023). U doktorskoj disertaciji je predviđena kupovina novih vozila za preostala dva sistema, pa je kumulativna aktivnost tokom života minimalna i iznosi 100 km. Sledeća tabela 5.12 sadrži podatke potrebne za unos u softver.

Tabela 5.12 Podaci potrebni za modelovanje u COPERT softveru

Vrsta vozila	Vrsta pogonskog goriva	Zalihe	Srednja vrednost pređenog puta (km/god)	Kumulativna aktivnost tokom života (km)
Putnička vozila	Benzin	3222,161	29,500	200.000,000
	Benzin PHEV	955,603	29,500	200.000,000

	Benzin Hibrid	955,603	29,500	200.000,000
	Dizel	1302,065	29,500	200.000,000
	Dizel PHEV	3072,154	29,500	200.000,000
	TNG Biogorivo	70,004	29,500	200.000,000
	CNG biogorivo	70,004	29,500	200.000,000
	Električni automobil na baterije	86,004	29,500	200.000,000
<b>Laka komercijalna vozila</b>	Dizel	3,000	10035,450	100,000
<b>Teška vozila</b>	Dizel	3,000	18.408	100,000

PHEV - plug-in hibridno električno vozilo na benzinski/dizel pogon; TNG - tečni naftni gas;  
CNG - komprimovani prirodni gas

Itrip je srednja pređena udaljenost u kilometrima, gde pri izračunavanju emisija, „putovanje“ treba posmatrati kao segment putovanja definisan između paljenja – gašenja - paljenja. Metodologija hladnog starta uključena u ovaj Vodič primenljiva je samo na putničke automobile i laka komercijalna vozila. U nastavku su date vrednosti za dužinu „putovanja“ i trajanje putovanja koje su korišćene u proračunu.

*Tabela 5.13 Prosečna dužina i trajanje putovanja*

Kategorija	Dužina putovanja (km)	Trajanje putovanja (sati)
<b>Putnička vozila</b>	14,800	0,300
<b>Laka komercijalna vozila</b>	10,100	0,400

Naredni korak je određivanje raspodele (strukture učešća u %) pređenog puta za svaku kategoriju vozila po tipu saobraćajnica na kojima je pređeni put realizovan (Slika 5.8 ). Na taj način se i emisija vezuje za kategorije saobraćajnica. Za potrebe doktorske disertacije definisane su prosečne brzine za svaku od kategorija vozila i vrste saobraćajnice. Za sva vozila je u urbanim sredinama u špicu saobraćajne gužve dodeljena brzina od 15 km/h, dok je van špica ta brzina 35 km/h. Dok je u vangradskim područjima brzina 60 km/h. Međutim, minimalna i maksimalna brzina su različite za putnička vozila (5 – 130 km/h), za laka komercijalna vozila (10 – 130 km/h), a za teška vozila (5 – 80 km/h).

Vehicle				Share				Speed			
Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Urban Peak [%]	Urban Off Peak [%]	Rural [%]	Highway [%]	Urban Peak [km/h]	Urban Off Peak [km/h]	Rural [km/h]	Highway [km/h]
Passenger Cars	Battery el...	Medium	Euro 6 a/b/c	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Medium	Euro 6 d-temp	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Medium	Euro 6 d/e	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Medium	Euro 7	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Large-SUV-Executive	Euro 6 a/b/c	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Large-SUV-Executive	Euro 6 d-temp	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Large-SUV-Executive	Euro 6 d/e	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Passenger Cars	Battery el...	Large-SUV-Executive	Euro 7	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Light Comme...	Diesel	N1-I	Euro 6 a/b/c	45%	45%	10%	0%	15	35	60	
Heavy Duty ...	Diesel	Rigid 20 - 26 t	Euro VI A/B/C	45%	45%	10%	0%	15	35	60	

Slika 5.8 Parametri saobraćajnog toka i vozila u modelu

Ukupna emisija izduvnih gasova proračunava se kao zbir emisija koje nastaju tokom rada motora na radnoj temperaturi i emisija ostvarenih u fazi hladnog starta, odnosno u periodu dok motor ne dostigne radnu temperaturu. Iz tog razloga neophodno je jasno razlikovati emisije u stabilizovanom režimu rada motora (pri radnoj temperaturi) od emisija u prelaznoj fazi zagrevanja, tokom koje dolazi do značajnog povećanja količine i koncentracije zagađujućih supstanci. Usled nedostatka podataka o specifikacijama goriva kao što su energetski sadržaj i gustina goriva koje se koristi u Srbiji uvrštene su vrednosti koje predlaže softver. U okviru opcije je dat i odnos atoma vodonika i ugljenika (odnos H:C), kao i odnos O:C koji u COPERT modelu predstavlja odnos sadržaja kiseonika i ugljenika u gorivu i koristi se za preciznije određivanje emisija CO<sub>2</sub>, posebno kod goriva koja sadrže kiseonik, kao što su biogoriva. Takođe, softver obezbeđuje i preporučene vrednosti za sadržaj teških metala u gorivima. Na slici 5.9 prikazane su vrednosti ovih odnosa, kao i sadržaj teških metala u zavisnosti od tipa goriva, koje su korišćene u proračunu ukupnih emisija u okviru ove doktorske disertacije.

Primary Fuel	Specifications				Content In Species										
	Energy Content [MJ/kg]	H:C Ratio [-]	O:C Ratio [-]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	S [ppm wt]	Pb [ppm wt]	Cd [ppm wt]	Cu [ppm wt]	Cr [ppm wt]	Ni [ppm wt]	Se [ppm wt]	Zn [ppm wt]	Hg [ppm wt]	As [ppm wt]	
Petrol Grade 1	43.774	1.86	0	750	0	0.0016	0.0002	0.0045	0.0063	0.0023	0.0002	0.033	0.0087	0.0003	
Petrol Grade 2	43.774	1.86	0	750	0	0.0016	0.0002	0.0045	0.0063	0.0023	0.0002	0.033	0.0087	0.0003	
Diesel Grade 1	42.695	1.86	0	840	0	0.0005	0.00005	0.0057	0.0085	0.0002	0.0001	0.018	0.0053	0.0001	
Diesel Grade 2	42.695	1.86	0	840	0	0.0005	0.00005	0.0057	0.0085	0.0002	0.0001	0.018	0.0053	0.0001	
LPG Grade 1	46.564	2.525	0	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LPG Grade 2	46.564	2.525	0	520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CNG	48	4	0	175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Biodiesel	37.3	1.95	0.11	890	0	0.0005	0.00005	0.0057	0.0085	0.0002	0.0001	0.018	0.0053	0.0001	
Bioethanol	28.8	3	0.5	794	0	0.0016	0.0002	0.0045	0.0063	0.0023	0.0002	0.033	0.0087	0.0003	
Biogas	48	4	0	175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Slika 5.9 Specifikacije goriva i sadržaj zagađujućih materija u modelu

Na slici 5.10 prikazani su podaci koji se odnose na specifikacije maziva, uključujući odnos atoma vodonika i ugljenika (H:C), sadržaj teških metala i odnos kiseonika i ugljenika (O:C). Međutim, kao i u slučaju parametara za goriva, ove vrednosti predstavljaju podrazumevane vrednosti koje se mogu korigovati ukoliko su dostupni precizniji podaci. Takođe, navedeni parametri mogu varirati u zavisnosti od godine i karakteristika korišćenih maziva.

Lubricant Type	Content In Species										Specifications	
	S [ppm wt]	Pb [ppm wt]	Cd [ppm wt]	Cu [ppm wt]	Cr [ppm wt]	Ni [ppm wt]	Se [ppm wt]	Zn [ppm wt]	Hg [ppm wt]	As [ppm wt]	H:C Ratio [-]	O:C Ratio [-]
LIGHT_DUTY	0	0.0332	4.56	778	19.2	31.89	4.54	450.2	0	0	2.08	0

Slika 5.10 Specifikacije maziva i sadržaj zagađujućih elemenata u modelu

Podkriterijum emisije zagađujućih materija izražen je kao udeo (%) pojedinih polutanata i prikazane su u tabeli 5.14.

Tabela 5.14 Procentualni udeo emisija zagađujućih materija po alternativama

Zagađujuće materije	A1	A2	A3
	(%)		
<b>Grupa zagađujućih materija</b>	8,393	0,797	90,810
<b>Teški metali</b>	3,843	0,636	95,521
<b>Alifatični ugljovodonici (alkani)</b>	1,936	0,134	97,930
<b>Alifatični ugljovodonici (alkeni i dieni)</b>	1,707	0,181	98,112
<b>Alkani</b>	0,000	0,000	99,999
<b>Aldehidi</b>	20,068	1,356	78,576
<b>Aromatični ugljovodonici</b>	1,898	0,037	98,065
<b>Policiklični aromatični ugljovodonici (PAH)</b>	8,331	1,243	90,426
<b>Organske kiseline</b>	0,000	2,795	97,205

Grupa zagađujućih materija obuhvata: Ugljen-monoksid, Ugljen-dioksid, Metan, Azot-suboksid, Azotni oksidi, Azot-monoksid, Azot-dioksid, Amonijak, Sumpor-dioksid, Elementarni ugljenik, Organske materije, Isparljiva organska jedinjenja, Nemetanska isparljiva jedinjenja, Suspendovane čestice, BC (black carbon), Lubricanti, PM TSP (total suspended particles), SPN23 (Solid Particle Number > 23 nm).

### Bezbednost građana (Z2)

Ovaj podkriterijum odnosi se na nivo zaštite građana od potencijalnih povreda prilikom manipulacije otpadom. Stepenn bezbednosti zavisi od načina organizacije sistema sakupljanja. U sistemima koji podrazumevaju preuzimanje otpada na adresi korisnika, rizik od povreda je minimalan, jer građani nisu direktno uključeni u transport i manipulaciju otpadom. Sa druge strane, u sistemima gde je predviđeno samostalno odlaganje i transport otpada od strane građana, rizik se povećava usled mogućnosti nepravilnog rukovanja, fizičkog napora i potencijalnog kontakta sa opasnim komponentama otpada.

### Ekološka bezbednost (Z3)

Ovaj podkriterijum odnosi se na nivo zaštite životne sredine od potencijalnog isticanja i oslobađanja opasnih supstanci tokom rukovanja i transporta otpada. Stepenn ekološke bezbednosti zavisi od organizacije sistema sakupljanja. U sistemima koji podrazumevaju preuzimanje otpada na adresi korisnika, rizik od nekontrolisanog oslobađanja štetnih materija je minimalan, jer se manipulacija otpadom odvija pod kontrolisanim uslovima. Nasuprot tome, u sistemima koji uključuju samostalan transport otpada od strane građana, rizik se povećava usled mogućnosti nepravilnog rukovanja, neadekvatnog pakovanja i potencijalnog oštećenja otpada tokom transporta, što može dovesti do negativnih uticaja na životnu sredinu.

*Tabela 5.15 Vrednosti podkriterijuma u okviru aspekta uticaj sistema za sakupljanje na životnu sredinu i zdravlje ljudi za razmatrane alternative*

Alternativa	Z1 - Emisije u vazduh iz izduvnih gasova vozila za transport otpada	Z2 - Bezbednost građana	Z3 - Ekološka bezbednost
Stacionarni sistem	5,153%	Prosečeno	Prosečeno
Mobilni sistem	0,800%	Dobro	Veoma dobro
Reciklažna dvorišta	94,056%	Veoma loše	Veoma loše

## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

### 6.1 Rezultati evaluacije kriterijuma i podkriterijuma primenom AHP metode

Za određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma i podkriterijuma primenjena je AHP metoda. U početnoj fazi metodologije identifikovani su kriterijumi i podkriterijumi na osnovu relevantne naučne literature i iskustva autora. Definisan je model koji obuhvata 14 podkriterijuma grupisanih u pet osnovnih kriterijuma, čime je formirana hijerarhijska struktura problema odlučivanja. Problem je postavljen u skladu sa principima višekriterijumske analize, kroz hijerarhiju koja uključuje cilj, kriterijume i podkriterijume. U daljem postupku sprovedena je anketa među donosiocima odluka, pri čemu je svaki ispitanik samostalno popunjavao upitnik namenjen određivanju težina kriterijuma i podkriterijuma.

Izabrani donosioci odluka izvršili su poređenja u parovima elemenata hijerarhije (pairwise comparison). Njihove preferencije izražene su primenom Saaty-jeve skale relativne važnosti, koja obuhvata pet osnovnih nivoa i četiri međunivoa intenziteta, sa numeričkim vrednostima u opsegu od 1 do 9 (Saaty, 1980).

Rezultati poređenja na svakom nivou hijerarhije organizovani su u odgovarajuće matrice poređenja. Na osnovu tih matrica izvršeno je određivanje relativnih težina kriterijuma i njihovih podkriterijuma, pri čemu su kao rezultat dobijeni normalizovani sopstveni vektori prioriteta za sve elemente hijerarhije. Lokalni ponderi kriterijuma u odnosu na cilj, kao i podkriterijuma u odnosu na pripadajuće kriterijume, izračunati su primenom standardne AHP agregacije individualnih procena, čime su dobijeni konačni ponderi podkriterijuma u odnosu na globalni cilj za svakog ispitanika. Razmatranim kriterijumima su dodeljene sledeće skraćenice:

- C1 - Finansijski aspekt
- C2 - Efikasnost sistema
- C3 - Socijalni aspekt
- C4 - Infrastrukturni aspekt
- C5 - Uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi

Pojedinačni konačni rezultati AHP vrednovanja donosilaca odluka DO1 – DO15 prikazani su u tabeli 6.1

Tabela 6.1 Individualne težine kriterijuma i normalizovane geometrijski osrednjene težine kriterijuma u odnosu na cilj

	W				
	C1	C2	C3	C4	C5
<b>DO1</b>	0,455	0,248	0,066	0,170	0,062
<b>DO2</b>	0,290	0,194	0,084	0,356	0,076
<b>DO3</b>	0,389	0,119	0,062	0,344	0,086
<b>DO4</b>	0,200	0,384	0,040	0,260	0,116
<b>DO5</b>	0,412	0,160	0,101	0,189	0,137
<b>DO6</b>	0,209	0,387	0,038	0,263	0,104
<b>DO7</b>	0,323	0,167	0,114	0,229	0,168
<b>DO8</b>	0,399	0,313	0,075	0,136	0,075
<b>DO9</b>	0,083	0,078	0,189	0,113	0,538
<b>DO10</b>	0,542	0,182	0,071	0,154	0,050
<b>DO11</b>	0,108	0,315	0,047	0,118	0,413
<b>DO12</b>	0,193	0,333	0,044	0,339	0,090
<b>DO13</b>	0,120	0,296	0,094	0,229	0,261
<b>DO14</b>	0,061	0,229	0,086	0,156	0,469
<b>DO15</b>	0,401	0,126	0,094	0,203	0,176
<b>Wg</b>	0,270	0,249	0,082	0,237	0,162

W - individualna težina kriterijuma u odnosu na cilj; Wg - normalizovane geometrijski osrednjene težine kriterijuma u odnosu na cilj.

U okviru kriterijuma Finansijski aspekt (C1) se nalaze dva podkriterijuma sa sledećim skraćenicama:

- F1 – Investicioni troškovi
- F2 – Operativni troškovi

U tabeli 6.2 je prikazana evaluacija F1 i F2 podkriterijum u odnosu na C1 kriterijum od strane 15 DO-a, kao i individualni vektori prioriteta (težine). Množenjem geometrijskih osrednjenih težina F1 i F2 u odnosu na C1 kriterijum i geometrijski osrednjene težine C1 kriterijuma u odnosu na cilj, dobijaju se konačne težine oba podkriterijuma u odnosu na cilj.

Tabela 6.2 Individualne vektor težina F1, F2 u odnosu na C1; normalizovane geometrijski osrednjene težine F1, F2 u odnosu na C1; težine F1, F2 u odnosu na cilj

	W <sub>F1,F2</sub>	
	F1	F2
<b>DO1</b>	0,250	0,750
<b>DO2</b>	0,500	0,500
<b>DO3</b>	0,111	0,888
<b>DO4</b>	0,100	0,900

<b>DO5</b>	0,333	0,666
<b>DO6</b>	0,100	0,900
<b>DO7</b>	0,800	0,200
<b>DO8</b>	0,750	0,250
<b>DO9</b>	0,800	0,200
<b>DO10</b>	0,250	0,750
<b>DO11</b>	0,250	0,750
<b>DO12</b>	0,100	0,900
<b>DO13</b>	0,750	0,250
<b>DO14</b>	0,250	0,750
<b>DO15</b>	0,250	1,750
<b><math>W_{F1,F2}</math> local</b>	0,328	0,671
<b><math>W_{F1,F2}</math> global</b>	0,089	0,181

$W_{F1,F2}$  - individualne težine F1, F2 podkriterijuma u odnosu na C1 kriterijum;  $W_{F1,F2}$  local - normalizovane geometrijski osrednjene težine podkriterijuma F1, F2 u odnosu na C1 kriterijum;  $W_{F1,F2}$  global, težine podkriterijuma F1, F2 u odnosu na cilj

U okviru kriterijuma Efikasnost sistema (C2) se nalazi tri podkriterijuma sa sledećim skraćenicama:

- E1 – Količina sakupljenog otpada
- E2 – Potrebno vreme za sakupljanje
- E3 – Pokrivenost uslugom sakupljanja

Vrednovanje E1, E2 i E3 podkriterijuma u odnosu na C2 kriterijuma od strane svih DO-a, kao i vektori prioriteta date su u tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Individualne vektor težina E1, E2, E3 u odnosu na C2; normalizovane geometrijski osrednjene težine E1, E2, E3 u odnosu na C2; težine E1, E2, E3 u odnosu na cilj

	$W_{E1,E2,E3}$		
	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>
<b>DO1</b>	0,170	0,387	0,443
<b>DO2</b>	0,455	0,091	0,455
<b>DO3</b>	0,485	0,294	0,221
<b>DO4</b>	0,286	0,140	0,574
<b>DO5</b>	0,261	0,328	0,411
<b>DO6</b>	0,243	0,118	0,639
<b>DO7</b>	0,239	0,137	0,623
<b>DO8</b>	0,724	0,193	0,083
<b>DO9</b>	0,686	0,220	0,094
<b>DO10</b>	0,209	0,083	0,708
<b>DO11</b>	0,429	0,143	0,429
<b>DO12</b>	0,267	0,108	0,624
<b>DO13</b>	0,411	0,328	0,261

<b>DO14</b>	0,633	0,106	0,260
<b>DO15</b>	0,847	0,361	1,792
<b><math>W_{E1,E2,E3}</math> local</b>	0,400	0,185	0,415
<b><math>W_{E1,E2,E3}</math> global</b>	0,099	0,046	0,103

$W_{E1,E2,E3}$  - individualne težine E1,E2,E3 podkriterijuma u odnosu na C2 kriterijum;

$W_{E1,E2,E3}$  local - normalizovane geometrijski osrednjene težine podkriterijuma E1, E2, E3 u odnosu na C2 kriterijum;  $W_{E1,E2,E3}$  global, težine podkriterijuma E1,E2,E3 u odnosu na cilj

U okviru kriterijuma Socijalni aspekt (C3) se nalazi tri podkriterijuma sa sledećim skraćenicama:

- S1 – Nova radna mesta
- S2 – Otpornost sistema na uticaj neformalnog sektora
- S3 – Komfor građana

Vrednovanje S1, S2 i S3 podkriterijuma u odnosu na C3 kriterijuma od strane svih DO-a, kao i vektori prioriteta date su u tabeli 6.4.

Tabela 6.4 Individualne vektor težina S1, S2, S3 u odnosu na C3; normalizovane geometrijski osrednjene težine S1, S2, S3 u odnosu na C3; težine S1, S2, S3 u odnosu na cilj

	$W_{S1,S2,S3}$		
	S1	S2	S3
<b>DO1</b>	0,164	0,539	0,297
<b>DO2</b>	0,303	0,607	0,090
<b>DO3</b>	0,356	0,311	0,333
<b>DO4</b>	0,193	0,083	0,724
<b>DO5</b>	0,458	0,126	0,416
<b>DO6</b>	0,179	0,082	0,739
<b>DO7</b>	0,140	0,286	0,574
<b>DO8</b>	0,714	0,143	0,143
<b>DO9</b>	0,268	0,084	0,647
<b>DO10</b>	0,108	0,103	0,789
<b>DO11</b>	0,429	0,429	0,143
<b>DO12</b>	0,209	0,083	0,708
<b>DO13</b>	0,574	0,286	0,140
<b>DO14</b>	0,106	0,260	0,633
<b>DO15</b>	1,721	0,859	0,420
<b><math>W_{S1,S2,S3}</math> local</b>	0,331	0,240	0,428
<b><math>W_{S1,S2,S3}</math> global</b>	0,027	0,020	0,035

$W_{S1,S2,S3}$  - individualne težine S1,S2,S3 podkriterijuma u odnosu na C3 kriterijum;  $W_{S1,S2,S3}$  local - normalizovane geometrijski osrednjene težine podkriterijuma S1, S2, S3 u odnosu na C3 kriterijum;  $W_{S1,S2,S3}$  global - težine podkriterijuma S1,S2,S3 u odnosu na cilj

U okviru kriterijuma Infrastrukturni aspekt (C4) se nalazi tri podkriterijuma sa sledećim skraćenicama:

- I1 – Mogućnost nadogradnje i kompatibilnosti sa postojećim sistemom
- I2 – Jednostavnost logistike i transporta
- I3 – Jednostavnost sabirnog mesta

Vrednovanje I1, I2 i I3 podkriterijuma u odnosu na C4 kriterijuma od strane svih DO-a, kao i vektori prioriteta date su u tabeli 6.5.

Tabela 6.5 Individualne vektor težina I1, I2 i I3 u odnosu na C4; normalizovane geometrijski osrednjene težine I1, I2 i I3 u odnosu na C4; težine I1, I2 i I3 u odnosu na cilj

	$W_{I1,I2,I3}$		
	<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>I3</b>
<b>DO1</b>	0,164	0,310	0,539
<b>DO2</b>	0,731	0,158	0,111
<b>DO3</b>	0,190	0,820	0,082
<b>DO4</b>	0,638	0,273	0,089
<b>DO5</b>	0,328	0,367	0,261
<b>DO6</b>	0,455	0,455	0,091
<b>DO7</b>	0,648	0,122	0,230
<b>DO8</b>	0,739	0,095	0,190
<b>DO9</b>	0,363	0,317	0,321
<b>DO10</b>	0,339	0,209	0,452
<b>DO11</b>	0,200	0,600	0,200
<b>DO12</b>	0,286	0,718	0,102
<b>DO13</b>	0,490	0,268	0,198
<b>DO14</b>	0,260	0,672	0,106
<b>DO15</b>	2,071	0,339	0,447
<b><math>W_{I1,I2,I3} local</math></b>	0,458	0,341	0,201
<b><math>W_{I1,I2,I3} global</math></b>	0,109	0,081	0,048

$W_{I1,I2,I3}$  - individualne težine I1,I2,I3 podkriterijuma u odnosu na C4 kriterijum;  $W_{I1,I2,I3} local$  - normalizovane geometrijski osrednjene težine podkriterijuma I1, I2, I3 u odnosu na C4 kriterijum;  $W_{I1,I2,I3} global$  - težine podkriterijuma I1,I2,I3 u odnosu na cilj

U okviru kriterijuma Uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi (C5) se nalazi tri podkriterijuma sa sledećim skraćenicama:

- Z1 – Emisije u vazduh iz izduvnih gasova vozila za transport otpada
- Z2 – Bezbednost građana
- Z3 – Ekološka bezbednost

Vrednovanje Z1, Z2 i Z3 podkriterijuma u odnosu na C5 kriterijuma od strane svih DO-a, kao i vektori prioriteta date su u tabeli 6.6.

Tabela 6.6 Individualne vektor težina  $Z1$ ,  $Z2$ ,  $Z3$  u odnosu na  $C5$ ; normalizovane geometrijski osrednjene težine  $Z1$ ,  $Z2$ ,  $Z3$  u odnosu na  $C5$ ; težine  $Z1$ ,  $Z2$ ,  $Z3$  u odnosu na cilj

	$W_{Z1,Z2,Z3}$		
	$Z1$	$Z2$	$Z3$
<b>DO1</b>	0,648	0,122	0,230
<b>DO2</b>	0,480	0,115	0,405
<b>DO3</b>	0,401	0,539	0,061
<b>DO4</b>	0,714	0,143	0,143
<b>DO5</b>	0,137	0,239	0,623
<b>DO6</b>	0,189	0,501	0,310
<b>DO7</b>	0,655	0,133	0,211
<b>DO8</b>	0,303	0,607	0,090
<b>DO9</b>	0,253	0,089	0,658
<b>DO10</b>	0,400	0,200	0,400
<b>DO11</b>	0,106	0,260	0,633
<b>DO12</b>	0,655	0,133	0,211
<b>DO13</b>	0,075	0,242	0,683
<b>DO14</b>	0,106	0,260	0,633
<b>DO15</b>	0,189	0,823	1,999
<i><math>W_{Z1,Z2,Z3}</math> local</i>	0,288	0,273	0,439
<i><math>W_{Z1,Z2,Z3}</math> global</i>	0,047	0,044	0,071

$W_{Z1,Z2,Z3}$  - individualne težine  $Z1, Z2, Z3$  podkriterijuma u odnosu na  $C5$  kriterijum;  $W_{Z1,Z2,Z3}$  local - normalizovane geometrijski osrednjene težine podkriterijuma  $Z1, Z2, Z3$  u odnosu na  $C5$  kriterijum;  $W_{Z1,Z2,Z3}$  global - težine podkriterijuma  $Z1, Z2, Z3$  u odnosu na cilj

Rezultati primene AHP metode ukazuju na relativni značaj podkriterijuma, izražen kroz vrednosti lokalnih i globalnih težina. Lokalni prioriteti odražavaju značaj podkriterijuma unutar odgovarajućih grupa kriterijuma, dok globalni prioriteti predstavljaju njihov ukupan doprinos ostvarenju glavnog cilja odlučivanja, te imaju presudnu ulogu u procesu rangiranja i izbora optimalne alternative. Na taj način, rezultati potvrđuju jednu od ključnih prednosti AHP metode, koja se ogleda u jasnom diferenciranju prioriteta i transparentnom kvantifikovanju značaja kriterijuma.

Analizom globalnih težina, koje će u nastavku istraživanja biti korišćene kao ulazni parametri za primenu TOPSIS i PROMETHEE II metoda, uočava se da podkriterijum F2 ima najveći značaj (0,1813), čime se izdvaja kao dominantan faktor u procesu odlučivanja. Slede podkriterijumi I1 (0,1086), E3 (0,1030) i E1 (0,0994), koji takođe imaju značajan uticaj na konačan ishod. Nasuprot tome, podkriterijumi iz grupe S (S1, S2 i S3) imaju najniže vrednosti globalnih težina, što ukazuje na njihov relativno mali doprinos ukupnom modelu odlučivanja. Ovakva raspodela prioriteta ukazuje na neujednačenu distribuciju značaja među

podkriterijumima, pri čemu pojedini elementi imaju dominantnu ulogu u formiranju konačne odluke.

## 6.2 Matrice performansi TOPSIS i PROMETHEE II metoda

Matrice performansi formirane su kao inicijalni korak u primeni metoda višekriterijumskog odlučivanja, pri čemu su podkriterijumi klasifikovani na minimizacione i maksimizacione u skladu sa njihovom funkcionalnom prirodom. Ovakva podela omogućava adekvatnu pripremu podataka za dalju analizu i obezbeđuje pravilnu interpretaciju rezultata.

Matrica performansi minimizacionih podkriterijuma (MIN) obuhvata one podkriterijume kod kojih niže vrednosti ukazuju na povoljnije performanse alternativa, kao što su troškovi, vreme i emisije. Nasuprot tome, matrica performansi maksimizacionih podkriterijuma (MAX) obuhvata podkriterijume kod kojih više vrednosti predstavljaju poželjniji ishod, poput nivoa usluge, broja novootvorenih radnih mesta ili infrastrukturnih karakteristika sistema.

Kvalitativni podkriterijumi kvantifikovani su primenom ordinalne skale u opsegu od 1 do 5, pri čemu veće vrednosti označavaju bolje performanse alternativa, u skladu sa metodološkim okvirom definisanim u poglavlju „Definisanje kriterijuma i podkriterijuma za ocenu alternativa“.

U okviru svake matrice, redovi predstavljaju posmatrane alternative (A1, A2 i A3), dok kolone odgovaraju pojedinačnim podkriterijumima. Elementi matrice izražavaju performanse svake alternative u odnosu na dati podkriterijum i predstavljaju osnovu za sprovođenje daljih faza analize primenom TOPSIS i PROMETHEE II metoda.

Tabela 6.7 prikazuje matricu performansi za minimizacione podkriterijume (F1, F2, E2 i Z1), dok je u Tabeli 6.8 data matrica performansi za maksimizacione podkriterijume (E1, E3, S1, S2, S3, I1, I2, I3, Z2 i Z3).

*Tabela 6.7 Matrica performansi podkriterijuma koje je potrebno minimizirati.*

	MIN			
	F1	F2	E2	Z1
A1	1.504.448	95.881	2.144	0,051
A2	229.578	292.901	6.072,6	0,008
A3	5.683.564	200.667	135.118	0,940

Tabela 6.8 Matrica performansi podkriterijuma koje je potrebno maksimizirati

	MAX									
	E1	E3	S1	S2	S3	I1	I2	I3	Z2	Z3
A1	1443	3	12	2	4	1	3	2	3	3
A2	3797	5	18	3	5	3	2	5	4	5
A3	3797	1	6	5	2	5	4	1	1	1

Ovako definisana klasifikacija podkriterijuma omogućava doslednu primenu TOPSIS i PROMETHEE II metoda, koje zahtevaju jasno određen smer optimizacije (minimizacija ili maksimizacija) za svaki pojedinačni kriterijum, čime se obezbeđuje validnost i pouzdanost dobijenih rezultata.

### 6.3 Rezultati dobijeni TOPSIS metodom

TOPSIS metoda je primenjena za rangiranje alternativa na osnovu njihove udaljenosti od pozitivnog idealnog i negativnog idealnog rešenja. Nakon formiranja matrice performansi izvršena je njena normalizacija primenom vektorske normalizacije, prema izrazu:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Rezultati normalizacije za podkriterijume tipa MIN i MAX prikazani su u Tabelama 6.9 i 6.10.

Tabela 6.9 Normalizovana matrica performansi podkriterijume tipa MIN

	F1	F2	E2	Z1
A1	0,256	0,261	0,016	0,055
A2	0,039	0,796	0,045	0,008
A3	0,966	0,546	0,999	0,998

Tabela 6.10 Normalizovana matrica performansi podkriterijume tipa MAX

	E1	E3	S1	S2	S3	I1	I2	I3	Z2	Z3
A1	0,259	0,507	0,535	0,324	0,596	0,169	0,557	0,365	0,588	0,507
A2	0,683	0,845	0,802	0,487	0,745	0,507	0,371	0,913	0,784	0,845
A3	0,683	0,169	0,267	0,811	0,298	0,845	0,743	0,183	0,196	0,169

Nakon normalizacije, formirana je ponderisana normalizovana matrica množenjem normalizovanih vrednosti sa odgovarajućim težinskim koeficijentima podkriterijuma ( $w_j$ ):

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

Na osnovu ponderisane matrice određena su pozitivna idealna rešenja ( $A^+$ ) i negativna idealna rešenja ( $A^-$ ). Za minimizacione podkriterijume (F1, F2, E2 i Z1) idealno rešenje predstavlja minimum vrednosti, dok negativno idealno rešenje predstavlja maksimum:

$$A^+ = \min(v_{ij}), \quad A^- = \max(v_{ij})$$

Za maksimizacione podkriterijume važi obrnuto:

$$A^+ = \max(v_{ij}), \quad A^- = \min(v_{ij})$$

Rezultati ponderisane normalizovane matrice, zajedno sa definisanim idealnim i negativno-idealnim rešenjima, prikazani su u Tabelama 6.11 i 6.12.

*Tabela 6.11 Ponderisana normalizovana matrica podkriterijuma tipa MIN; idealna i negativno-idealna rešenja*

$w_j$	<b>0,089</b>	<b>0,181</b>	<b>0,046</b>	<b>0,047</b>
	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>E2</b>	<b>Z1</b>
<b>A1</b>	0,023	0,047	0,001	0,003
<b>A2</b>	0,003	0,144	0,002	0,0004
<b>A3</b>	0,086	0,099	0,046	0,047
<b>A+</b>	0,003	0,047	0,001	0,0004
<b>A-</b>	0,086	0,144	0,046	0,047

$w_j$  – globalne težine podkriterijuma;  $A^+$  - idealna rešenja;  $A^-$  - negativno idealna rešenja

*Tabela 6.12 Ponderisana normalizovana matrica podkriterijuma tipa MAX; idealna i negativno-idealna rešenja*

$w_j$	<b>0,099</b>	<b>0,103</b>	<b>0,027</b>	<b>0,020</b>	<b>0,035</b>	<b>0,109</b>	<b>0,081</b>	<b>0,048</b>	<b>0,044</b>	<b>0,071</b>
	<b>E1</b>	<b>E3</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>I3</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>
<b>A1</b>	0,026	0,052	0,015	0,006	0,021	0,018	0,045	0,017	0,026	0,036
<b>A2</b>	0,068	0,087	0,022	0,010	0,026	0,055	0,030	0,043	0,035	0,060
<b>A3</b>	0,068	0,017	0,007	0,016	0,010	0,092	0,060	0,009	0,009	0,012
<b>A+</b>	0,068	0,087	0,022	0,016	0,026	0,092	0,060	0,043	0,035	0,060
<b>A-</b>	0,026	0,017	0,007	0,006	0,010	0,018	0,030	0,009	0,009	0,012

$w_j$  – globalne težine podkriterijuma;  $A^+$  - idealna rešenja;  $A^-$  - negativno idealna rešenja

U narednom koraku izračunata su n-dimenziona Euklidska rastojanja alternativa od idealnog ( $D_i^+$ ) i negativno-idealnog rešenja ( $D_i^-$ ):

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

Na osnovu dobijenih vrednosti određena je relativna blizina idealnom rešenju:

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Rezultati proračuna prikazani su u Tabeli 6.13, na osnovu koje je izvršeno konačno rangiranje alternativa.

*Tabela 6.13 Udaljenost alternativa A1, A2, A3 od idealnih i negativno-idealnih rešenja i rangiranje alternativa*

Alternative	D <sup>+</sup>	D <sup>-</sup>	RC <sub>i</sub> <sup>+</sup>	Rang
A1	0,102	0,141	0,580	2
A2	0,108	0,153	0,586	1
A3	0,152	0,101	0,399	3

Primenom TOPSIS metode alternativa A2 rangirana je na prvo mesto ( $RC^+ = 0,586$ ), dok je alternativa A1 zauzela drugo mesto ( $RC^+ = 0,580$ ). Mala razlika između ove dve alternative ukazuje na visok stepen njihove međusobne konkurentnosti i sličan nivo ukupnih performansi. Alternativa A3, sa vrednošću  $RC^+ = 0,399$ , rangirana je na poslednje mesto, što ukazuje na njenu manju pogodnost u odnosu na druge dve alternative.

U TOPSIS metodi svaki kriterijum doprinosi rezultatu kroz svoju težinu i udaljenost od idealnog i negativno-idealnog rešenja, pri čemu se pretpostavlja potpuna kompenzacija između kriterijuma. U konkretnom slučaju, kriterijumi sa većim težinskim koeficijentima (npr. F2, E3, I1) imaju dominantan uticaj na konačan rezultat, jer veće odstupanje alternative od idealnog rešenja po tim kriterijumima značajno utiče na ukupnu udaljenost  $D^+$  i  $D^-$ . Alternativa A2 ostvaruje prednost upravo zato što je bliža idealnom rešenju kod više kriterijuma sa većim težinama, čime smanjuje ukupnu udaljenost od idealnog rešenja i povećava udaljenost od negativno-idealnog. Sa druge strane, iako alternativa A1 ostvaruje povoljnije vrednosti kod pojedinih podkriterijuma (npr. određenih finansijskih ili operativnih pokazatelja), njen ukupni

rang je nešto niži. Razlog za to leži u prirodi TOPSIS metode kao kompenzacionog modela, u kome je dozvoljena međusobna kompenzacija između kriterijuma, ali u skladu sa njihovim relativnim značajem izraženim kroz težinske koeficijente. Posledično, odstupanja od idealnog rešenja kod podkriterijuma sa većim težinama imaju proporcionalno veći uticaj na ukupnu udaljenost alternative, te se ne mogu u potpunosti nadoknaditi boljim performansama kod manje značajnih podkriterijuma, što se direktno reflektuje na konačno rangiranje.

Alternativa A3 pokazuje najnepovoljnije performanse, pre svega zbog izraženih odstupanja od idealnog rešenja kod većeg broja podkriterijuma. To se odražava kroz najveću vrednost udaljenosti od idealnog rešenja ( $D^+ = 0,152$ ) i najmanju udaljenost od negativno-idealnog rešenja ( $D^- = 0,101$ ), što rezultira njenim najnižim rangom.

Rezultati potvrđuju osnovnu karakteristiku TOPSIS metode, prema kojoj se rangiranje alternativa zasniva na njihovoj relativnoj udaljenosti od idealnog i negativno-idealnog rešenja, pri čemu kriterijumi sa većim težinskim koeficijentima imaju proporcionalno veći uticaj na konačan rezultat. U tom smislu, prednost ostvaruju alternative koje postižu povoljne vrednosti kod većeg broja značajnih kriterijuma. Mala razlika između alternativa A1 i A2 dodatno ukazuje da obe alternative imaju sličan profil performansi, pri čemu A2 ostvaruje blagu prednost zahvaljujući boljoj usklađenosti sa raspodelom težina kriterijuma.

## 6.4 Rezultati dobijeni PROMETHEE II metodom

PROMETHEE II metoda primenjena je za rangiranje alternativa na osnovu preferencijalnih odnosa između alternativa prema definisanim podkriterijumima. U prvom koraku formirana je matrica performansi, nakon čega su izračunate razlike između alternativa za svaki podkriterijum. Dobijene razlike transformisane su u stepene preferencije primenom odgovarajućih funkcija preferencije. Na osnovu težinskih koeficijenata podkriterijuma izračunati su agregirani indeksi preferencije, koji su korišćeni za određivanje pozitivnih i negativnih tokova preferencije. Konačno rangiranje alternativa izvršeno je na osnovu neto toka preferencije.

Za kvantitativne podkriterijume korišćene su njihove numeričke vrednosti, dok su kvalitativni podkriterijumi kvantifikovani primenom skale od 1 do 5. Svi podkriterijumi su klasifikovani kao minimizacioni ili maksimizacioni, a težinski koeficijenti su preuzeti iz AHP analize. Dodatno, za svaki podkriterijum određene su osnovne statističke karakteristike

(minimalna i maksimalna vrednost, aritmetička sredina i standardna devijacija), koje su korišćene pri definisanju pragova preferencije.

Za modeliranje preferencija primenjene su odgovarajuće funkcije preferencije i definisani pragovi. Za podkriterijume F1, F2, E1, E2, S1 i Z1 primenjena je linearna (V-shape) funkcija preferencije, koja pretpostavlja da preferencija između alternativa raste proporcionalno razlici njihovih performansi do praga preferencije  $p$ . Kada razlika dostigne ili premaši ovaj prag, ostvaruje se potpuna preferencija jedne alternative u odnosu na drugu. Prag preferencije definisan je kao razlika između maksimalne i minimalne vrednosti posmatranog podkriterijuma.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 < d < p \\ 1, & d \geq p \end{cases}$$

gde je  $p = \max - \min$ .

Za podkriterijume E3, S2, S3, I1, I2, I3, Z2 i Z3 primenjena je standardna (Usual) funkcija preferencije, koja predstavlja najjednostavniji oblik funkcije u okviru PROMETHEE II metode i ne uključuje pragove indiferencije niti pragove preferencije. Ova funkcija pretpostavlja da svaka pozitivna razlika između performansi dve alternative dovodi do potpune preferencije, dok u slučaju negativne ili jednake razlike preferencija ne postoji. Na taj način omogućeno je modelovanje situacija u kojima je dovoljno utvrditi koja alternativa ima bolju performansu, bez razmatranja intenziteta te razlike.

$$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$$

U nastavku je slika interfejsa softvera Visual PROMETHEE sa svim unetim podacima.

Criteria	Investicioni t...	Operativni tr...	Kolicina saku...	Potrebno vr...	Pokrivenost...	Nova radna ...	Otpornost si...	Komfor grad...	Mogućnost n...	Jednostavno...	Jednostavno...	Emisije u vaz...	Bezbednost...	Ekološka bez...
Unit	€	€	tone	H	5-point	No	5-point	5-point	5-point	5-point	5-point	%	5-point	5-point
Cluster/Group	◆	◆	●	●	●	◆	◆	◆	■	■	■	◆	◆	◆
Preferences														
Min/Max	min	min	max	min	max	max	max	max	max	max	max	max	min	max
Weight	0,09	0,18	0,10	0,05	0,10	0,03	0,02	0,04	0,11	0,08	0,05	0,04	0,04	0,07
Preference Fn.	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	Usual	V-shape	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	V-shape	Usual	Usual
Thresholds	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
-P: Preference	5749355,15	182955,94	2679	143607	n/a	11	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	1,031	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
Statistics														
Minimum	229578,00	95881,09	1443	2144	1	6	2	2	1	2	1	0,008	1	1
Maximum	5683563,75	292900,82	3797	135118	5	18	5	5	5	4	5	0,941	4	5
Average	2472529,82	196482,95	3012	47778	3	12	3	4	3	3	3	0,333	3	3
Standard Dev.	2329431,60	80487,36	1110	61779	2	5	1	1	2	1	2	0,430	1	2
Evaluations														
Stacionarni sistem	1504447,70	95881,09	1443	2144	average	12	bad	good	very bad	average	bad	0,051	average	average
Mobilni sistem	229578,00	292900,82	3797	6073	very good	18	average	very good	average	bad	very good	0,008	good	very good
Reciklažna dvorišta	5683563,75	200666,95	3797	135118	very bad	6	very good	bad	very good	good	very bad	0,941	very bad	very bad

Slika 6.1 Prikaz ulaznih parametara, težinskih koeficijenata i evaluacije alternativa u okviru PROMETHEE II metode

Tabela 6.14 prikazuje vrednosti pojedinačnog neto tok preferencija za svaku alternativu po pojedinačnim kriterijumima, u okviru PROMETHEE II metode. Pozitivne vrednosti ukazuju na to da alternativa ima bolju performansu u odnosu na ostale po datom kriterijumu, dok negativne vrednosti ukazuju na slabije performanse. Vrednosti bliske nuli označavaju neutralan ili uravnotežen uticaj kriterijuma.

Tabela 6.14 Pojedinačni neto tok preferencija

Podkriterijumi	Stacionarni sistem	Mobilni sistem	Reciklažna dvorišta
Investicioni troškovi	0,253	0,585	-0,838
Operativni troškovi	0,786	-0,752	-0,034
Količina sakupljenog otpada	-0,879	0,439	0,439
Potrebno vreme za sakupljanje	0,477	0,436	-0,912
Pokrivenost uslugom sakupljanja	0,000	1,000	-1,000
Nova radna mesta	0,000	0,773	-0,773
Otpornost sistema na uticaj neformalnog sektora	-1,000	0,000	1,000
Komfor građana	0,000	1,000	-1,000
Mogućnost nadogradnje i kompatibilnosti sa postojećim sistemom	-1,000	0,000	1,000
Jednostavnost logistike i transporta	0,000	-1,000	1,000
Jednostavnost sabirnog mesta	0,000	1,000	-1,000
Emisije u vazduh iz izduvnih gasova vozila za transport otpada	0,410	0,473	-0,884
Bezbednost građana	0,000	1,000	-1,000
Ekološka bezbednost	0,000	1,000	-1,000

Mobilni sistem ostvaruje dominantne rezultate kod većine kriterijuma, posebno u pogledu investicionih troškova, pokrivenosti uslugom, komfora građana, mogućnosti zapošljavanja, kao i ekološke i bezbednosne performanse. Ove visoke pozitivne vrednosti ukazuju da mobilni sistem u najvećoj meri nadmašuje ostale alternative u ključnim aspektima sistema sakupljanja.

Stacionarni sistem pokazuje izraženu prednost kod operativnih troškova i potrebnog vremena za sakupljanje, što ukazuje na njegovu efikasnost u organizacionom i logističkom smislu. Međutim, negativne vrednosti kod kriterijuma kao što su količina sakupljenog otpada, otpornost sistema i mogućnost nadogradnje ukazuju na određena ograničenja ovog pristupa.

Reciklažna dvorišta ostvaruju pozitivne vrednosti kod pojedinih infrastrukturnih i sistemskih kriterijuma, kao što su otpornost sistema i mogućnost nadogradnje, kao i kod logistike. Ipak, izrazito negativne vrednosti kod većine ostalih kriterijuma, naročito investicionih troškova, vremena sakupljanja, pokrivenosti uslugom i ekoloških aspekata, značajno utiču na njihovu ukupnu nepovoljnu poziciju.

Tabela 6.15 prikazuje rezultate PROMETHEE II metode, uključujući pozitivni tok preferencije ( $\Phi^+$ ), negativni tok preferencije ( $\Phi^-$ ), neto tok preferencije ( $\Phi$ ) i konačan rang alternativa. Pozitivni tok predstavlja meru u kojoj je alternativa preferirana u odnosu na ostale, dok negativni tok pokazuje u kojoj meri je alternativa nadjačana od strane drugih. Neto tok, definisan kao razlika između ova dva pokazatelja, koristi se za konačno rangiranje alternativa.

*Tabela 6.15 Rangiranje alternativa prema PROMETHEE II metodi*

Alternative	$\Phi^+$	$\Phi^-$	$\Phi$	Rang
<b>Stacionarni sistem</b>	0,416	0,426	-0,010	2
<b>Mobilni sistem</b>	0,525	0,283	0,242	1
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,299	0,531	-0,232	3

Rezultati PROMETHEE II analize ukazuju na jasno rangiranje alternativa na osnovu neto toka preferencije ( $\Phi$ ). Najpovoljnija alternativa je mobilni sistem, sa najvećom vrednošću neto toka ( $\Phi = 0,242$ ), što ukazuje da ova alternativa u najvećoj meri dominira nad ostalim alternativama. Visoka vrednost pozitivnog toka ( $\Phi^+ = 0,525$ ) i istovremeno relativno nizak negativni tok ( $\Phi^- = 0,283$ ) potvrđuju da mobilni sistem ostvaruje bolje performanse u većini parnih poređenja.

Stacionarni sistem zauzima drugo mesto sa gotovo neutralnim neto tokom ( $\Phi = -0,010$ ), što ukazuje na uravnotežen odnos između prednosti i nedostataka. Slične vrednosti

pozitivnog ( $\Phi^+ = 0,416$ ) i negativnog toka ( $\Phi^- = 0,426$ ) pokazuju da ova alternativa podjednako često dominira i biva nadjačana od strane drugih alternativa, te se može smatrati kompromisnim rešenjem.

Reciklažna dvorišta imaju negativan neto tok ( $\Phi = -0,232$ ), uz najniži pozitivan ( $\Phi^+ = 0,299$ ) i najviši negativan tok ( $\Phi^- = 0,531$ ), što ukazuje da ova alternativa najčešće gubi u parnim poređenjima sa ostalim alternativama. Ovakav rezultat potvrđuje njenu najmanju preferabilnost u okviru analiziranog skupa kriterijuma.

Dobijeni rezultati ukazuju da mobilni sistem ostvaruje najpovoljniji odnos prednosti i nedostataka i predstavlja najpoželjniju alternativu. Stacionarni sistem je konkurentna, ali manje dominantna opcija, dok se reciklažna dvorišta izdvajaju kao najmanje pogodna alternativa.

S obzirom na to da PROMETHEE metoda zasniva evaluaciju na parnim poređenjima, ekstremne vrednosti ( $\pm 1$ ) ukazuju na jasnu dominaciju ili inferiornost alternative. U tom kontekstu, mobilni sistem ostvaruje najveći broj pozitivnih doprinosa, dok reciklažna dvorišta imaju najviše negativnih, što direktno objašnjava njihov konačni rang.

#### 6.4.1 Interpretacija rezultata dobijenih PROMETHEE metodom

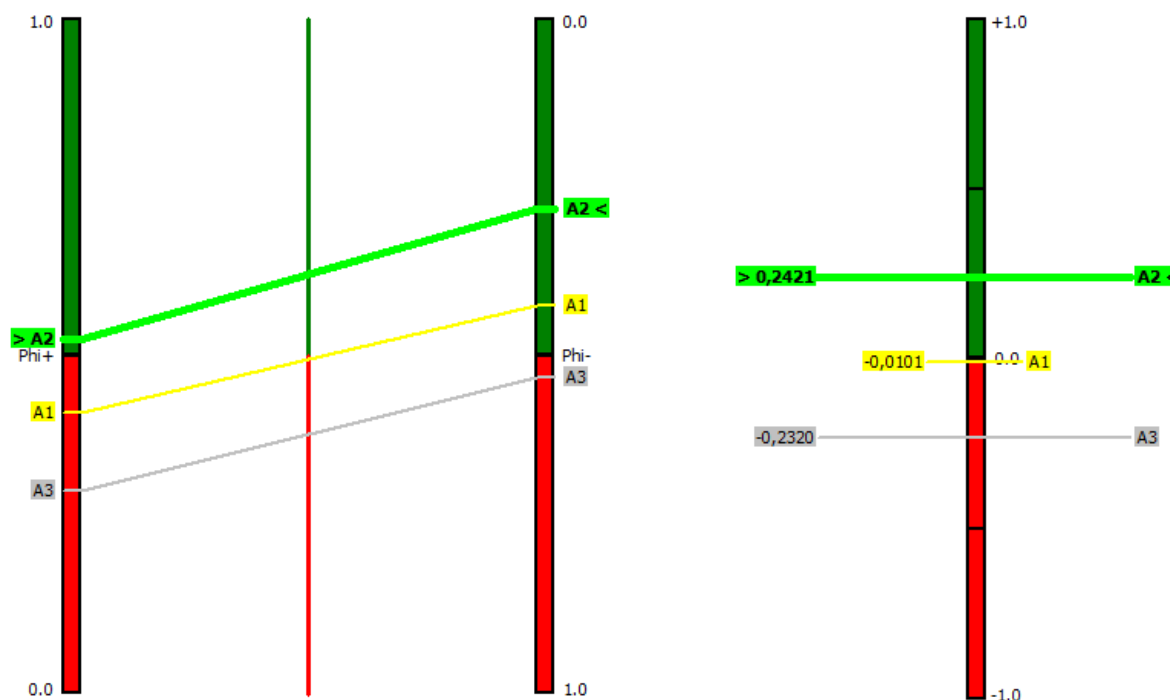
##### 6.4.1.1 Delimično rangiranje i kompletno rangiranje

PROMETHEE metoda omogućava dobijanje dva tipa rangiranja alternativa:

- **Delimično rangiranje (PROMETHEE I)** zasniva se na izračunavanju pozitivnog ( $\Phi^+$ ) i negativnog ( $\Phi^-$ ) toka preferencija. Ovaj pristup omogućava uočavanje situacija u kojima nije moguće jednoznačno utvrditi koja alternativa ima prednost, usled suprotnih vrednosti pozitivnog i negativnog toka preferencija.
- **Kompletno rangiranje (PROMETHEE II)** zasniva se na neto toku preferencija ( $\Phi$ ), koji predstavlja razliku između pozitivnog i negativnog toka ( $\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$ ), čime se omogućava potpuno rangiranje svih alternativa.

Na kartici delimičnog rangiranja (PROMETHEE I), leva kolona prikazuje rangiranje alternativa prema pozitivnom toku preferencija ( $\Phi^+$ ), pri čemu alternativa A2 (mobilni sistem) zauzima prvo mesto, zatim slede A1 (stacionarni sistem) i A3 (reciklažna dvorišta). Desna kolona prikazuje rangiranje prema negativnom toku preferencija ( $\Phi^-$ ), gde mobilni sistem takođe ostvaruje najpovoljniji rezultat, odnosno ima najmanji negativni tok, a slede ga A1 i

A3. Na osnovu oba toka preferencija može se zaključiti da je mobilni sistem (A2) najpovoljnija alternativa u okviru PROMETHEE I rangiranja.



Grafik 6.1 PROMETHEE I delimično rangiranje (levo) i PROMETHEE II kompletno rangiranje (desno)

Kompletno rangiranje dobijeno primenom PROMETHEE II metode potvrđuje prethodne nalaze. Alternativa A2 (mobilni sistem) nalazi se u gornjoj zoni sa vrednošću  $\Phi = 0,2421$ , što jasno ukazuje na njenu dominantnu poziciju u odnosu na ostale alternative. Njena udaljenost od nulte vrednosti potvrđuje da ova alternativa ostvaruje značajnu prednost u većini kriterijuma. Alternativa A1 (stacionarni sistem) pozicionirana je veoma blizu nulte vrednosti ( $\Phi = -0,0101$ ), što ukazuje na gotovo uravnotežen odnos između pozitivnih i negativnih preferencija. Ovakav položaj sugerise da A1 predstavlja kompromisno rešenje, bez izražene dominacije nad drugim alternativama. Alternativa A3 (reciklažna dvorišta) nalazi se u donjoj zoni sa negativnom vrednošću neto toka ( $\Phi = -0,2320$ ), što ukazuje na njenu inferiornu poziciju u odnosu na ostale alternative. Njena udaljenost od nulte vrednosti u negativnom smeru potvrđuje da ova alternativa najčešće gubi u parnim poređenjima.

Iako kompletno rangiranje PROMETHEE II omogućava jednostavniju interpretaciju rezultata, ono je ujedno i manje informativno, jer ne prikazuje odvojeno pozitivne ( $\Phi^+$ ) i negativne ( $\Phi^-$ ) tokove preferencija. Nasuprot tome, delimično rangiranje PROMETHEE I pruža dodatni uvid kroz mogućnost identifikacije neuporedivosti između alternativa, što je

posebno značajno u situacijama sa većim brojem podkriterijuma i konfliktnim performansama alternativa.

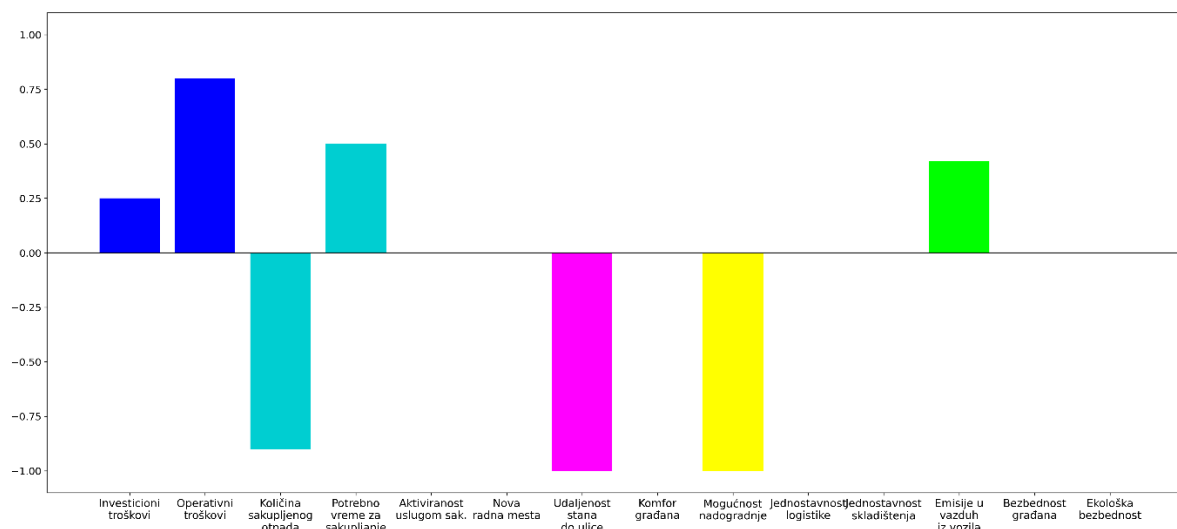
#### 6.4.1.2 GAIA Web "Unicriterion net flow"

U nastavku su prikazani "Unicriterion net flow" dijagrami koji ilustruju doprinos pojedinačnih podkriterijuma ukupnom neto toku preferencije. Svaki podkriterijum ima pozitivan ili negativan uticaj na konačno rangiranje alternative, u zavisnosti od njegove performanse i težine. Podkriterijumi čije su vrednosti iznad nulte ose imaju pozitivan doprinos, dok podkriterijumi ispod nule negativno utiču na rangiranje.

##### *Stacionarni sistem*

Grafički prikaz pojedinačnih neto tokova preferencije za stacionarni sistem ukazuje na heterogen profil performansi po posmatranim kriterijumima. Pozitivne vrednosti zabeležene su kod kriterijuma kao što su operativni troškovi i potrebno vreme za sakupljanje, što potvrđuje efikasnost ovog sistema u organizacionom i logističkom smislu. Takođe, umereno pozitivan doprinos prisutan je i kod emisija, što ukazuje na relativno povoljan ekološki aspekt u poređenju sa ostalim alternativama.

Sa druge strane, izraženo negativne vrednosti javljaju se kod podkriterijuma količine sakupljenog otpada, otpornosti sistema i mogućnosti nadogradnje, što ukazuje na ograničenja stacionarnog sistema u pogledu fleksibilnosti i prilagođavanja savremenim zahtevima sistema upravljanja otpadom. Negativan doprinos kod ovih podkriterijuma značajno utiče na njegov ukupni neto tok preferencije. Veći broj podkriterijuma sa vrednostima bliskim nuli (npr. pokrivenost, komfor građana, bezbednost i ekološka bezbednost) ukazuje da stacionarni sistem nema izraženu prednost niti slabost u tim aspektima, već ostvaruje neutralne performanse u odnosu na druge alternative.



Grafik 6.2 Doprinos podkriterijuma ukupnom rangiranju Alternative 1 (stacionarni sistem)

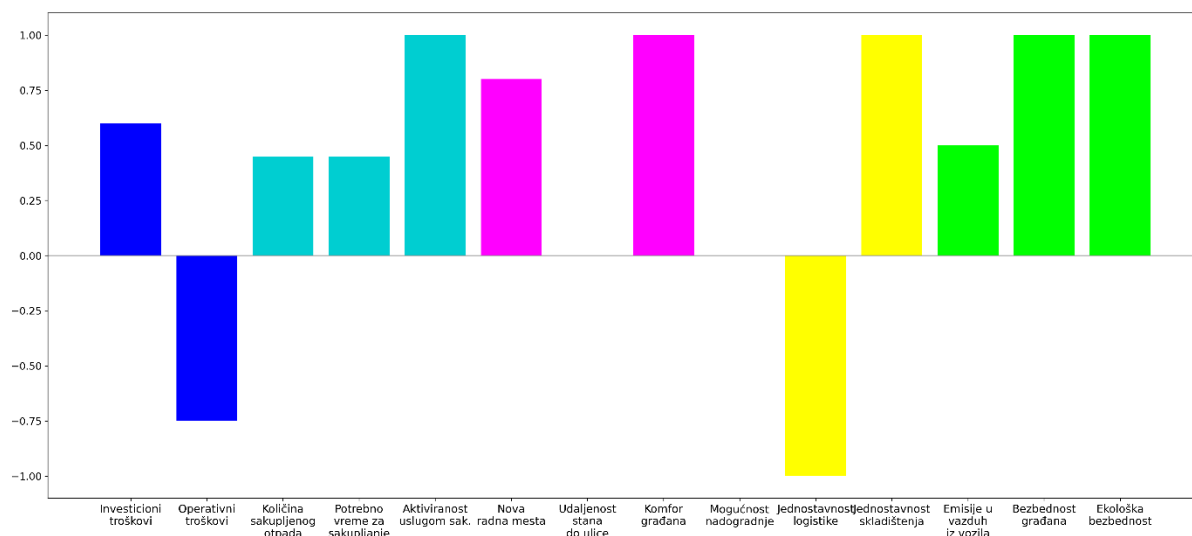
Ukupno posmatrano, stacionarni sistem karakteriše kombinacija izraženih prednosti u operativnoj efikasnosti i određenih slabosti u pogledu fleksibilnosti i performansi sistema, što rezultira njegovom pozicijom blizu neutralne vrednosti neto toka preferencije i rangiranjem na drugo mesto.

#### Mobilni sistem

Najizraženije prednosti mobilnog sistema uočavaju se kod kriterijuma pokrivenosti uslugom, komfora građana, bezbednosti i ekološke bezbednosti, gde ostvaruje maksimalne ili visoko pozitivne vrednosti. Takođe, značajan doprinos vidljiv je i kod količine sakupljenog otpada, potrebnog vremena za sakupljanje i broja radnih mesta, što ukazuje na njegovu efikasnost i društvenu prihvatljivost.

U pogledu finansijskih kriterijuma, mobilni sistem ostvaruje veoma povoljne investicione troškove, dok je kod operativnih troškova prisutan negativan doprinos, što predstavlja njegovu glavnu slabost. Međutim, zbog kompenzacije kroz veliki broj kriterijuma sa visokim pozitivnim vrednostima, ovaj nedostatak nema presudan uticaj na konačni rezultat.

Negativan doprinos takođe je izražen kod kriterijuma jednostavnosti logistike, što ukazuje na određenu složenost u organizaciji sistema. Ipak, ovaj nedostatak je nadmašen prednostima u drugim ključnim aspektima.

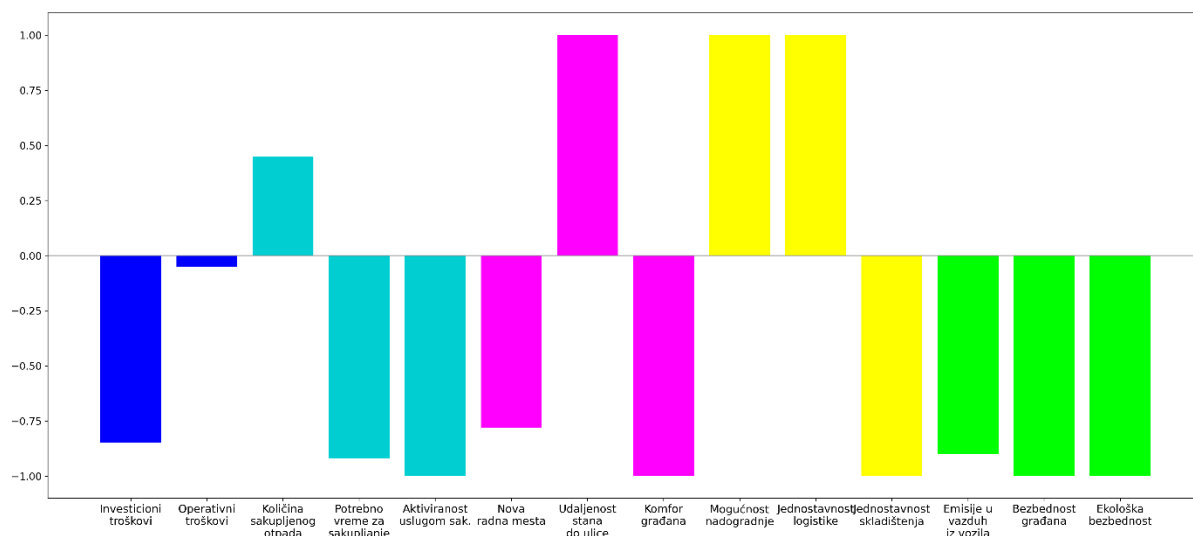


Grafik 6.3 Doprinos podkriterijuma ukupnom rangiranju Alternative 2 (mobilni sistem)

Ukupno posmatrano, mobilni sistem pokazuje najuravnoteženiji i najpovoljniji profil performansi, sa dominantnim brojem pozitivnih doprinosa, što direktno objašnjava njegovu najvišu vrednost neto toka preferencije i rangiranje na prvo mesto u okviru PROMETHEE II analize.

### Reciklažna dvorišta

Grafički prikaz pojedinačnih neto tokova preferencije za sistem reciklažnih dvorišta ukazuje na izraženo neujednačen profil performansi, sa dominantno negativnim vrednostima kod većine kriterijuma. Negativni doprinosi posebno su izraženi kod investicionih troškova, potrebnog vremena za sakupljanje, pokrivenosti uslugom, kao i kod društvenih i ekoloških kriterijuma, što ukazuje na značajna ograničenja ove alternative u odnosu na druge posmatrane sisteme. Iako reciklažna dvorišta ostvaruju pozitivne vrednosti kod određenih kriterijuma, kao što su otpornost sistema na uticaj neformalnog sektora, mogućnost nadogradnje i kompatibilnosti, kao i pojedini logistički aspekti, ovi pozitivni doprinosi nisu dovoljni da kompenzuju izražene slabosti u ključnim segmentima sistema.

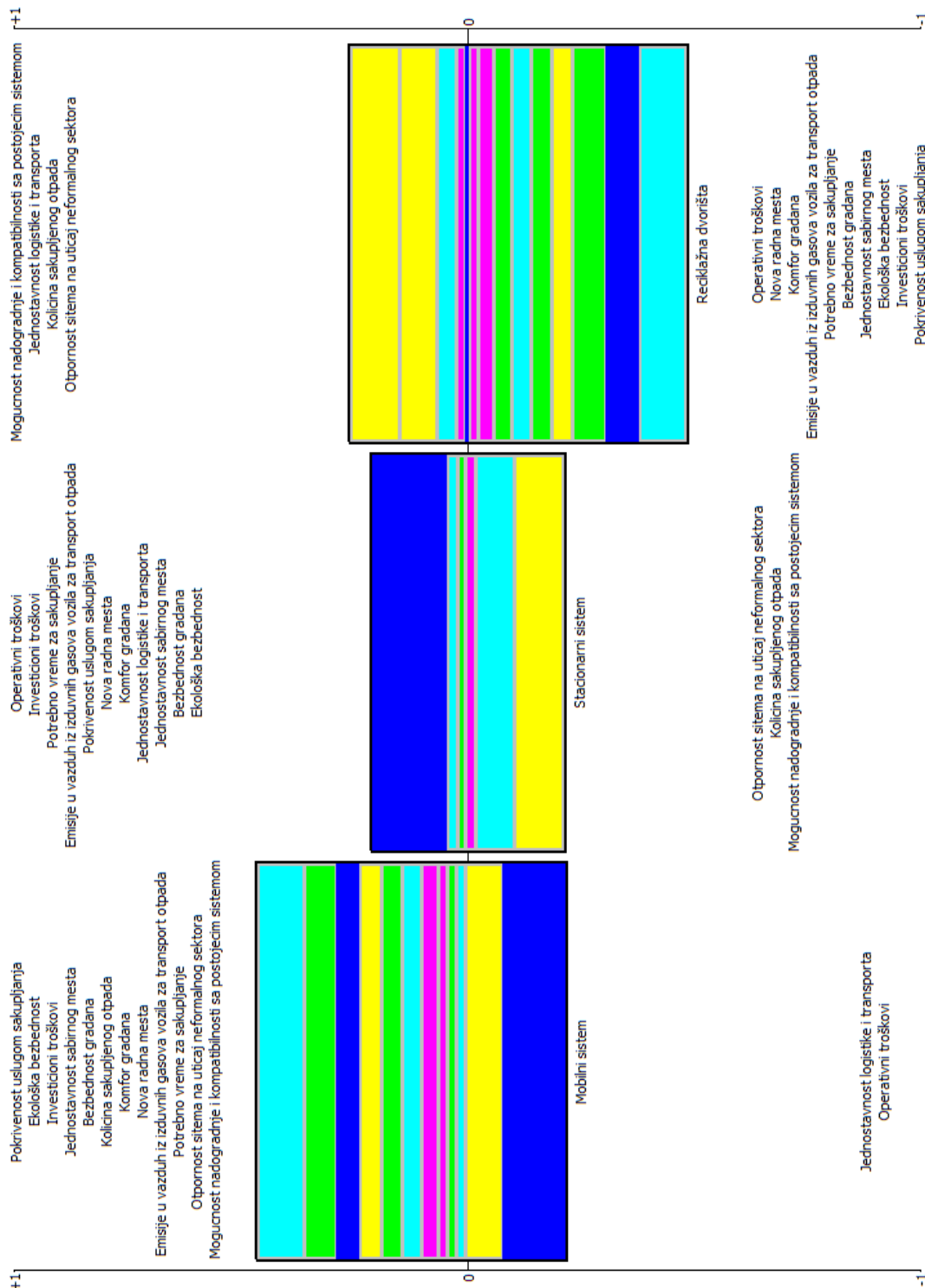


Grafk 6.4 Prikaz pojedinačnih neto tokova preferencije za Alternativu 3 (sistem reciklažnih dvorišta)

Ukupno posmatrano, sistem reciklažnih dvorišta karakteriše ograničen broj prednosti i veliki broj slabosti u odnosu na druge alternative, što rezultira negativnim neto tokom preferencije i njegovim rangiranjem na poslednje mesto u okviru PROMETHEE II analize.

#### 6.4.1.3 PROMETHEE II "Rainbow"

Prikaz kumulativnih doprinosa kriterijuma po alternativama omogućava detaljniji uvid u strukturu neto toka preferencije i način na koji pojedinačni kriterijumi utiču na konačno rangiranje. Svaka alternativa prikazana je kao zbir pozitivnih i negativnih doprinosa, pri čemu gornji deo (iznad nule) predstavlja kriterijume u kojima alternativa dominira, dok donji deo (ispod nule) ukazuje na kriterijume u kojima zaostaje u odnosu na druge alternative.



Grafik 6.5 PROMETHEE II "Rainbow" dijagram

Mobilni sistem pokazuje najuravnoteženiji profil, sa velikim brojem kriterijuma koji doprinose pozitivnom delu dijagrama. Dominantni pozitivni doprinosi potiču od kriterijuma kao što su pokrivenost uslugom, ekološka bezbednost, kao i investicioni troškovi. Negativni doprinosi su prisutni, ali ograničeni, i odnose se na operativne troškove i logističke performanse, što ukupno rezultira najvećim neto tokom preferencije.

Stacionarni sistem ima izraženije uravnotežen profil, sa približno jednakim udelom pozitivnih i negativnih doprinosa. Njegove prednosti vezane su za operativne troškove i vreme sakupljanja, dok se slabosti javljaju kod fleksibilnosti sistema, količine sakupljenog otpada i pojedinih infrastrukturnih kriterijuma. Ovakva raspodela doprinosa objašnjava neto tok blizak nuli i njegovu poziciju kao kompromisnog rešenja.

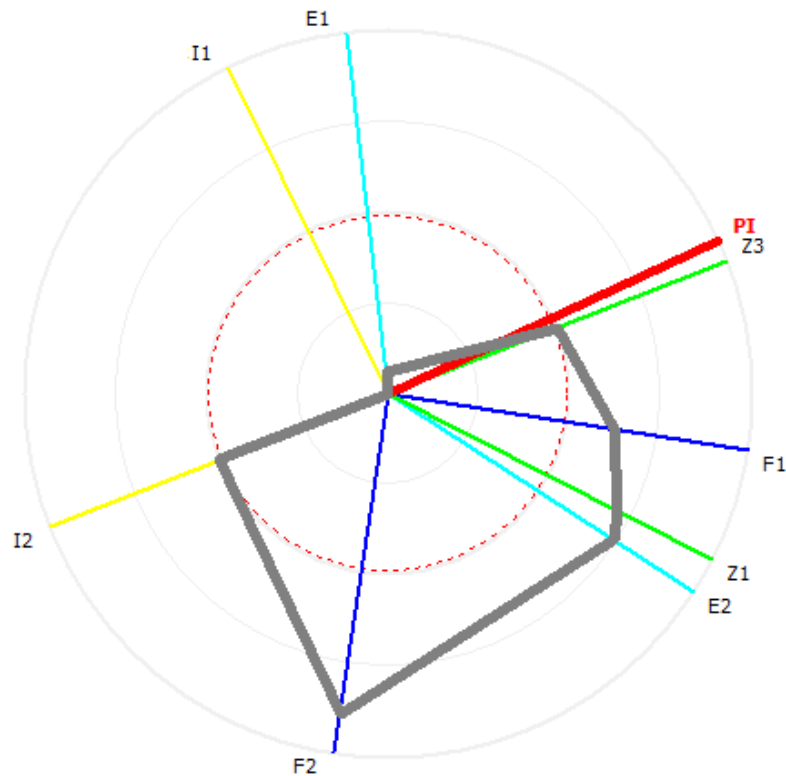
Reciklažna dvorišta karakteriše dominacija negativnih doprinosa, pri čemu veliki broj kriterijuma učestvuje u donjem delu dijagrama. Iako postoje pojedinačne prednosti, poput otpornosti sistema i mogućnosti nadogradnje, one su nedovoljne da nadoknade izražene slabosti kod ključnih kriterijuma, kao što su investicioni troškovi, pokrivenost uslugom, komfor građana i ekološki aspekti. Zbog toga ova alternativa ostvaruje negativan neto tok i najniži rang.

#### 6.4.1.4 GAIA radar

GAIA dijagram (*eng. Geometrical Analysis for Interactive Aid*) predstavlja grafički alat u okviru PROMETHEE II metode koji omogućava vizuelnu interpretaciju odnosa između alternativa i podkriterijuma. U nastavku je prikazan GAIA dijagram, koji ilustruje međusobne odnose podkriterijuma i njihov uticaj na rangiranje alternativa.

Svaki podkriterijum predstavljen je vektorom čiji pravac i dužina ukazuju na njegov uticaj i međusobni odnos sa ostalim podkriterijumima, dok ugao između vektora omogućava identifikaciju saglasnosti ili konflikta. Vektor PI predstavlja osu odluke i ukazuje na smer optimalnog kompromisa između podkriterijuma, dok isprekidani krug prikazuje vrednost ukupnog neto toka preferencija. Alternative koje su usmerene ka ovom vektoru ostvaruju bolje ukupne performanse.

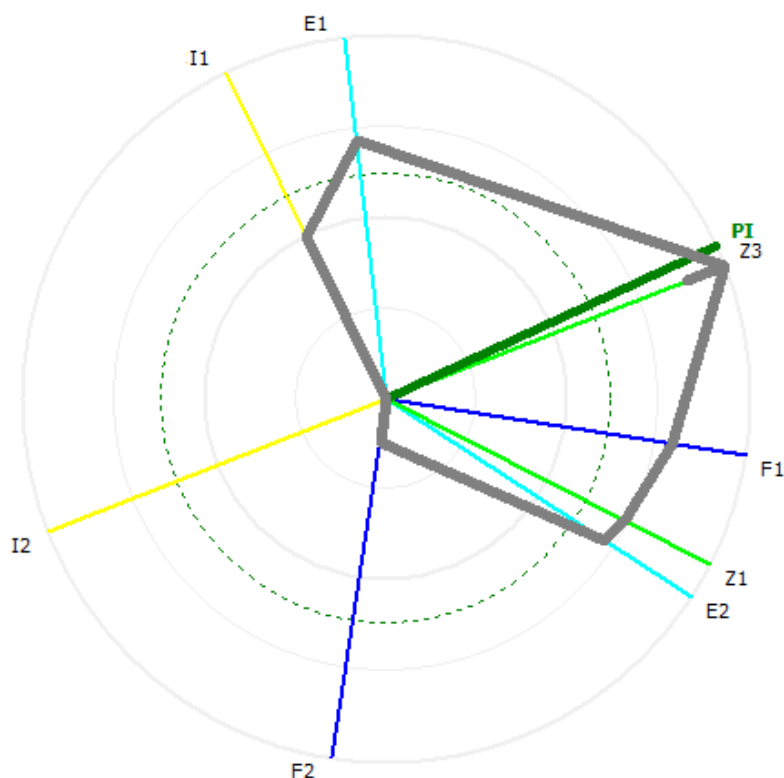
Podkriterijumi koji su orijentisani u sličnom pravcu kao i stacionarni sistem imaju pozitivan uticaj na njegovo rangiranje, dok kriterijumi u suprotnom pravcu ukazuju na slabosti ove alternative. Uočava se da postoji izražen konflikt između ekonomskih kriterijuma (npr. operativni troškovi) i kriterijuma koji se odnose na dostupnost, efikasnost i ekološku bezbednost sistema.



Grafik 6.6 GAIA dijagram za stacionarni sistem

U posmatranom slučaju, kriterijumi kao što su **Z3 (ekološka bezbednost)** i PI osa (pravac odlučivanja) gotovo su kolinearni, što ukazuje da upravo ovi kriterijumi imaju dominantan uticaj na konačno rangiranje alternativa. Slično tome, kriterijumi poput **Z1 (emisije)** i **E2 (potrebno vreme)** nalaze se u bliskom pravcu, što znači da zajedno utiču na preferenciju u istom smeru.

Sa druge strane, kriterijumi poput **F2 (operativni troškovi)** i infrastrukturnih kriterijuma (**I1, I2**) nalaze se u suprotnom smeru u odnosu na PI osu, što ukazuje na konflikt sa kriterijumima koji favorizuju najbolje rangiranu alternativu. To znači da alternative koje imaju prednost u troškovima ne moraju nužno biti najbolje rangirane ako zaostaju u drugim, važnijim kriterijumima.



Grafik 6.7 GAIA dijagram za mobilni sistem

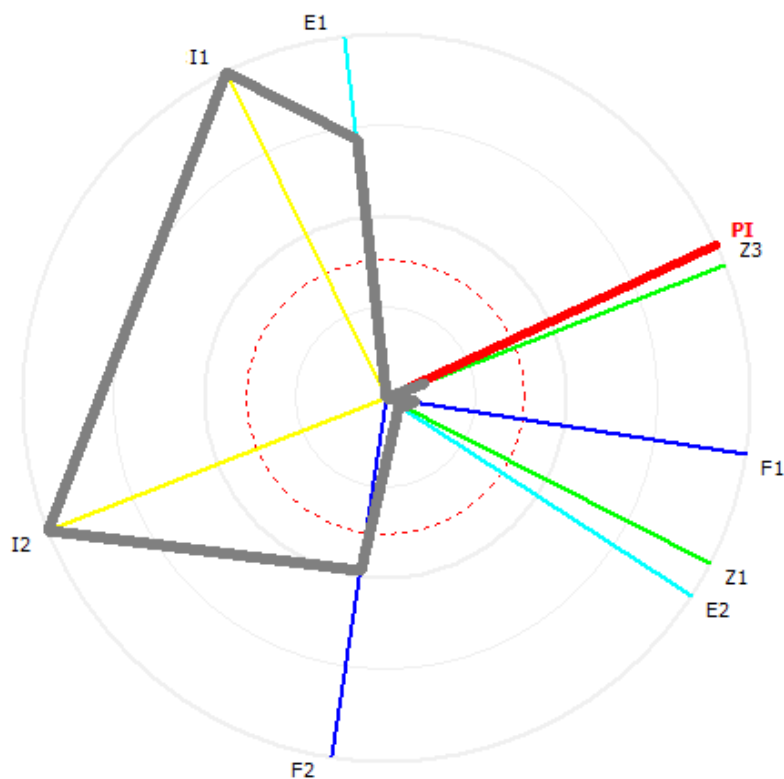
Na GAIA radarskom dijagramu mobilni sistem pokazuje jasnu usklađenost sa pravcem glavne ose odlučivanja (PI), koja je gotovo kolinearna sa kriterijumom **Z3 (ekološka bezbednost)**. Vrh poligona mobilnog sistema upravo je najizraženiji u tom pravcu, što direktno ukazuje da ova alternativa ostvaruje najbolje performanse u kriterijumima koji imaju najveći uticaj na konačnu odluku.

Takođe, uočava se da mobilni sistem ima visoke vrednosti u pravcu kriterijuma **Z1 (emisije)** i **E2 (potrebno vreme za sakupljanje)**, koji su orijentisani slično kao i PI osa. To znači da ova alternativa istovremeno zadovoljava i ekološke i operativne zahteve sistema, što dodatno doprinosi njenom rangiranju.

U pravcu kriterijuma **F1 (investicioni troškovi)** poligon je takođe izražen, što ukazuje na povoljne investicione karakteristike mobilnog sistema. Nasuprot tome, u pravcu kriterijuma **F2 (operativni troškovi)** vidi se znatno slabija vrednost (poligon je bliže centru), što potvrđuje da su operativni troškovi jedna od glavnih slabosti ove alternative.

Kriterijumi **I1 i I2 (infrastrukturni aspekti)** nalaze se u suprotnom ili ortogonalnom pravcu u odnosu na dominantne kriterijume, a vrednosti mobilnog sistema u tom delu dijagrama su niže, što ukazuje da ova alternativa nema izraženu prednost u infrastrukturnim karakteristikama.

Važno je naglasiti da je poligon mobilnog sistema u većem delu izvan referentne (isprekidane) kružnice, što ukazuje na natprosečne performanse u odnosu na sve alternative za većinu ključnih kriterijuma



Grafik 6.8 GAIA dijagram za sistem reciklažnih dvorišta

Na GAIA radarskom dijagramu reciklažna dvorišta pokazuju izraženu neusaglašenost sa pravcem glavne ose odlučivanja (PI), koja je usmerena ka kriterijumu **Z3 (ekološka bezbednost)**. Poligon ove alternative je u tom pravcu veoma blizu centra, što ukazuje na slabe performanse u kriterijumima koji imaju najveći uticaj na konačnu odluku. Nasuprot tome, najizraženiji vrhovi poligona nalaze se u pravcu kriterijuma **I1 i I2 (infrastrukturni aspekti)**, gde reciklažna dvorišta ostvaruju najbolje performanse. Ovo potvrđuje da ova alternativa ima prednosti u pogledu otpornosti sistema i mogućnosti nadogradnje, odnosno infrastrukturne stabilnosti. U pravcu kriterijuma **F2 (operativni troškovi)** poligon je umeren, što ukazuje na relativno prihvatljive operativne karakteristike. Međutim, u pravcu kriterijuma **F1 (investicioni troškovi)**, kao i **Z1 (emisije)** i **E2 (vreme sakupljanja)**, vrednosti su niske i bliske centru, što potvrđuje značajne slabosti ove alternative u ekonomskom i operativno-ekološkom smislu. Takođe, kriterijum **E1 (količina sakupljenog otpada)** pokazuje srednje vrednosti, ali bez dovoljno izraženog doprinosa da utiče na ukupno poboljšanje pozicije alternative.

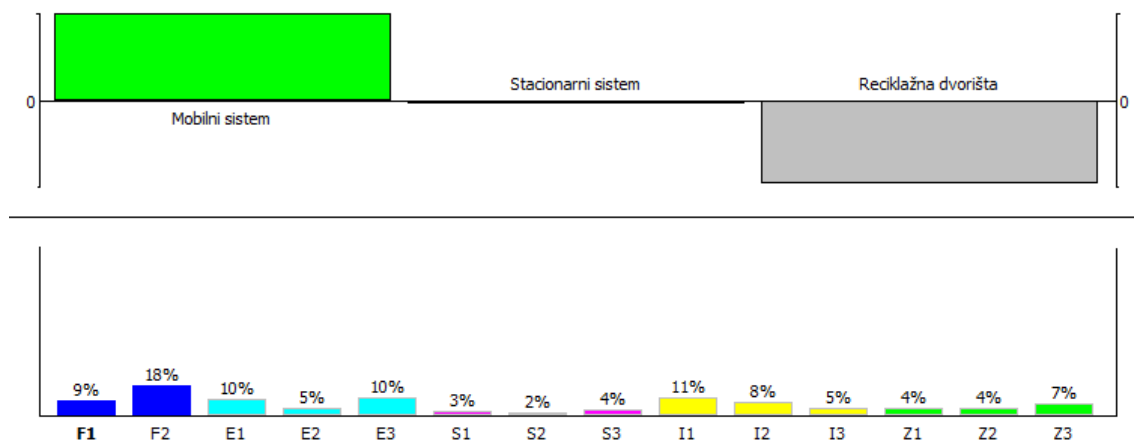
Važno je naglasiti da se najveći deo poligona nalazi unutar referentne (isprekidane) kružnice, što ukazuje da reciklažna dvorišta u većini kriterijuma ostvaruju ispod prosečne performanse u odnosu na druge alternative.

## 6.5 Analiza osetljivosti TOPSIS i PROMETHEE II metode

Radi provere stabilnosti dobijenog rangiranja sprovedena je analiza osetljivosti TOPSIS i PROMETHEE II metode, zasnovana na variranju težinskih koeficijenata podkriterijuma. Definisana su tri scenarija: u prvom su težine izjednačene, dok su u drugom i trećem scenariju pojedini podkriterijumi dodatno naglašeni, uz proporcionalno smanjenje ostalih, tako da suma težina ostane jednaka jedinici. Ovakav pristup omogućava očuvanje relativnih odnosa između ostalih podkriterijuma i obezbeđuje konzistentnost modela.

Analiza osetljivosti PROMETHEE II metode sprovedena je korišćenjem opcije „Walking Weights“, koja omogućava praćenje promena neto toka preferencije ( $\Phi$ ) u zavisnosti od promena težina kriterijuma.

U nultom scenariju na kom se zasniva doktorska disertacija, obe metode daju identično rangiranje alternativa: mobilni sistem zauzima prvo mesto, stacionarni sistem drugo, dok su reciklažna dvorišta najmanje povoljna alternativa.



Grafik 6.9 Rang alternativa i vrednosti težinskih koeficijenata u nultom scenariju

### 6.5.1 Scenario I – izjednačene težine

U prvom scenariju, gde su sve težine podkriterijuma izjednačene (0,071), rangiranje alternativa ostaje nepromenjeno u obe metode. Mobilni sistem zadržava prvo mesto, stacionarni drugo, a reciklažna dvorišta treće.

Tabela 6.16 Rezultati analize osetljivosti TOPSIS metode za prvi scenario

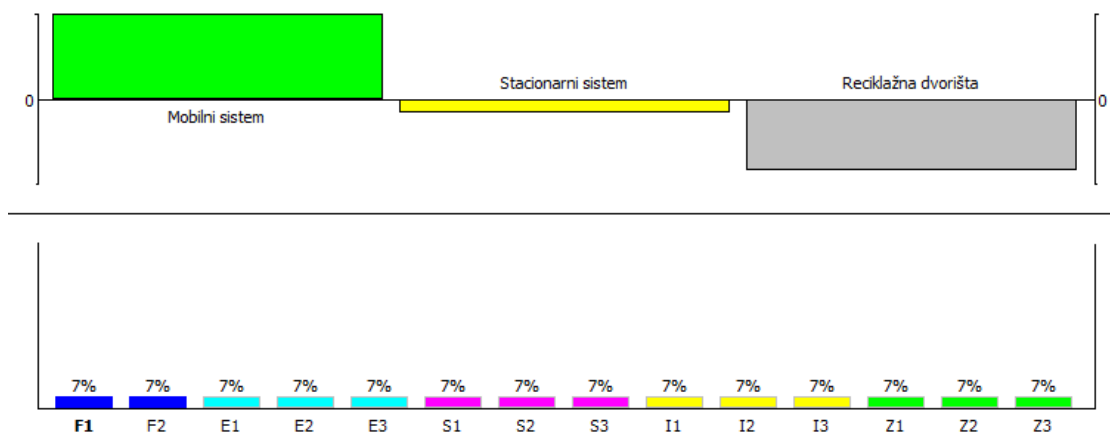
	D+	D-	RC+	Rang
<b>Stacionarni sistem</b>	0,091	0,129	0,587	2
<b>Mobilni sistem</b>	0,057	0,165	0,742	1
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,162	0,074	0,313	3

Tabela 6.17 Rezultati analize osetljivosti PROMETHEE II metode za prvi scenario

	$\Phi^+$	$\Phi^-$	$\Phi$	Rang
<b>Stacionarni sistem</b>	0,381	0,449	-0,068	2
<b>Mobilni sistem</b>	0,623	0,198	0,425	1
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,264	0,621	-0,357	3

Pozitivni tok preferencija ( $\Phi^+$ ), negativni tok preferencija ( $\Phi^-$ ), neto tok preferencija ( $\Phi$ ) i konačan rang alternativa

U nastavku je dat grafički prikaz net toka preferencija PROMETHEE II metode ( $\Phi$ ) za tri alternative, dok donji deo prikazuje procentualne težine podkriterijuma.



Grafik 6.10 Rang alternativa i izjednačene težine podkriterijuma za prvi scenario

Ovakav rezultat ukazuje na određeni nivo stabilnosti modela, odnosno na činjenicu da mobilni sistem ostvaruje najbolji ukupni rezultat čak i kada se eliminiše uticaj različitog značaja kriterijuma.

## 6.5.2 Scenario II – povećanje značaja operativnih troškova

U drugom scenariju povećana je težina podkriterijuma operativnih troškova (F2) za 20%. U ovom slučaju dolazi do promene rangiranja kod TOPSIS metode, gde stacionarni sistem zauzima prvo mesto, dok mobilni sistem pada na drugo mesto.

Tabela 6.18 Rang alternativa TOPSIS metode za drugi scenario

	D+	D-	RC+	Rang
<b>Stacionarni sistem</b>	0,098	0,152	0,609	1
<b>Mobilni sistem</b>	0,125	0,146	0,539	2
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,150	0,102	0,405	3

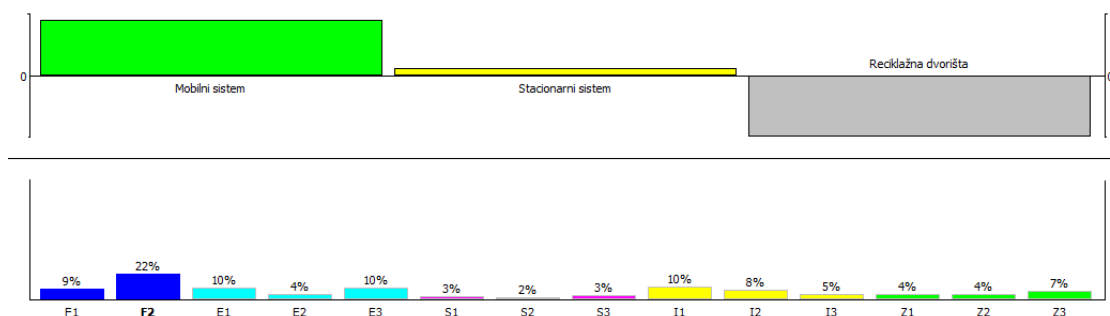
Međutim, kod PROMETHEE II metode rangiranje ostaje nepromenjeno, pri čemu mobilni sistem zadržava vodeću poziciju.

Tabela 6.19 Rang alternativa PROMETHEE II metode za drugi scenario

	$\Phi^+$	$\Phi^-$	$\Phi$	Rang
<b>Stacionarni sistem</b>	0,432	0,407	0,025	2
<b>Mobilni sistem</b>	0,502	0,303	0,199	1
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,297	0,521	-0,223	3

Pozitivni tok preferencija ( $\Phi^+$ ), negativni tok preferencija ( $\Phi^-$ ), neto tok preferencija ( $\Phi$ ) i konačan rang alternativa

Grafik prikazuje net tok preferencija PROMETHEE II metode ( $\Phi$ ) za tri alternative, dok donji deo prikazuje procentualne težine podkriterijuma pri povećanju težine operativnih troškova za 20%.



Grafik 6.11 Rang alternativa i težine podkriterijuma za drugi scenario

Ovaj rezultat ukazuje da PROMETHEE II metoda pokazuje veću robusnost u odnosu na promene težinskih koeficijenata, dok je TOPSIS metoda osetljivija na povećanje značaja pojedinačnih kriterijuma, naročito ekonomskih.

### 6.5.3 Scenario III – povećanje značaja pokrivenosti uslugom sakupljanja i jednostavnosti logistike i transporta

U trećem scenariju analiziran je uticaj istovremenog povećanja težina podkriterijuma pokrivenosti uslugom sakupljanja (E3) i jednostavnosti logistike i transporta (I2). Čak i pri značajnom povećanju (do 90%), nije došlo do promene rangiranja ni u jednoj od primenjenih metoda.

Tabela 6.20 Provera osetljivosti TOPSIS metode za treći scenario

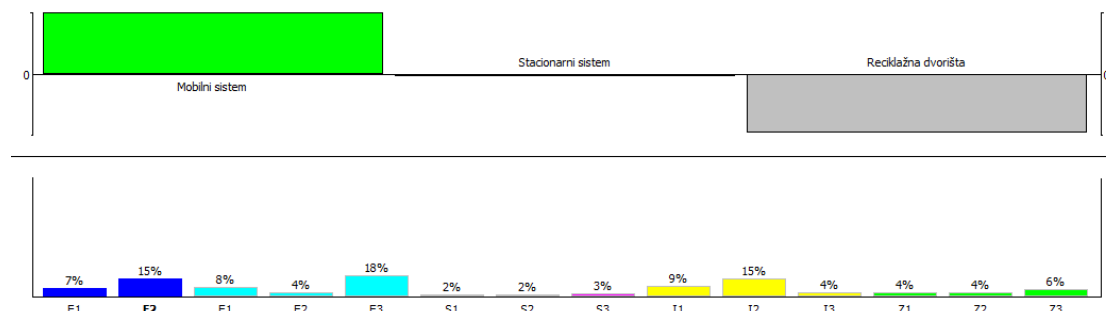
	<b>D+</b>	<b>D-</b>	<b>RC+</b>	<b>Rang</b>
<b>Stacionarni sistem</b>	0,105	0,130	0,555	2
<b>Mobilni sistem</b>	0,101	0,171	0,630	1
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,171	0,096	0,360	3

Tabela 6.21 Rang alternativa PROMETHEE II metode za treći scenario

	$\Phi^+$	$\Phi^-$	$\Phi$	<b>Rang</b>
<b>Stacionarni sistem</b>	0,431	0,439	-0,008	2
<b>Mobilni sistem</b>	0,524	0,319	0,205	1
<b>Reciklažna dvorišta</b>	0,333	0,529	-0,196	3

Pozitivni tok preferencija ( $\Phi^+$ ), negativni tok preferencija ( $\Phi^-$ ), neto tok preferencija ( $\Phi$ ) i konačan rang alternativa

Grafik prikazuje neto tok preferencija PROMETHEE II metode ( $\Phi$ ) za tri alternative, pri čemu su u donjem delu prikazuje težine podkriterijuma pri povećanju težine koeficijenata podkriterijuma E3 i I2 za 90 % .



*Grafik 6.12 Rang alternativa i težine podkriterijuma za treći scenario*

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da je dobijeno rangiranje alternativa relativno stabilno i robusno u odnosu na promene težinskih koeficijenata.

Mobilni sistem se u svim scenarijima pokazuje kao najpovoljnija alternativa, posebno u PROMETHEE II metodi, gde rangiranje ostaje nepromenjeno bez obzira na varijacije težina. Ovo ukazuje na njegovu izraženu i stabilnu prednost, zasnovanu na uravnoteženim performansama kroz veći broj kriterijuma.

Sa druge strane, TOPSIS metoda pokazuje veću osetljivost na promene težina, naročito kada se povećava značaj finansijskih kriterijuma, što može dovesti do promene rangiranja u korist stacionarnog sistema.

Reciklažna dvorišta ostaju najmanje pogodna alternativa u svim analiziranim scenarijima, što potvrđuje konzistentnost njihovog slabijeg ukupnog učinka.

Ukupno posmatrano, rezultati potvrđuju da izbor optimalne alternative zavisi od preferencija donosioca odluke, ali i da mobilni sistem predstavlja najrobusnije rešenje, jer zadržava vodeću poziciju u različitim uslovima vrednovanja kriterijuma.

Razlike u rezultatima TOPSIS i PROMETHEE II metode proizilaze iz njihovih metodoloških osnova. TOPSIS omogućava kompenzaciju između kriterijuma i pokazuje veću osetljivost na promene težina, dok PROMETHEE II naglašava dominaciju alternativa i obezbeđuje stabilnije rangiranje.

## 7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Rezultati sprovedenog istraživanja ukazuju da sistem upravljanja električnim i elektronskim otpadom u Republici Srbiji, što je potvrđeno analizom sistema u Novom Sadu, i dalje karakteriše nedovoljna razvijenost institucionalnog okvira, ograničeni infrastrukturni kapaciteti i nedovoljna koordinacija između ključnih aktera sistema. Uprkos postojanju zakonskog okvira koji formalno prepoznaje principe održivog upravljanja otpadom i proširene odgovornosti proizvođača, implementacija ovih principa u praksi je ograničena, što se negativno odražava na efikasnost sistema sakupljanja i ukupne performanse upravljanja e-otpadom.

Empirijska analiza pokazuje da se postojeći sistem sakupljanja u najvećoj meri oslanja na tržišno orijentisane aktivnosti ovlašćenih operatera, uz nedovoljno razvijenu ulogu lokalnih samouprava u organizaciji primarnog sakupljanja, posebno iz domaćinstava. Ovakva organizacija sistema, dodatno opterećena prisustvom neformalnog sektora, dovodi do fragmentacije tokova otpada, smanjene transparentnosti i gubitka vrednih materijala, čime se umanjuje ukupna efikasnost sistema i otežava ostvarivanje ciljeva cirkularne ekonomije.

U cilju identifikacije optimalnog modela sakupljanja, u okviru istraživanja definisane su i analizirane tri alternativne organizacione strukture: stacionarni sistem (A1), mobilni sistem (A2) i sistem reciklažnih dvorišta (A3). Njihova evaluacija izvršena je primenom integrisanog metodološkog okvira zasnovanog na kombinaciji AHP, TOPSIS i PROMETHEE II metoda, čime je omogućeno simultano razmatranje finansijskih, tehničkih, socijalnih, infrastrukturnih i ekoloških kriterijuma.

Primena AHP metode omogućila je utvrđivanje relativnog značaja kriterijuma i podkriterijuma, pri čemu su globalne težine pokazale da najveći uticaj na donošenje konačne odluke imaju podkriterijumi F2 ( $W_{global} = 0,181$ ), I1 ( $W_{global} = 0,109$ ), E3 ( $W_{global} = 0,103$ ) i E1 ( $W_{global} = 0,099$ ). Visoke vrednosti ovih težina ukazuju da su u procesu izbora optimalnog sistema presudni troškovi posmatrani kroz finansijsku dimenziju, kao i infrastrukturna prilagodljivost i operativna efikasnost sistema, naročito u pogledu količine sakupljenog otpada i pokrivenosti uslugom. Sa druge strane, najmanji uticaj na konačnu odluku imaju podkriterijumi S2 ( $W_{global} = 0,020$ ), S1 ( $W_{global} = 0,027$ ) i S3 ( $W_{global} = 0,035$ ), što ukazuje da socijalni aspekt, iako relevantan, u okviru definisanog modela ima manji uticaj u odnosu na druge parametre.

Na osnovu tako definisanih težina izvršeno je rangiranje alternativa primenom TOPSIS metode. Dobijeni rezultati pokazuju da je mobilni sistem (A2) rangiran kao najpovoljnija alternativa, sa najvećom vrednošću koeficijenta relativne bliskosti idealnom rešenju  $RC_i^+ = 0,586$ . Neposredno iza njega nalazi se stacionarni sistem (A1) sa vrednošću  $RC_i^+ = 0,580$ , dok je sistem reciklažnih dvorišta (A3) rangiran kao najmanje povoljna alternativa, sa znatno nižom vrednošću  $RC_i^+ = 0,399$ . Dobijene vrednosti ukazuju da su A1 i A2 relativno bliski po ukupnim performansama, ali da mobilni sistem ipak ostvaruje neznatnu prednost zahvaljujući boljoj uravnoteženosti u odnosu na kriterijume sa najvećim težinama. Udaljenosti od idealnog i anti-idealnog rešenja dodatno potvrđuju ovakvu interpretaciju: za A1 su dobijene vrednosti  $D^+ = 0,102$  i  $D^- = 0,141$ , za A2  $D^+ = 0,108$  i  $D^- = 0,153$ , dok za A3 iznose  $D^+ = 0,152$  i  $D^- = 0,101$ . Ovakvi rezultati jasno ukazuju da je A3 najudaljenija od idealnog, a istovremeno najbliža anti-idealnom rešenju, zbog čega zauzima poslednju poziciju.

Rezultati PROMETHEE II metode potvrđuju dobijenu hijerarhiju alternativa. Mobilni sistem (A2) ostvaruje najveću vrednost neto preferencijalnog toka  $\Phi = 0,205$ , čime je potvrđen kao dominantna alternativa. Stacionarni sistem (A1) beleži znatno nižu pozitivnu vrednost  $\Phi = 0,040$ , što ukazuje na njegov kompromisni karakter, dok sistem reciklažnih dvorišta (A3) ostvaruje negativnu vrednost  $\Phi = -0,245$ , čime se jasno potvrđuje njegova inferiorna pozicija u odnosu na preostale dve alternative. Saglasnost između TOPSIS i PROMETHEE II rezultata ukazuje na visok stepen metodološke pouzdanosti sprovedene evaluacije.

Mobilni sistem se posebno izdvaja po visokom nivou dostupnosti usluge i mogućnosti direktnog preuzimanja otpada na mestu njegovog nastanka, čime se značajno povećava obuhvat korisnika i količina sakupljenog e-otpada. Međutim, njegova implementacija zahteva veće operativne troškove i složeniju logističku organizaciju, što ukazuje na potrebu optimizacije ruta i efikasnog upravljanja resursima.

Stacionarni sistem (A1) predstavlja kompromisno rešenje koje omogućava relativno dobru ravnotežu između troškova i organizacione efikasnosti. Centralizacija sabirnih mesta doprinosi smanjenju logističkih troškova, ali istovremeno zahteva aktivno učešće korisnika, što može ograničiti njegovu efikasnost u uslovima niskog nivoa ekološke svesti i motivacije.

Nasuprot tome, sistem reciklažnih dvorišta (A3) pokazuje najniži nivo performansi, što se može objasniti potrebom za samostalnim transportom otpada od strane korisnika, što predstavlja značajnu barijeru za učešće. Dodatno, ovaj sistem generiše najveće ekološko opterećenje usled povećanog individualnog transporta, što je potvrđeno analizom emisija.

Integracija ekološkog aspekta sprovedena je kroz modelovanje emisija zagađujućih materija primenom COPERT metodologije. Kvantifikacijom emisija zagađujućih materija utvrđeno je da sistem koji uključuje individualni transport otpada ima dominantan negativan uticaj, sa udelom emisija koji značajno prevazilazi emisije organizovanih sistema sakupljanja. Ovi rezultati naglašavaju značaj centralizovanog i logistički optimizovanog sistema sakupljanja u cilju smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte.

Analiza osetljivosti dodatno je potvrdila robusnost dobijenih rezultata, pri čemu PROMETHEE II metoda pokazuje veću stabilnost u odnosu na promene težinskih koeficijenata, dok TOPSIS metoda pokazuje veću osetljivost, posebno u scenarijima povećanog značaja finansijskih kriterijuma. Ova komplementarnost metoda potvrđuje pouzdanost primenjenog metodološkog okvira i njegovu primenljivost u različitim uslovima odlučivanja.

Na osnovu sprovedenog istraživanja može se zaključiti da unapređenje sistema sakupljanja e-otpada u Republici Srbiji zahteva integrisani pristup koji podrazumeva razvoj infrastrukture, jačanje institucionalnog okvira, unapređenje koordinacije između aktera i povećanje učešća korisnika. Poseban značaj ima unapređenje sistema proširene odgovornosti proizvođača, kao ključnog mehanizma za finansiranje i organizaciju sistema, kao i uspostavljanje centralizovanog modela upravljanja koji bi omogućio efikasniju koordinaciju aktivnosti.

Na osnovu sprovedenog istraživanja i dobijenih rezultata, može se izvršiti i verifikacija postavljenih hipoteza.

Dobijeni rezultati potvrđuju **opštu hipotezu (H0)**, jer je primena integrisanog modela višekriterijumskog odlučivanja, zasnovanog na kombinaciji AHP, TOPSIS i PROMETHEE II metoda, omogućila adekvatnu i pouzdanu evaluaciju analiziranih sistema sakupljanja e-otpada, kao i izbor optimalnog rešenja u uslovima Republike Srbije.

Rezultati primene AHP metode potvrđuju **pomoćnu hipotezu H1**, s obzirom na to da je omogućeno određivanje relativnog značaja kriterijuma i podkriterijuma, kao i identifikacija ključnih faktora koji imaju dominantan uticaj na proces donošenja odluka, pre svega u domenu finansijskih i infrastrukturnih aspekata.

Saglasnost rezultata dobijenih primenom TOPSIS i PROMETHEE II metoda potvrđuje **pomoćnu hipotezu H2**, jer je obezbeđeno konzistentno i pouzdano rangiranje analiziranih alternativa, pri čemu su obe metode dale usaglašene rezultate u pogledu hijerarhije sistema sakupljanja.

Na osnovu sprovedene višekriterijumske evaluacije i identifikacije mobilnog sistema kao najpovoljnijeg rešenja, potvrđena je i **pomoćna hipoteza H3**, jer je omogućeno definisanje optimalnog scenarija sakupljanja e-otpada za uslove Republike Srbije, na primeru grada Novog Sada.

Naučni doprinos istraživanja ogleda se u razvoju integrisanog modela za evaluaciju sistema sakupljanja e-otpada, koji povezuje AHP, TOPSIS i PROMETHEE II metode sa procenom ekoloških uticaja. Time je omogućen sveobuhvatan i kvantitativno zasnovan pristup sagledavanju kompleksnog problema odlučivanja u oblasti upravljanja posebnim tokovima otpada.

Praktična primena rezultata istraživanja ogleda se u mogućnosti primene modela kao alata za podršku donosiocima odluka u procesu planiranja i optimizaciji sistema upravljanja e-otpadom. Predloženi model može poslužiti kao osnova za razvoj strategija i politika u oblasti upravljanja otpadom, ne samo u Republici Srbiji, već i u drugim zemljama sa sličnim razvojnim karakteristikama.

U cilju daljeg unapređenja istraživanja, moguće je proširenje modela uključivanjem dodatnih kriterijuma, kao što su regulatorni i tržišni faktori. Takođe, primena fuzzy pristupa omogućava sistematsko uvažavanje i kvantifikaciju neizvesnosti i nepreciznosti u ekspertskim procenama, dok bi uvođenje dinamičkih modela omogućilo analizu promena sistema kroz vreme i razvoj scenarija upravljanja e-otpadom. Buduća istraživanja mogu biti usmerena na integraciju digitalnih alata i pametnih sistema u organizaciju sakupljanja otpada, što bi moglo doprineti dodatnom unapređenju efikasnosti i održivosti sistema.

Zaključno, rezultati istraživanja potvrđuju da mobilni sistem sakupljanja predstavlja najpovoljnije rešenje u analiziranim uslovima, pri čemu je njegova prednost potvrđena i TOPSIS i PROMETHEE II metodom. Stacionarni sistem predstavlja prihvatljivu alternativu sa kompromisnim karakteristikama, dok sistem reciklažnih dvorišta pokazuje najniži nivo održivosti i funkcionalne efikasnosti. Shodno tome, razvoj budućih sistema sakupljanja e-otpada u urbanim sredinama Srbije treba usmeriti ka modelima koji obezbeđuju visoku dostupnost korisnicima, logističku optimizaciju i smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu.

Može se istaći da razvoj efikasnih sistema sakupljanja e-otpada predstavlja ključni preduslov za unapređenje cirkularne ekonomije, smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu i povećanje stepena iskorišćenja sekundarnih sirovina, pri čemu primena višekriterijumskih metoda odlučivanja ima ključnu ulogu u identifikaciji optimalnih rešenja.

## 8. PREGLED LITERATURE

- Abha, T. A., Gitifar, A., Chowdhury, R., Tasnim, A., & Ng, K. T. W. (2025). Quantification of e-waste collection count at household level. *Environmental and Sustainability Indicators*, 28, 100898. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100898>
- Achillas, C., Aidonis, D., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Baniyas, G., & Triantafyllou, D. (2012). A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.004>
- Agarski, B. (2015). *Razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa* (Doktorska disertacija). Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
- Agencija za bezbednost saobraćaja (2023). *Statistički izveštaj o stanju bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji 2023*. Agencija za bezbednost saobraćaja.
- Aidonis, D., Achillas, C., Folinias, D., Keramydas, C., & Tsolakis, N. (2019). Decision support model for evaluating alternative WEEE management schemes — A Case Study. *Sustainability*, 11(12), 3364. <https://doi.org/10.3390/su11123364>
- André, M. (2004). The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions. *Science of Total Environment*, 334-335, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.070>
- Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., & den Hollander, M. (2014). Products that go round: Exploring product life extension through design. *Journal of Cleaner Production*, 69, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.028>
- Baldé, C. P., Kuehr, R., Blumenthal, K., Fondeur Gill, S., Kern, M., Micheli, P., Magpantay, E. & Huisman J. (2015a). *E-waste statistics: Guidelines on classification, reporting and indicators*. United Nations University. IAS – SCYCLE.
- Baldé, C. P., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. (2015b). *The Global E-waste Monitor 2014*. United Nations University. IAS – SCYCLE.
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, flows, and resources*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA).
- Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khetriwal, D. S, Luda di Cortemiglia, V., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N., & Wagner, M. (2024). *The*

- Global E-waste Monitor 2024: Electronic waste rising, global recycling stagnating*. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) & International Telecommunication Union (ITU).
- Baral, S. P., Parida, P. K., & Sahoo, D. (2025). An enhanced TOPSIS-based framework for MCDM with uncertain weights: Application to e-waste recycling partner selection. *Results in Control and Optimization*, 19, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2025.100545>
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Belton, V., & Stewart T., J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Bilitewski, B., Wagner, J., & Reichenbach, J. (2018). *Best Practice Municipal Waste Management*. Umweltbundesamt.
- Bilitewski, B., Härdtle G. (2013) *Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79531-5>
- Brans, J. P. (1982). L'ingénierie de la décision: Élaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE. In M. Nadeau & R. Landry (Eds.), *L'aide à la décision: Nature, instruments et perspectives* (pp. 183–214). Presses de l'Université Laval.
- Brans, J. P., Vincke, P., Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
- Brans, J. P., Vincke, P. (1985). A preference ranking organisation method. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
- Brans, J. P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. In J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (pp. 163–186). Springer. [https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5\\_5](https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_5)
- Chakraborty, S. (2022). TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision Analytics Journal*, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100021>
- Chakraborty, S., & Yeh, C. H. (2009). A simulation comparison of normalization procedures for TOPSIS. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering* (pp. 1815–1820). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223811>

- Chakraborty, S., & Yeh, C. H. (2012). Comparison Based Group Ranking Outcome for Multiattribute Group Decisions. In *Proceedings of the 14th UKSim International Conference on Computer Modelling and Simulation* (pp. 324–327). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2012.53>
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1)
- Chi, X., Streicher-Porte, M., Wang, M. Y. L., & Reuter, M. A. (2011). Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China. *Waste Management*, 31(4), 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.006>
- Chung, S.S., Zhang, C., (2011). An evaluation of legislative measures on electrical and electronic waste in the People's Republic of China. *Waste Management*, 31(12), 2638–2646. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.010>
- Corsini, F., Rizzi, F., & Frey, M. (2017). Extended producer responsibility: The impact of organizational dimensions on WEEE collection from households. *Waste Management*, 59, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.046>
- Cossu, R., & Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, 45, 1–3. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>
- Dawan, S. H., Bhattacharya, T., & Kumar, A. (2025). E-waste-derived microplastics and metals: Challenges, mechanisms, and sustainable mitigation strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13, 119509. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119509>
- Diaz, J. D. R., & Amin, S. H. (2025). A multi-objective optimization approach for sustainable management of computers e-waste in a closed-loop supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 506, 145494. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145494>
- Diedler, S., Hobohm, J., Batinic, B., Kalverkamp, M., & Kuchta, K. (2018). WEEE data management in Germany and Serbia. *Global NEST Journal*, 20(4), 751–757. <https://doi.org/10.30955/gnj.002657>
- Direktiva 2002/96/EC (2003). *Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. *Official Journal of the European Union*, L 37, 24–38.
- Direktiva 2011/65/EU (2011). *Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast)*. *Official Journal of the European Union*, L 174, 88–110.
- Direktiva 2012/19/EU (2012). *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast)*. *Official Journal of the European Union*, L 197, 38–71.

- Dorđević, Lj., Radovanović, N., Radić, I., Grković, R., Jovanović, G., Mirosavić, T., & Redžić, N. (2024). *Upravljanje otpadom u Republici Srbiji u periodu 2011–2023*. Ministarstvo zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine.
- EC – European Commission. (2000). *Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste (2000/532/EC)*. *Official Journal of the European Communities*, L 226, 3–24.
- EC – European Commission. (2020). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe* (COM(2020) 98 final). European Commission.
- EC – European Commission. (2023). *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020* (COM(2023) 160 final). European Commission.
- EC/JRC – European Commission/Joint Research Centre. (2023). *COPERT model (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport)*.
- EEA – European Environment Agency. (2000). *EMEP/CORINAIR atmospheric emission inventory guidebook* (2nd ed.). European Environment Agency.
- EEA – European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Luxembourg.
- EEA – European Environment Agency. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., & Finnveden, G. (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management*, 27(8), 989–996. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.015>
- Erkut, E., & Moran, S. R. (1991). Locating obnoxious facilities in the public sector: An application of the analytic hierarchy process to municipal landfill siting decisions. *Socio-Economic Planning Sciences*, 25(2), 89–102.
- Eurostat (2024). *Passenger mobility statistics / Road transport statistics*. Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger\\_mobility\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_mobility_statistics)

- Eurostat (2025). *Waste statistics - electrical and electronic equipment*. Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics\\_-\\_electrical\\_and\\_electronic\\_equipment](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment)
- EU – European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020*. *Official Journal of the European Union, L*, 2024/1252.
- EU – European Commission. (2025). *Study supporting the evaluation of Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE): Final report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2779/168019>
- Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b100605>
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU), & International Solid Waste Association (ISWA). Bonn/Geneva/Rotterdam.
- Friege, H., Oberdörfer, M., & Günther, M. (2015). Optimising waste from electric and electronic equipment collection systems: A comparison of approaches in European countries. *Waste Management & Research*, 33(3), 223–231. <https://doi.org/10.1177/0734242X14567500>
- Gatersleben, B., Steg, L., & Vlek, C. (2002). Measurement and determinants of environmentally significant consumer behavior. *Environment and Behavior*, 34(3), 335–362. <https://doi.org/10.1177/0013916502034003004>
- Generalni urbanistički plan (2022). *Generalni urbanistički plan grada Novog Sada do 2030. godine*. Grad Novi Sad.
- Gomez, M., Grimes, S., Qian, Y., Feng, Y., & Fowler, G. (2023). Critical and strategic metals in mobile phones: A detailed characterisation of multigenerational waste mobile phones and the economic drivers for recovery of metal value. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138099. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138099>
- Gomez, M., Pena-Torres, D., Colet-Lagrille, M., Jaramillo, K., Ilankoon, I. M. S. K., & Zeng, X. (2026). From e-waste to resource: Identifying the optimal pre-treatment for copper recovery from waste PCBs. *Resources, Conservation & Recycling*, 228, 108821. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108821>

- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Guillén-Mena, V., Quesada-Molina, F., Astudillo-Cordero, S., Lema, M., & Ortiz-Fernández, J. (2023). Lessons learned from a study based on the AHP method for the assessment of sustainability in neighborhoods. *MethodsX*, 11, 102440. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102440>
- Habib, M. S., & Hwang, S.-J. (2025). A modified neutrosophic fuzzy approach for managing electronic waste considering sustainability and resilience dimensions. *Applied Soft Computing*, 176, 113097. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113097>
- Hickman, A. J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., & Sorenson, S. (1999). *Methodology for calculating transport emissions and energy consumption*. Transport Research Laboratory.
- Hobohm, J. (2017). *Ressourcenoptimierte Erfassung von Elektro- und Elektronikgeräten am Beispiel des Ballungsgebietes Hamburg* (Dissertation), Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Huang, Y. F., Chou, S. L., & Lo, S. L. (2022). Gold recovery from waste printed circuit boards of mobile phones by using microwave pyrolysis and hydrometallurgical methods. *Sustainable Environment Research*, 32:6. <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00118-x>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications: A state-of-the-art survey*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Iattoni, G., Nnorom, I.C., Toppenberg, D., Kuehr, R., Baldé, C.P. (2023). *Regional E-waste Monitor for the Western Balkans – 2023*. International Telecommunication Union (ITU), United Nations Environment Programme (UNEP) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – SCYCLE Programme.
- Islam, A., Ahmed, T., Awual, M.R., Rahman, A., Sultana, M., Aziz, A.A., Monir, M.U., Teo, S.H., Hasan, M. (2020). Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste – A review. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118815. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118815>
- Jano, T., Sayed, A. N., Hossen, M. M., Sardianos, C., Hamila, R., Bensaali, F., Varlamis, I., & Dimitrakopoulos, G. (2026). Closing the loop: A systematic review of artificial intelligence in circular e-waste management. *Waste Management*, 214, 115392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115392>

- JKP Informatika Novi Sad. (2023). *Podaci o broju stanovnika i strukturi domaćinstava po mesnim zajednicama* (interna baza podataka). Dostupno na: <https://www.nsinfo.co.rs/cyr/broj-stanovnika-po-naseljima>
- Karuppiah, K., & Sankaranarayanan, B. (2023). An integrated multi-criteria decision-making approach for evaluating e-waste mitigation strategies. *Applied Soft Computing*, 144, 110420. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110420>
- Kasper, A. C., & Veit, H. M. (2018). Gold recovery from printed circuit boards of mobile phones scraps using a leaching solution alternative to cyanide. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35(3), 931–942. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180353s20170291>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>
- Kennedy, C., Pincetl, S., & Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution* 159, 1965-1973 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>
- Khetriwal, D.S., Kraeuchi, P., Widmer, R. (2009). Producer responsibility for e-waste management: Key issues for consideration – Learning from the Swiss experience. *Journal of Environmental Management*, 90, 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.019>
- Kim, M., Jang, Y.-C., & Lee, S. (2013). Application of Delphi-AHP methods to select priorities of WEEE for recycling. *Journal of Environmental Management*, 128, 941–948. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.049>
- Kim, J., Hwang, Y., Matthews, H. S., & Park, K. (2004). Methodology for recycling potential evaluation of waste home appliances considering environmental and economic factors. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (pp. 227–232). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2004.1299690>
- Krišanović, T., Gačević, R., Manasijević Radojević, M., Tolmač, O., Marković, V., & Panjković, A. (2009). *Studija stanovanja za Generalni plan Novog Sada: Dokumentaciona osnova za reviziju Generalnog urbanističkog plana grada Novog Sada*. Javno preduzeće „Urbanizam“ – Zavod za urbanizam Novi Sad.
- Kumar, A., & Dixit, G. (2018). Evaluating critical barriers to implementation of WEEE management using DEMATEL approach. *Resources, Conservation and Recycling* 131, 101-121. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.024>

- Kumar, A., & Dixit, G. (2019). A novel hybrid MCDM framework for WEEE recycling partner evaluation based on green competencies. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118017>
- Lin, C. H., Wen, L., & Tsai, Y. M. (2010). Applying decision-making tools to national e-waste recycling policy: An example of Analytic Hierarchy Process. *Waste Management*, 30(5), 863–869. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.012>
- Lokalni plan upravljanja otpadom. (2023). *Lokalni plan upravljanja otpadom za Grad Novi Sad za period 2023–2032. godine*. Službeni list Grada Novog Sada, 21. Grad Novi Sad.
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multipl criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516-571, <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Mareschal, B., & Brans, J. P. (1994). *The PROMETHEE-GAIA decision support system for multicriteria investigations*. Université Libre de Bruxelles.
- Marinello, S., & Gamberini, R. (2021). Multi-Criteria Decision Making Approaches Applied to Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): A Comprehensive Literature Review. *Toxics*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/toxics9010013>
- Marinković, T., Tošić, N., Berežni, I., Stanisavljević, N., & Batinić, B. (2025). Challenges in implementing the extended producer responsibility in developing economy: WEEE management in Serbia. *Global NEST Journal*, 27(7), 06721. <https://doi.org/10.30955/gnj.06721>
- Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33, 988–1003. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.023>
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. Universe Books.
- Medina, M. (2000). Scavenger cooperatives in Asia and Latin America. Resources, *Conservation and Recycling*, 31, 51–69. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00071-9)
- Meskers, C. E. M., & Hagelüken, C. (2009). Closed loop WEEE recycling? Challenges and opportunities for a global recycling society. In *Proceedings of the TMS Annual Meeting 2009*. The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).
- MZŽS – Ministarstvo zaštite životne sredine. (2010a). *Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada* („Sl. glasnik RS“, br. 56/2010, 93/2019, 39/2021 i 65/2024).

- MZŽS – Ministarstvo zaštite životne sredine. (2010b). *Pravilnik o listi električnih i elektronskih proizvoda, merama zabrane i ograničenja korišćenja električne i elektronske opreme koja sadrži opasne materije i upravljanju otpadom od električne i elektronske opreme* („Sl. glasnik RS“, br. 99/2010).
- Nowakowski, P., Król, A., & Mrówczyńska, B. (2017). Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. *Waste Management*, 69, 377–392. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.045>
- Nowakowski, P., & Mrówczyńska, B. (2013). Systematic approach to collection schemes of waste electric and electronic equipment. In *ICLEEE 2013: Logistics in Recession*. Maribor, Slovenia.
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., & Samaras, Z. (2009). COPERT: A European road transport emission inventory model. In I. N. Athanasiadis, P. A. Mitkas, D. Rizzoli, & J. Marx Gómez (Eds.), *Information technologies in environmental engineering* (pp. 491–504). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88351-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88351-7_37)
- Oberdörfer, M., Baehr, T., Wasielewski, A., Behrend, S., Bothe, D., Nae-Muşetoiu, I., & Moser, A. (2017). *Analysis of Serbian legislation about specific waste streams, gap analysis and recommendations for improvement of environmental legislative framework: Assessment and recommendation report*. Twinning Project SR 13 IB EN 02 – Improvement of Hazardous Waste Management in the Republic of Serbia (IHWMS). Environment Agency Austria & Ministry of Agriculture and Environmental Protection of the Republic of Serbia.
- OECD. (2016), *Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management*, OECD Publishing. <http://doi.org/10.1787/9789264256385-en>
- Opricović, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Parajuly, K., Kuehr, R., Awasthi, A. K., Fitzpatrick, C., Lepawsky, J., Smith E., Widmer, R., Zeng, X. (2019). *Future E-waste Scenarios*. StEP (Bonn), UNU ViE-SCYCLE (Bonn) & UNEP IETC (Osaka).
- Program upravljanja otpadom. (2022). *Program upravljanja otpadom u Republici Srbiji za period 2022–2031*. Vlada Republike Srbije ("Sl. glasnik RS", br. 12/2022).
- Queiruga, D., Walther, G., González-Benito, J., & Spengler, T. (2008). Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management* 28, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.11.001>

- Quinto, S., Law, N., Fletcher, C., Le, J., Jose, S. A., & Menezes, P. L. (2025). Exploring the E-Waste Crisis: Strategies for Sustainable Recycling and Circular Economy Integration. *Recycling*, 10(2), 72. <https://doi.org/10.3390/recycling10020072>
- Rahman, S., & Subramanian, N. (2012). Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.019>
- RHMZ – Republički hidrometeorološki zavod Srbije. (2025). *Meteorološki godišnjak 2024 – Klimatološki podaci*. Republički hidrometeorološki zavod Srbije.
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 408, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- Rousis, K., Moustakas, K., Malamis, S., Papadopoulos, A., & Loizidou, M. (2008). Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus. *Waste Management*, 28, 1941–1954. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.12.001>
- Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. <http://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>
- Roy, B. (1991). *The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods*. Theory and Decision 31, 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>
- Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234–281. [http://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](http://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1984). The analytic hierarchy process: Decision making in complex environments. In R. Avenhaus & R. K. Huber (Eds.), *Quantitative assessment in arms control* (pp. 285–308). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12)
- Saaty, T. L. (1986). Exploring optimization through hierarchies and ratio scales. *Socio-Economic Planning Sciences*, 20(6), pages 355–360. [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(86\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0038-0121(86)90047-9)
- Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process—What It Is and How It Is Used. *Mathematical Modelling*, 9, 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty, T. L., & Kearns, K. P. (1985). *Analytical Planning: The Organization of Systems*. Pergamon Press.

- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Sander, K., Schilling, S., Tojo, K., van Rossem, C., Vernon, J., & George, C. (2007). *The producer responsibility principle of the WEEE Directive: Final report*. Study Contract No. 07010401/2006/449269/MAR/G4, prepared for the European Commission DG Environment by Ökopool GmbH, IIIIEE Lund University, and Risk & Policy Analysts Ltd.
- Saphores, J. D. M., Nixon, H., Ogunseitan, O. A., & Shapiro, A. A. (2006). Household Willingness to Recycle Electronic Waste: An Application to California. *Environment Behavior* 38(2), 183–208. <https://doi.org/10.1177/0013916505279045>
- SAUVD – Srpska asocijacija uvoznika vozila i delova. (2025). *Srpsko tržište novih putničkih i LKV vozila*. Srpska asocijacija uvoznika vozila i delova. Dostupno na: <https://www.uvoznicivozila.rs/novosti/vesti-i-saopstenja/srpsko-trziste-novih-putnickih-i-lkv-vozila-.html>
- Schluep, M., Hagelüken, C., Kuehr, R., Magalini, F., Maurer, C., Meskers, C., Mueller, E., & Wang, F. (2009). *Recycling – From e-waste to resources*. UNEP (UNEP) & United Nations University (UNU).
- Schmidt, K., Aumann, I., Hollander, I., Damm, K., & Graf von der Schulenburg, J.-M. (2015). Applying the analytic hierarchy process in healthcare research: A systematic literature review and evaluation of reporting. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 15, 112. <https://doi.org/10.1186/s12911-015-0234-7>
- Singh, S., Dasgupta, M. S., & Routroy, S. (2022). Evaluation of sustainable e-waste collection method for urban and rural region of India. *Waste Management & Research*, 40(5), 545–<https://doi.org/10.1177/0734242X211018512>
- Srđević, B., & Srđević, Z. (2016). Višekriterijumska analiza indikatora dugoročne performanse vodoprivrednih sistema. *Vodoprivreda*, 48, 155–165.
- Tanskanen, P. (2013). Management and recycling of electronic waste. *Acta Materialia*, 61(3), 1001–1011. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.005>
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Boca Raton: CRC Press / Taylor & Francis Group.
- Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56–66.

- Wang, Z., Lyu, L., Huang, G., Hu, B., & An, C. (2025). Life cycle-based environmental, social, and economic assessment of waste printed circuit board management in isolated island areas: A case study in British Columbia, Canada. *Environmental Development*, 55, 101195. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101195>
- WHO – World Health Organization. (2021). *Children and digital dumpsites: E-waste exposure and child health*. World Health Organization.
- WHO – World Health Organization. (2023). *Electrical/electronic waste and children's health: Training for health care providers* (2nd ed.). World Health Organization.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 436–458. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>
- Wilson, D. C., Velis, C., & Cheeseman, C. (2006). Role of informal sector recycling in waste management in developing countries. *Habitat International*, 30(4), 797–808. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2005.09.005>
- Wilson, D. C., Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C. A., & Alabaster, G. (2012). Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, 30(3), 237–254. <https://doi.org/10.1177/0734242X12437569>
- WMO – World Meteorological Organization. (2022). *Scientific assessment of ozone depletion: 2022* (GAW Report No. 278). World Meteorological Organization.
- Xavier, L. H., Giese, E. C., Ribeiro-Duthie, A. C., & Lins, F. A. F. (2021). Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, 74, 101467. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>
- Yildirim, B., Ayyildiz, E., & Aydin, N. (2025). A novel intuitionistic fuzzy decision-making framework for sustainable site selection of solar panel waste recycling facilities. *Journal of Cleaner Production*, 521, 146195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146195>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and control* 8, 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zakon o upravljanju otpadom Republike Srbije. (2025). *Zakon o upravljanju otpadom Republike Srbije*. Vlada Republike Srbije (“Službeni glasnik RS”, br. 109/2025).
- Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397–427. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>

Zeng, X., Mathews, J. A., & Li, J. (2018). Urban mining of e-waste is becoming more cost-effective than virgin mining. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4835–4841.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04909>

## PRILOG

Tabela P1 Procena potrebnog broja kontejnera na osnovu prostornih i demografskih pokazatelja

Mesne zajednice	Gustina kontejnera (km <sup>2</sup> /kont.)	Broj kuća	Broj domaćinstava u zgradama	Broj zgrada	Potreban broj kontejnera prema površine	Potreban broj kontejnera prema br. domaćinstava /kuća	Potreban broj kontejnera prema površini	Potreban br. kontejnera prema broju domaćinstava /zgrada
Šangaj	0,798	376	0	0	0,292	0,224	0,292	0
Ivo Andrić	0,227	0	1.393	55,720	0,901	0	0,901	0,591
Stari grad	0,798	295	1.810	72,400	0,723	0,175	0,723	0,768
Liman	0,798	0	1.977	79,080	0,854	0	0,854	0,839
Ostrvo	0,798	1	2.009	80,360	1,131	0,001	1,131	0,852
Dunav	0,123	42	3.028	121	1,856	0,025	1,856	1,285
Sonja Marinković	0,227	61	3.100	124	1,580	0,036	1,580	1,315
Boško Buha	0,227	0	2.754	110	1,886	0	1,886	1,168
Vidovdansko naselje	0,798	1191	170	6,800	3,747	0,708	3,747	0,072
Sava Kovačević	0,123	23,000	3.422	136,880	2,060	0,014	2,060	1,452
Slana bara	2,434	1552	180	7,200	1,877	0,923	1,877	0,076
Salajka	0,798	1027	2.963	118,520	1,692	0,611	1,692	1,257
Nikola Tesla -Telep	2,434	1118	2.800	112	1,746	0,665	1,746	1,188
Radnički I	2,434	323,000	3.480	139,200	1,766	0,192	1,766	1,476
vojvodanska brigada	0,227	174,000	5.497	219,880	3,216	0,103	3,216	2,332
Južni Telep	0,798	1448,000	2.960	118,400	2,924	0,861	2,924	1,256
Bratstvo - Telep	0,798	1439	2.734	109,360	1,679	0,856	1,679	1,160
Klisa	0,798	2006	87	3,480	3,948	1,193	3,948	0,037
Liman III	0,227	7,000	4.823	192,920	3,771	0,004	3,771	2,046
Podbara	0,227	580	6.323	252,920	3,587	0,345	3,587	2,682
Omladinski pokret	0,227	181,000	5.162	206,480	3,098	0,108	3,098	2,190
Vera Pavlović	0,123	82,000	7.175	287	3,318	0,049	3,318	3,044
Jugovićevo	0,227	915,000	5.415	216,600	5,783	0,544	5,783	2,297
Adice	0,798	3867	2.246	89,840	5,176	2,300	5,176	0,953

<b>Žitni trg</b>	0,123	365	7.939	317,560	5,013	0,217	5,013	3,368
<b>Gavrilo Princip</b>	0,227	249,000	6.902	276,080	6,401	0,148	6,401	2,928
<b>Narodni heroji</b>	0,227	471	9.059	362,360	4,151	0,280	4,151	3,843
<b>7. Juli</b>	0,227	760	11.008	440,320	6,754	0,452	6,754	4,670
<b>Bistrica</b>	0,227	49	8.325	333	6,401	0,029	6,401	3,532
<b>Detelinara</b>	0,227	227	13.705	548,200	5,650	0,135	5,650	5,814
<b>Sajlovo</b>	2,434	115	0	0	1,520	0,687	1,520	0
<b>Petrovaradin</b>	2,434	3133	3.737	149,480	5,585	1,863	5,585	1,585
<b>Sremska Kamenica</b>	2,434	4145	563	22,520	6,281	2,465	6,281	0,239

Tabela P2 Osnovne prostorne i demografske karakteristike mesnih zajednica

<b>Naziv mesne zajednice</b>	<b>Površina mesne zajednice (ha)</b>	<b>Broj stanovnika</b>	<b>Gustina naseljenosti (st./ha)</b>
<b>Šangaj</b>	23,330	1.729	74,126
<b>Ivo Andrić</b>	20,410	3.426	167,884
<b>Stari grad</b>	57,690	3.872	67,112
<b>Liman</b>	68,150	3.989	58,529
<b>Ostrvo</b>	90,260	4.672	51,762
<b>Dunav</b>	22,830	5.690	249,248
<b>Sonja Marinković</b>	35,800	5.978	166,968
<b>Boško Buha</b>	42,720	6.101	142,816
<b>Vidovdansko naselje</b>	299	6.362	21,278
<b>Sava Kovačević</b>	25,340	6.444	254,256
<b>Slana bara</b>	457	7.162	15,672
<b>Salajka</b>	135	7.483	55,430
<b>Nikola Tesla -Telep</b>	425	7.823	18,407
<b>Radnički</b>	430	8.376	19,479
<b>I vojvođanska brigada</b>	72,850	8.559	117,483
<b>Južni Telep</b>	233,360	8.661	37,114
<b>Bratstvo - Telep</b>	134	8.848	66,030
<b>Klisa</b>	315	9.297	29,514
<b>Liman III</b>	85,440	10.520	123,133
<b>Podbara</b>	81,250	10.764	132,480
<b>Omladinski pokret</b>	70,180	10.815	154,093
<b>Vera Pavlović</b>	40,820	11.429	280
<b>Jugovićevo</b>	131	13.472	102,840
<b>Adice</b>	413	13.897	33,649
<b>Žitni trg</b>	61,680	14.454	234,359

---

<b>Gavrilo Princip</b>	145	15.719	108,407
<b>Narodni heroji</b>	94,040	17.272	183,664
<b>7. Juli</b>	153	18.021	117,784
<b>Bistrica</b>	145	20.413	140,779
<b>Detelinara</b>	128	24.020	187,656
<b>Sajlovo</b>	370	3.500	9,459
<b>Petrovaradin</b>	1359	18.022	13,255
<b>Sremska Kamenica</b>	1529	13.399	8,763

---

## Rezultati dobijeni primenom COPERT softvera

*Tabela P3 Emisije zagađujućih materija iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem*

Zagađujuće materije	A1	A2	A3
	tona/godišnje		
Ugljen-monoksid (CO)	0,02327	0,00229	1,00000
Ugljen-dioksid (CO <sub>2</sub> )	65,00000	6,00000	883,00000
Metan (CH <sub>4</sub> )	0,00009	0,00034	0,03850
Azot-suboksid (N <sub>2</sub> O)	0,01808	0,00029	0,01962
Azotni oksidi (NO <sub>x</sub> )	0,13677	0,00930	0,53140
Azot-monoksid (NO)	0,12310	0,01896	0,37490
Azot-dioksid (NO <sub>2</sub> )	0,01368	0,00569	0,15650
Amonijak (NH <sub>3</sub> )	0,00035	0,00021	0,03247
Sumpor-dioksid (SO <sub>2</sub> )	0,00000	0,00000	0,00000
Elementarni ugljenik (EC)	0,87649	0,08002	20,00000
Organska materija (OM)	0,00064	/	0,00340
Isparljiva organska jedinjenja (VOC)	0,00287	0,00147	179,00000
Nemetanska isparljiva organska jedinjenja (NMVOC)	0,00278	0,00113	178,00000
Suspendovane čestice - PM <sub>2,5</sub>	0,00535	0,00054	0,08753
Suspendovane čestice - PM <sub>10</sub>	0,00917	0,00106	0,16294
Crni ugljenik (black carbon)	0,00079	0,00009	0,01874
Potrošnja maziva (lubricant consumption)	0,00949	0,00220	0,67459
Ukupne suspendovane čestice (total suspended particles)	0,01268	0,00147	0,22600
Broj čestica >23 nm (Solid Particle Number > 23 nm)	9,00000	3,00000	16249,00000
Procentualni udeo	<b>8,39267%</b>	<b>0,79730%</b>	<b>90,81002%</b>

*Tabela P4 Emisija teških metala iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem*

Teški metali	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
Arsen (As)	0,00027	0,00004	0,00575
Živa (Hg)	0,00011	0,00001	0,00216
Olovo (Pb)	0,02368	0,00354	0,50022
Kadmijum (Cd)	0,00014	0,00004	0,00524
Bakar (Cu)	0,20307	0,03269	5,00000
Xrom (Cr)	0,00925	0,00143	0,20216
Nikl (Ni)	0,00164	0,00034	0,05030
Selen (Se)	0,00018	0,00004	0,00607
Cink (Zn)	0,05866	0,01028	2,00000
Procentualni udeo	<b>3,84278%</b>	<b>0,63609%</b>	<b>95,52113%</b>

Tabela P5 Emisije alifatičnih ugljovodonika (alkana) iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Alkani	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
Izopentan	0,00000	0,00000	15951,99630
Izobutan	0,00390	/	1117,14184
Butan	0,00418	/	1,49640
Etan	0,00084	/	78,58913
Propan	0,00278	/	1314,00980
Pentan	0,00167	/	11516,60814
Heptan	0,00835	0,00000	2462,17641
Heksan	/	0,00079	3017,60757
Oktan	/	0,00078	0,78499
Dekan	0,04985	0,00955	0,46946
Nonan	0,00000	0,00153	0,61914
Alkani C10-C12	0,00000	0,00383	1,28886
3-metilheksan	0,00752	0,00000	0,22925
3-metilpentan	0,00975	0,00000	0,54751
2-metilheptan	0,00000	/	6415,40279
2-metilpentan	0,00585	0,00000	0,20948
3-metilheksan	0,00390	/	1117,14184
Alkani C>13	0,76579	0,01005	3,42447
2-metilheksan	0,01754	0,00000	0,54212
<b>Procentualni udeo</b>	<b>1,93563%</b>	<b>0,13436%</b>	<b>97,93001%</b>

Tabela P6 Emisije alifatičnih ugljovodonika (alkena i diena) iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
Etilen	0,19521	0,00364	97,79212
Izobuten	0,04734	/	37,80619
1,3-butadien	0,09189	0,00325	0,54607
Propadien	0,00000	0,00138	0,27032
Propilen	0,03676	0,03134	5,11045
1-penten	/	/	0,02938
2-penten	/	/	734,31483
1-buten	/	/	224,60060
2-buten	/	/	701,19738
<b>Procentualni udeo</b>	<b>1,70726%</b>	<b>0,18056%</b>	<b>98,11217%</b>

Tabela P7 Emisije alkina iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
1-butin	/	/	0,05609

Acetilen	0,02924	0,00344	21542,00000
Ostali alkini	/	/	63,00000
Propin (metil-acetilen)	/	/	132,00000
<b>Procentualni udeo</b>	<b>0,00003%</b>	<b>0,00000%</b>	<b>99,99996%</b>

Tabela P8 Emisije aldehida iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

	A1	A2	A3
	kilogram/godišnje		
Formaldehid (metanal)	0,23391	0,06623	2,00000
Akrolein (propenal)	0,04929	0,02353	0,66105
Benzaldehid	0,03815	0,00021	0,36835
Krotonaldehid (2-butenal)	0,04121	0,00420	0,12481
Metakrolein (2-metilpropenal)	0,02395	0,00055	0,13106
Butiraldehid (butanal)	0,02451	0,00000	0,07239
Izobutiraldehid (2-metilpropanal)	0,01643	0,00390	0,14441
Propionaldehid (propanal)	0,03481	0,00000	0,22124
Heksanal	0,03954	0,00077	0,01836
<b>Procentualni udeo</b>	<b>20,06774%</b>	<b>1,35641%</b>	<b>78,57584%</b>

Tabela P9 Emisije aromatičnih ugljovodonika iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
Toluen	0,00028	0,00360	7288
Etilbenzen	/	0,00021	6508
m-, p-ksilen	0,02729	0,00100	10691
o-ksilen	0,01114	0,00055	4650
1,2,3-trimetilbenzen	0,00835	0,00098	0,64597
1,2,4-trimetilbenzen	0,02395	0,00280	920,00000
1,3,5-trimetilbenzen	0,01253	0,00166	1,00000
Stiren	0,01559	0,00050	0,66197
Benzen	0,00195	0,03081	1340,00000
Aromatični ugljovodonici C9	0,03258	0,00798	6,00000
Aromatični ugljovodonici C10	0,00000	0,00224	2,00000
Aromatični ugljovodonici C>13	0,56724	0,00064	1,00000
Aromatični ugljovodonici C11	/	0,00194	2167,00000
Aromatični ugljovodonici C12	/	0,00125	2167,00000
Aromatični ugljovodonici C8	/	/	2167,00000
Indan	/	/	2167,00000
Inden	/	/	2167,00000
Naftalen	/	/	2167,00000
<b>Procentualni udeo</b>	<b>1,89817%</b>	<b>0,03683%</b>	<b>98,06501%</b>

Tabela P10 Emisije policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
<b>3,6-dimetilfenantren</b>	/	/	0,00425
<b>Acenaftilen</b>	/	0,00078	0,02495
<b>Acenaften</b>	/	0,00104	0,03335
<b>Antracen</b>	0,00053	0,00007	0,00669
<b>Benzo(a)antracen</b>	0,00015	0,00009	0,00449
<b>Benzo(a)piren</b>	0,00005	0,00005	0,00312
<b>Benzo(b)fluoranten</b>	0,00033	0,00006	0,00325
<b>Benzo(b)fluoren</b>	0,00064	0,00044	0,01640
<b>Benzo(e)piren</b>	0,00012	0,00020	0,00736
<b>Benzo(ghi)perilen</b>	/	0,00010	0,00584
<b>Benzo(j)fluoranten</b>	0,00080	0,00001	0,00108
<b>Benzo(k)fluoranten</b>	0,00037	/	0,00239
<b>Krizen</b>	0,00099	0,00015	0,00661
<b>Koronen</b>	/	/	0,00042
<b>Dibenzo(a,j)antracen</b>	/	/	0,00034
<b>Dibenzo(a,l)piren</b>	/	/	0,00014
<b>Dibenzo(ah)antracen</b>	/	/	0,00049
<b>Fluoranten</b>	0,00130	0,00085	0,04050
<b>Fluoren</b>	0,00243	/	0,00000
<b>Indeno(1,2,3-cd)piren</b>	0,00009	/	0,00307
<b>Naftalen</b>	0,00345	0,04140	3,00000
<b>Perilen</b>	/	/	0,00081
<b>Fenantren</b>	0,00140	0,00170	0,08417
<b>Piren</b>	0,00192	0,00077	0,03192
<b>Trifenilen</b>	0,00006	0,00026	0,01106
<b>Procentualni udeo</b>	<b>8,33100%</b>	<b>1,24279%</b>	<b>90,42621%</b>

Tabela P11 Emisije organskih kiselina iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem

	A1	A2	A3
	kilograma/godišnje		
<b>Sirćetna kiselina (etanoična kiselina)</b>	/	0,45229	7,59423
<b>Akrilna kiselina (propenočna kiselina)</b>	/	0,00099	0,02490
<b>Butanska kiselina (butanoična kiselina)</b>	/	0,00029	0,00553
<b>Krotonska kiselina (2-butenska kiselina)</b>	/	0,00178	0,09611
<b>Mravlja kiselina (metanoična kiselina)</b>	/	0,00500	0,12400
<b>Oksalna kiselina (etanoična dikiselina)</b>	/	0,00046	0,04036
<b>Pentanska kiselina (pentanoična kiselina)</b>	/	0,00000	0,00554
<b>Propanska kiselina (propanoična kiselina)</b>	/	0,00813	0,14046
<b>Sorbinska kiselina</b>	/	0,00000	0,00708
<b>Ostale kiseline</b>	/	0,00108	0,08265
<b>Procentualni udeo</b>	<b>0,00000%</b>	<b>2,79549%</b>	<b>97,20451%</b>

## ANKETNI UPITNIK ZA ODREĐIVANJE TEŽINSKIH KOEFICIJENATA KRITERIJUMA I PODKRITERIJUMA PRIMENOM AHP METODE

Institucija/preduzeće/organizacija:

Ime i prezime:

Oblast ekspertize:

E-mail:

Anketa se sprovodi za potrebe AHP, TOPSIS I PROMETHEE II analize sa ciljem da se izvrši evaluacija kriterijuma i podkriterijuma od značaja za implementaciju sistema za sakupljanje električnog i elektronskog otpada (ee-otpad). Definisana su tri scenarija koja karakterišu 5 kriterijuma i 20 podkriterijuma, datih u nastavku. Prvi scenario je sakupljanje ee-otpada korišćenjem podzemnih kontejnera, drugi scenario je sakupljanje ee-otpada sistemom "od vrata do vrata", dok je treći scenario samostalno odnošenje ee-otpada u reciklažno dvorište.

Vaše stručno mišljenje će biti korišćeno isključivo u naučne svrhe.

Molimo Vas da izvršite poređenja kriterijuma i podkriterijuma koristeći Saaty-jevu skalu prikazanu u nastavku.

Tabela 1: Saaty-eva skala relativne važnosti

Značaj	Definicija	Objašnjenje
1	Istog značaja	Dva elementa su jednako važna
3	Slaba dominantnost	Dati element je neznatno važniji od drugog
5	Jaka dominantnost	Dati element je znatno važniji od drugog
7	Veoma jaka dominantnost	Dati element je još važniji u odnosu na drugi
9	Apsolutna dominantnost	Dati element je apsolutno važniji od drugog
2, 4, 6, 8	Međuvrednosti	

U nastavku je dat primer kako popuniti tabelu, a nakon njega slede DEO I i DEO II gde u okviru tabela treba da upišete spostvene ocene.

**PRIMER:** Ako smatrate da je kriterijum C2 (Efikasnost sistema) jednako važan za implementaciju sistema za sakupljanje otpada kao kriterijum C4 (Infrastrukturni aspekt), u kolonu gde je broj jedan stavite oznaku x.

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
C2									x									C4

Ako smatrate da je kriterijum C2 (Efikasnost sistema) neznatno važniji za implementaciju sistema za sakupljanje otpada od kriterijuma C4 (Infrastrukturni aspekt), u kolonu gde je broj crvenom bojom označen broj 3 stavite oznaku x.

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
C2							x											C4

Ako smatrate da je važnost kriterijuma C4 (Infrastrukturni aspekt) između neznatno i znatno važniji od C2 (Efikasnost sistema) za implementaciju sistema za sakupljanje otpada, u kolonu gde je broj plavom bojom označen broj 4 stavite oznaku x.

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
C2												x						C4

**DEO I: POREĐENJE GLAVNIH KRITERIJUMA**

Molimo Vas da izvršite poređenja kriterijuma koristeći gore navedenu Saaty-jevu skalu.

KRITERIJUMI ZA EVALUACIJU				
C1	C2	C3	C4	C5
<b>Finansijski aspekt</b>	<b>Efikasnost sistema</b>	<b>Socijalni aspekt</b>	<b>Infrastrukturni aspekt</b>	<b>Uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi</b>
Obuhvata investicione i operativne troškove nabavke kamiona i kontejnera, opremanje reciklažnih dvorišta, plate radnika, gorivo i troškove amortizacije.	Podrazumeva koja količina otpada može da se sakupi, vreme potrebno za sakupljanje, pokrivenost uslugom sakupljanja.	Obuhvata otvaranje novih radnih mesta, otpornost sistema na uticaj neformalnog sektora, komfor građana.	Obuhvata logistička i infrastrukturna rešenja oko postavljanja sabirnih mesta, ruta kamiona, održavanja lokacija i kompatibilnosti sa postojećim sistemom sakupljanja.	Akcentuje koliko sistem sakupljanja i manipulacije otpadom imaju uticaja na životnu sredinu i zdravlje ljudi.

U tabeli koja sledi, koristeći skalu od 1 do 9 uporedite navedene kriterijume u odnosu na cilj.

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
C1																		C2
C1																		C3
C1																		C4
C1																		C5
C2																		C3
C2																		C4
C2																		C5
C3																		C4
C3																		C5
C4																		C5

**DEO I: POREĐENJE PODKRITERIJUMA**

Molimo Vas da izvršite poređenja podkriterijuma koristeći gore navedenu Saaty-jevu skalu.

Podkriterijumi (Finansijski aspekt)	
F1	F2
Investicioni troškovi	Operativni troškovi

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
F1																		F2

Podkriterijumi (Efikasnost sistema)		
E1	E2	E3
Količina sakupljenog otpada	Potrebno vreme za sakupljanje	Pokrivenost uslugom sakupljanja

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
E1																		E2
E1																		E3
E2																		E3

Podkriterijumi (Socijalni aspekt)		
S1	S2	S3
Nova radna mesta	Otpornost sistema na uticaj neformalnog sektora	Komfor građana

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
S1																		S2
S1																		S3
S2																		S3

Podkriterijumi (Infrastrukturni aspekt)		
I1	I2	I3
<b>Mogućnost nadogradnje i kompatibilnosti sa postojećim sistemom</b> (trenutno je planirana izgradnja 3 reciklažna dvorišta, ostala dva scenarija nisu u dugoročnim planovima grada)	<b>Jednostavnost logistike i transporta</b> (u zavisnosti od gustine naseljenosti i izabranog scenarija menjaju se zahtevi za vozilima i planiranjem ruta. U jednom scenariju se koriste kamioni, dok se u drugom koriste kombi vozila)	<b>Jednostavnost sabirnog mesta</b> (lokacije sabirnih mesta su manje ili više zahtevne u zavisnosti da li je to reciklažno dvorište, postavljanje kontejnera po naselju ili mobilno sakupljanje)

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
I1																		I2
I1																		I3
I2																		I3

Podkriterijumi (Uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi)		
Z1	Z2	Z3
<b>Emisije u vazduh iz izduvnih gasova vozila za transport otpada</b> (U zavisnosti koja se vozila koriste za transport otpada i pređene kilometraže godišnje menja se koncentracija zagađujućih materija)	<b>Bezbednost građana</b> (Opasnost da se građani povrede prilikom manipulacije otpadom; Ukoliko je sistem organizovan kao preuzimanje na adresi - rizik je mali, dok se rizik povećava ukoliko se otpad samostalno prevozi)	<b>Ekološka bezbednost</b> (Opasnost od isticanja/oslobađanja (opasnih supstanci u životnu sredinu; Ukoliko je sistem organizovan kao preuzimanje na adresi - rizik je mali, dok se rizik povećava ukoliko se otpad samostalno prevozi)

Kriterijum	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kriterijum
Z1																		Z2
Z1																		Z3
Z2																		Z3

*Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.*

## План третмана података

<b>Назив пројекта/истраживања</b>
Примена дискретних метода вишекритеријумске анализе у циљу дефинисања одрживог система сакупљања електричног и електронског отпада
<b>Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање</b>
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
<b>Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање</b>
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму - Инжењерство заштите животне средине.
<b>1. Опис података</b>
<p><i>1.1 Врста студије</i></p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <p>Предмет истраживања докторске дисертације јесте дефинисање оптималног и одрживог система сакупљања електричног и електронског отпада применом метода вишекритеријумске анализе, са фокусом на услове Републике Србије и града Новог Сада као студије случаја. Процена количине електричног и електронског отпада у Републици Србији заснована је на анализи статистичких података и извештаја надлежних институција. Подаци о навикама корисника и њиховој спремности да учествују у савременим системима сакупљања прикупљени су анкетирањем домаћинстава. Методолошки оквир истраживања заснива се на примени метода вишекритеријумског одлучивања, укључујући <i>AHP</i> методу за одређивање тежинских коефицијената критеријума, као и <i>TOPSIS</i> и <i>PROMETHEE II</i> методе за рангирање алтернатива. Додатно, процена утицаја система на животну средину спроведена је моделовањем емисија загађујућих материја применом <i>COPERT</i> софтвера.</p> <p><b>1.2 Врсте података</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> а) квантитативни</p> <p><input type="radio"/> б) квалитативни</p> <p><b>1.3. Начин прикупљања података</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> а) анкете, упитници, тестови</p> <p><input type="radio"/> б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи</p> <p><input type="radio"/> в) генотипови: навести врсту _____</p> <p><input checked="" type="radio"/> г) административни подаци: <input type="checkbox"/> Јавно доступни статистички подаци, Подаци о токовима отпада Агенције за заштиту животне средине</p> <p><input type="radio"/> д) узорци ткива: _____</p> <p><input checked="" type="radio"/> ђ) снимци, фотографије: фотографије на основу националне дигиталне платформе ГеоСрбија (<a href="https://a3.geosrbija.rs/">https://a3.geosrbija.rs/</a>)</p>

- е текст, Актуелна литература у области истраживања
- ж мапа, конструисање рута система за сакупљање отпада на основу алата *OpenRouteService* (<https://maps.openrouteservice.org/>)
- з остало: \_\_\_\_\_ За одређивање количина емитованих загађујућих материја коришћен је софтвер *COPERT 5* (верзија 5.9.1), развијен у оквиру Европске агенције за животну средину и Европског тематског центра за ваздух и климатске промене. *COPERT* представља алат базиран на MS Word платформи, који омогућава детаљну процену емисија у друмском саобраћају на основу комбинације података о возном парку, активности и услова експлоатације.

### 1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

#### 1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- а Ексел фајл, датотека \_\_\_\_\_ .xlsx
- б) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_
- с) PDF фајл, датотека \_\_\_\_\_ .pdf
- д) Текст фајл, датотека \_\_\_\_\_ .pdf, word
- е) JPG фајл, датотека \_\_\_\_\_ .jpg
- г) Остало, датотека \_\_\_\_\_ .json

#### 1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- а) број варијабли \_\_\_\_\_ број зависних варијабли: 5, број независних варијабли: 14
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) 140 испитаника електронске анкете (платформа: JotForm) – за потребе дефинисања индикатора „комфор грађана“  
20 испитаника анкетираних путем упитника – за потребе одређивања тежинских коефицијената применом АХП методе  
33 графичка приказа (слике) полигона површина месних заједница – преузето са платформе GeoSrbija  
3 датотеке са рутама – преузете са платформе OpenRouteService  
1 Ексел датотека са резултатима добијеним применом COPERT софтвера

#### 1.3.3. Поновљена мерења

- а) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) временски размак између поновљених мера је \_\_\_\_\_
- б) варијабле које се више пута мере односе се на \_\_\_\_\_
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- а) експеримент, навести тип \_\_\_\_\_  
 б) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_ квантитативно анкетно истраживање \_\_\_\_\_  
 ц) анализа текста, навести тип \_\_\_\_\_ преглед релевантне научне и стручне литературе \_\_\_\_\_  
 д) остало, навести шта \_\_\_\_\_

#### 2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 2.2 Квалитет података и стандарди

#### 2.2.1. Третман недостајућих података

- а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да  Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_  
 б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не  
 в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

#### 2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података обезбеђен је применом више поступака контроле током свих фаза истраживања – од прикупљања до анализе података. Квалитет података је унапређен применом триангулације извора, с обзиром на то да су у истраживању учествовали представници различитих сектора (академске заједнице, привреде, образовних институција, невладиног и јавног сектора), као и спровођењем компаративне анализе између земаља, што је омогућило проверу конзистентности уочених образаца. Релативни значај критеријума и подкритеријума одређује се поступком парног поређења, при чему доносилац одлуке процењује њихов допринос остварењу циља користећи дефинисану скалу преференција. Метода интегрише субјективне процене експерата и објективне карактеристике проблема, чиме омогућава свеобухватну евалуацију алтернатива. Резултат овог процеса је одређивање приоритета, односно тежинских коефицијената, који квантификују значај појединачних критеријума у процесу одлучивања. Посебна предност методе огледа се у могућности

провере конзистентности донетих процена, чиме се повећава поузданост резултата и смањује утицај субјективних грешака.

### 2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу извршена је кроз поступак вишеструке провере и систематског прегледа унетих података. Након иницијалног уноса, подаци су поново прегледани и упоређени са оригиналним изворима како би се обезбедила тачност, доследност и потпуност информација. Додатно, примењена је логичка и садржајна провера унетих података у оквиру матрице, чиме је осигурана поузданост и валидност даље анализе подата.

## 3. Третман података и пратећа документација

### 3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијум докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса <https://www.cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) Да  
б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_  
в) Не

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

### 3.2. Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? Стандард који примењује репозиторијум Универзитета у Новом Саду.

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум. Тијана Маринковић, Примена дискретних метода вишекритеријумске анализе у циљу дефинисања одрживог система сакупљања електричног и електронског отпада

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

### 3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? Неограничено

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да  Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да  Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да  Не

Образложити

## 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

### 4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности

([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да  Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да  Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

## 5. Доступност података

### 5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство - некомерцијално – без прераде

## 6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Тијана Маринковић, [tijanamarinkovic@uns.ac.rs](mailto:tijanamarinkovic@uns.ac.rs)

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Тијана Маринковић, [tijanamarinkovic@uns.ac.rs](mailto:tijanamarinkovic@uns.ac.rs)

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Тијана Маринковић, [tijanamarinkovic@uns.ac.rs](mailto:tijanamarinkovic@uns.ac.rs)