



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



**RAZVOJ SISTEMA ZA INTELIGENTNU VIŠEKRITERIJUMSKU
PROCENU OPTEREĆENJA ŽIVOTNE SREDINE KOD
OCENJIVANJA ŽIVOTNOG CIKLUSA PROIZVODA I PROCESA**

- Doktorska disertacija -

Mentor:
Prof. dr Janko Hodolič

Kandidat:
mr Boris Agarski

Novi Sad, 2015.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR:	
Identifikacioni broj, IBR:	
Tip dokumentacije, TD:	Monografska publikacija
Tip zapisa, TZ:	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada, VR:	Doktorska disertacija
Autor, AU:	Boris Agarski
Mentor, MN:	Prof. dr Janko Hodolič
Naslov rada, NR:	Razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa
Jezik publikacije, JP:	Srpski, latinica
Jezik izvoda, JI:	Srpski, Engleski
Zemlja publikovanja, ZP:	Republika Srbija
Uže geografsko područje, UGP:	AP Vojvodina
Godina, GO:	2014
Izdavač, IZ:	Autorski reprint
Mesto i adresa, MA:	21000, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Fizički opis rada, FO: (poglavlja/strana/citata/tabela/slika/ grafika/priloga)	9/173/142/50/60/16/2
Naučna oblast, NO:	Inženjerstvo zaštite životne sredine
Naučna disciplina, ND:	Upravljanje zaštitom životne sredine
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO:	Višekriterijumska analiza, ocenjivanje životnog ciklusa, dodeljivanje težinskih faktora
UDK	
Čuva se, ČU:	Biblioteka Fakulteta Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Važna napomena, VN:	
Izvod, IZ:	Realizovana istraživanja disertacije mogu se podeliti na tri osnovne celine. Prva celina predstavlja teorijski deo disertacije, u okviru kog su postavljene osnovne podloge za razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku analizu kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa. Drugu celinu predstavlja razvoj modela i programskog sistema za inteligentnu višekriterijumsku analizu. U okviru treće celine prikazani su rezultati primene razvijenog modela i programskog rešenja na primerima ocenjivanja životnog ciklusa i procene opterećenja životne sredine.
Datum prihvatanja teme, DP:	21.10.2010.
Datum odbrane, DO:	
Članovi komisije, KO:	Predsednik: dr Bojan Srđević, redovni profesor
	Član: dr Katica Šimunović, redovni profesor
	Član: dr Borut Kosec, redovni profesor
	Član: dr Igor Budak, docent
	Član, mentor: dr Janko Hodolič, redovni profesor
	Potpis mentora



UNIVERSITY OF NOVI SAD ● FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	Dr.Sc. thesis
Author, AU :	M.Sc. Boris Agarski
Mentor, MN :	Prof. Dr.Sc. Janko Hodolič
Title, TI :	Development of system for intelligent multi-criteria assessment of environmental loading with life cycle assessment of products and processes
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2014
Publisher, PB :	Autors reprint
Publication place, PP :	Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/173/142/50/60/16/2
Scientific field, SF :	Environmental Engineering
Scientific discipline, SD :	Environmental management
Subject/Key words, S/KW :	Multi-criteria analysis, life cycle assessment, weighting
UC	
Holding data, HD :	Faculty of Technical Sciences Library, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	Dissertation research has been carried out in three main sections. The first section presents the theoretical part of the dissertation, where the base for the development of intelligent multi-criteria analysis within life cycle assessment of the products and processes is set up. The second part presents the development of model and software system for intelligent multi-criteria analysis. Within the third section the results of applying the developed model and software solution are presented on the case studies of life cycle analysis and assessment of environmental burdens.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	21.10.2010.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Dr.Sc. Bojan Srđević, full professor
	Member: Dr. Sc. Katica Šimunović, full professor
	Member: Dr. Sc. Borut Kosec, full professor
	Member: Dr. Sc. Igor Budak, assistant professor
Member, Mentor:	Dr.Sc. Janko Hodolič, full professor
	Mentor's sign

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Predmet istraživanja	1
1.2 Cilj istraživanja	3
1.3 Struktura doktorske disertacije	4
2. VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA	5
2.1 Podele metoda višekriterijumske analize	7
2.2 Metode korisnosti	10
2.2.1 Metoda aditivnih težinskih faktora	10
2.2.2 Metoda produktivnih težinskih faktora	11
2.2.3 Analitički hijerarhijski proces	11
2.3 Metode rangiranja	14
2.3.1 Metode PROMETHEE	14
2.3.2 Metode ELECTRE	18
2.4 Metode kompromisa	21
2.4.1 Metoda TOPSIS	21
2.4.2 Metoda VIKOR	24
2.4.3 Metoda kompromisnog programiranja	28
2.5 Grupno donošenje odluka	28
2.6 SWOT analiza metoda višekriterijumske analize	29
3. METODE ZA DODELJIVANJE TEŽINSKIH FAKTORA	35
3.1 Metode za subjektivno dodeljivanje težinskih faktora	35
3.1.1 Kompenzacione metode određivanja težinskih faktora	36
3.1.2 Nekompenzacione metode određivanja težinskih faktora	39
3.1.3 Određivanje težinskih faktora parcijalno-parnim poređenjem	40
3.2 Metode za objektivno dodeljivanje težinskih faktora	41
3.2.1 Metoda srednje vrednosti težinskih faktora	41
3.2.2 Metoda entropije	41
3.2.3 Metoda CRITIC	43
3.2.4 Metoda FANMA	44
3.2.5 Metoda I-odstojanja	46
3.3 Metode kombinacije subjektivnog i objektivnog dodeljivanja težinskih faktora	48
3.3.1 Kombinovanje subjektivnih, objektivnih i korelacionih težinskih faktora	48
3.3.2 Metoda redukcionih koeficijenata	51
3.4 SWOT analiza metoda za dodeljivanje težinskih faktora	53
4. VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA I OCENJIVANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA	59
4.1 Primena višekriterijumske analize u inženjerstvu zaštite životne sredine	59
4.2 Ocenjivanje životnog ciklusa procesa i proizvoda	60
4.2.1 Definisane cilja, predmeta i područja primene	62
4.2.2 Analiza inventara životnog ciklusa	63

4.2.3	Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa	65
4.2.4	Interpretacija životnog ciklusa.....	67
4.3	Primena višekriterijumske analize u ocenjivanju životnog ciklusa	67
4.3.1	Primena višekriterijumske analize za dodeljivanje težinskih faktora kategorija uticaja u ocenjivanju uticaja životnog ciklusa.....	70
4.3.2	Primena višekriterijumske analize na rezultate ocenjivanja životnog ciklusa.....	76
4.3.3	Ostali pristupi primene višekriterijumske analize sa ocenjivanjem životnog ciklusa.....	78
5.	RAZVOJ SISTEMA ZA VIŠEKRITERIJUMSKU PROCENU OPTEREĆENJA ŽIVOTNE SREDINE KOD OCENJIVANJA ŽIVOTNOG CIKLUSA	80
5.1	Razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu.....	80
5.2	Pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora.....	83
5.3	Programski sistem.....	91
5.3.1	Panel operativnih podataka	95
5.3.2	Panel za unos podataka	96
5.3.3	Panel za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima.....	99
5.3.4	Panel za izračunavanje ranga alternativa	106
5.3.5	Panel za grafički prikaz.....	111
6.	VERIFIKACIJA RAZVIJENOG SISTEMA.....	115
6.1	Primer 1: Dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja kod ocenjivanja životnog ciklusa procesa	115
6.1.1	Opis višekriterijumskog problema dodeljivanja težinskih faktora kod ocenjivanja uticaja životnog ciklusa	115
6.1.2	Dodeljivanje težinskih faktora u ocenjivanju uticaja životnog ciklusa	116
6.1.3	Analiza osetljivosti rezultata višekriterijumske analize	122
6.1.4	Diskusija rezultata višekriterijumske analize	125
6.2	Primer 2: Vrednovanje opterećenja životne sredine u urbanim područjima.....	127
6.2.1	Opis višekriterijumskog problema opterećenja životne sredine	127
6.2.2	Višekriterijumska analiza opterećenja životne sredine.....	128
6.2.3	Analiza osetljivosti rezultata višekriterijumske analize	133
6.2.4	Diskusija rezultata višekriterijumske analize	136
7.	ZAKLJUČAK.....	138
7.1	Rezultati istraživanja	138
7.2	Pravci budućih istraživanja.....	141
8.	LITERATURA.....	143
9.	PRILOZI	155
9.1	Prilog 1: Matrice poređenja AHP	155
9.2	Prilog 2: Izvorni kod IMCAT programskog sistema.....	159

Pregled slika (I)		
Broj slike	Naziv slike	Broj strane
2.1	Opšti hijerarhijski model u AHP-u	12
3.1	Fulerov trougao	40
3.2	Primer popunjenog Fulerovog trougla za 5 kriterijuma	41
4.1	Faze životnog ciklusa proizvoda	61
4.2	Faze LCA prema ISO 14040	62
4.3	Iterativni karakter LCA	64
4.4	Osnovni elementi faze LCIA	66
4.5	Faze LCA i VKA	68
4.6	Dva glavna pristupa istraživanja primene VKA sa LCA	70
4.7	Dobijanje ukupnog uticaja životnog ciklusa primenom težinskih faktora kategorija uticaja na nivou srednjih i krajnjih pozicija	72
4.8	Primer dodeljivanja težinskih faktora kategorijama uticaja primenom trougla za dodeljivanje težinskih faktora	73
4.9	Kriterijumi za dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja	74
4.10	Hijerarhijska struktura za vrednovanje težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA	75
4.11	Primena VKA na rezultate LCIA	76
4.12	Primena VKA kod izbora odgovarajućeg materijala	77
5.1	Osnovni okvir za razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu	80
5.2	Međusobni odnos modula i baza podataka u okviru modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu	82
5.3	Opšta blok šema fuzzy kontrolera	84
5.4	Pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora	85
5.5	Grafički prikaz Mamdani metode zaključivanja	90
5.6	Segment osnovne GUI M-funkcije	92
5.7	Glavni dijalog okvir razvijenog programskog sistema IMCAT	93
5.8	Primer greške ako prilikom unosa ulaznih podataka nije unešena matrica performansi	94
5.9	Primer upozorenja kod AHP	94
5.10	Dijalog okvir za brisanje svih podataka iz operativnih baza podataka	94
5.11	Panel operativnih podataka programskog sistema IMCAT	95
5.12	Algoritam modula za unos podataka	96
5.13	Manuelni unos matrice performansi, tipa kriterijuma i koordinata lokaliteta	97
5.14	Unos matrice performansi, tipa kriterijuma i koordinata lokaliteta preko digitalnog zapisa	98
5.15	Unos mape područja preko slike u elektronskom zapisu i „World file“ dokumenta	98
5.16	Algoritam modula za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima	99
5.17	Algoritam baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora	100
5.18	Dijalog okvir za dodeljivanje težinskih faktora primenom Fulerovog trougla	101
5.19	Dijalog okvir za AHP dodeljivanje težinskih faktora	101

Pregled slika (II)		
Broj slike	Naziv slike	Broj strane
5.20	Dijalog okvir za direktno dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma	102
5.21	Unos redosleda značajnosti kriterijuma kod metode redukcionih koeficijenata	102
5.22	Primena razvijenog sistema za inteligentnu višekriterijumsku analizu sa metodom ocenjivanja životnog ciklusa	103
5.23	Suma težinskih faktora u ReCiPe i VKA	104
5.24	Unos sume LCIA težinskih faktora	105
5.25	Dijalog okvir za inteligentno integrisanje težinskih faktora	105
5.26	Algoritam modula za izračunavanje ranga alternativa	106
5.27	Algoritam baze metoda VKA	107
5.28	Pomoćni dijalog okviri za metode SAW i CP	109
5.29	Dijalog okvir za PROMETHEE i izbor funkcije preferencije za svaki kriterijum	109
5.30	Dijalog okviri za AHP poređenje alternativa	110
5.31	Algoritam modula za grafički prikaz	111
5.32	Grafički prikaz težinskih faktora kriterijuma i ranga alternativa	112
5.33	Grafički prikaz normalizovane matrice histogramom	112
5.34	Grafički prikaz normalizovane matrice polarnim dijagramom	113
5.35	Izbor grafičkog prikaza rezultata LCA histogramom	113
5.36	Grafički prikaz opterećenja životne sredine lokaliteta na mapi područja	114
6.1	Rezultati normalizacije metode ReCiPe za hijerarhist perspektivu	118
6.2	Ukupni uticaj životnog ciklusa za četiri procesa tretmana otpada	122
6.3	Lokaliteti i pozicije mernih mesta	127
6.4	Grafički prikaz normalizovane matrice performansi histogramom	129
6.5	Grafički prikaz normalizovane matrice performansi polarnim dijagramom	129
6.6	Fulerov trougao poređenja kriterijuma	130
6.7	Fulerov trougao poređenja kriterijuma u IMCAT programu	131
6.8	Grafički prikaz vrednovanja	132
6.9	Grafički prikaz opterećenja životne sredine na mapi područja	133

Pregled grafika		
Broj grafika	Naziv grafika	Broj strane
2.1	Idealno i kompromisno rešenje	25
4.1	Radovi publikovani u periodu 1990.-2010. godine po oblastima primene metoda VKA u inženjerstvu zaštite životne sredine u %	60
5.1	Trougaona funkcija pripadnosti	86
5.2	Funkcije pripadnosti za ulaz: Subjektivni težinski faktori	87
5.3	Funkcije pripadnosti za ulaz: Objektivni težinski faktori	87
5.4	Funkcije pripadnosti za ulaz: Lambda	87
5.5	Funkcije pripadnosti za izlaz: Integrisani težinski faktori	87
5.6	Funkcije pripadnosti za subjektivne i objektivne težinske faktore za različit broj kriterijuma	89
6.1	Podrazumevani, subjektivni i integrisani težinski faktori kategorija uticaja	120
6.2	Skupovi težinskih faktora kategorija uticaja	123
6.3	Ukupan uticaj životnog ciklusa procesa tretmana otpada na životnu sredinu	124
6.4	Rang procesa za različite skupove težinskih faktora kategorija uticaja	125
6.5	Težinski faktori kriterijuma dobijeni Fulerovim trouglom, metodom entropije i integrisanjem	131
6.6	Skupovi težinskih faktora kriterijuma	134
6.7	Opterećenje lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma	135
6.8	Rang opterećenja lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma	136

Pregled tabela (I)		
Broj tabele	Naziv tabele	Broj strane
2.1	Poređenje MODM i MADM	8
2.2	Metode VKA	9
2.3	Satijeva skala vrednovanja	13
2.4	Slučajni indeksi RI	14
2.5	Funkcije preferencije u metodi PROMETHEE	16
2.6	Koraci izvršavanja metode PROMETHEE I i II	17
2.7	SWOT analiza metode SAW	30
2.8	SWOT analiza AHP	31
2.9	SWOT analiza metode PROMETHEE	32
2.10	SWOT analiza metode ELECTRE	33
2.11	SWOT analiza metode CP	33
2.12	SWOT analiza metode TOPSIS	34
2.13	SWOT analiza metode VIKOR	34
3.1	SWOT analiza metode direktnog dodeljivanja težinskih faktora	53
3.2	SWOT analiza metode Fulerovog trougla	54
3.3	SWOT analiza metode srednjih vrednosti težinskih faktora	54
3.4	SWOT analiza metode entropije	55
3.5	SWOT analiza metode CRITIC	55
3.6	SWOT analiza metode FANMA	56
3.7	SWOT analiza metode I-odstojanja	56
3.8	SWOT analiza metode iz 2012. godine autora Jahan i drugi	57
3.9	SWOT analiza metode iz 2013. godine autora Jahan i Edwards	57
3.10	SWOT analiza metode redukcionih koeficijenata	58
4.1	Primena metoda VKA u oblastima inženjerstva zaštite životne sredine	60
4.2	Analogija između metoda LCA i VKA	68
5.1	Baza pravila modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora	90
5.2	Vrste normalizacije koje se mogu odabrati u IMCAT programu za metodu SAW	108
6.1	Rezultati normalizacije metode ReCiPe	117
6.2	Normalizovana matrica kao ulaz za VKA	118
6.3	Četiri perspektive težinskih faktora u ReCiPe metodi	119
6.4	Podrazumevani, subjektivni i integrisani težinski faktori kategorija uticaja	121
6.5	Ukupni uticaj životnog ciklusa za četiri procesa tretmana otpada	121
6.6	Opis skupova težinskih faktora kategorija uticaja	123
6.7	Skupovi težinskih faktora kategorija uticaja	124
6.8	Ukupan uticaj životnog ciklusa za različite skupove težinskih faktora kategorija uticaja	125
6.9	Rang procesa za različite skupove težinskih faktora kategorija uticaja	125
6.10	Izmerene vrednosti kriterijuma prema lokacijama	128

Pregled tabela (II)		
Broj tabele	Naziv tabele	Broj strane
6.11	Normalizovana matrica performansi	129
6.12	Težinski faktori kriterijuma dobijeni Fulerovim trouglom	130
6.13	Subjektivni, objektivni i integrisani težinski faktori	132
6.14	Opterećenje lokaliteta za integrisane težinske faktore	133
6.15	Opis skupova težinskih faktora kriterijuma	134
6.16	Skupovi težinskih faktora kriterijuma	135
6.17	Opterećenje lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma	135
6.18	Rang opterećenja lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma	136
9.1	Matrica poređenja kriterijuma	155
9.2	Matrica poređenja kategorije uticaja prema kriterijumu vreme	156
9.3	Matrica poređenja kategorije uticaja prema kriterijumu područje	157
9.4	Matrica poređenja kategorija uticaja prema kriterijumu nepovratnost	158
9.5	Subjektivni težinski faktori kategorija uticaja	159

Pregled korišćenih akronima (I)		
Akronim	Naziv na engleskom jeziku	Naziv na srpskom jeziku
AHP	Analytic Hierarchy Process	Analički Hijerarhijski Proces
ANP	Analytic Network Process	-
CP	Compromise Programing	Kompromisno programiranje
CRITIC	CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation	-
DEA	Data Envelopment Analysis	-
EIA	Environmental Impact Assessment	Procena uticaja na životnu sredinu
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELimination and Choice Expressing REality)	-
EPI	Environmental Performance Indicators	Indikatori životne sredine
FIS	Fuzzy Inference System	Fuzzy kontroler
FT	Fullers Triangle	Fulerov Trougao
GAIA	Geometrical Analysis for Interactive Aid	-
GIS	Geographic Information System	Geografski Informacioni Sistem
GUI	Graphic User Interface	Grafički korisnički interfejs
GUIDE	Graphic User Interface Development Environment	Okruženje za razvoj grafičkog korisničkog interfejsa
IMCAT	Intelligent MultiCriteria Analysis Tool	Alat za inteligentnu višekriterijumsku analizu
ISO	International Organization for Standardisation	Međunarodna organizacija za standardizaciju
LCA	Life Cycle Assessment	Ocenjivanje životnog ciklusa
LCI	Life Cycle Inventory	Inventar životnog ciklusa
LCIA	Life Cycle Impact Assessment	Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique	-
MADM	Multi-Attribute Decision Making	Višeatributno odlučivanje
MATLAB	MATrix LABoratory	Laboratorija za matrice
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory	Višeatributna teorija korisnosti
MAVT	Multi-Attribute Value Theory	Višeatributna teorija vrednosti
MCDA	Multiple Criteria Decision Aid	Podrška višekriterijumskom odlučivanju
MCDM	MultiCriteria Decision Making	Višekriterijumsko odlučivanje
MODM	Multiple Objective Decision Making	Višeciljno odlučivanje
MS	MicroSoft	-
NAIADE	Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments	-
PDF	Portable Document Format	Format zapisa elektronskih dokumenta

Pregled korišćenih akronima (II)		
Akronim	Naziv na engleskom jeziku	Naziv na srpskom jeziku
PROMETHEE	Preference Ranking Organization - METH od for Enrichment Evaluation	
REPA	Resource and Environment Profile - Analysis	
REPA	Resource and Environment Profile - Analysis	
SAW	Simple Additive Weights	Metoda aditivnih težinskih faktora
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry	Asocijacija za toksikologiju i hemiju životne sredine
SMART	Simple Multiattribute Rating Technique	-
SPW	Simple Product Weighting	-
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats	Prednosti, nedostaci, mogućnosti i pretnje
SWS	Simple Weighted Sum	Metoda aditivnih težinskih faktora
TOPSIS	Technique for the Order of Prioritisation by Similarity to Ideal Solution	-
VKA	MultiCriteria Analysis	VišeKriterijumska Analiza
VIKOR	Multicriteria Optimization and Compromise Solution	VišeKriterijumska Optimizacija i Kompromisno Rešenje
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency	Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država
WPM	Weighted Product Method	-
WSM	Weighted Sum Model	Metoda aditivnih težinskih faktora

Pregled korišćenih termina (I)	
Termin	Objašnjenje
Alokacija	U LCA predstavlja raspoređivanje/dodeljivanje ulaznih, odnosno izlaznih tokova jediničnog procesa u sistemu proizvoda koji se ispituje.
Alternativa	Varijanta, rešenje - jedna od prethodno definisanih rešenja koje se vrednuje VKA.
Cilj vrednovanja	Svrha i namena zbog čega se radi VKA.
Dodeljivanje težina	Ponderisanje, prioritizacija, određivanje značajnosti kriterijuma na osnovu kojeg se vrši vrednovanje alternativa. U LCIA koristi se i termin odmeravanje.
Fuzzy	Od engleske reči „fuzzy“ (fazi) što znači nejasno, neodređeno, mutno. U disertaciji termin „fuzzy“ vezan je za teoriju fazi skupova i fazi logike. U srpskom jeziku za fuzzy skupove često se koristi i termin rasplinuti skupovi.
Grupisanje	Pojam grupisanja u LCA podrazumeva dodeljivanje kategorija uticaja jednom ili više skupova, kako je predviđeno definicijom cilja i predmeta i područja primene, i kao takvo može obuhvatiti razvrstavanje i/ili rangiranje.
Karakterizacija	Izračunavanje kvantitativnog rezultata kategorije uticaja. Pretvaranje rezultata LCI u uobičajene jedinice i objedinjavanje pretvorenih rezultata u okviru kategorija uticaja.
Kategorija uticaja	Klasa koja predstavlja pitanja iz oblasti životne sredine kojima se mogu pripisati rezultati inventara životnog ciklusa.
Klasifikacija	U LCA predstavlja dodeljivanje rezultata inventara životnog ciklusa kategorijama uticaja.
Krajnje pozicije	Osobina ili aspekt prirodnog okruženja, čovekovog zdravlja ili resursa, kojima se identifikuju pitanja o zaštiti životne sredine koja izazivaju pažnju. Kategorije štete, krajnje tačke (engl. endpoint) kod LCA se nalaze u mehanizmu životne sredine na poslednjoj tački. U LCIA metodama se najčešće koriste kategorije štete: po ljudsko zdravlje, kvalitet ekosistema i resurse.
Kriterijum	Atribut, indikator, parametar, faktor, pokazatelj - predstavlja princip prema kom se vrednuju alternative i donose odluke u VKA, ili meru postizanja zadatog cilja.
Matrica performansi	rejting matrica, pay-off matrica, matrica odlučivanja u kojoj su sadržane performanse alternativa koje se vrednuju. Matrica performansi može sadržati vrednosti kvalitativnih i kvantitativnih kriterijuma, s tim da se kvalitativni kriterijumi prevode u kvantitativne da bi se mogla izvršiti VKA. Često se koristi tabelarni prikaz za predstavljanje matrice performansi.
Međupozicije	Srednje tačke (engl. midpoint) kod LCA nalaze se u mehanizmu životne sredine na nekoj poziciji između početnih tačaka (emisije ili druge aktivnosti u životnoj sredini) i krajnjih pozicija (kategorije štete).
Normalizacija	Postupak kojim se u VKA vrednosti iz matrice performansi svode na uporedivu i bezdimenzionalnu skalu. Pored normalizacije, u literaturi može se pronaći i termin standardizacija. U LCA, normalizacijom se izračunavanju veličine kvantitativnih rezultata kategorije uticaja u odnosu na referentne vrednosti.

Pregled korišćenih termina (II)	
Termin	Objašnjenje
Normalizovana matrica	Matrica kod koje su sve vrednosti iz matrice performansi normalizovane na uporedivu skalu. Elementi normalizovane matrice su najčešće brojevi u rasponu od 0 do 1.
Održivi razvoj	Razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnje generacije bez ugrožavanja potreba budućih generacija za život u okviru kapaciteta životne sredine.
Rang alternative	Konačni rezultat VKA koji prikazuje koliko se alternative međusobno razlikuju prema svim kriterijumima. Rang alternativa najčešće je broj koji pokazuje koliko preferenciju je alternativa postigla u odnosu na ostale.
Težinski faktor	Predstavlja značajnost, važnost, prioritet ili ponder elementa koji se vrednuje u VKA. Težinski faktor ili težinski koeficijent, najčešće se odnosi na kriterijum, ali može da se odnosi i na alternativu. Težinski faktor je najčešće broj sa vrednošću od 0 do 1, gde se većom vrednošću označava značajniji elemenat poređenja i obrnuto.
Tip kriterijuma	Tip kriterijuma označava razliku između kriterijuma koji pozitivno utiču na rang alternative (kriterijumi tipa „max“, kriterijumi koji se maksimiziraju, kriterijumi dobiti, koristi, prihodni atributi, „što više to bolje“) i kriterijuma koji negativno utiču na rang alternative (kriterijumi tipa „min“, kriterijumi koji se minimiziraju, kriterijumi troškova, rashodni atributi „što manje to bolje“). U disertaciji će se koristiti termini: kriterijumi tipa „max“ i kriterijumi tipa „min“.
Višekriterijumska analiza (VKA)	Alat za donošenje odluka razvijen za kompleksne višekriterijumske probleme koji sadrže kvalitativne i/ili kvantitativne aspekte problema kod procesa donošenja odluke. VKA spada u oblast teorije odlučivanja gde se susreću ekonomija, matematika, statistika, psihologija, sociologija, organizaciona teorija, filozofija i ostale nauke. Kod VKA često se koriste i termini višekriterijumsko ili multikriterijumsko vrednovanje, odlučivanje, donošenje odluka.
Životna sredina	Skup prirodnih i stvorenih vrednosti čiji kompleksni međusobni odnosi čine okruženje, odnosno prostor i uslove za život.

1. UVOD

1.1 Predmet istraživanja

Politika zaštite životne sredine je orijentisana ka integralnoj prevenciji zagađenja, uzimajući u obzir sve aspekte životne sredine: vazduh, vodu, zemljište, potrošnju energije i drugih resursa. Kompleksnost i raznorodnost kriterijuma za procenu opterećenja životne sredine nameće potrebu razvoja i primene isto tako složenih metoda za ocenjivanje proizvoda i procesa tokom životnog ciklusa. Primena metoda višekriterijumske analize (VKA) je neophodna kod ocenjivanja uticaja na životnu sredinu tokom životnog ciklusa, kako bi se respektovali ekološki, tehnički, ekonomski i socijalni parametri.

Osnovna svrha metoda VKA jeste prevazilaženje problema na konzistentan način, na koje čovek kao donosilac odluke nailazi prilikom rada sa velikom količinom kompleksnih informacija. Kompleksne informacije u VKA odnose se na rad sa velikim brojem parametara sa kojima se analizira višekriterijumski problem, različite merne jedinice u kojima se izražavaju parametri, kao i različite skale. Metode VKA ne mogu da zamene proces donošenja odluke, već da pruže podršku pri organizovanju odlučivanja i definisanju modela problema, čime doprinose boljem razumevanju višekriterijumskog problema odlučivanja. Kod definisanja problema VKA treba istaći da je izbor odgovarajućih kriterijuma, na osnovu kojih će se vrednovati alternative, važan i ne tako jednostavan korak od kojeg zavisi konačni rezultat vrednovanja. VKA obuhvata različite tehnike koje se razlikuju po pristupu problemu, ali kod skoro svih metoda VKA neophodno je dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma. Značajan korak VKA jeste dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima, a rezultat vrednovanja u velikoj meri zavisi od težinskih faktora kriterijuma. Kod dodeljivanja težinskih faktora, mogu se istaći kombinovani pristupi koji se zasnivaju na primeni subjektivnih i objektivnih metoda kako bi se dobili konačni-integrirani težinski faktori, što je ujedno i predmet istraživanja ove disertacije.

Upravljanje zaštitom životne sredine (eko menadžment), jeste upravljanje svim aktivnostima koje imaju ili mogu imati uticaj na životnu sredinu. U manje formalne alate upravljanja zaštitom životne sredine, pored ostalih, ubraja se i metoda ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda (Hodolič i dr., 2013). Metoda ocenjivanja životnog ciklusa (engl. Life Cycle Assessment - LCA) standardizovana je međunarodnim standardima ISO 14040 i ISO 14044 (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006) i podrazumeva prikupljanje i vrednovanje podataka o ulazima, izlazima i mogućim uticajima procesa i proizvoda na životnu sredinu tokom životnog ciklusa. Bez obzira na svrhu studije, često je cilj metode ocenjivanja životnog ciklusa poređenje životnih ciklusa ili faza životnih ciklusa različitih proizvoda, procesa i sistema. Pored toga što je metoda LCA dobro definisana ISO 14040 standardima, izbor metode LCIA (engl. Life Cycle Impact Assessment) i okvir procene uticaja u LCA predstavljaju područja za istraživanje i unapređivanje. S obzirom na to da ne postoji najbolja metoda za ocenjivanje uticaja, na analitičarima ostaje izbor odgovarajuće. ISO 14044:2006 zahteva da dodeljivanje težinskih faktora (odmeravanje) bude u potpunosti jasno (transparentno). Međutim, ISO standardi ne daju smernice za sprovođenje opcionog procesa dodeljivanja težinskih faktora u LCIA.

Postoji bliska analogija između ocenjivanja životnog ciklusa i alata za donošenje odluka (Chevalier i Rousseaux, 1999) kao što je višekriterijumska analiza, a LCA se može shvatiti kao problem odlučivanja (Hertwich i Hammit, 2001a, 2001b). Višekriterijumski pristup kod rešavanja problema pri izradi LCA studije može se koristiti u sve četiri faze LCA (Seppala, 2003). Grupisanje u LCIA fazi sa ciljem izračunavanja rezultujućih indikatora može se izvesti upotrebom MAUT (engl. Multi-Attribute Utility Theory). Višekriterijumske metode odlučivanja pomažu računanju kategorija uticaja na nivou međupozicija i krajnjih pozicija (središnjeg i krajnjeg nivoa). „Vrednosno drvo“, alat koji se koristi pri struktuiranju problema kod višekriterijumskog odlučivanja, može da bude koristan alat za odabir uticajnih kategorija i klasifikaciju (Seppala, 2003). Metode za dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma, poreklom iz oblasti višekriterijumske analize, mogu biti upotrebljene pri subjektivnom određivanju faktora karakterizacije i dodeljivanju težinskih faktora uticajnim kategorijama. Tehnike analize osetljivosti, koje se primenjuju kod višekriterijumskih modela odlučivanja, mogu se primeniti u LCIA. Višekriterijumsko odlučivanje pomaže kod izračunavanja rezultata uticajnih kategorija na nivou međupozicija i kod ukupnog rezultata (engl. single score) kategorija uticaja odgovarajućim jednačinama agregacije. Primena VKA kod LCA najčešće se odnosi na

dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja što je ujedno i predmet istraživanja doktorske disertacije.

1.2 Cilj istraživanja

Najčešće veliki broj elemenata sa kojima se analizira višekriterijumski problem sa jedne strane, a kompleksnost metoda za višekriterijumsku analizu sa druge strane, nameću potrebu da se obe činjenice pažljivo razmotre kako bi se uskladile. Dobar pristup je da se razvije i implementira programski sistem u kome će centralno mesto zauzeti metode veštačke inteligencije za pomoć kod rešavanja problema u oblasti zaštite životne sredine. Cilj istraživanja je da se na osnovu pregleda stanja u oblasti primene metoda višekriterijumskog odlučivanja kod ocenjivanja životnog ciklusa, kao i analize prednosti i nedostataka postojećih pristupa, razvije model za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod metode LCA. Cilj je da se prvo razvije model za inteligentnu višekriterijumsku analizu za procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa, a zatim da se realizuje programski sistem koji će omogućiti automatizaciju procesa izračunavanja ukupnog (sinergetskog) uticaja na životnu sredinu. Programski sistem treba korisnicima da omogući kvalitetnu grafičku interpretaciju rezultata i pruži jasniju sliku o opterećenju životne sredine. Važna komponenta razvijenog modela i programskog sistema jeste pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora kategorija uticaja na životnu sredinu, kao i primena fuzzy logike pri dodeljivanju težinskih faktora subjektivnim i objektivnim pristupom.

Dodatni ciljevi istraživanja se odnose na razvijeni programski sistem i mogu se definisati kao:

- Omogućiti unos svih potrebnih informacija bitnih za procenu opterećenja životne sredine;
- Obezbediti jednostavan i intuitivan korisnički interfejs i pregledni grafički prikaz rezultata opterećenja životne sredine;
- Omogućiti procenu opterećenja životne sredine uz podršku metoda fuzzy logike;
- Omogućiti robusnost metoda i programskog sistema u tipičnim okruženjima primene.

U okviru istraživanja potrebno je razviti sistem za višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine, koji će na adekvatan način služiti i kao alat za ocenjivanje

životnog ciklusa proizvoda i procesa za probleme kompleksnog opterećenja životne sredine.

1.3 Struktura doktorske disertacije

U skladu sa postavljenim ciljevima, istraživanja su realizovana u osam poglavlja, čija struktura se može podeliti na tri osnovne celine, ako se izuzmu uvodno poglavlje, zaključna razmatranja, pregled literaturnih informacija i prilozi. Prva celina obuhvaćena drugim, trećim i četvrtim poglavljem, predstavlja teorijski deo disertacije, u okviru kojeg je predstavljen prikaz postojećeg stanja i tendencija, u oblasti obuhvaćenim direktno ili indirektno tematikom ove disertacije. Drugo poglavlje opisuje metode VKA, treće poglavlje je fokusirano na metode za dodeljivanje težinskih faktora, dok je primena VKA kod ocenjivanja životnog ciklusa procesa i proizvoda tema četvrtog poglavlja. U okviru druge celine realizovan je razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku analizu. Drugu celinu predstavlja peto poglavlje, u kojem je predstavljen razvoj modela i programskog sistema za inteligentnu višekriteijumsku analizu. Treća celina obuhvata šesto poglavlje, u okviru kog je prikazana verifikacija razvijenog modela i programskog rešenja realizovana u dva primera: dodeljivanje težinskih faktora LCIA kategorijama uticaja, kod ocenjivanja uticaja životnog ciklusa i vrednovanje opterećenja životne sredine na lokalitetima urbanog područja.

2. VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA

Donošenje odluka je identifikovanje i izbor alternativa zasnovan na vrednostima i preferencijama donosilaca odluke (Harris, 2014). Donošenje odluke podrazumeva da postoje alternativni izbori koji se razmatraju i u takvom slučaju pored identifikovanja što je moguće više alterantiva, alternative se analiziraju (selektuju, klasifikuju) u skladu sa ciljevima, željama, vrednostima itd.

VKA je alat za donošenje odluka, razvijen za kompleksne višekriterijumske probleme koji sadrže kvalitativne i/ili kvantitativne aspekte problema kod procesa donošenja odluke. Spada u oblast teorije odlučivanja gde se susreću: ekonomija, matematika, statistika, psihologija, sociologija, organizaciona teorija, filozofija, informacione tehnologije i ostale nauke. Kod VKA se često koriste i termini: višekriterijumsko ili multikriterijumsko vrednovanje, optimizacija, odlučivanje, donošenje odluka. VKA struktuirana i rešava odlučivanje na bazi kriterijuma. VKA ne treba da zameni donosilaca odluke, već da pruži podršku pri odlučivanju. Obično ne postoji jedno univerzalno optimalno rešenje (alternativa, varijanta) kod višekriterijumskih problema i neophodno je da donosilac odluke postavi svoje preferencije kako bi se rešenja mogla razlikovati. Rešavanje višekriterijumskog problema podrazumeva izbor „najbolje“ alternative iz skupa dostupnih alternativa, gde „najbolje“ donosilac odluke može tumačiti kao „najpoželjnije“.

Metode VKA se mogu koristiti pri identifikovanju: optimalne alternative, za rangiranje alternativa, za dobijanje određenog broja alternativa ili za razlikovanje prihvatljivih od neprihvatljivih alternativa (Bernardini i dr., 2007). Glavna svrha metoda VKA, jeste prevazilaženje problema na konzistentan način na koje čovek kao donosilac odluke nailazi prilikom rada sa velikom količinom kompleksnih informacija. VKA se može posmatrati kao kompleksan i dinamičan proces koji uključuje menadžerski i inženjerski nivo (Opricović i Tzeng, 2004). Menadžerski nivo definiše ciljeve i odabira konačnu „optimalnu“ alternativu. Višekriterijumska priroda odluka je naročito izražena na menadžerskom nivou gde donosioci odluka prihvataju ili odbacuju rešenja koja su

predložena na inženjerskom nivou. Inženjerski nivo VKA definiše alternative i naglašava posledice izbora alternative sa stanovišta različitih kriterijuma.

Višekriterijumski problemi imaju sledeće zajedničke karakteristike (Čupić, 2004):

- Veći broj kriterijuma koje definišu jedan ili više donosilaca odluka (individualni i grupni kontekst);
- Konflikti kriterijuma – kao najčešći slučaj kod realnih problema;
- Neuporedive merne jedinice - nekomparabilnost kriterijuma, kriterijumi/atributi često imaju različite merne jedinice;
- Rešenje problema višekriterijumskog odlučivanja može biti rangiranje alternativa, identifikacija najbolje (najpoželjnije) alternative, ili skup alternativa koje ispunjavaju određene uslove.

VKA obuhvata veliki broj različitih tehnika koji se razlikuju po pristupu problemu tj. načinu agregacije podataka datih za pojedinačne merljive kriterijume, a u cilju određivanja ukupne performanse alternativa u odnosu na skup eksplicitno definisanih ciljeva. Mnogi autori (Baker i dr., 2002; Bernardini i dr., 2007; Opricović i Tzeng, 2004; Roy i McCord, 1996) su napravili klasifikaciju osnovnih faza u VKA, prema kojima postoje sledeće faze VKA:

- definisanje cilja, kriterijuma i alternativa,
- formiranje matrice performansi,
- dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima,
- višekriterijumska analiza (primenom jedne ili više metoda),
- dobijanje vrednosti-ranga alternativa.

Pored osnovnih faza VKA može se raditi i analiza osetljivosti, gde se ulazni podaci menjaju u maloj meri i posmatra se uticaj na rezultate. Ukoliko se rang alternativa ne menja, zaključuje se da su rezultati robusni i pouzdani. Analiza osetljivosti istražuje razlike u podacima i neusaglašenosti oko kvalitativnih ulaza u model VKA, da bi se otkrilo da li postoji uticaj na konačni rezultat preferencija i rang alternativa. Ukoliko postoji mala razlika u redosledu ranga alternativa, tada se dogovor oko konačnog rešenja može jednostavno postići bez potrebe za konzensusom ulaza ili težinskih faktora. Takođe, analizom osetljivosti se može ispitati slučaj gde dve ili više alternativa imaju malu razliku ranga, čime se može postići dogovor između donosilaca odluke preporukom jedne od ovih alternativa, čak i ako nisu bile na prvom mestu prema preferencijama donosilaca odluke. Analiza osetljivosti je korisna prilikom rešavanja

konflikata između donosilaca odluka (Eghali, 2002). Dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima često je sporna oblast koja zahteva analizu osetljivosti. Analiza osetljivosti može ispitati osetljivost rezultata na promene težinskih faktora kriterijuma, što je značajno kod metoda kao što su analitički hijerarhijski proces gde se vrši subjektivno vrednovanje. Često se u praksi za jedan višekriterijumski problem paralelno koriste nekoliko metoda VKA kako bi se ispitala osetljivost dobijenih rezultata i da bi se obezbedila kontrola konzistentnosti odlučivanja (Srđević, 2005).

Prilikom definisanja višekriterijumskog problema u VKA važno je napraviti razliku između kriterijuma označavanjem dva tipa kriterijuma: „max“ ili „min“. Kriterijumi tipa „max“ pozitivno utiču (direktno proporcionalno) na rang alternative dok kriterijumi tipa „min“ negativno utiču (obrnuto proporcionalno) na rang alternative. U VKA često se razlika između „max“ i „min“ tipa kriterijuma pravi prilikom normalizacije matrice performansi. Postoje i kriterijumi sa nemonotonom raspodelom koje je potrebno za potrebe VKA, ukoliko je to moguće, prevesti u „max“ ili „min“ tip kriterijuma.

2.1 Podele metoda višekriterijumske analize

Pregledom većeg broja literaturnih izvora (Chai i dr., 2013; Čupić, 2004; Figueira i dr., 2005; Hwang i Yoon, 1981; Kaplan, 2006; Polatidis i dr., 2006; Yoon, 1980), ustanovljeno je da metode VKA¹⁾, mogu biti podeljene na:

- *Višeatributno odlučivanje* (engl. Multiple Attribute Decision Making - MADM) karakteriše se potrebom izbora najprihvatljivije alternative, iz skupa alternativa predstavljenih na osnovu definisanih kriterijuma. Postoji konačan broj unapred zadatih alternativa za izbor, pri čemu ne postoje eksplicitno definisana ograničenja, već su ona uključena u attribute. Uobičajeni način predstavljanja problema MADM je matična forma (matrica performansi ili matrica odlučivanja). Metode MADM mogu se dalje podeliti na²⁾:
 - *Metode korisnosti* (engl. utility methods) – tipičan predstavnik je metoda aditivnih težinskih faktora opisana u podnaslovu 2.1.1;

¹⁾ Često se u literaturi može pronaći i termin MCDM (engl. Multi-Criteria Decision Making), MCDA (engl. Multiple Criteria Decision Aid), dok se višekriterijumsko programiranje i optimizacija (engl. Multicriteria Programming and Optimization) često koriste za višeciljno odlučivanje.

²⁾ Metode višeatributnog odlučivanja se mogu podeliti na kompenzacione i nekompenzacione prema (Čupić, 2004; Srđević, 2005; Yoon, 1980), ali s obzirom da se kompenzacione metode mnogo češće primenjuju u praksi, u disertaciji je usvojena podela na višeatributno i višeciljno odlučivanje. Pogledati poglavlje 3.1 Metode za subjektivno dodeljivanje težinskih faktora.

- *Metode rangiranja* (engl. outranking methods) ili *metode preferencija* - redosled alternativa se generiše po prioritetu tako da mera saglasnosti bude zadovoljena na najbolji način. Logika vrednovanja u metodama rangiranja, jeste da alternativa sa dovoljno visokim rangovima po više atributa bude i konačno visoko rangirana.
- *Metode kompromisa ili metode idealne tačke* – karakteriše definisanje referentnih vrednosti (idealnih tačaka) u odnosu na koje se porede alternative;
- *Ostale metode*.
- *Višeciljno odlučivanje* (engl. Multiple Objective Decision Making - MODM) je eksplicitno definisano analitičkim oblikom svakog kriterijuma pojedinačno. Karakteristika MODM je da se određenim matematičkim aparatom, skup više funkcija cilja prevodi u problem jednokriterijumskog odlučivanja, posle čega se isti rešava standardnom metodom jednokriterijumskog linearnog programiranja i najčešće simpleks procedurom. Za razliku od višeatributnog odlučivanja, kod višeciljnog odlučivanja diskretno se naglašava skup funkcija cilja (dve i više) nad definisanim skupom ograničenja. Dobra strana višeciljnog odlučivanja jeste da pruža skup najboljih alternativnih opcija umesto jedne (Azapagic i Clift, 1999b).

Metode MADM koriste se za izbor jedne alternative iz malog, reprezentativnog broja alternativa, dok se metode MODM koriste za rešavanje problema sa beskonačnim brojem alternativa koje su definisane matematičkim ograničenjima (tabela 2.1). Tabela 2.2 prikazuje pregled karakterističnih metoda VKA grupisanih prema prethodno spomenutoj podeli.

Tabela 2.1. Poređenje MODM i MADM (Yoon, 1980)

	MODM	MADM
Cilj	Nalaženje optimalnog rešenja primenom matematičkog modela sa odgovarajućim ograničenjima.	Nalaženje samo jedne alternative iz malog skupa (nekoliko alternativa). Svaka alternativa ima isti nivo identifikacije.
Funkcije alternativa	Funkcija sadrži varijable odlučivanja koje predstavljaju meru pripadanja svake alternative. Beskonačan broj alternativa (kontinuirane).	Ne postoji funkcija alternative. Konačan broj alternativa (diskretne).
Atributi (kriterijumi)	Funkcije kao ograničenja.	Funkcije koje pružaju numerički rang alternative.

Tabela 2.2. Metode VKA

VKA	Akronim	Naziv metode VKA	Reprezentativne reference
Metode korisnosti (MAUT/MAVT)			
SAW/ WSM		Simple Additive Weights/ Weighted Sum Model	(Hwang i Yoon, 1981; Triantaphyllou, 2000)
SMART		Simple Multiattribute Rating Technique	(Edwards, 1977, Edwards i Barron, 1994)
SPW/ WPM		Simple Product Weighting/ Weighted product model	(Triantaphyllou, 2000)
AHP		Analytic Hierarchy Process	(Saaty, 1980)
ANP		Analytic Network Process	(Saaty, 1996)
MACBETH		Measuring Attractiveness by a categorical Based Evaluation Technique	(Bana e Costa i Vansnick, 1999)
I-odstojanje		Ivanovićevo odstojanje	(Ivanović, 1973; Jeremić i dr., 2011a)
RC		Redukcioni koeficijenti	(Agarski i dr., 2012a; Hodolić i dr., 2003)
Metode rangiranja			
ELECTRE		Elimination and choice expressing reality	(Beneyoun, 1966; Roy i Bertier, 1971)
PROMETHEE		Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation	(Brans, 1982; Benoit i Rousseaux, 2003)
NAIADE		Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments	(Benetto i dr., 2008; Benoit i Rousseaux, 2003; Munda, 1995)
REGIME		REGIME	(Benoit i Rousseaux, 2003)
ORESTE		ORESTE	(Benoit i Rousseaux, 2003)
Metode kompromisa			
TOPSIS		Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution	(Hwang i Yoon, 1981)
VIKOR		VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Rešenje	(Opricović, 1998)
CP		Compromise programing	(Zeleny, 1982)
Ostale metode višeatributnog odlučivanja			
DEMATEL		DEcision MAking Trial and Evaluation Laboratory	(Gabus i Fontela, 1972)
FLAG		FLAG	(Polatidis i dr., 2006)
SMAA		Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis	(Polatidis i dr., 2006)

Višeatributno odlučivanje

Tabela 2.2. Metode VKA (nastavak)

VKA	Akronim	Naziv metode VKA	Reprezentativne reference
Višeciljno odlučivanje	DEA	Data Envelopment Analysis	(Seiford i Thrall, 1990)
	LP	Linear Programming	(Dantzig i Thapa, 1997)
	NP	Nonlinear programming	(Chai i dr., 2013)
	MOP	MultiObjective Programming	(Chai i dr., 2013)
	GP	Goal Programming	(Chai i dr., 2013)
	SP	Stochastic Programming	(Chai i dr., 2013)
	MOORA	Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis	(Brauers, 2004)

Pored navedenih metoda VKA (tabela 2.2), postoje mnoge metode koje nisu spomenute u disertaciji, kombinacija/integracija više različitih metoda VKA (Agarski i dr., 2012a-2012d; Jahan i dr., 2012; Jahan i Edwards, 2013, 2014; Srđević, 2005), razne modifikacije metoda VKA (Agarski i dr., 2010, 2012a; Benetto i dr., 2008; Jahan i dr., 2012; Jahan i Edwards, 2013, 2014), kao i primena fuzzy brojeva i fuzzy logike u VKA (Benetto i dr., 2008; Gelderman, 2005; Munda, 1995; Pires i dr., 2011). Neke od navedenih metoda iz tabele 2.2 biće iskorišćene kao podloge za razvoj programskog sistema u poglavlju 5. U nastavku će biti opisane značajnije metode VKA.

2.2 Metode korisnosti

2.2.1 Metoda aditivnih težinskih faktora

Metoda aditivnih težinskih faktora (aditivna metoda), SAW, SWS ili WSM (Fishburn, 1967; Triantaphyllou, 2000), jeste jednostavna metoda koja najčešće daje slične rezultate kao i tzv. naprednije metode (Srđević, 2005). Posle određivanja težinskih faktora kriterijuma w_j i normalizacije matrice performansi $X = [x_{ij}]$, primenom jednačine 2.1 za svaku alternativu se izračunava ukupna vrednost-korist (engl. utility) alternative S_i , a najbolja je alternativa sa najvećom vrednošću S_i .

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1; \quad 0 \leq w_j \leq 1; \quad (2.1)$$

gde je:

S_i – rejting alternative (rang alternative),

w_j – težinski faktor kriterijuma,
 x_{ij} – elemenat normalizovane matrice performansi,
 n – broj alternativa,
 m – broj kriterijuma.

Isti pristup koristi i metoda SMART (engl. Simple Multi-Attribute Rating Technique) koja se primenjuje ukoliko suma težinskih faktora nije jednaka jedinici $\sum w_j \neq 1$:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^m w_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^m w_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \sum_{j=1}^m w_j \neq 1; \quad 0 \leq w_j. \quad (2.2)$$

2.2.2 Metoda produktivnih težinskih faktora

Metoda SPW ili WPM (Triantaphyllou, 2000), ima postupak računanja slično kao kod metode SAW (Srđević, 2005). Jednačina 2.3 se primenjuje na svaku alternativu, a najbolja je alternativa sa najvećom vrednošću S_i . Normalizacija nije neophodna, ali može se koristiti.

$$S_i = \prod_{j=1}^m (r_{ij})^{w_j}, \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1; \quad 0 \leq w_j \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (2.3)$$

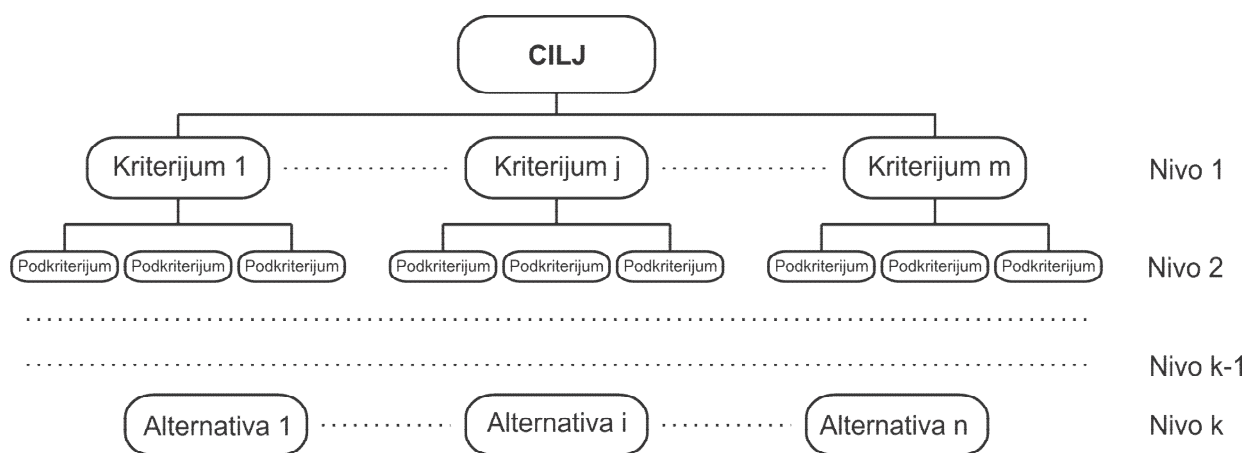
gde je:

S_i – rejting alternative (rang alternative),
 w_j – težinski faktor kriterijuma,
 r_{ij} – elemenat matrice performansi,
 n – broj alternativa,
 m – broj kriterijuma.

2.2.3 Analitički hijerarhijski proces

AHP (Saaty, 1980) predstavlja jedan od najpoznatijih i najčešće korišćenih metoda VKA. Zasnovan je na tri principa: sastavljanje hijerarhije, postavljanje prioriteta i provera konzistentnosti.

Sastavljanje hijerarhije - problem odlučivanja, postavljen oko cilja vrednovanja, struktuirana se i slaže u hijerarhiju prema svojim sastavnim delovima: ciljevi, kriterijumi, podkriterijumi i alternative. Cilj se nalazi na vrhu hijerarhije, dok su kriterijumi, podkriterijumi i alternative na nižim nivoima (slika 2.1). Hijerarhija ne mora da bude kompletna; npr. element na nekom nivou ne mora da bude kriterijum za sve elemente u podnivou.



Slika 2.1. Opšti hijerarhijski model u AHP-u

Postavljanje prioriteta - relativni prioritet, značajnost data svakom elementu hijerarhije, određuje se parcijalno-parnim poređenjem značajnosti svakog elementa na nižem nivou u smislu kriterijuma (ili elemenata) sa kojim postoji uzročna veza. Donosilac odluke koristi mehanizam parcijalno-parnog poređenja Satijevom skalom sa vrednostima od 1 do 9 (tabela 2.3), za popunjavanje matrice parcijalno-parnog poređenja A , jednačina 2.4.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & P_c(a_1, a_2) & \cdot & \cdot & P_c(a_1, a_n) \\ P_c(a_2, a_1) & 1 & \cdot & \cdot & P_c(a_2, a_n) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_c(a_n, a_1) & P_c(a_n, a_2) & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Tabela 2.3. Satijeva skala vrednovanja

Značaj	Definicija	Objašnjenje
1	Istog značaja	Dva elementa su identičnog značaja u odnosu na cilj.
3	Slaba dominantnost	Iskustvo ili rasuđivanje neznatno favorizuju jedan element u odnosu na drugi.
5	Jaka dominantnost	Iskustvo ili rasuđivanje znatno favorizuju jedan element u odnosu na drugi.
7	Demonstrirana dominantnost	Dominantnost jednog elementa potvrđena u praksi.
9	Apsolutna dominantnost	Dominantnost najvišeg stepena.
2, 4, 6, 8	Međuvrednosti	Potreban kompromis ili dalja podela.

Relativan prioritet, ili težinski faktor, dodeljuje se odgovarajućim vektorom sopstvenih vrednosti W koji odgovara najvećoj sopstvenoj vrednosti λ_{max} , kao što je prikazano jednačinom 2.5:

$$A \cdot W = \lambda_{max} \cdot W . \quad (2.5)$$

U slučaju da su parcijalno-parna poređenja u potpunosti konzistentna, matrica A ima rang 1 i $\lambda_{max} = n$. U slučaju potpuno konzistentne matrice A , težinski faktori poređenih elemenata mogu se dobiti normalizovanjem bilo kojeg reda kolone matrice A .

Prethodno opisana procedura ponavlja se za sve podsisteme hijerarhije. Da bi se sintetizovali vektori prioriteta, isti se množe sa težinskim faktorima elemenata u višem nivou hijerarhije. Rezultat vrednovanja je ukupni relativni prioritet dodeljen najnižim elementima u hijerarhiji, tj. alternativama. Ukupni relativni prioriteti alternativa ukazuju na uticaj alternative prema cilju vrednovanja. Prioriteti alternativa predstavljaju sintezu lokalnih prioriteta (prioriteta elemenata na svakom podnivou) i reflektuju proces vrednovanja jednog ili više donosilaca odluke.

Provera konzistentnosti - AHP spada u popularne metode, zbog toga što ima sposobnost da identifikuje i analizira nekonzistentnosti donosilaca odluke u procesu rasuđivanja i vrednovanja elemenata hijerarhije (Srđević, 2005). U svakoj matrici parcijalno-parnog poređenja A za slučaj potpune konzistentnosti važi jednačina 2.6:

$$P_c(a_i, a_j) = P_c(a_i, a_k)P_c(a_k, a_j), \quad \forall i, j, k. \quad (2.6)$$

Kada su matrice parcijalno-parnog poređenja u potpunosti konzistentne, prioritet (težinski faktor) vektora je predstavljen vektorom sopstvenih vrednosti W koji odgovara

najvećoj sopstvenoj vrednosti λ_{max} . Kod potpuno konzistentne matrice A najveća sopstvena vrednost matrice A (λ_{max}) jednaka je broju elemenata koji se porede n (Saaty, 1980). U slučaju da je nekonzistentnost matrice parcijalno-parnog poređenja ograničena, λ_{max} se blago razlikuje od n . Razlika $\lambda_{max} - n$ se deli sa $n - 1$ i koristi se kao mera nekonzistentnosti, ili „indeks konzistentnosti“ CI (engl. *consistency index*) dat jednačinom 2.7:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}. \quad (2.7)$$

Konačni stepen konzistentnosti CR (engl. *consistency ratio*), na osnovu koga se može zaključiti da li je vrednovanje konzistentno, računa se kao odnos indeksa konzistentnosti CI i slučajnog indeksa RI (engl. *random index*):

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (2.8)$$

Slučajni indeks RI zavisi od reda matrice, a preuzima se iz tabele 2.4 u kojoj prvi red predstavlja red matrice poređenja, a drugi slučajne indekse.

Tabela 2.4. Slučajni indeksi 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

Prema Saaty (1980) nekonzistentost ne bi trebala biti veća od 10% ($CR \leq 0,10$). Treba napomenuti da se u praksi često dešava da stepen konzistentnosti bude veći od 0,10, a da se izabrana alternativa ipak zadrži kao najbolja (Srđević, 2005).

2.3 Metode rangiranja

2.3.1 Metode PROMETHEE

Metoda PROMETHEE koristi se za izbor optimalnog rešenja u slučaju kada postoji ograničen broj alternativa i više kriterijuma koji su često međusobno konfliktni. Postoje šest osnovnih familija PROMETHEE od kojih svaka rešava određene probleme:

- PROMETHEE I – daje parcijalni poredak (rangiranje) alternativa (Brans, 1982),

- PROMETHEE II – daje konačan poredak alternativa (Brans i Mareschal, 1982),
- PROMETHEE III – vrši rangiranje varijanti zasnovano na intervalima (Brans i Mareschal, 1994),
- PROMETHEE IV – za potpuni ili delimični poredak alternativa kada postoji neprekidan niz rešenja (Brans i Mareschal, 1995),
- PROMETHEE V – višekriterijumski problemi sa segmentnim graničnim vrednostima (Brans i Mareschal, 1992),
- PROMETHEE VI – pravi razliku između „tvrdih“ i „mekih“ višekriterijumskih problema gde se vrednuje stepen „tvrdoće“ prema zadatim težinskim faktorima kriterijuma (Brans i Mareschal, 1995).

Pored navedenih osnovnih familija PROMETHEE metoda, razvijene su i sledeće metode: PROMETHEE GDSS za grupno donošenje odluka (Macharis i dr., 1998), grafička interpretacija metode PROMETHEE primenom GAIA (Mareschal 1988, Brans i Mareschal, 1994), PROMETHEE TRI za sortiranje problema i PROMETHEE CLUSTER za nominalnu klasifikaciju (Figueira i dr., 2004). Sistematičan prikaz primene metoda PROMETHEE sa ostalim metodama MCDM nalazi se u Behzadian i drugi (2010).

Metode PROMETHEE zasnovane su na parcijalno-panom poređenju svakog para alternativa po svakom od izabranih kriterijuma. Donosilac odluke ima mogućnost da na osnovu takvog poređenja dodeli preferenciju, jednoj od alternativa, koja može uzeti vrednost u intervalu od 0 do 1. Veća preferencija se izražava većom vrednošću iz datog intervala. Karakteristika metode PROMETHEE jeste da za svaki kriterijum donosilac odluke određuje jednu od mogućih šest predefinisanih funkcija preferencije (tabela 2.5):

1. običan kriterijum preferencije,
2. kvazi kriterijum preferencije,
3. kriterijum sa linearnom preferencijom,
4. kriterijum sa stepenom preferencijom,
5. kriterijum sa linearnom preferencijom i područjem indiferencije,
6. kriterijum sa Gaussovom (normalnom) preferencijom.

Granica indiferentnosti q za dati kriterijum predstavlja najveću devijaciju koja se smatra zanemarljivom pri poređenju dve alternative (akcije). Dobra praksa za određivanje granice indiferentnosti q , jeste početi od male vrednosti i povećavati je sve dok se smatra da više nije zanemarljivo. Na primer, prilikom poređenja cena laptop računara, razlika od 1 evro je zanemarljiva, ali razlika od 5, 10 ili 25 nije.

Tabela 2.5. Funkcije preferencije u metodi PROMETHEE (Behzadian i dr., 2010; Brans, 1982)

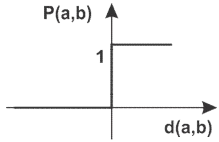
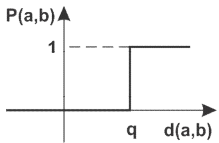
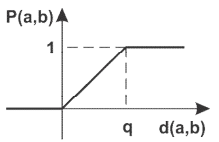
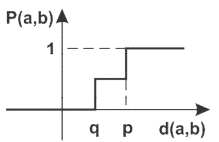
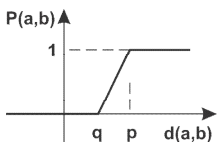
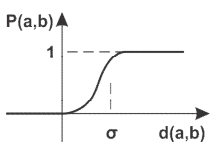
Naziv funkcije	Grafički prikaz	Funkcija preferencije	Primena
I Običan kriterijum preferencije		$P(a,b) = \begin{cases} 0, & d(a,b) \leq 0, \\ 1, & d(a,b) > 0. \end{cases}$	Kvalitativni kriterijumi. Ukoliko postoji mala skala za opis kriterijuma i ako su velike razlike u vrednostima skale (da/ne, skala sa 5 vrednosti)
II Kvazi kriterijum preferencije (U-oblik)		$P(a,b) = \begin{cases} 0, & d(a,b) \leq q, \\ 1, & d(a,b) > q. \end{cases}$	Predstavlja specijalni slučaj III funkcije preferencije i ređe se koristi
III Kriterijum sa linearnom preferencijom (V-oblik)		$P(a,b) = \begin{cases} \frac{ d(a,b) }{p}, & d(a,b) \leq q, \\ 1, & d(a,b) > q. \end{cases}$	Kvantitativni kriterijumi (cena, troškovi, snaga itd.)
IV Kriterijum sa stepenom preferencijom		$P(a,b) = \begin{cases} 0, & d(a,b) \leq q, \\ \frac{1}{2}, & q < d(a,b) \leq p, \\ 1, & d(a,b) \geq p. \end{cases}$	Kvalitativni kriterijumi. Ako postoji mala skala za opis kriterijuma i ako se žele razlikovati male devijacije od velikih u vrednostima skale (da/ne, skala sa 5 vrednosti)
V Kriterijum sa linearnom preferencijom i područjem indiferencije		$P(a,b) = \begin{cases} 0, & d(a,b) \leq q, \\ \frac{ d(a,b) - q}{p - q}, & q < d(a,b) \leq p, \\ 1, & d(a,b) \geq p. \end{cases}$	Kvantitativni kriterijumi (cena, troškovi, snaga itd.) sa područjem indiferencije
VI Kriterijum sa Gaussovom preferencijom		$P(a,b) = 1 - e^{-\frac{d(a,b)^2}{2\sigma^2}}$	Ređe se koristi zbog težeg korišćenja parametara (s parametar bi trebao da bude između q (m) i p (n))

Tabela 2.6. Koraci izvršavanja metode PROMETHEE I i II (Behzadian i dr., 2010; Brans, 1982)

Korak 1: Određivanje devijacija prema parcijalno-parnim poređenjima

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

gde $d_j(a, b)$ označava razliku u vrednovanju alternative a u odnosu na alternativu b po svakom kriterijumu.



Korak 2: Primena funkcija preferencije

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)]; \quad j = 1, 2, \dots, m;$$

gde $P_j(a, b)$ označava preferenciju alternative a u odnosu na alternativu b po svakom kriterijumu, kao funkciju $d_j(a, b)$. Što je $P_j(a, b)$ bliže 1 to je veća preferencija alternative a u odnosu na alternativu b .



Korak 3: Izračunavanje ukupnog indeksa preferencije

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

gde je $\pi_j(a, b)$, od a prema b (od 0 do 1), definisano otežanom sumom $p_j(a, b)$ za svaki kriterijum, a w_j je težinski faktor j -kriterijuma.



Korak 4: Izračunavanje pozitivnih i negativnih tokova (PROMETHEE I delimično rangiranje)

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

gde je $\phi^+(a)$ pozitivni tok, a $\phi^-(a)$ negativni tok za svaku alternativu.



Korak 5: Izračunavanje neto toka (PROMETHEE II potpuno rangiranje)

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

gde je $\phi(a)$ neto tok za svaku alternativu.

Granica preferencije p za dati kriterijum odnosi se na najmanju meru koja se sigurno smatra za značajnu prilikom poređenja dve akcije. Obično se vrednost p određuje postavljanjem velike vrednosti i smanjivanjem iste sve dok se ne postigne odgovarajuća preferencija. Dobar način za određivanje p parametra, jeste da bi p trebalo da bude manje od raspona vrednosti kriterijuma (razlika između maksimalne i minimalne vrednosti kriterijuma).

Nakon što je definisan problem VKA, sastavljena matrica performansi, i kada su određeni težinski faktori kriterijuma može se pristupiti PROMETHEE proceduri. PROMETHEE II se izračunava u 5 koraka (tabela 2.6) (Behzadian i dr., 2010; Brans, 1982):

1. određivanjem devijacija prema parcijalno-parnim poređenjima,
2. primenom funkcija preferencije,
3. izračunavanjem ukupnog indeksa preferencije,
4. izračunavanjem pozitivnih i negativnih tokova (PROMETHEE I delimično rangiranje),
5. izračunavanjem neto toka (PROMETHEE II potpuno rangiranje).

2.3.2 Metode ELECTRE

ELECTRE je skup metoda usmerenih na rešavanje problema odlučivanja, gde se vrednovanje alternativnih odluka vrši poređenjem relevantnih atributa koji karakterišu vrednovane odluke. Metoda je nastala iz komercijalnih razloga, za potrebe francuske konsultantske kuće SEMA. Kasnije varijante razvijene su u istraživačkom institutu Univerziteta Paris-Dauphine, za potrebe konsultantske kuće LAMSADE.

Prva od nekoliko metoda ELECTRE, ELECTRE I nastala je 1966. od strane autora Benayoun i drugi (1966). Ostale metode ELECTRE nastale su sukcesivnim redom: ELECTRE II (Roy i Bertier, 1971), ELECTRE III (Roy, 1978), ELECTRE IV (Hugonnard i Roy, 1982), ELECTRE IS (Roy i Skalka, 1984), ELECTRE A (nije objavljena iz poverljivih razloga, napravljena da rešava specifične probleme odlučivanja u važnoj bankarskoj kompaniji) i ELECTRE TRI (Yu, 1992).

Prvobitni algoritam sadržan u verziji metoda ELECTRE I, sastavni je deo i svih kasnijih verzija, a razlike se sastoje u: stepenu kojim se uređuje skup alternativa, prirodi informacija koje se koriste, načinu sagledavanja kriterijuma i važnosti kriterijuma, kao i uvođenju novih parametara. Metoda ELECTRE II, nastala je usavršavanjem izvorne varijante metode ELECTRE I, koja daje delimičan poredak alternativa, dok ELECTRE II

omogućava da se odredi potpun poredak alternativa. Metoda je opšteg karaktera i može se koristiti za gotovo sve probleme višeatributnog odlučivanja, gde je potrebno izvršiti potpuno rangiranje alternativa. ELECTRE II poredi alternative prema kvantitativnim i kvalitativnim kriterijumima i ne postoje nikakva ograničenja za broj kriterijuma. Metoda ELECTRE III je metoda kod koje postoji mogućnost korišćenja fuzzy podataka i fuzzy relacija. Metoda vrši rangiranje alternativa prema delimičnom poretku, ređe prema potpunom poretku. Metoda ELECTRE III, koristi pojmove nestabilne relacije i pragove veta, koji zapravo dozvoljavaju uvođenje i korišćenje nedovoljno preciznih, rasplnutih podataka. Za razliku od svih prethodnih metoda ove grupe, ELECTRE IV ne zahteva određivanje težinskih faktora kriterijuma. Dakle, subjektivni uticaj donosilaca odluke na rangiranje alternativa kroz određivanje težinskih faktora kriterijuma je isključen.

Postupak primene metode ELECTRE I sastoji se iz sledećih koraka:

1. računanje normalizovane matrice performansi,
2. računanje težinske normalizovane matrice performansi,
3. određivanje skupova saglasnosti i nesaglasnosti,
4. određivanje matrice saglasnosti,
5. određivanje matrice nesaglasnosti,
6. određivanje matrice saglasne dominacije,
7. određivanje matrice nesaglasne dominacije,
8. određivanje neto dominantnih i nedominantnih vrednosti alternativa.

Korak 1. Računanje normalizovane matrice performansi. Elementi normalizovane matrice r_{ij} (r_{ij}^+ za kriterijume tipa „max“ i r_{ij}^- za kriterijume tipa „min“), dobijaju se vektorskom normalizacijom matrice performansi X_{ij} za n -alternativa ($i = 1, 2, \dots, n$) i m -kriterijuma ($j = 1, 2, \dots, m$) na sledeći način:

$$r_{ij}^+ = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad r_{ij}^- = \frac{\frac{1}{x_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{ij}}\right)^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (2.11)$$

Korak 2. Određivanje težinske normalizovane matrice performansi v_{ij} gde je:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; \quad (2.12)$$

gde je w_j težinski faktor kriterijuma tako da važi $\sum_{j=1}^m w_j = 1$.

Korak 3. Za svaki par alternativa (a,b) ($a,b = 1, 2, \dots, n, a \neq b$) određuju se skupovi slaganja C_{ab} , odnosno neslaganja D_{ab} :

- $C_{ab} = \{i \mid x_{ai} \geq x_{bi}\}$ - skup indeksa kriterijuma u kojima se X_a preferira nad X_b za $\max X_i$
- $D_{ab} = \{i \mid x_{ai} < x_{bi}\}$ - skup indeksa kriterijuma u kojima se X_a ne preferira nad X_b za $\max X_i$

Kada je reč o kriterijumima tipa „min“ važi suprotan slučaj.

Korak 4. Određivanje matrice slaganja koeficijenata c_{ab} koji mere učestalost kriterijuma, gde se alternativa X_a preferira u odnosu na alternativu X_b . Indeksi c_{ab} se izračunavaju na sledeći način:

$$C_{ab} = \sum_{i \in C_{ab}} W_i. \quad (2.13)$$

Korak 5. Određivanje matrice neslaganja koeficijenata d_{ab} koja mere učestalost kriterijuma gde se alternativa A_a ne preferira u odnosu na alternativu A_b . Indeks d_{ab} se izračunava na sledeći način:

$$d_{ab} = \frac{\max_{i \in D_{ab}} |v_{ai} - v_{bi}|}{\max_{i \in I, n, m \in J} |v_{ni} - v_{mi}|}. \quad (2.14)$$

Korak 6. Određivanje matrice saglasne dominacije elemenata f_{ab} , koji mogu uzimati vrednosti 0 ili 1 i to u zavisnosti od praga slaganja \bar{c} , koji je definisan relacijom:

$$\bar{c} = \sum_{a=1}^n \sum_b^n \frac{c(a,b)}{n(n-1)}. \quad (2.15)$$

Vrednost koju uzima indeks f_{ab} utvrđuje se iz sledećeg poređenja:

$$f_{ab} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } c(a,b) \geq \bar{c}, \\ 0, & \text{ako je } c(a,b) < \bar{c}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Korak 7. Određivanje matrice nesaglasne dominacije elemenata g_{ab} , koristeći \bar{d} - prag neslaganja:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n d(a,b)}{n(n-1)}. \quad (2.17)$$

$$g_{ab} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } d(a,b) \leq \bar{d}, \\ 0, & \text{ako je } d(a,b) > \bar{d}. \end{cases} \quad (2.18)$$

Korak 8. Računanje neto dominantnih (superiornih) c_a i nedominantnih (inferiornih) d_a vrednosti alternativa, koje se koriste da se odredi koliko puta su alternative bile dominantne i :

$$e_{ab} = f_{ab} g_{ab}. \quad (2.19)$$

2.4 Metode kompromisa

2.4.1 Metoda TOPSIS

Metoda TOPSIS (engl. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), zasnovana je na konceptu da izabrana alternativa treba da ima najkraće rastojanje od idealnog rešenja, i najduže od anti-idealnog rešenja (Hwang i Yoon, 1981).

Kriterijumi se mogu predstaviti u višedimenzionalnom koordinatnom sistemu, gde svakom kriterijumu odgovara jedna koordinatna osa. Pretpostavlja se da svakom kriterijumu monotono raste ili opada upotrebljivost, tako da je lako naći "idealno" rešenje koje je sastavljeno od svih najboljih kriterijumskih vrednosti koje su dostignute, i "anti-idealno" rešenje koje je sastavljeno od najlošijih vrednosti. Prvi uslov je da izabrana alternativa ima najmanje Euklidsko rastojanje od idealnog rešenja u geometrijskom smislu, a drugi da istovremeno ima najveće rastojanje od "anti-idealnog" rešenja.

Ponekad izabrana alternativa, koja ima minimalno Euklidsko rastojanje od "idealnog" rešenja, ima kraće rastojanje od "anti-idealnog" rešenja nego ostale alternative.

Pre primene metode TOPSIS višekriterijumski problem je potrebno predstaviti određivanjem:

- matrice performansi X kod koje su alternative A_i postavljene u redove, a kriterijumi C_j u kolone (element x_{ij} predstavlja rejting (performansu) alternative A_i u odnosu na kriterijum C_j);
- úipa kriterijuma – „min“ ili „max“ (da li je cilj da se koriste maksimalne ili minimalne vrednosti kriterijuma);
- težinskih faktora kriterijuma - w_1, w_2, \dots, w_m (na primer: često se AHP koristi za dodeljivanje težinskih faktora (Agarski i dr., 2012a, 2013; Noh i Lee, 2003)).

TOPSIS se sastoji iz 6 koraka:

1. *Normalizovanje matrice performansi.* U matrici performansi (2.21), brojne vrednosti x_{ij} u opštem slučaju imaju različitu metriku. 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 . Za m kriterijuma (C_1, C_2, \dots, C_m) i n alternativa (A_1, A_2, \dots, A_n) matrica X ima oblik (2.20), a vrednosti (w_1, w_2, \dots, w_m) upisane iznad matrice predstavljaju težinske faktore kriterijuma definisane od strane donosilaca odluka, ili određene na drugi način; suma težinskih faktora je 1. Zato se prvo vrši vektorska normalizacija elemenata prema relaciji (2.21) da bi se dobila matrica (2.22) u kojoj su svi elementi bezdimenzione veličine.

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \end{matrix} \\ & \begin{matrix} w_1 & w_2 & \cdot & \cdot & w_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2m} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & x_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.20)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2.21)$$

$$R = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\ & w_1 & w_2 & \cdot & \cdot & w_m \\ A_1 & \left[\begin{array}{cccc} r_{11} & r_{12} & \cdot & \cdot & r_{1m} \end{array} \right. \\ A_2 & \left[\begin{array}{cccc} r_{21} & r_{22} & \cdot & \cdot & r_{2m} \end{array} \right. \\ \cdot & \left[\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right. \\ \cdot & \left[\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right. \\ A_n & \left[\begin{array}{cccc} r_{n1} & r_{n2} & \cdot & \cdot & r_{nm} \end{array} \right. \end{matrix} \cdot \quad (2.22)$$

2. *Množenje normalizovane matrice performansi težinskim faktorima.* Pomoću relacije (2.23) određuje se težinska normalizovana matrica performansi $V = (v_{ij})$, gde je svako v_{ij} proizvod normalizovane performanse alternative i odgovarajućeg težinskog faktora kriterijuma.

$$V = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\ A_1 & \left[\begin{array}{cccc} v_{11} & v_{12} & \cdot & \cdot & v_{1m} \end{array} \right. \\ A_2 & \left[\begin{array}{cccc} v_{21} & v_{22} & \cdot & \cdot & v_{2m} \end{array} \right. \\ \cdot & \left[\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right. \\ \cdot & \left[\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right. \\ A_n & \left[\begin{array}{cccc} v_{n1} & v_{n2} & \cdot & \cdot & v_{nm} \end{array} \right. \end{matrix} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdot & \cdot & C_m \\ A_1 & \left[\begin{array}{cccc} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdot & \cdot & w_m r_{1m} \end{array} \right. \\ A_2 & \left[\begin{array}{cccc} w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdot & \cdot & w_m r_{2m} \end{array} \right. \\ \cdot & \left[\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right. \\ \cdot & \left[\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right. \\ A_n & \left[\begin{array}{cccc} w_1 r_{n1} & w_2 r_{n2} & \cdot & \cdot & w_m r_{nm} \end{array} \right. \end{matrix} \cdot \quad (2.23)$$

3. *Određivanje idealnih rešenja.* Idealno rešenje A^+ i negativno idealno rešenje A^- određuju se pomoću relacija (2.24) i (2.25):

$$A^+ = \{(\max_{j \in G} v_{ij}, (\min_{j \in G'} v_{ij}), i = 1, \dots, n\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_m^+\}, \quad (2.24)$$

$$A^- = \{(\min_{j \in G} v_{ij}, (\max_{j \in G'} v_{ij}), i = 1, \dots, n\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-\}, \quad (2.25)$$

gde je:

$G = \{j = 1, 2, \dots, m \mid j \text{ pripada kriterijumima tipa „max“}\}$

$G' = \{j = 1, 2, \dots, m \mid j \text{ pripada kriterijumima tipa „min“}\}$

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.

4. *Određivanje rastojanja alternativa od idealnih rešenja.* U četvrtom koraku se pomoću relacija (2.26) i (2.27) izračunavaju n -dimenziona Euklidska rastojanja svih alternativa od idealnog i idealnog negativnog rešenja.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.26)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.27)$$

5. *Određivanje relativne blizine alternativa idealnom rešenju.* Za svaku alternativu određuje se relativna blizina (engl. Relative Closeness - RC_i^+) (2.28):

$$RC_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.28)$$

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.

6. *Rangiranje alternativa.* Alternative se rangiraju po opadajućim vrednostima RC_i^+ .

2.4.2 Metoda VIKOR

U doktorskoj disertaciji 1979. godine, S. Opricović je razradio osnovne ideje VIKOR-a, a naziv VIKOR se pojavio 1990. godine (Opricović, 1990) kao skraćenica od: VIšekriterijumska optimizacija i KOmpromisno Rešenje. Realne primene su prikazane u knjizi (Opricović, 1998) 1998. godine. Rad iz 2004. godine (Opricović i Tzeng, 2004), doprineo je da VIKOR bude široko prepoznatljiva metoda, a 2009. godine identifikovan je od strane Thomson Reuters Essential Science IndicatorsSM kao najcitiraniji rad u oblasti ekonomije i poslovanja (Science Watch, 2009).

Metoda VIKOR je razvijena za višekriterijumsku optimizaciju kompleksnih sistema. VIKOR određuje kompromisnu rang-listu, kompromisno rešenje i intervale stabilnosti težinskih faktora za stabilnost preferencija kompromisnog rešenja dobijenog početnim (zadatim) težinskim faktorima. Metoda VIKOR se fokusira na rangiranje i izbor

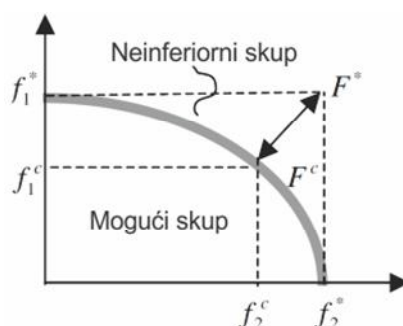
alternative, iz skupa alternativa pri prisustvu konfliktnih kriterijuma. Uvodi se višekriterijumski indeks rangiranja, zasnovan na određenoj meri „bliskosti idealnom“ rešenju (Opricović, 1998).

Ukoliko se pretpostavi da se svaka alternativa vrednuje prema svakoj kriterijumskoj funkciji, kompromisno rangiranje se može izvršiti poređenjem bliskosti prema idealnoj alternativni. Višekriterijumska mera kompromisnog rangiranja razvijena je iz L_p -metrike, koja je primenjena kao funkcija agregacije u metodi kompromisnog programiranja (Yu, 1973; Zeleny, 1982). Različite i -alternative označavaju se sa a_1, a_2, \dots, a_i . Za alternativu a_i , rejting j -aspekta označava se sa f_{ij} , tj. f_{ij} je vrednost j -kriterijumske funkcije za alternativu a_i ; m je broj kriterijuma.

Razvoj metode VIKOR počinje od L_p -metrike:

$$L_{p,i} = \left\{ \sum_{j=1}^m [w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)]^p \right\}^{1/p}, \quad 1 \leq p \leq \infty; i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.29)$$

U metodi VIKOR $L_{1,i}$ (kao S_i u jednačini 2.31) i $L_{\infty,i}$ (kao R_i u jednačini 2.32), koriste se da bi se formulisala mera rangiranja. Rešenje dobijeno sa $\min_i S_i$ je sa maksimalnim grupnim obeležjem „pravilo većine“ (pesimističko rešenje), a rešenje dobijeno $\min_i R_i$ je sa minimumom individualnog gubitka prilike (očekivano rešenje). Kompromisno rešenje F^c je moguće rešenje koje je „najbliže“ idealnom F^c , a kompromisno označava dogovor postignut međusobnim usklađivanjem kao što je prikazano na grafiku 2.1 preko $\Delta f_1 = f_1^* - f_1^c$ i $\Delta f_2 = f_2^* - f_2^c$.



Grafik 2.1. Idealno i kompromisno rešenje (Opricović i Tzeng, 2004)

Metoda kompromisnog rangiranja VIKOR se izvršava prema sledećim koracima:

1. Određivanje najboljih f_j^* i najgorih f_j^- vrednosti za sve funkcije kriterijuma, $j=1, 2, \dots, m$. Ako j -ta funkcija predstavlja dobiti tada:

$$f_j^* = \max_i f_{ij}, \quad f_j^- = \min_i f_{ij}. \quad (2.30)$$

2. Računanje vrednosti S_i i R_i , $i = 1, 2, \dots, n$, prema relacijama:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-), \quad (2.31)$$

$$R_i = \max_j [w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)], \quad (2.32)$$

gde je:

w_j - težinski faktor kriterijuma, koji predstavlja relativnu značajnost kriterijuma.

3. Računanje vrednosti Q_i , $i = 1, 2, \dots, n$, prema relaciji:

$$Q_i = \frac{v(S_i - S^*)}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)}, \quad (2.33)$$

gde je:

$$S^* = \min_i S_i, \quad S^- = \max_i S_i. \quad (2.34)$$

$$R^* = \min_i R_i, \quad R^- = \max_i R_i. \quad (2.35)$$

v je uvedeno kao težinski faktor strategije maksimizovanja grupnog obeležja, a $1-v$ je težinski faktor individualnog gubitka prilike.

4. Rangiranje alternativa, sortiranjem vrednosti S , R i Q po opadajućem redosledu.

Rezultat su tri rang liste.

5. Predlog kompromisnog rešenja alternative a' koja je rangirana kao najbolja prema vrednosti mere Q (minimalna vrednost) ako su zadovoljena sledeća dva uslova:

$U1$: „Prihvatljiva prednost“:

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ. \quad (2.36)$$

gde je a'' alternativa sa drugim položajem prema rang listi Q ; $DQ=1/(n-1)$; n je broj alternativa.

U2: „Prihvatljiva stabilnost odlučivanja“:

Alternativa a' takođe mora biti najbolje rangirana prema S i/ili R . Kompromisno rešenje je stabilno u procesu odlučivanja, koje može biti „glasanje prema pravilu većine“ (kada je potrebno da je $v > 0,5$), ili preko „koncenzusa“ $v \approx 0,5$, ili sa „veto“ ($v < 0,5$). Ovde, v je težinski faktor strategije odlučivanja „većina kriterijuma“ (ili „maksimizacija grupnog obeležja“).

Ako jedan od prethodnih uslova nije zadovoljen, tada se predlaže skup kompromisnih rešenja koji se sastoji od:

- alternative a' i a'' ako nije ispunjen uslov U2, ili
- alternative a' , a'' , ..., $a^{(N)}$ ako nije ispunjen uslov U1; $a^{(N)}$ je određeno relacijom $Q(a^{(N)}) - Q(a') < DQ$ za maksimum N (pozicija ovih alternativa u „bliskosti“).

Najbolja alternativa, rangirana prema Q , je ona sa minimalnom vrednošću Q . Glavni rezultat rangiranja je kompromisna rang lista alternativa i kompromisno rešenje sa „stopom prednosti“. Poredak po metodi VIKOR može biti izveden sa različitim vrednostima težinskih faktora kriterijuma analizirajući tako uticaj težinskih faktora kriterijuma na kompromisno rešenje. Metoda VIKOR određuje intervale stabilnosti za težinske faktore kriterijuma prema (Opricović, 1998). Kompromisno rešenje postignuto sa početnim težinskim faktorima kriterijuma (w_j , $j= 1, 2, \dots, m$), biće zamenjeno ako se vrednosti težinskih faktora ne nalaze unutar stabilnog intervala. Analiza težina stabilnog intervala za jedan kriterijum, izvodi se zajedno po svim kriterijumima funkcije, s istim početnim vrednostima težinskih faktora (Opricović i Tzeng, 2004).

VIKOR je koristan alat u višekriterijumskom odlučivanju, pogotovo u situaciji u kojoj donosilac odluke nije u stanju ili ne zna izraziti svoje preferencije za težinske faktore pojedinih kriterijuma na početku sastavljanja matrice performansi. Dobijeno kompromisno rešenje može biti prihvaćeno od strane donosilaca odluke, jer pruža maksimalnu „grupnu korisnost“ i minimalno individualno „žaljenje“. Kompromisno rešenje može biti osnov za pregovore koji uključuju preferencije donosilaca odluka za težinske faktore kriterijuma.

2.4.3 Metoda kompromisnog programiranja

Metoda kompromisnog programiranja CP (engl. Compromise Programming) rangira alternative prema bliskosti određenim 'idealnim' vrednostima kriterijuma (Zeleny, 1982). CP definiše kao najbolju alternativu koja ima najmanje rastojanje od idealnog rešenja u skupu mogućih rešenja. Mera rastojanja je familija L_p - metrika data kao:

$$L_{p,i} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[w_j \frac{r_i^* - r_{ij}}{r_i^* - r_i^{**}} \right]^p \right\}^{1/p}, \quad (2.37)$$

gde je :

$L_{p,i}$ - oznaka za L_p - metriku alternative A_i ;

r_{ij} - rejting alternative A_i u odnosu na kriterijum C_j ;

r_j^* i r_j^{**} - najbolja i najgora vrednost rejtinga na skupu alternativa za kriterijum C_j ;

p - parametar koji ukazuje na sklonost donosilaca odluke u vrednovanju;

m - broj kriterijuma,

n - broj alternativa.

Rangiranje se vrši prema L_p -metrici gde se alternativa sa minimalnom L_p -metrikom smatra najboljom i obrnuto. Težinski faktori kriterijuma w_j ($j = 1, 2, \dots, m$) su normirane vrednosti originalnih ocena koje definiše donosilac odluka, tako da im je zbir 1. Parametar p posredno iskazuje preferencije u balansiranju kriterijuma, kao linearna normalizacija, ($p=1$), uobičajenom korišćenju efekta kvadriranja greške ($p=2$), ili traženju apsolutno dominantnog rešenja ($p=\infty$). Ako se dopušta međusobno kompenziranje kriterijuma, p mora biti 1; ako se smanjuje marginalna vrednost ciljne funkcije, p mora biti veće od 1; kada je važna samo apsolutno najbolja alternativa, p mora biti beskonačno. U svakom od navedenih slučajeva, ciljna funkcija optimizacionog problema transformiše se u različit oblik.

2.5 Grupno donošenje odluka

Metode VKA mogu imati svoje modifikacije za grupno donošenje odluka. Grupno odlučivanje podrazumeva agregaciju različitih individualnih preferencija od više donosilaca odluke ili zainteresovanih strana za dati skup alternativa u jednu zajedničku

preferenciju (Milićević i Župac, 2012b). Donošenje odluka u grupi je komplikovanije od individualnog odlučivanja. Grupna odluka objedinjava stavove ljudi (donosilaca odluke) koji najčešće imaju različite interese, nivo obrazovanja, različite poglede na problem i shodno tome različito vrednuju i kriterijume i alternative. U pravilnoj metodi za sintetizovanje grupnih odluka, kompetencija različitih donosilaca odluke iz različitih profesionalnih oblasti takođe mora biti uključena u razmatranje. Obično postoji i specijalni donosilac odluke sa autoritetom da donosi pravila i određuje pravo glasa članova grupe prema različitim kriterijumima (Keeney i Raiffa, 1976). Konačna odluka dobija se agregacijom (sintetizovanjem) mišljenja članova grupe prema pravilima i prioritetima definisanim od strane specijalnog donosilaca odluke.

Postoje više metoda i procedura za grupno donošenje odluka, a najčešće primenjivane su: „Brainstorming“, dijalektički upitnik, nominalna grupna tehnika. Delphi metoda je jedan od najstarijih i karakterističnih pristupa grupnog odlučivanja. Delphi metoda polazi od ispitivane grupe čiji članovi treba da sastave svoje lične liste kriterijuma ili ciljeva važnih za rešavanje određenog problema (ili zadatka) (Brown, 1968). Svaki član grupe, pri tom, dobija svoju listu kriterijuma (ili ciljeva) koju uređuje po redosledu važnosti koji mu pridaje. Za suženu listu – oko desetak kriterijuma zajedničkih za grupu – sprovodi se procedura dodeljivanja međusobne značajnosti kriterijuma, na taj način što se svakom od kriterijuma sa liste daje ocena od jedan do deset (1-10). Jedan se daje za najmanju značajnost kriterijuma i deset za najznačajnije (može i više od jednog kriterijuma biti ocenjeno istom ili približno istom ocenom). Prema Delphi metodi, kriterijumi se ocenjuju u odnosu na doprinos kriterijuma rešavanju određenog projektnog problema (zadatka). Za tako dobijene podatke od članova grupe (koji članovi grupe daju nezavisno jedan od drugog) izračunavaju se srednje vrednosti ocena za grupu u celini. Izračunate srednje vrednosti uzimaju se u obzir kao krajnja ocena. Dobijene ocene veličina pojedinih kriterijuma (ciljeva) se svode na ukupni zbir jedan (1). Na opisani način dobijaju se težinski faktori kriterijuma i konačan redosled značajnosti kriterijuma.

2.6 SWOT analiza metoda višekriterijumske analize

Identifikovanjem prednosti, slabosti, mogućnosti i pretnji urađena je SWOT (engl. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) analiza prethodno opisanih metoda VKA:

- SWOT analiza metode SAW(tabela 2.7),

- SWOT analiza AHP (tabela 2.8),
- SWOT analiza metode PROMETHEE (tabela 2.9),
- SWOT analiza metode ELECTRE (tabela 2.10),
- SWOT analiza metode CP (tabela 2.11),
- SWOT analiza metode TOPSIS (tabela 2.12),
- SWOT analiza metode VIKOR (tabela 2.13).

Tabela 2.7. SWOT analiza metode SAW

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Jednostavna za razumevanje i primenu.</p> <p>Dobro dokazana metoda u praksi.</p> <p>Dobre performanse u poređenju sa sofisticiranijim i naprednijim metodama.</p> <p>Rang alternativa iskazan brojčanom vrednošću pruža bolje razumevanje rezultata.</p> <p>Ne može doći do promene ranga alternativa.</p> <p>Postoji softverska podrška metodi sa adekvatnim grafičkim prikazima.</p> <p>Mogućnost kompenzacije među kriterijumima, intuitivna za donosiocce odluke.</p> <p>Izračunavanje je jednostavno i ne zahteva složene računarske programe.</p>	(Cinelli i dr., 2013; Figueira i dr., 2005; Jahan i Edwards, 2014; Pires i dr., 2011; Poliatidis, 2006)
Slabosti	<p>Neophodna je normalizacija za rešavanje višedimenzionih problema.</p> <p>Ne poseduje mehanizam za računanje težinskih faktora, težinski faktori se direktno unose.</p> <p>Dobijeni rezultati mogu da ne odgovaraju stvarnoj situaciji i mogu da budu nelogični.</p> <p>Nije dovoljno osetljiva na vrednosti kriterijuma u poređenju sa metodom TOPSIS.</p>	
Mogućnosti	<p>Primenljiva kada su sakupljene tačne i potpune informacije.</p> <p>Mogućnost kombinovanja preferenci više eksperata.</p> <p>Primenljiva za kvalitativni i kvantitativni tip kriterijuma.</p>	
Pretnje	Nisu identifikovane pretnje.	

Tabela 2.8. SWOT analiza AHP

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Predstavlja jedan od najpoznatijih i najčešće korišćenih metoda VKA.</p> <p>Primena hijerarhijske stukture za predstavljanje složenih problema odlučivanja.</p> <p>Rang alternativa iskazan brojčanom vrednošću pruža bolje razumevanje rezultata.</p> <p>Problem odlučivanja može biti razložen u manje elemente.</p> <p>Izračunavanje koeficijenta nekonzistentnosti pomaže donosiocima odluka. Postoji softverska podrška metodi sa adekvatnim grafičkim prikazima.</p> <p>Poređenje samo dva elementa u isto vreme.</p> <p>Jednostavna za primenu, nije zahtevna za podacima.</p>	(Cinelli i dr., 2013; Figueira i dr., 2005; Jahan i Edwards, 2014; Pires i dr., 2011; Poliatidis, 2006)
Slabosti	<p>Zbog agregacije, može se pojaviti kompenzacija dobrih ocena kriterijuma i loših ocena ostalih kriterijuma.</p> <p>Implementacija je teška zbog složenosti.</p> <p>Vremenski zahtevna.</p> <p>Ne postoji mogućnost primene graničnih vrednosti.</p> <p>Problemi zbog međusobne zavisnosti kriterijuma i alternativa.</p> <p>Promena ranga alternativa dodavanjem nove alternative ili kriterijuma.</p> <p>Može da poredi ograničeni broj alternativa: ako se poredi stotine ili hiljade opcija, parcijalno parno poređenje je neizvodljivo.</p>	
Mogućnosti	<p>Podržava grupno donošenje odluka.</p> <p>Često se koristi u kombinaciji sa ostalim metodama VKA, pre svega za izračunavanje težinskih faktora kriterijuma.</p> <p>Primenljiva za kvalitativni i kvantitativni tip kriterijuma.</p>	
Pretnje	<p>Može doći do promene ranga alternativa.</p> <p>Može dovesti do nekonzistentnosti kod vrednovanja i rangiranja kriterijuma.</p> <p>Subjektivni osećaj donosilaca odluke prilikom primene Saatijeve skale poređenja.</p>	

Tabela 2.9. SWOT analiza metode PROMETHEE

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Primenljiva čak i kad nedostaju informacije.</p> <p>Postoji softverska podrška metodi sa adekvatnim grafičkim prikazima.</p> <p>Jednostavna za primenu, ne zahteva da se pretpostavlja da su kriterijumi proporcionalni.</p> <p>Rang alternativa iskazan brojčanom vrednošću pruža bolje razumevanje rezultata.</p>	(Cinelli i dr., 2013; Figueira i dr., 2005; Pires i dr., 2011; Poliatidis, 2006)
Slabosti	<p>Vremenski zahtevna bez primene odgovarajućeg softvera.</p> <p>Prilikom korišćenja više kriterijuma, donosiocu odluke postaje teško da dobije jasnu sliku problema.</p> <p>Ne poseduje mehanizam za računanje težinskih faktora, težinski faktori se direktno unose.</p> <p>Ne obezbeđuje jasni izbor metode za dodeljivanja težinskih faktora kriterijuma.</p>	
Mogućnosti	<p>Postoji mogućnost primene graničnih vrednosti.</p> <p>PROMETHEE I pruža delimični poredak alternativa, a za potpuni poredak alternativa potrebno je koristiti PROMETHEE II.</p> <p>Primenljiva za kvalitativni i kvantitativni tip kriterijuma.</p>	
Pretnje	Može doći do promene ranga alternativa.	

Tabela 2.10. SWOT analiza metode ELECTRE

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Primenljiva čak i kad nedostaju informacije.</p> <p>Primenljiva u slučajevima kad postoje neuporedive alternative.</p> <p>Postoji softverska podrška metodi.</p> <p>Uključuje nesigurnost u vrednovanje.</p>	<p>(Cinelli i dr., 2013; Figueira i dr., 2005; Jahan i Edwards, 2014; Pires i dr., 2011; Poliatidis, 2006; Velasquez i Hester, 2013)</p>
Slabosti	<p>Vremenski zahtevna bez primene odgovarajućih softvera zbog složenosti procedure izračunavanja.</p> <p>Može i ne mora dostići preferisanu alternativu.</p> <p>Ne poseduje mehanizam za računanje težinskih faktora, težinski faktori se direktno unose.</p> <p>Slaba podrška grafičkih prikaza u softverskom rešenju.</p> <p>Procedura i rezultati mogu biti teško razumljivi.</p> <p>Određuje samo rang alternativa i ne pruža brojčane vrednosti za bolje razumevanje razlika među alternativama.</p> <p>Kako raste broj alternativa drastično raste količina izračunavanja.</p>	
Mogućnosti	<p>Postoji mogućnost primene graničnih vrednosti za preferentnost i indiferentnost.</p> <p>Prikladnija kada je broj kriterijuma veći od broja alternativa.</p> <p>Mogućnost vrednovanja ordinalnih skala bez potrebe za normalizacijom.</p> <p>Primenljiva za kvalitativni i kvantitativni tip kriterijuma.</p>	
Pretnje	<p>Može doći do promene ranga alternativa.</p>	

Tabela 2.11. SWOT analiza metode CP

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Jednostavna za razumevanje i primenu.</p> <p>Rang alternativa iskazan brojčanom vrednošću pruža bolje razumevanje rezultata.</p> <p>Uzima u obzir idealno i anti-idealno rešenje.</p>	<p>(Manoliadis i dr., 2007; Zeleny, 1982)</p>
Slabosti	<p>Ne poseduje mehanizam za računanje težinskih faktora, težinski faktori se direktno unose.</p>	
Mogućnosti	<p>Promena p parametra omogućava analizu osetljivosti dobijenih rezultata.</p> <p>Kad je p parametar jednak jedinici rezultati postaju identični sa rezultatima metodom SAW sa linearnom normalizacijom.</p> <p>Primenljiva za kvalitativni i kvantitativni tip kriterijuma.</p>	
Pretnje	<p>Nisu identifikovane pretnje.</p>	

Tabela 2.12. SWOT analiza metode TOPSIS

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Jednostavna za razumevanje i primenu.</p> <p>Uzima u obzir idealno i anti-idealno rešenje.</p> <p>Pružna dobro strukturirani analitički okvir za rangiranje alternativa.</p> <p>Broj koraka ostaje isti bez obzira na broj kriterijuma.</p> <p>Korisna u slučaju velikog broja alternativa i kriterijuma.</p> <p>Rang alternativa iskazan brojčanom vrednošću pruža bolje razumevanje rezultata.</p> <p>Jedna od najboljih metoda za rešavanje problema promene ranga.</p>	(Anojkumar i dr., 2014; Cinelli i dr., 2013; Figueira i dr., 2005; Jahan i Edwards, 2014; Pires i dr., 2011; Poliatidis, 2006; Velasquez i Hester, 2013)
Slabosti	<p>Neophodna je normalizacija za rešavanje višedimenzionih problema.</p> <p>Ne poseduje mehanizam za računanje težinskih faktora, težinski faktori se direktno unose.</p> <p>Komplikovano dodeljivanje težinskih faktora i održavanje konzistentnosti donetih odluka.</p>	
Mogućnosti	<p>Primenljiva kada su sakupljene tačne i potpune informacije.</p> <p>Moguća primena fuzzy brojeva za rešavanje problema nesigurnosti.</p> <p>Primenljiva za kvalitativni i kvantitativni tip kriterijuma.</p>	
Pretnje	<p>Primena Euklidskog rastojanja ne uzima u obzir korelaciju kriterijuma.</p> <p>Ne uzima u obzir relativna rastojanja od idealnog i anti-idealnog rešenja.</p>	

Tabela 2.13. SWOT analiza metode VIKOR

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	<p>Poseduje sve prednosti metode TOPSIS.</p> <p>Uzima u obzir relativna rastojanja idealnog i anti-idealnog rešenja (nasuprot metodi TOPSIS).</p> <p>Koristan alat u situacijama kada donosilac odluke ne može da izraziti svoje preferencije za težinske faktore.</p>	(Anojkumar i dr., 2014; Jahan i Edwards, 2014; Opricović i Tzeng, 2004)
Slabosti	<p>Ne poseduje mehanizam za računanje težinskih faktora, težinski faktori se direktno unose.</p>	
Mogućnosti	<p>Poseduje sve mogućnosti metode TOPSIS.</p> <p>Mogućnost analize stabilnog intervala težinskih faktora.</p>	
Pretnje	<p>Nisu identifikovane pretnje.</p>	

3. METODE ZA DODELJIVANJE TEŽINSKIH FAKTORA

S obzirom na to da se dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima koristi u skoro svim metodama VKA, i da rezultat vrednovanja u velikoj meri zavisi od težinskih faktora kriterijuma, poglavlje tri orijentisano je na metode dodeljivanja težinskih faktora. Podela metoda za dodeljivanje težinskih faktora može se izvršiti na (Jahan i dr., 2012; Jahan i Edwards, 2014; Milićević i Župac, 2012a-2012b):

- subjektivne metode za dodeljivanje težinskih faktora,
- objektivne metode za dodeljivanje težinskih faktora,
- kombinacija subjektivne i objektivne metode za dodeljivanje težinskih faktora.

Subjektivni pristupi zasnovani su na određivanju težinskih faktora na osnovu informacije dobijene od donosilaca odluke ili od eksperata uključenih u proces odlučivanja, i generalno se najviše koriste u praksi. Subjektivni pristupi odražavaju subjektivno mišljenje i intuiciju donosilaca odluke i time donosilac odluke utiče na rezultat procesa odlučivanja. Objektivni pristupi zanemaruju mišljenje donosioca odluke i zasnovani su na određivanju težinskih faktora kriterijuma, na osnovu informacije sadržane u matrici odlučivanja primenom određenih matematičkih modela (Milićević i Župac, 2012a-2012b). Kombinovani pristupi u opštem slučaju zasnivaju se na primeni subjektivnih i objektivnih metoda kako bi se dobili konačni-integrisani težinski faktori.

3.1 Metode za subjektivno dodeljivanje težinskih faktora

Metode subjektivnog dodeljivanja težinskih faktora mogu se razlikovati po broju učesnika u procesu određivanja težinskih faktora, načinu objedinjavanja individualnih težinskih faktora, primenjenim teorijskim konceptima, i sl. (Milićević i Župac, 2012b).

Prema broju učesnika u procesu odlučivanja razlikuju se individualne i grupne metode određivanja težinskih faktora. U individualnim metodama obično se vrednosti težinskih faktora određuju na osnovu mišljenja donosilaca odluke. Kod grupnih metoda u proces određivanja težina faktora uključeno je više eksperata ili zainteresovanih

strana, pri čemu se može organizovati grupni rad učesnika ili se težinski faktori određuju objedinjavanjem individualnih ekspertskih ocena vrednosti kriterijuma. Metode je moguće podeliti na kompenzacione i nekompenzacione, na osnovu koncepta kompenzacije ili razmene između kriterijuma. Najčešće se pri određivanju težinskih faktora primenjuju metode parcijalno-parnog poređenja ili rangiranja kriterijuma, bez obzira na to da li se radi o kompenzacionim ili nekompenzacionim metodama,.

3.1.1 Kompensacione metode određivanja težinskih faktora

Kod kompenzacionih metoda se, pri određivanju težinskih faktora kriterijuma, u obzir uzima celokupan raspon kriterijumskih vrednosti varijanti svakog pojedinačnog kriterijuma. Dobijeni težinski faktori nemaju apsolutno značenje i ne odražavaju generalne vrednosti, već samo preferencije i prioritete u odnosu na razmatrane varijante (Milićević i Župac, 2012b).

U kompenzacionim metodama dodeljivanjem težinskih faktora kriterijumima, donosilac odluke direktno određuje koliko jedinica jednog kriterijuma je spreman da izgubi sa ciljem da poveća vrednost drugog kriterijuma za jednu jedinicu. Ako je težinski faktor j_1 -kriterijuma duplo veći od težinskog faktora j_2 -kriterijuma, tada donosilac odluke vrednuje 10 jedinica j_1 -kriterijuma isto kao i 20 jedinica j_2 -kriterijuma. Da bi donosilac odluke što jasnije izrazio svoju preferenciju putem nužne razmene između kriterijuma, težinski faktori su izraženi u početnoj skali uzimanjem u obzir apsolutnog nivoa performansi i apsolutne razlike vrednosti.

Najčešće primenjene kompenzacione metode jesu:

Trade-off metoda (Keeney i Raiffa, 1976; Milićević i Župac, 2012a-2012b) – donosilac odluke poredi dve hipotetičke varijante koje se jedino razlikuju po dva kriterijuma. Ostali kriterijumi se zadržavaju na istom fiksnom nivou. Neka su a i b dve alternative, a indeksi 1 i 2 neka označavaju kriterijume. Donosilac odluke razmatra dve hipotetičke alternative sa parovima kriterijuma $(a_1; a_2)$ i $(b_1; b_2)$ i podešava jedan od kriterijuma dok alternative ne postanu jednake preferencije. Da bi izabrao koji će kriterijum podešavati, donosilac odluke mora poznavati rang kriterijuma ili mora znati koja od hipotetičkih alternativa je preferirana. Poznavanje prirode kriterijuma je potrebno da bi se izbeglo da donosilac odluke menja vrednost kriterijuma izvan raspona kriterijuma utvrđenog na početku. Indiferentnost je data jednačinom 3.1:

$$w_1 v_1(a_1) + w_2 v_2(a_2) = w_1 v_1(b_1) + w_2 v_2(b_2), \quad (3.1)$$

gde je:

w_1 i w_2 nepoznati težinski faktori kriterijuma,
 $m-1$ jednačina indiferentnosti.

Poznate vrednosti $v_j(\cdot)$ i uslov normalizacije, daju m jednačina koje se koriste za dobijanje m težinskih faktora. Potrebno je naglasiti da moraju biti poznate sve kriterijumske vrednosti alternativa $v_j(\cdot)$. Kod metode „trade-off“, oblik funkcije korisnosti utiče na težinski faktor kriterijuma. Trade-off metoda nije primenjiva na sve situacije odlučivanja jer zahteva da kriterijumi budu mereni na kontinualnoj skali.

Swing metoda (Von Winterfeldt i Edwards, 1986; Milićević i Župac, 2012a-2012b) – prvo se konstruišu dva ekstremna hipotetička scenarija L i B , od kojih je prvi (L) urađen na osnovu najlošijih vrednosti svih kriterijuma, a drugi scenario (B) odgovara najboljim vrednostima. Polazno stanje je scenario L . Donosilac odluke mora pažljivo da sagleda potencijalnu dobit od prelaska iz L u B i da odluči koji od kriterijuma će se prvi pomeriti u scenario B . Podrazumevajući da je prvi prelaz vrednovan sa 100 jedinica na hipotetičkoj skali, donosilac odluke mora da dodeli vrednost (<100) drugom kriterijumu koji se pomera u scenario B , a zatim dodeljuje vrednost trećem i tako redom do poslednjeg kriterijuma koji prelazi u scenario B . Ako je drugi kriterijum koji se pomera u scenario B upola važan kao prvi kriterijum, on dobija 50 poena. Na kraju se poeni dodeljeni kriterijumima normalizuju da bi se dobili težinski faktori kriterijuma. Svakom od m kriterijuma dodeljeni su poeni s_1, \dots, s_m . Odgovarajući težinski faktor kriterijuma izračunava se na sledeći način:

$$w_j = \frac{s_j}{\sum_{k=1}^m s_k}. \quad (3.2)$$

Swing metoda se odlikuje sledećim prednostima: jednostavnošću i transparentnošću otkrivanja preferentnosti; osetljivošću na uticaj razlike rangova; sposobnošću rešavanja problema bez obzira na broj kriterijuma i varijanti; izbegavanje direktnih pitanja razmene (trade-off).

SMART metoda (Edwards, 1977; Edwards i Barron, 1994; Milićević i Župac, 2012a-2012b) – pojednostavljuje višekriterijumski pristup rangiranju, uključujući proceduru određivanja težinskih faktora kriterijuma koja se realizuje u dva koraka. Prvo,

donosilac odluke rangira značaj promena kriterijuma od najlošije vrednosti kriterijuma do najbolje vrednosti. Drugo, on vrši procenu relativne važnosti svakog kriterijuma u odnosu na kriterijum koji je po značaju na poslednjem mestu. Korak-dva obično počinje dodeljivanjem 10 bodova najmanje važnom kriterijumu. Ostalim kriterijumima se dodeljuje vrednost veća od 10. Rezultujući težinski faktori normalizuju se, tako da suma težinskih faktora iznosi jedan.

Nova verzija metode pod nazivom SMARTER (engl. SMART Exploiting Ranks) koristi rangove kriterijuma za određivanje težinskih faktora kriterijuma.

Conjoint metoda (Green i Srinivasan, 1978; Milićević i Župac, 2012a-2012b) – donosilac odluke rangira razmatrane alternative uzimajući u obzir vrednosti alternativa za ceo skup kriterijuma. Ukupne preferencije se razlažu pomoću regresione analize da bi se dobile pojedinačne funkcije vrednosti i pripadajući težinski faktori. Conjoint metoda određuje težinske faktore kriterijuma na direktan i holistički način. Potrebni uslov za primenu metode je postojanje velikog broja alternativa i kriterijuma da bi regresiona analiza mogla biti primenjena. Metoda je pogodna za donosilaca odluke jer zahteva jednostavne informacije o preferentnosti. Pošto metoda ne primorava donosilaca odluke na opreznost u pogledu preferencija u odnosu na kriterijume, može se dogoditi da donosilac odluke ignoriše, pogrešno tumači ili razmatra kriterijume na inkonzistentan način, pa se dobijeni težinski faktori ne mogu smatrati balansiranim.

MACBETH (engl. Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) (Bana e Costa i Vansnick, 1999; Milićević i Župac, 2012a-2012b) – procedura određivanja težinskih faktora kriterijuma je samo jedan deo ove metode koja kao rezultat daje poredak varijanti na osnovu više kriterijuma. Težinski faktori kriterijuma se ne procenjuju direktno na osnovu relativne važnosti kriterijuma, već se razmatra raspon kriterijumskih vrednosti alternativa. Metoda objedinjava elemente metoda swing i trade off, uz neophodan test koherentnosti procedura. Težinski faktori se podudaraju sa trade off konceptom; donosilac odluke daje odgovor na pitanje koliko je spreman da prihvati smanjenje performansi po jednom kriterijumu da bi se postiglo povećanje po drugom. Posmatraju se najlošije vrednosti kriterijuma i procenjuje se da li je dobit u odnosu na performanse kriterijuma, koja se postiže pomeranjem od najlošijeg do najboljeg nivoa, veća ili manja od odgovarajuće dobiti koja bi se postigla za druge kriterijume.

3.1.2 Nekompensacione metode određivanja težinskih faktora

Suprotno od kompenzacionih metoda, u nekompensacionim metodama prikazuju se, uglavnom, globalne vrednosti značajnosti kriterijuma i ne razmatra se uticaj obima specifičnog konteksta odlučivanja, što se podrazumeva pri konstrukciji parcijalnih relacija preferentnosti (Milićević i Župac, 2012b).

Najčešće korišćene nekompensacione metode su sledeće:

Direktno dodeljivanje težinskih faktora (Poyhonen i Hamalainen, 2001; Milićević i Župac, 2012a-2012b) (Direct point allocation method) najjednostavnija je od svih metoda određivanja težinskih faktora kriterijuma. Donosilac odluke raspodeljuje fiksni broj poena, bodova i sl., između kriterijuma. Obično je vrednost težinskih faktora kriterijuma izražena u procentima, pa je ukupna suma vrednosti težinskih faktora svih kriterijuma jednaka 100%. Najvažnijem kriterijumu dodeljuje se najveća vrednost težinskog faktora.

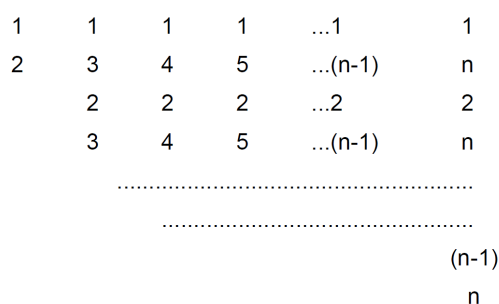
Proporcionalna metoda (Weber i Borchering, 1993; Milićević i Župac, 2012a-2012b) (engl. Ratio or direct importance weighting method) - donosilac odluke prvo rangira sve kriterijume u skladu sa njihovim značajem. Na osnovu ranga kriterijuma donosilac odluke dodeljuje težinski faktor svakom od kriterijuma. Najlošije rangirani kriterijum dobija težinski faktor 10. Sledeći po redu (od kraja) kriterijum dobija težinski faktor 20 i tako redom do najbolje rangiranog kriterijuma. Na kraju je potrebno izvršiti normalizaciju težinskih faktora kriterijuma tako da je zbir težinskih faktora jednak 100. Razlika između težinskih faktora kriterijuma ne mora biti uvek jednaka 10. Veličina razlike težinskih faktora kriterijuma zavisi od subjektivnog mišljenja donosilaca odluke i izražava razliku značaja kriterijuma. Rangiranje kriterijuma u prvom koraku pomaže da se dobiju preciznije vrednosti težinskih faktora.

Metoda otpora prema promenama (Rogers i Bruen, 1998; Milićević i Župac, 2012a-2012b) (engl. resistance to change method) – poseduje elemente swing metode i metode parcijalno-parnih poređenja. Metoda otpora prema promenama je sastavni deo nekih metoda višeg ranga (npr. ELECTRE). Svaki kriterijum ima dve suprotne strane performansi: poželjna i nepoželjna. Na početku se razmatraju poželjne strane svih kriterijuma. Donosilac odluke, parcijalno-parno poredi sve kriterijume i bira koji od kriterijuma bi pomerio sa poželjne na nepoželjnu stranu. Za svaki kriterijum se računa ukupna frekvencija otpora prema promenama (koliko puta pri parnim poređenjima kriterijum nije izabran za promenu strane), što predstavlja ukupan rezultat tog kriterijuma. Na taj način se uspostavlja hijerarhija među kriterijumima.

3.1.3 Određivanje težinskih faktora parcijalno-parnim poređenjem

Određivanje težinskih faktora kriterijuma parcijalno-parnim poređenjem, zasniva se na parnom poređenju kriterijuma i proračunu težinskih faktora primenom određene metode prioritizacije. Donosilac odluke poredi svaki kriterijum sa ostalim i određuje nivo preferentnosti za svaki par kriterijuma. Kao pomoć u određivanju veličine preferentnosti jednog kriterijuma u odnosu na drugi koristi se ordinalna skala³⁾ (Milićević i Župac, 2012b). Jedna od najčešće korišćenih metoda parcijalno-parnih poređenja je AHP, opisan u poglavlju 2.2.3.

Pored AHP značajna je i metoda Fulerovog trougla (Agarski i dr., 2012a, 2012b; Hodolič i dr., 2003; Votruba i Klos, 1988). FT omogućava brzo dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima, ukoliko je broj kriterijuma relativno mali. Prvo se svi kriterijumi poređaju u FT prema šemi prikazanoj na slici 3.1.



Slika 3.1. Fulerov trougao

Svaki par kriterijuma koji se poredi nosi jedan bod, gde se bod dodeljuje kriterijumu koji se smatra značajnijim (obično se obeležava zaokruživanjem u FT – slika 3.2). Ukoliko donosilac odluke smatra da imaju jednaku značajnost – oba kriterijuma dobijaju pola boda (par se zaokruži pravugaonikom – slika 3.2). Kada se završi vrednovanje, bodovi dodeljeni kriterijumima se sabiraju i sume predstavljaju težinske faktore kriterijuma. Ukupan broj parova koji se poredi je:

$$M = \frac{m(m-1)}{2}, \tag{3.3}$$

gde je m broj kriterijuma. M je jednako sumi svih težinskih faktora kriterijuma.

³⁾ Ordinalnom skalom se predstavljaju kategorički podaci, koji su klasifikovani u kategorije po određenom redosledu, ali rastojanje između kategorija nema tačno određeno značenje. Na primer, Satijeva skala prikazana tabelom 2.3.

				Parcijalno-parno poređenje kriterijuma
1	1	1	1	Poređenje prvog kriterijuma sa ostalim
2	3	4	5	Poređenje drugog kriterijuma sa ostalim
	2	2	2	Poređenje trećeg kriterijuma sa ostalim
	3	4	5	Poređenje četvrtog kriterijuma sa ostalim
		3	3	
		4	5	
			4	
			5	

Slika 3.2. Primer popunjenog Fulerovog trougla za 5 kriterijuma

3.2 Metode za objektivno dodeljivanje težinskih faktora

3.2.1 Metoda srednje vrednosti težinskih faktora

Metoda srednje vrednosti težinskih faktora određuje objektivne težinske faktore kriterijuma preko $w_j = 1/m$, gde je m broj kriterijuma. Metoda srednje vrednosti težinskih faktora zasnovana je na pretpostavci da su svi kriterijumi iste značajnosti. Primena metode srednje vrednosti težinskih faktora preporučuje se u slučajevima kada ne postoji donosilac odluke ili kada nema dovoljno informacija da bi se mogao odrediti relativni značaj kriterijuma (Jahan i Edwards, 2014).

3.2.2 Metoda entropije

Određivanje objektivnih težinskih faktora kriterijuma prema metodi entropije zasniva se na merenju neodređenosti informacije koju sadrži matrica odlučivanja i direktno generiše skup težinskih faktora kriterijuma na osnovu međusobnog kontrasta pojedinačnih kriterijumskih vrednosti alternativa za svaki kriterijum, i zatim istovremeno za sve kriterijume (Shannon i Weaver, 1947).

Neka je data matrica odlučivanja A sa n alternativa i m kriterijuma. Određivanje težinskih faktora kriterijuma w_j provodi se kroz tri koraka. U prvom koraku vrši se normalizacija kriterijumskih vrednosti varijanti a_{ij} primenom obrasca:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.4)$$

Količina informacije sadržana u normalizovanoj matrici odlučivanja i emitovana od svakog kriterijuma C_j , može biti merena kao vrednost entropije e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.5)$$

Uvođenjem konstante $k=1/\ln n$ obezbeđeno je da se sve vrednosti e_j nalaze u intervalu $[0,1]$. U drugom koraku određuje se stepen divergencije d_j u odnosu na prosečnu količinu informacije sadržanu u svakom kriterijumu:

$$d_j = 1 - e_j, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.6)$$

d_j predstavlja svojstven intenzitet kontrasta kriterijuma C_j . Što je veća divergencija početnih kriterijumskih vrednosti a_{ij} varijanti A_i za dati kriterijum C_j , vrednost d_j za dati kriterijum je veća, pa se zaključuje da je važnost kriterijuma C_j za dati problem odlučivanja veća. Ako sve varijante imaju slične vrednosti stepena divergencije za određeni kriterijum, onda je taj kriterijum manje važan za dati problem odlučivanja. Takođe, ako su sve vrednosti stepena divergencije varijanti za određeni kriterijum iste, dati kriterijum može biti izostavljen jer on ne donosi novu informaciju donosilacu odluke. Budući da vrednost d_j predstavlja specifičnu meru intenziteta kontrasta kriterijuma C_j , konačni relativni težinski faktor kriterijuma, u trećem koraku metode, može da se dobije jednostavnom aditivnom normalizacijom:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}. \quad (3.7)$$

3.2.3 Metoda CRITIC

CRITIC je metoda za određivanje objektivnih vrednosti težinskih faktora kriterijuma koja uključuje intenzitet kontrasta i konflikt koji je sadržan u strukturi problema odlučivanja (Diakoulaki i dr., 1995). CRITIC se zasniva na analitičkom ispitivanju matrice odlučivanja radi utvrđivanja informacija sadržanih u kriterijumima po kojima se ocenjuju varijante. Za utvrđivanje kontrasta kriterijuma koriste se standardna odstupanja normiranih kriterijumskih vrednosti varijanti po kolonama, kao i koeficijenti korelacije svih parova kolona.

Neka je data matrica odlučivanja A sa n alternativa i m kriterijuma. Elementi matrice A se normalizuju primenom obrasca:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^-}{a_j^+ - a_j^-}. \quad (3.8)$$

Ovakva normalizacija zasnovana je na konceptu idealne tačke i naziva se linearna. Vrednost r_{ij} izražava koliko je varijanta a_i blizu idealne vrednosti a_j^+ , koja predstavlja najbolju vrednost j -kriterijuma, i koliko je udaljena od anti-idealne vrednosti a_j^- koja je najlošija vrednost j -kriterijuma.

U nastavku metode potrebno je konstruisati simetričnu matricu dimenzija $m \times m$ sa elementima r_{jk} , koji predstavljaju koeficijente linearne korelacije vektora x_j i x_k (Milićević i Župac, 2012b). Što je veće neslaganje između kriterijumskih vrednosti varijanti za kriterijume j i k , to je manja vrednost koeficijenta r_{jk} . Izraz 3.9 predstavlja meru konflikta j -kriterijuma u odnosu na ostale u datoj situaciji odlučivanja:

$$\sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}). \quad (3.9)$$

Umesto koeficijenta r_{jk} može se primeniti Spirmenov koeficijent korelacije ranga Rs_{jk} da bi se postiglo uopštenije kvantifikovanje saglasnosti rangova elemenata sadržanih u vektorima x_j i x_k .

Količina informacije C_j sadržana u j -kriterijumu određuje se kombinacijom prethodno navedene veličine r_{jk} i standardne devijacije σ_j od a_{jk} na sledeći način:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}). \quad (3.10)$$

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti da veća vrednost C_j podrazumeva veću količinu informacije koja se dobija od datog kriterijuma, a time je i relativna važnost posmatranog kriterijuma za dati proces odlučivanja veća.

Objektivni težinski faktori kriterijuma dobijaju se normalizacijom veličina C_j :

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k}. \quad (3.11)$$

Težinske faktore kriterijuma moguće je odrediti samo na osnovu vrednosti standardnog odstupanja vektora x_j :

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{k=1}^m \sigma_k}. \quad (3.12)$$

3.2.4 Metoda FANMA

Određivanje težinskih faktora kriterijuma metodom FANMA zasniva se na korišćenju principa rastojanja od idealne tačke i tzv. rane težinske normalizacije (Ma i dr., 1999, Milićević i Župac, 2012b). Prvo je potrebno izvršiti normalizaciju elemenata matrice performansi A i formirati matricu $X = [x_{ij}]_{n \times m}$ na sledeći način:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^-}{a_j^+ - a_j^-}, \quad (3.13)$$

gde je:

$$a_j^+ = \max\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}\}; \quad a_j^- = \min\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}\} \text{ za kriterijume tipa „max“ i}$$

$$a_j^+ = \min\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}\}; \quad a_j^- = \max\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}\} \text{ za kriterijume tipa „min“.}$$

Normalizovana matrica performansi X se dalje transformiše u novu, otežanu matricu $Y = [y_{ij}]_{n \times m}$, gde je: $y_{ij} = w_j x_{ij}$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$. „Idealno rešenje“ može se definisati kao veštačka varijanta $A^* = \{y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*\}$, gde je: $y_j^* = w_j x_j^*$, a $x_j^* = \max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}$ i predstavlja idealnu vrednost kriterijuma C_j . Kao meru rastojanja svake alternative u odnosu na idealnu, može se iskoristiti kvadratno rastojanje:

$$g_i = \sum_{j=1}^m (y_j^* - y_{ij})^2 = \sum_{j=1}^m w_j^2 (x_j^* - x_{ij})^2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.14)$$

Za manje g_i , varijanta A_i je bolja. Težinski faktori w_j određuju se rešavanjem višekriterijumskog optimizacionog modela:

minimizirati:

$$G^* = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}, \quad (3.15)$$

uz ograničenja: $e^T w = 1$ i $w \geq 0$, gde je: $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ i $e = (1, 1, \dots, 1)^T$.

Skalarizacijom vektorske kriterijumske funkcije dobija se uprošćen jednokriterijumski model:

minimizirati:

$$\sum_{i=1}^n g_i = w^T H w, \quad (3.16)$$

uz ograničenja: $e^T w = 1$ i $w \geq 0$. H je dijagonalna matrica sa elementima:

$$h_{jj} = \sum_{i=1}^n (x_j^* - x_{ij})^2, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.17)$$

Uvođenjem Lagranžijana $L = w^T H w + 2\lambda(e^T w - 1)$ i diferenciranjem po w , a zatim po λ dobijaju se dve jednačine:

$$H w + \lambda e = 0, \quad e^T w = 1, \quad (3.18)$$

čijim se rešavanjem dobija:

$$w^* = \frac{H^{-1}e}{e^T H^{-1}e}, \quad \lambda^* = \frac{-1}{e^T H^{-1}e}. \quad (3.19)$$

Ako se u prethodni izraz uvrste vrednosti inverzne matrice H^{-1} i izvrše potrebna preračunavanja, dobija se traženi vektor w^* :

$$w_j^* = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n (x_j^* - x_{ij})^2 \right] \left[\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_j^* - x_{ij})^2} \right]}. \quad (3.20)$$

3.2.5 Metoda I-odstojanja

Metodu I-odstojanja predložio je Branislav Ivanović (Ivanović, 1973) sa ciljem da rangira zemlje (države) na osnovu socio-ekonomskih indikatora i da kao rezultat dobije jedan sintetički indikator koji bi predstavljao rang zemlje. Za određeni vektor kriterijuma $X^T = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ izabranih da reprezentuju entitete (alternative ili zemlje koje se rangiraju), I-odstojanje između dva entiteta $e_r = (X_{1r}, X_{2r}, \dots, X_{kr})$ i $e_s = (X_{1s}, X_{2s}, \dots, X_{ks})$ se definiše kao:

$$D(r,s) = \sum_{i=1}^k \frac{|d_i(r,s)|}{\sigma_i} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - r_{ji,1,2,\dots,j-1}), \quad (3.21)$$

gde je:

$d_i(r,s)$ - odstojanje između vrednosti kriterijuma X_i entiteta e_r i e_s tj. diskriminacioni efekat:

$$d_i(r,s) = x_{ir} - x_{is}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (3.22)$$

σ_i - standardna devijacija od X_i ,

$r_{ji,1,2,\dots,j-1}$ - parcijalni koeficijent korelacije između X_i i X_j , ($j < i$).

Da bi se rangirali entiteti u posmatranom skupu kod metode I-odstojanja, neophodno je da se odredi referentni entitet, tj. jedan entitet koji se fiksira i u odnosu na koji se porede ostali entiteti. Često se referentni entitet x_r dobija od minimalnih vrednosti kriterijuma tipa „max“ i maksimalnih vrednosti kriterijuma tipa „min“.

Smatra se da najznačajniji kriterijum nosi najveću količinu informacija za rangiranje, a da su preostali delovi informacija raspoređeni u ostalim kriterijumima opadajuće od najznačajnijeg do najmanje značajnog kriterijuma. Težinski faktor najznačajnijeg kriterijuma uvek je jednak broju jedan, dok su težinski faktori ostalih kriterijuma u rasponu [0-1] poređani u opadajućem nizu. Izračunavanje vrednosti I-odstojanja je iterativno prema sledećoj proceduri:

- izračunavanje vrednosti diskriminacionog efekta za kriterijum X_1 (najznačajniji kriterijum, onaj koja pruža najveću količinu informacija o fenomenu prema kojem se rangira),
- dodavanje vrednosti diskriminacionog efekta kriterijuma X_2 koji nije pokriven sa X_1 ,
- dodavanje vrednosti diskriminacionog efekta kriterijuma X_3 koji nije pokriven sa X_1 i X_2 ,
- ponavljanje procedure za sve kriterijume.

Ponekad nije moguće uspostaviti isti predznak težinskih faktora za sve kriterijume jer se mogu pojaviti negativni koeficijent korelacije i negativni koeficijent parcijalne korelacije, zbog čega se koristi kvadratno I-odstojanje koje je definisano kao:

$$D^2(r, s) = \sum_{i=1}^k \frac{d_i^2(r, s)}{\sigma_i^2} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - r_{ji,1,2,\dots,j-1}^2). \quad (3.23)$$

Primeri primene I-odstojanja mogu se naći u sledećim radovima (Jeremić i dr., 2011a - 2011c).

3.3 Metode kombinacije subjektivnog i objektivnog dodeljivanja težinskih faktora

U opštem slučaju, kombinovanje bilo koje metode objektivnog i subjektivnog pristupa može se izvršiti na sledeći način (Milićević i Župac, 2012a):

- primenom izabrane metode subjektivnog pristupa određuju se težinski faktori $w_j(s)$,
- izabranom metodom objektivnog pristupa određuju se težinski faktori $w_j(o)$,
- konačni težinski faktori w_j određuju se pomoću izraza 3.24.

$$w_j = \frac{w_j^s w_j^o}{\sum_{j=1}^m w_j^s w_j^o} . \quad (3.24)$$

U nastavku biće prikazana dva karakteristična pristupa kombinacije subjektivnih i objektivnih težinskih faktora kriterijuma, prvi od autora Jahan i saradnici (Jahan i dr., 2012, 2013), a drugi pod nazivom redukcioni koeficijenti (Agarski i dr., 2012, Hodolič i dr., 2003).

3.3.1 Kombinovanje subjektivnih, objektivnih i korelacionih težinskih faktora

Zanimljiv pristup kombinovanju metoda objektivnih i subjektivnih težinskih faktora kriterijuma, predložili su Jahan i saradnici (2012) u proceduri koja sadrži sledećih pet koraka:

1. Korak: Izračunavanje objektivnih težinskih faktora primenom metode entropije za situacije u kojima su svi podaci kvantitativni, ili da su kvantitativni konvertovani u odgovarajuće brojne vrednosti, u suprotnom koristiti samo subjektivno dodeljivanje težinskih faktora;
2. Korak: Izračunavanje korelacije među kriterijumima i izbacivanju nepotrebnih kriterijuma ukoliko je broj kriterijuma veliki;
3. Korak: Računanje težinskih faktora u zavisnosti od korelacionog efekta prema jednačini 3.25:

$$w_j^c = \frac{\sum_{k=1}^m (1 - R_{jk})}{\sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^m 1 - R_{jk} \right)}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (3.25)$$

gde je:

$$R_{jk} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} & \text{Ako su ciljevi kriterijuma } j \text{ i } k \text{ isti;} \\ & j \text{ i } k = 1, 2, \dots, m. \\ \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} & \text{Ako su ciljevi kriterijuma } j \text{ i } k \text{ različiti;} \end{cases}$$

4. Korak: U situacijama sa malim brojem kriterijuma, metode direktnog dodeljivanja težinskih faktora preporučuju se za subjektivno dodeljivanje težinskih faktora kao što su „modified digital logic“ parcijalno-parna metoda ili AHP ukoliko je veći broj kriterijuma;
5. Korak: Kombinacija težinskih faktora prema jednačini 3.26:

$$w_j = \frac{(w_j^s w_j^o w_j^c)^{\frac{1}{3}}}{\sum_{j=1}^m (w_j^s w_j^o w_j^c)^{\frac{1}{3}}}, \quad (3.26)$$

gde je:

- w_j^o - objektivni težinski faktori,
- w_j^s - subjektivni težinski faktori,
- w_j^c - korelacioni težinski faktori.

Jednačina 3.26 daje istu značajnost objektivnim, subjektivnim i korelacionim težinskim faktorima kriterijuma. Godinu dana kasnije, koncept kombinovanja težinskih faktora (Jahan i Edwards, 2013) dat jednačinom 3.26, proširen je dodavanjem λ parametra koji označava odnos-značajnost subjektivnih i objektivnih težinskih faktora kriterijuma. Pored ovoga, u novom konceptu za objektivne težinske faktore umesto

metode entropije, koristi se metoda standardne devijacije i matrica performansi se normalizuje pre izračunavanja objektivnih težinskih faktora.

Prošireni koncept (Jahan i Edwards, 2013) izračunavanja težinskih faktora kriterijuma sastoji se od sledećih pet koraka:

1. Korak: Normalizacija matrice performansi:

$$r_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - T_j|}{\text{Max}\{x_j^{\text{max}}, T_j\} - \text{Min}\{x_j^{\text{min}}, T_j\}}, \quad (3.27)$$

gde je:

x_{ij} - rejting i -alternative prema j -kriterijumu u matrici performansi,

T_j - najbolji element (x_{ij}) ili ciljna vrednost j -kriterijuma,

x_j^{max} - maksimalna vrednost j -kriterijuma,

x_j^{min} - minimalna vrednost j -kriterijuma.

2. Korak: Izračunavanje objektivnih težinskih faktora primenom metode standardne devijacije:

$$w_j^o = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^m \sigma_j}, \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{n}}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.28)$$

3. Korak: Računanje težinskih faktora u zavisnosti od korelacionog efekta jednačinom 3.29. S obzirom na to da jednačina 3.30 koristi normalizovane podatke, treći korak je pojednostavljen u odnosu na prethodni koncept (Jahan i dr., 2012).

$$w_j^c = \frac{\sum_{k=1}^m (1 - R_{jk})}{\sum_{j=1}^m (\sum_{k=1}^m 1 - R_{jk})}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.29)$$

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}} \quad (3.30)$$

4. Korak: Računanje subjektivnih težinskih faktora primenom AHP ili „modified digital logic“ pristupa.
5. Korak: Integrisanje težinskih faktora. Predložena jednačina 3.31 kombinuje tri vrste težina.

$$w_j = w_j^s \lambda + w_j^o \frac{(1-\lambda)}{2} + w_j^c \frac{(1-\lambda)}{2}, \quad j = 1, 2, \dots, m; 0 \leq \lambda \leq 1. \quad (3.31)$$

gde je:

w_j^o , - objektivni težinski faktori,

w_j^s , - subjektivni težinski faktori,

w_j^c - korelacioni težinski faktori,

λ – odnos značajnosti objektivnih, subjektivnih i korelacionih težinskih faktora.

Jednačina 3.31 omogućava donosilacu odluke da odredi koliku će značajnost dodeliti objektivnim, subjektivnim i korelacionim težinskim faktorima. Promenom vrednosti λ od 0 do 1, jednačina 3.31 omogućava i analizu osetljivosti težinskih faktora kod problema odlučivanja. Predloženi pristup uključuje nesigurnost donosioca odluke tako što male vrednosti λ mogu koristiti donosioci odluke sa manje iskustva, a veće vrednosti λ odgovaraju ekspertima sa većim znanjem, iskustvom i donosiocima odluke koji su sigurni u dodeljene subjektivne težinske faktore.

3.3.2 Metoda redukcionih koeficijenata

Modifikacija metode I-odstojanja, koja se može pronaći u (Agarski i dr., 2012a; Hodolič i dr., 2003), nazvana je metodom redukcionih koeficijenata. Konačni rezultat vrednovanja alternativa metodom redukcionih koeficijenata dobija se, kao i kod SAW, sumom pomnoženih težinskih faktora kriterijuma w_j i normalizovanih vrednosti matrice performansi b_{ij} :

$$q_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} w_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.32)$$

Težinski faktori kriterijuma w_j izračunavaju se:

$$w_j = \prod_{i=1}^{j-1} (1 - |r_{ij}|), \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3.33)$$

gde je:

r_{ij} – Pirsonov koeficijent korelacije:

$$r_{jl} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_j)(a_{il} - \bar{a}_l)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_j)^2 \sum_{i=1}^n (a_{il} - \bar{a}_l)^2}}, \quad j = 1, 2, \dots, m-1; \quad l = 2, \dots, m. \quad (3.34)$$

U jednačini 3.33 može se primetiti razlika u odnosu na originalnu metodu I-odstojanja koja se ogleda u primeni apsolutne vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije i subjektivnom izboru redosleda značajnosti kriterijuma. Pored primene apsolutne vrednosti, razlika je i u tome što postupak dobijanja težinskih faktora kriterijuma nije iterativan.

Normalizacija matrice performansi A , isto kao i u metodi I-odstojanja, vrši se preko:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - u_j}{s_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.35)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_j)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (3.36)$$

gde je:

b_{ij} – normalizovana vrednost matrice performansi,

a_{ij} – element matrice performansi A (vrednost i -alternative i j -kriterijuma),

s_j – standardna devijacija,

u_j – „veštački vektor“, istog značenja kao i referentni entitet u metodi I-odstojanja.

Razlika između kriterijuma tipa „max“ i kriterijuma tipa „min“, pravi se dodavanjem predznaka minus vrednostima kriterijuma matrice performansi $A = [a_{ij}]$ kriterijumima tipa „max“. Veće vrednosti q_i ukazuju na bolji rejting i -alternative i obrnuto.

3.4 SWOT analiza metoda za dodeljivanje težinskih faktora

Identifikovanjem prednosti, slabosti, mogućnosti i pretnji, urađena je SWOT analiza prethodno opisanih metoda za dodeljivanje težinskih faktora:

- SWOT analiza metode direktnog dodeljivanja težinskih faktora (tabela 3.1),
- SWOT analiza metode Fulerovog trougla (tabela 3.2),
- SWOT analiza metode srednjih vrednosti težinskih faktora (tabela 3.3),
- SWOT analiza metode entropije (tabela 3.4),
- SWOT analiza metode CRITIC (tabela 3.5),
- SWOT analiza metode FANMA (tabela 3.6),
- SWOT analiza metode I-odstojanja (tabela 3.7),
- SWOT analiza metode iz 2012. godine autora Jahan i drugi (tabela 3.8),
- SWOT analiza metode iz 2013. godine autora Jahan i Edwards (tabela 3.9),
- SWOT analiza metode redukcionih koeficijenata (tabela 3.10).

Kao što je i ranije bilo spomenuto, AHP se često koristi za dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma. Međutim, s obzirom na to da je SWOT analiza AHP realizovana u poglavlju 2.5, neće biti prikazana u delu SWOT analize metoda za dodeljivanje težinskih faktora.

Tabela 3.1. SWOT analiza metode direktnog dodeljivanja težinskih faktora

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Jednostavna za razumevanje i primenu. Pogodna za situacije gde je potrebno brzo dodeliti težinske faktore kriterijumima.	(Jahan i Edwards, 2014; Milićević i Župac, 2012b; Poyhonen i Hamalainen, 2001)
Slabosti	Teško primenljiva u slučaju većeg broja kriterijuma. Procedura dodeljivanja težinskih faktora ne pruža informacije o međusobnom odnosu poređenih kriterijuma.	
Mogućnosti	Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA. Donosilac odluke svojim preferencijama određuje težinski faktor kriterijuma (subjektivna metoda).	
Pretnje	Ne postoji izračunavanje nekonzistentnosti procena donosioca odluke kao kod AHP.	

Tabela 3.2. SWOT analiza metode Fulerovog trougla

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Jednostavna za razumevanje i primenu. Samo se dva kriterijuma porede u isto vreme. Pogodna za situacije gde je potrebno brzo dodeliti težinske faktore kriterijumima.	(Agarski i dr., 2012a, 2012b; Hodolič i dr, 2003; Votruba i Klos, 1988)
Slabosti	Gruba skala za poređenje kriterijuma - donosilac odluke ne može da iskaže koliko je jedan kriterijum značajniji od drugog. Broj parcijalno parnih poređenja drastično raste sa porastom broja kriterijuma.	
Mogućnosti	Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA. Donosilac odluke svojim preferencijama određuje težinski faktor kriterijuma (subjektivna metoda).	
Pretnje	Prilikom parcijalno-parnih poređenja, kriterijumu koji se smatra neznatno značajnim može se dodeliti težinski faktor „0“ čime se uticaj kriterijuma isključuje iz VKA. Ne postoji izračunavanje nekonzistentnosti procena donosioca odluke kao kod AHP.	

Tabela 3.3. SWOT analiza metode srednjih vrednosti težinskih faktora

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Jednostavna za razumevanje i primenu. Pogodna za situacije gde je potrebno brzo dodeliti težinske faktore kriterijumima. Omogućava izračunavanje težinskih faktora kriterijuma u slučajevima kada postoji odsustvo donosioca odluke (objektivna metoda).	(Jahan i Edwards, 2014)
Slabosti	Primenljiva samo u situacijama kada se smatra da su svi kriterijumi iste značajnosti.	
Mogućnosti	Pruža poredak alternativa koji ne uzima u obzir različite težinske faktore kriterijuma. Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA.	
Pretnje	Nisu identifikovane pretnje.	

Tabela 3.4. SWOT analiza metode entropije

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Omogućava izračunavanje težinskih faktora kriterijuma iz podataka zadatih u matrici performansi u slučajevima kada postoji odsustvo donosioca odluke (objektivna metoda). Pogodna za situacije gde je potrebno brzo dodeliti težinske faktore kriterijumima.	(Jahan i Edwards, 2014; Milićević i Župac, 2012a; Shannon i Weaver, 1947)
Slabosti	Informacije u matrici performansi moraju biti potpune. Vrednosti „0“ ne mogu se koristiti u matrici performansi ($\ln(0)$ je nedefinisan).	
Mogućnosti	Problem sa „0“ vrednostima u matrici performansi može se otkloniti primenom zanemarljivo malih vrednosti (vrednosti bliskih 0). Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA.	
Pretnje	Dobijeni rezultati mogu da ne odgovaraju stvarnoj situaciji. Dobijeni težinski faktori mogu se značajno razlikovati od subjektivnih težinskih faktora – na primer ako kriterijum koji se subjektivno smatra značajnim ima mali raspon vrednosti (meru entropije) u odnosu na ostale, biće mu dodeljen mali težinski faktor.	

Tabela 3.5. SWOT analiza metode CRITIC

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Omogućava izračunavanje težinskih faktora kriterijuma iz podataka zadatih u matrici performansi, u slučajevima kada postoji odsustvo donosioca odluke (objektivna metoda). Pogodna za situacije gde je potrebno brzo dodeliti težinske faktore kriterijumima.	(Diakoulaki i dr., 1995; Jahan i Edwards, 2014; Milićević i Župac, 2012a)
Slabosti	Informacije u matrici performansi moraju biti potpune. Potreban veći broj alternativa za dobijanje pouzdanijih vrednosti težinskih faktora zbog primene koeficijenata korelacije. Dobijeni rezultati mogu da ne odgovaraju stvarnoj situaciji.	
Mogućnosti	Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA.	
Pretnje	Dobijeni težinski faktori mogu se značajno razlikovati od subjektivnih težinskih faktora.	

Tabela 3.6. SWOT analiza metode FANMA

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Omogućava izračunavanje težinskih faktora kriterijuma iz podataka zadatih u matrici performansi u slučajevima kada postoji odsustvo donosioca odluke (objektivna metoda).	(Ma i dr., 1999; Milićević i Župac, 2012a; Xu, 2004)
Slabosti	Nestabilnost rezultata jer male promene vrednosti kriterijuma ponekad uzrokuju velike promene težinskih faktora.	
Mogućnosti	Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA.	
Pretnje	Dobijeni rezultati mogu se značajno razlikovati od rezultata metode entropije.	

Tabela 3.7. SWOT analiza metode I-odstojanja

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Omogućava izračunavanje težinskih faktora kriterijuma iz podataka zadatih u matrici performansi u slučajevima kada postoji odsustvo donosioca odluke (objektivna metoda).	(Ivanović, 1973; Jeremić i dr., 2011a - 2011c)
Slabosti	Nedovoljno i nejasno opisana originalna metoda – nije razjašnjeno na koji način se određuje najznačajniji kriterijum. Potreban veći broj alternativa za dobijanje pouzdanijih vrednosti težinskih faktora zbog primene koeficijenata korelacije. Informacije u matrici performansi moraju biti potpune.	
Mogućnosti	Omogućava izračunavanje težinskih faktora u slučaju velikog broja alternativa. Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA. Preporučljiva i originalno osmišljena za rangiranje zemalja.	
Pretnje	Dobijeni težinski faktori mogu se značajno razlikovati od subjektivnih težinskih faktora – ukoliko se dva ili više kriterijuma subjektivno smatraju za najznačajnije ili ako je potrebno da imaju istu vrednost težinskih faktora.	

Tabela 3.8. SWOT analiza metode iz 2012. godine autora Jahan i drugi

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Kombinovani pristup dodeljivanja težinskih faktora koji uzima u obzir subjektivne i objektivne težinske faktore. Pored objektivnih i subjektivnih težinskih faktora uzima u obzir i korelacione težinske faktore.	(Jahan i dr., 2012, 2014)
Slabosti	Ne uzima u obzir relativnu značajnost subjektivnih, objektivnih i korelacionih težinskih faktora. Izračunavanje subjektivnih, objektivnih i korelacionih težinskih faktora može da bude vremenski zahtevno.	
Mogućnosti	Mogućnost kombinacije objektivnih i subjektivnih težinskih faktora kriterijuma. Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA.	
Pretnje	Nisu identifikovane pretnje.	

Tabela 3.9. SWOT analiza metode iz 2013. godine autora Jahan i Edwards

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Kombinovani pristup dodeljivanja težinskih faktora koji uzima u obzir subjektivne i objektivne težinske faktore. Uzima u obzir korelacione težinske faktore. Donosilac odluke određuje relativnu značajnost subjektivnih, objektivnih i korelacionih težinskih faktora podešavanjem lambda parametra. Donosilac odluke može da uključi nesigurnost vezanu za subjektivno dodeljene težinske faktore promenom lambda parametra – donosioci odluke sigurniji u svoje subjektivne preferencije mogu izabrati vrednosti lambda parametra sa većom značajnošću subjektivnih težinskih faktora i suprotno.	(Jahan i Edwards, 2013, 2014)
Slabosti	Nije definisano na koji način se određuje lambda parametar. Izračunavanje subjektivnih, objektivnih i korelacionih težinskih faktora može da bude vremenski zahtevno.	
Mogućnosti	Mogućnost kombinacije objektivnih i subjektivnih težinskih faktora kriterijuma. Mogućnost dodeljivanja značajnosti subjektivnim, objektivnim i korelacionim težinskim faktorima. Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA. Mogućnost analize osetljivosti promenom lambda parametra.	
Pretnje	Nisu identifikovane pretnje.	

Tabela 3.10. SWOT analiza metode redukcionih koeficijenata

SWOT analiza		Reprezentativne reference
Prednosti	Kombinovani pristup subjektivnog i objektivnog dodeljivanja težinskih faktora u kojem donosilac odluke određuje redosled značajnosti kriterijuma, a međusobni odnos značajnosti kriterijuma se određuje objektivno.	(Agarski i dr., 2012a; Hodolič i dr., 2003)
Slabosti	<p>Informacije u matrici performansi moraju biti potpune.</p> <p>Potreban veći broj alternativa za dobijanje pouzdanijih vrednosti težinskih faktora zbog primene Pirsonovog koeficijenta korelacije (broja alternativa).</p> <p>Nije primenljiva u situacijama gde se dva ili više kriterijuma smatraju za najznačajnije i ako je potrebno da imaju istu vrednost težinskih faktora.</p>	
Mogućnosti	<p>Mogućnost kombinacije objektivnih i subjektivnih težinskih faktora kriterijuma.</p> <p>Primena dobijenih težinskih faktora u ostalim metodama VKA.</p>	
Pretnje	Nisu identifikovane pretnje.	

4. VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA I OCENJIVANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA

4.1 Primena višekriterijumske analize u inženjerstvu zaštite životne sredine

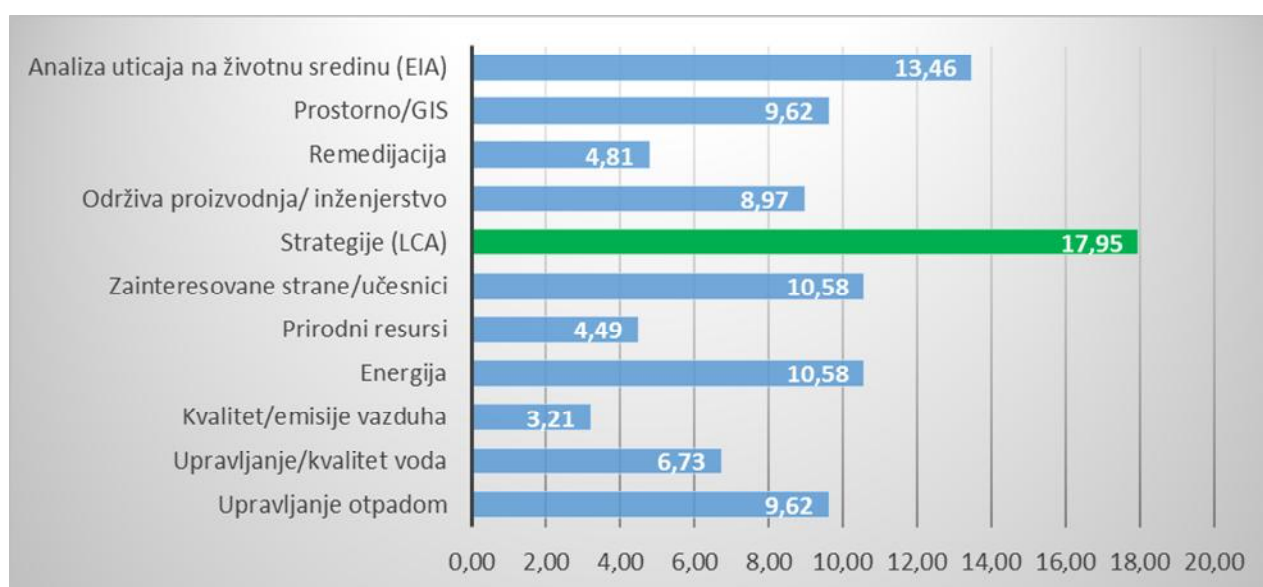
Primena metoda višekriterijumskih analiza je opšteg karaktera i obuhvata različite naučne oblasti u koje spada i inženjerstvo zaštite životne sredine. VKA u inženjerstvu zaštite životne sredine je kompleksna zbog međusobne interakcije socijalnih, ekoloških, ekonomskih i tehničkih faktora. Huang i drugi (2011) sistematizovali su primenu VKA u inženjerstvu zaštite životne sredine, tako što su radovi publikovani u periodu od 1990.-2010. godine (312 radova je razmatrano) klasifikovani u tri oblasti podeljene u 11 kategorija (tabela 4.1):

- Problemi životne sredine - koji uključuju primenu alata za VKA na upravljanje/kvalitet otpada, voda, vazduha, energije, ili prirodnih resursa;
- Interventni tip - fokusira se na zainteresovane strane/učesnike, održive proizvodne tehnologije/inženjerstvo, remedijacione postupke i strategije kao što su LCA;
- Dopunski alati - koji se fokusiraju na metode koje dopunjuju VKA, kao što su EIA ili primena prostorne/GIS analize.

Od ukupnog broja radova obuhvaćenih analizom, najveći broj radova (56 radova – tabela 4.1, tj. 18% - grafik 4.1), obuhvata kategorija „Strategija“ gde spada i primena VKA u LCA što potvrđuje aktuelnost istraživanja. S obzirom na trend istraživanja u oblasti vrednovanja uticaja na životnu sredinu, nastavak poglavlja biće posvećen LCA metodi i mogućnostima kombinovanja VKA i LCA, kao i primeni VKA sa LCA.

Tabela 4.1. Primena metoda VKA u oblastima inženjerstva zaštite životne sredine
(Huang i dr., 2011)

Kategorija		AHP/ANP	MAUT/MAVT	PROMETHEE	ELECTRE	TOPSIS	Više metoda	Pregled	Ostalo	Ukupno
Problemi životne sredine	Upravljanje otpadom	15	5	4	0	0	1	1	4	30
	Upravljanje/kvalitet voda	4	7	1	2	0	4	0	3	21
	Kvalitet/emisije vazduha	0	1	6	0	0	1	1	1	10
	Energija	14	3	4	3	1	2	2	4	33
	Prirodni resursi	7	1	0	0	0	1	3	2	14
Interventni tip	Zainteresovane strane/učesnici	16	5	1	2	0	3	6	0	33
	Strategije (LCA)	22	12	6	3	2	3	5	3	56
	Održiva proizvodnja/ inženjerstvo	18	2	0	1	2	2	1	2	28
	Remedijacija	4	5	1	2	0	1	1	1	15
Dopunski alati	Prostorno/GIS	24	5	0	0	0	0	1	0	30
	Analiza uticaja na životnu sredinu (EIA)	26	5	2	1	0	2	3	3	42
Ukupno		150	51	25	14	5	20	24	23	312

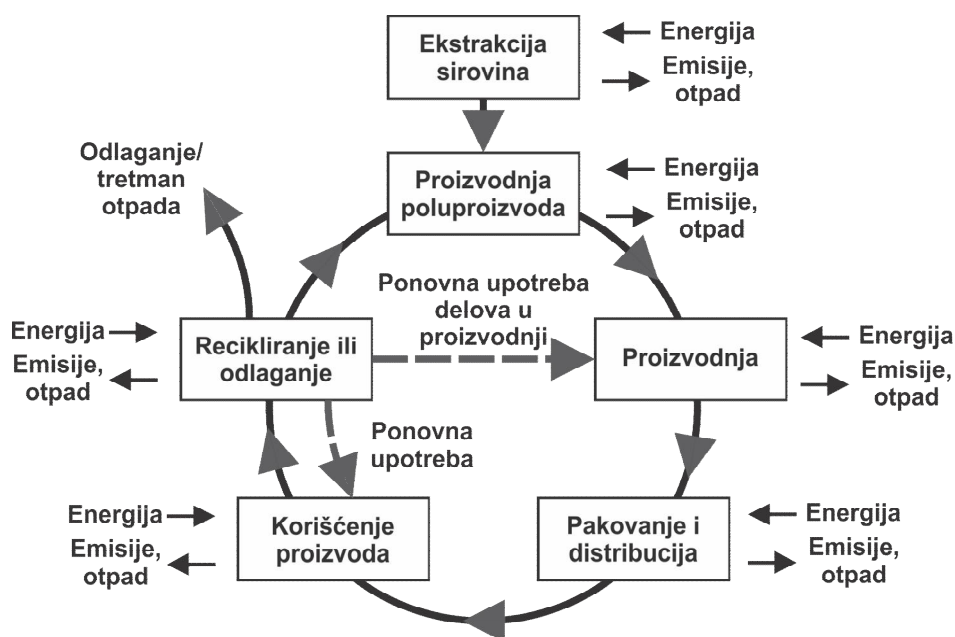


Grafik 4.1. Radovi publikovani u periodu 1990.-2010. godine po oblastima primene metoda VKA u inženjerstvu zaštite životne sredine u % (Huang i dr., 2011)

4.2 Ocenjivanje životnog ciklusa procesa i proizvoda

Često se u vezi sa LCA u literaturi mogu sresti pojmovi poput analiza životnog ciklusa (engl. life-cycle analysis), ekobalans, analiza od-kolevke-do-groba (engl. cradle-

to-grave analysis) kao i REPA. LCA, kao što i naziv sugeriše, predstavlja metodu za ocenjivanje proizvoda i proizvodnih procesa, sa aspekta uticaja na životnu sredinu u svim fazama životnog ciklusa - od ekstrakcije sirovina, preko projektovanja, proizvodnje i distribucije, do primene i postupanja na kraju životnog veka (slika 4.1). Radi se o procesu, u okviru kojeg se vrednuju kako potrošnja energije i materijala, tako i uticaj na zdravlje ljudi i kvalitet ekosistema u reprezentativnim fazama egzistencije proizvoda. U tome se LCA razlikuje od ostalih analiza, poput EIA, vrednovanja rizika ili ekološkog audita koje su usredsređene na delovanje proizvoda, procesa i službi na životnu sredinu, u određenoj fazi egzistencije.



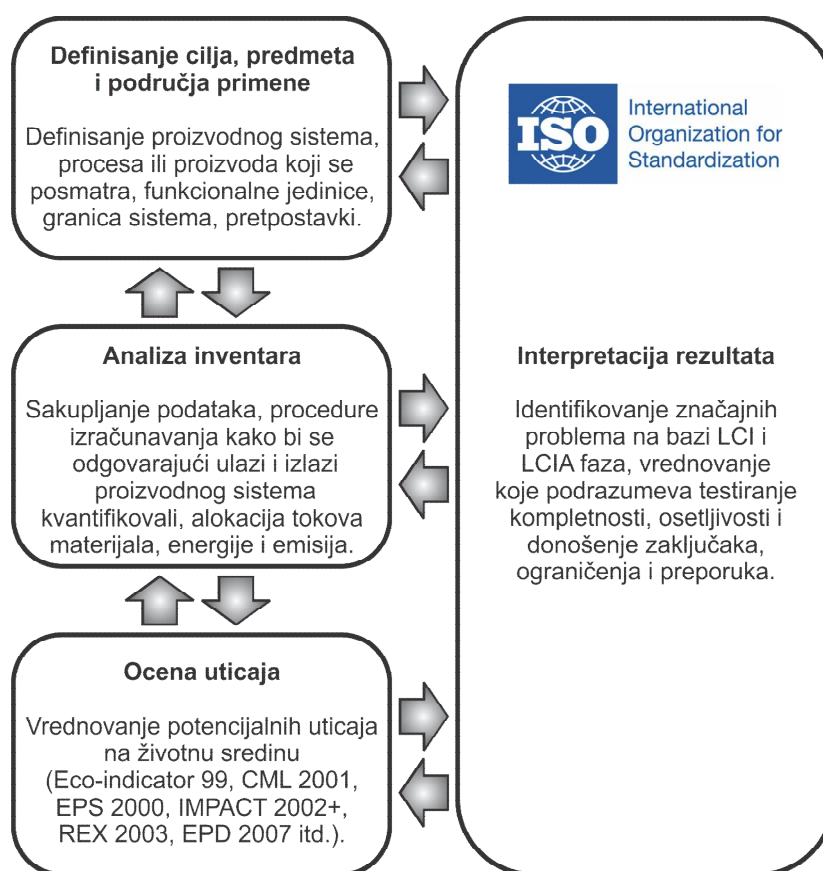
Slika 4.1. Faze životnog ciklusa proizvoda (Kiš, 2011)

LCA je relativno mlada metoda čiji koreni datiraju od 60-tih godina 20. veka (EPA, 2006). Do 1990. godine metoda LCA se razvijala i primenjivala uglavnom stihijski (Hodolič i dr., 2013). Različiti subjekti (institucionalni i industrijski) su primenjivali različite metode za dolaženje do podataka, koji su dalje iskazivani u različitim, često nekompatibilnim jedinicama. Kao prelomna godina se može smatrati 1990. godina, kada je na konferenciji (SETAC, 1991) došlo do sjedinjenja metoda različito realizovanih i do tada neuporedivih analiza. Na sledećoj konferenciji SETAC 1992. godine, realizovano je detaljnije usaglašavanje postupka i metode LCA, a 1997. godine je objavljen osnovni LCA standard ISO 14040, na bazi kojeg su dalje razvijeni i objavljeni ostali standardi u ISO 1404X grupi. U periodu od 1997. do 2002. godine došlo je do intenzivnijeg razvoja metoda LCIA, a usled toga nakon 2002. godine dolazi i do

intenzivnijeg razvoja baza podataka kao podrške metodama LCIA. Jedan od prvih literaturnih izvora na srpskom jeziku o metodi LCAi objavljen je 2003. godine (Hodolič i dr., 2003). Detaljno razmatranje trendova razvoja metoda LCA urađeno je u (Finnveden i dr., 2009).

LCA metoda sastoji se iz četiri faze, međusobno povezane kao što je prikazano na slici 4.2:

1. definisanje cilja i predmeta,
2. analiza inventara,
3. ocenjivanje uticaja i
4. interpretacija rezultata.



Slika 4.2. Faze LCA prema ISO 14040 (ISO 14040, 2006)

4.2.1 Definisanje cilja, predmeta i područja primene

Cilj u LCA studiji treba da definiše (EPA, 2006; ILCD, 2010):

- nameravanu primenu;
- razloge za sprovođenje studije;
- nameravani auditorijum, tj. kome treba saopštiti rezultate studije i

- da li je namera da se rezultati koriste za uporedne tvrdnje u cilju predočavanja javnosti.

Predmet i područje primene treba da su dovoljno jasno definisani kako bi se osigurali da širina, dubina i detaljnost studije budu kompatibilne i dovoljne da odgovore navedenom cilju, a obuhvataju sledeće:

- sistem proizvoda koji se posmatra;
- funkcije sistema proizvoda ili, u slučaju uporednih studija, više sistema proizvoda;
- funkcionalne jedinice;
- granice sistema;
- postupke alokacija;
- izabrane kategorije uticaja i metode ocenjivanja uticaja i interpretaciju koja sledi;
- zahteve koji se odnose na podatke;
- pretpostavke;
- ograničenja;
- zahteve za kvalitet inicijalnih podataka;
- vrste kritičkog preispitivanja, ako ih ima;
- vrste i formate izveštaja koji se zahtevaju studijom.

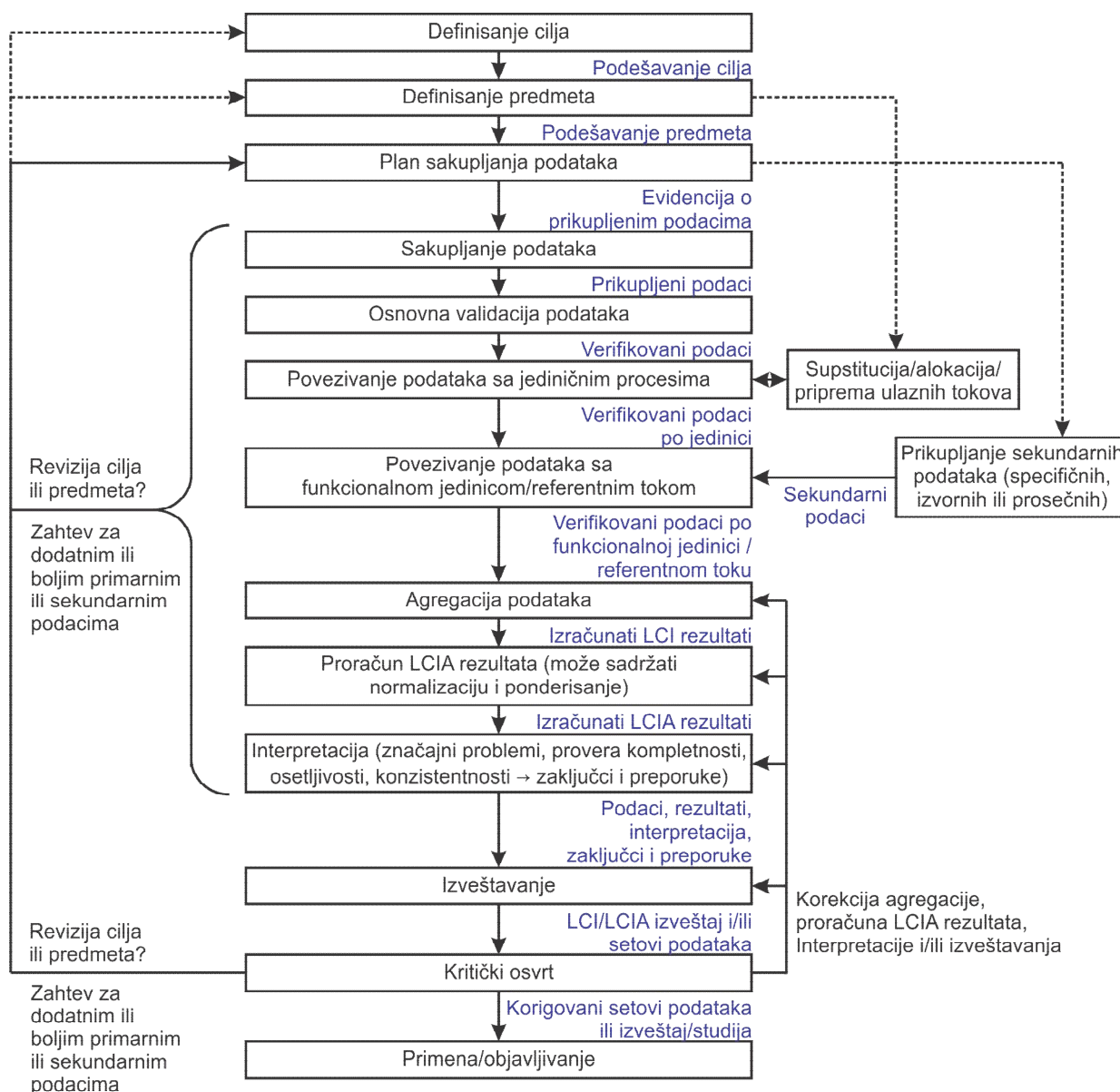
4.2.2 Analiza inventara životnog ciklusa

Faza analize inventara životnog ciklusa (engl. Life Cycle Inventory - LCI) obuhvata prikupljanje podataka, kao i procedure za proračunavanje u cilju kvantifikovanja relevantnih ulaza i izlaza sistema proizvoda. Proces sprovođenja LCA i LCI je iterativan jer pojedine faze LCA koriste rezultate iz drugih faza (slika 4.3). Drugim rečima, kako se podaci prikupljaju i rastu saznanja o sistemu, novi zahtevi za podacima ili ograničenja koja zahtevaju izmenu u procedurama prikupljanja podataka mogu se identifikovati tako da se ostvare ciljevi studije. Ponekad se mogu identifikovati pitanja koja zahtevaju revizije cilja ili predmeta i područja primene studije (ISO 14040, 2006; ILCD, 2010; SETAC, 1993).

Prikupljanje podataka - Podaci za svaki jedinični proces u okviru granica sistema uključuju sledeće:

- ulaze energije, ulaze sirovina, pomoćne ulaze i druge fizičke ulaze;
- proizvode, koproizvode i otpad;

- emisije u vazduh, ispuštanja u vodu i zemljište, i
- druge aspekte životne sredine.



Slika 4.3. Iterativni karakter LCA (ILCD, 2010)

Prikupljanje podataka može biti intenzivan proces prikupljanja resursa. Vrlo je važno da se praktična ograničenja u prikupljanju podataka analiziraju u predmetu i području primene, a treba ih dokumentovati u izveštaju studije.

Izračunavanje podataka - Nakon prikupljanja podataka, u cilju dobijanja rezultata inventara definisanog sistema za svaki jedinični proces i za definisanu funkcionalnu jedinicu sistema proizvoda koji će se modelirati, potrebno je sprovesti obradu podataka koja uključuje:

- validaciju prikupljenih podataka,

- povezivanje podataka sa jediničnim procesima i
- povezivanje podataka sa referentnim tokovima funkcionalne jedinice.

Alokacija – U praksi, većina industrijskih procesa daje više od jednog proizvoda i reciklira međuproizvode ili škart kao sirovine. Kod takvih sistema je, tokom sprovođenja LCA, neophodno izvršiti alokaciju tokova i emisija. Drugim rečima, ulazi i izlazi se moraju alocirati na različite proizvode u skladu sa jasno utvrđenim postupcima koji moraju biti dokumentovani i obrazloženi u okviru postupka alokacije. Pri tome, zbir alociranih ulaza i izlaza jediničnih procesa mora biti jednak ulazima i izlazima jediničnih procesa pre alokacije (SETAC, 1993).

Prečišćavanje granica sistema – U skladu sa iterativnim karakterom LCA, odluke o podacima koje treba uključiti moraju se bazirati na analizi osetljivosti da bi se odredio značaj podataka. Početna granica sistema mora biti revidirana, na odgovarajući način, u skladu sa kriterijumima isključenja ustanovljenim u definiciji predmeta i područja primene. Rezultati procesa podešavanja (prečišćavanja) granica i analize osetljivosti moraju se dokumentovati.

4.2.3 Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa

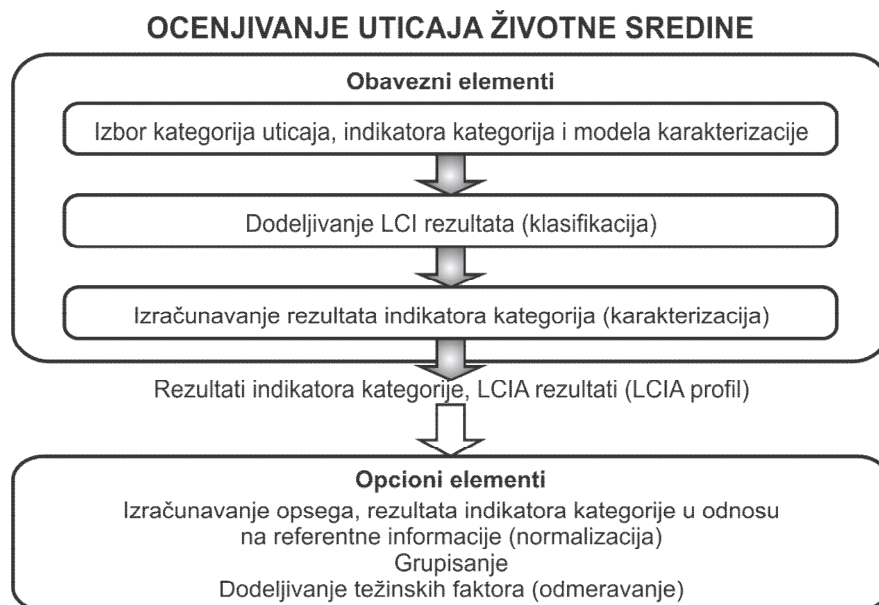
Faza LCIA usmerena je ka proceni značaja mogućih uticaja na životnu sredinu, na bazi rezultata LCI. LCIA obuhvata podatke inventara povezane sa specifičnim kategorijama uticaja na životnu sredinu i indikatorima kategorije. Faza LCIA takođe daje informacije o fazi interpretacije životnog ciklusa (EPA, 2006; ILCD, 2010).

Ocenjivanje uticaja može obuhvatiti iterativni proces preispitivanja cilja i predmeta LCA studije da bi se utvrdilo da li su ciljevi studije ostvareni, odnosno da bi se modifikovali u slučaju da se ocenjivanjem dokaže da se ne mogu ostvariti (slika 4.2).

Osnovni elementi faze LCIA prikazani su na slici 4.4. Razdvajanje faze LCIA na različite elemente je značajno i neophodno iz više razloga:

- svaki element LCIA je jasan i može se tačno definisati;
- u fazi definisanja cilja i predmeta i područja primene studije LCA može da se razmotri svaki element LCIA posebno;
- ocenjivanje kvaliteta metoda LCIA, pretpostavke i druge odluke mogu se sprovesti za svaki element LCIA;
- procedure LCIA, pretpostavke i druge operacije u okviru svakog elementa mogu postati transparentne za kritička preispitivanja i izveštavanja;

- upotreba vrednosti i subjektivnost u okviru svakog elementa, mogu postati transparentne za kritička preispitivanja i izveštavanja.



Slika 4.4. Osnovni elementi faze LCIA (ISO 14040, 2006)

Važno je napomenuti da se LCIA bavi samo onim pitanjima zaštite životne sredine koja su identifikovana u okviru cilja i predmeta i područja primene. U skladu sa tim, LCIA ne predstavlja kompletno ocenjivanje svih pitanja zaštite životne sredine proučavanog sistema proizvoda (Koć, 2009; Vještica, 2014; Vještica i dr. 2014).

Ne postoje opšte prihvaćene metode za konzistentno i precizno pridružene podatke inventara sa mogućim specifičnim uticajima na životnu sredinu. Modeli za kategorije uticaja nalaze se u različitim stadijumima razvoja. Kod većine LCA studija biraju se postojeće kategorije uticaja, indikatora kategorija ili modeli karakterizacije. Modeli karakterizacije odražavaju mehanizam uticaja na životnu sredinu opisivanjem veza između rezultata LCI, indikatora kategorija i, u nekim slučajevima, završet(a)ka kategorija.

Do sada je razvijen veći broj metoda LCIA, između kojih treba pomenuti Eco-indicator 99 (Goedkoop i Spriensma, 2000, Drayer, 2003), CML 2001 (Guinee i dr., 2002, Drayer, 2003), EPS 2000 (Steen, 1999), IMPACT 2002+ (Jolliet i dr., 2003), EDIP 2003 (Drayer, 2003), TRACI (Bare i dr., 2003), EPD 2007 (Environdec, 2013; Pre-sustainability, 2014a) itd., prilagođenih ocenjivanju uticaja kod različitih kategorija uticaja. Ipak, treba napomenuti da je Eco-indicator 99 predstavljala, do nedavno, vodeću metodu LCIA, na kojoj su bili zasnovani i gotovo svi vodeći programski sistemi za ocenjivanje uticaja (SimaPro (Pre-sustainability, 2014b), GaBi (Gabi-software, 2014)

itd.). Konstantni razvoj navedenih metoda je omogućio harmonizaciju indikatora kategorija, što je rezultiralo razvojem nove metode – ReCiPe (Goedkoop i dr., 2013; Pre-sustainability, 2014b) koja objedinjuje prethodne prilaze.

4.2.4 Interpretacija životnog ciklusa

Interpretacija je faza LCA, u kojoj se rezultati iz LCI i LCIA faza razmatraju zajedno, odnosno u slučaju LCI studija razmatraju se samo rezultati analize inventara (EPA, 2006; ILCD, 2010). Faza interpretacije (tumačenja) treba da obezbedi rezultate konzistentne sa definisanim ciljem i predmetom i područjem primene, a koji osiguravaju zaključke, objašnjavaju ograničenja i obezbeđuju preporuke. U skladu sa tim, kao osnovni elementi faze interpretacije, odnosno tumačenja životnog ciklusa, mogu se navesti:

- identifikacija značajnih pitanja na osnovu rezultata LCI i LCIA faza,
- ocenjivanje kojim se razmatraju provere potpunosti, osetljivosti i doslednosti i
- generisanje zaključaka, ograničenja i preporuka.

Interpretacija treba da reflektuje činjenicu da su rezultati LCIA zasnovani na relativnom pristupu, da ukazuju na moguće efekte na životnu sredinu (koji ne predviđaju aktuelne uticaje na krajnjim tačkama kategorija, prekoračenjima, bezbednosnim marginama ili rizicima). Rezultati interpretacije mogu da budu u obliku zaključaka i preporuka donosiocima odluka, u skladu sa ciljem i predmetom i područjem primene studije. Interpretacija životnog ciklusa, takođe, treba da obezbedi razumljivo, kompletno i konzistentno predstavljanje rezultata LCA, u skladu sa definisanim ciljem i predmetom i područjem primene studije.

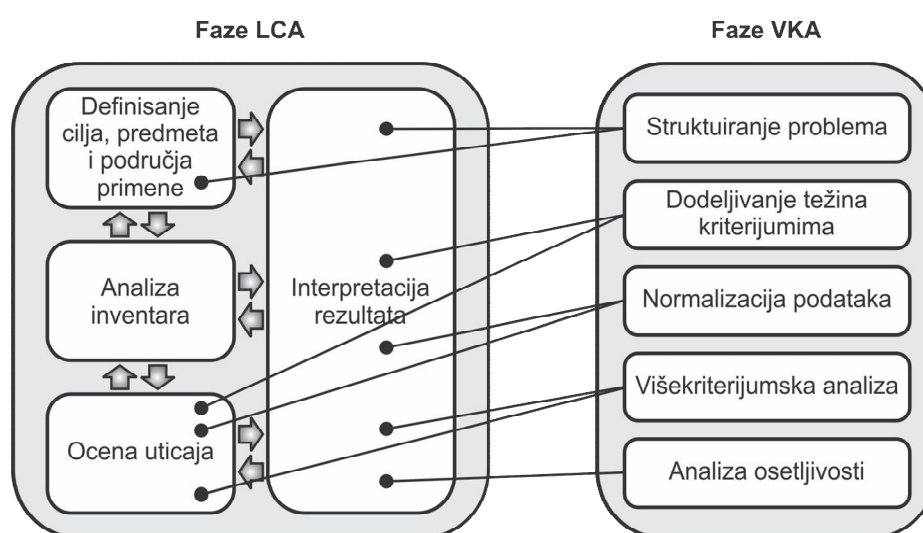
4.3 Primena višekriterijumske analize u ocenjivanju životnog ciklusa

Primena VKA u LCA je razmatrana u više naučnih radova, od kojih su pojedini značajniji prilazi analizirani u nastavku. Postoji bliska analogija između LCA i alata za odlučivanje kao što je VKA (Chevalier i Rousseaux, 1999), a iz šire perspektive LCA se može smatrati kao problem odlučivanja (Hertwich i Hammitt, 2001a, 2001b) i kao metoda VKA (Benoit i Rousseaux, 2003). Benoit i Rousseaux (2003) uporedili su korake metoda VKA i LCA kao što je prikazano u tabeli 4.2. Još jedan primer uporednog

prikaza faza i međusobnih veza VKA i LCA (Geldermann i Rentz, 2005), prikazan je na slici 4.5.

Tabela 4.2. Analogija između metoda LCA i VKA (Benoit i Rousseaux, 2003)

LCA	VKA
1. Definisanje cilja i predmeta studije	1. Definisanje cilja 2. Definisanje sistema (alternativa) koji se porede
2. Analiza inventara	4. Vrednovanje kriterijuma
3. Ocenjivanje uticaja	3. Sastavljanje koherentne familije kriterijuma
3.1 Klasifikacija uticaja	4. Vrednovanje kriterijuma
3.2 Karakterizacija uticaja	5. Modeliranje preferencija i agregacija rezultata kriterijuma
3.3 Vrednovanje/agregacija uticaja	
4. Interpretacija	6. Analiza osetljivosti i robusnosti
LCA nema ovaj deo donošenja odluke Primena odluke	7. Sinteza rezultata i formulisanje preporuka



Slika 4.5. Faze LCA i VKA (Geldermann i Rentz, 2005)

Višekriterijumski pristup kod rešavanja problema pri izradi LCA studije može se koristiti u sve četiri faze LCA (Seppala, 2003). SAW kao jedna od najjednostavnijih metoda VKA, koristi se u EI99, ReCiPe i ostalim metodama za dobijanje ukupnog uticaja životnog ciklusa na životnu sredinu (Rowley i Peters, 2009).

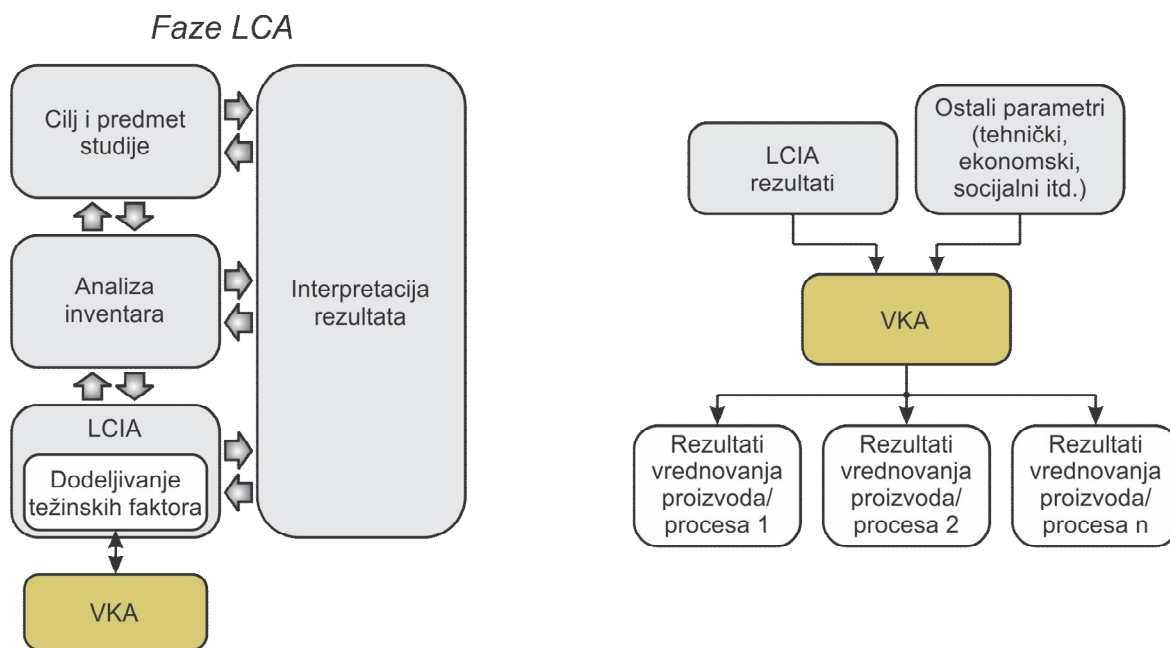
LCA je zasnovana na linearnim modelima ljudskih aktivnosti i uticaja ljudskih aktivnosti na životnu sredinu. Prema linearnim modelima opterećenje životne sredine i uticaji na životnu sredinu su direktno proporcionalni broju proizvedenih funkcionalnih jedinica, iz čega proizilazi da je linearno programiranje pogodno za primenu u LCA (Azapagic i Clift, 1999b). Hermann i drugi (2007) su diskutovali o mogućnosti

kombinacije LCA i VKA. LCA je standardizovana i praktično izvodljiva metoda, dok je većina primenjenih metoda VKA subjektivnog karaktera i različiti rezultati se mogu dobiti u zavisnosti od primenjenog metoda i preferencija donosilaca odluke. Generalno, VKA se koristi da bi se dodelili težinski faktori i da bi se sumirali rezultati LCA u ukupan uticaj životnog ciklusa nakon klasifikacije, karakterizacije i opciono normalizacije. Uprkos gubitku informacija koje se javljaju prilikom agregacije podataka u jedan broj, dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja na nivou međupozicija i izračunavanje jednog ukupnog rezultata, jesu generalne prednosti kombinacije metoda LCA i VKA.

Mogu se izdvojiti dva glavna pristupa istraživanja primene VKA sa LCA:

1. *Primena VKA za dodeljivanje težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA* – pored uobičajenog poređenja kategorija uticaja, težinski faktori mogu se dobiti definisanjem kriterijuma (vreme, razmera-prostor, povratnost-nepovratnost, rastojanje do ciljnih vrednosti, nesigurnost), za vrednovanje značajnosti kategorija uticaja u LCIA (slika 4.6a). (Agarski i dr., 2013, 2014; Noh i Lee, 2003; Soares i dr., 2006; Hermann i dr., 2007; Hertwich i Hammit, 2001b; Hofstetter, 1998);
2. *Primena VKA na rezultate LCIA* – ovim pristupom obično se dva ili više proizvoda analiziraju procedurom LCA i rezultati (karakterizacije, normalizacije, kategorija uticaja na međupozicijama ili krajnjim pozicijama) se uzimaju kao ulaz u VKA (Benetto i dr., 2008; Milani i dr., 2011; Rogers i Seager, 2009). Pored ekoloških karakteristika procesa/proizvoda dobijenih metodom LCA, ulazi za VKA mogu biti i ostali parametri tehničkih, ekonomskih ili socijalnih aspekata (slika 4.6b).

U odnosu na prva dva pravca koji dominiraju, ostali pristupi se odnose na primene VKA u sledećim oblastima LCA: alokacija uticaja na životnu sredinu (Azapagic i Clift, 1999a), agregacija uticaja na životnu sredinu (Benoit i Rousseaux, 2003), klasifikacija u LCA (Chevalier i Rousseaux, 1999), interpretacija rezultata LCA (Benetto i dr., 2008), izbor odgovarajućih kategorija uticaja (Chavalier, 1999), uključivanje nesigurnosti i subjektivnosti kod normalizacije i dodeljivanja težinskih faktora (Güereca i dr., 2007).



a) *Primena VKA za određivanje težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA*

b) *Primena VKA na rezultate LCIA*

Slika 4.6. Dva glavna pristupa istraživanja primene VKA sa LCA

4.3.1 Primena višekriterijumske analize za dodeljivanje težinskih faktora kategorija uticaja u ocenjivanju uticaja životnog ciklusa

Prema ISO 14044, LCIA procedura sadrži tri obavezna i tri opciona elementa (slika 4.4):

1. izbor kategorija uticaja, indikatora kategorija i modela karakterizacije (obavezan element),
2. klasifikacija (obavezan element),
3. karakterizacija (obavezan element),
4. normalizacija (opcioni element),
5. grupisanje (opcioni element) i
6. dodeljivanje težinskih faktora (opcioni element).

Opcioni elementi normalizacija, grupisanje i dodeljivanje težinskih faktora primenjuju se na rezultate karakterizacije. U normalizaciji se uvode normalizacioni faktori za sve kategorije uticaja i prikazom relativnog doprinosa svih kategorija uticaja problemu životne sredine na određenom geografskom području. Rezultati normalizovane kategorije uticaja nisu iste značajnosti i kao takve se ne mogu sabirati u kategorije štete ili konačni rezultat, zbog čega je potrebno dodeljivanje težinskih faktora.

Dodeljivanje težinskih faktora jeste subjektivan korak i stoga predstavlja kontroverzan i težak problem u LCA interpretaciji. ISO 14044 ne dozvoljava dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja prilikom javnog poređenja proizvoda. Međutim, dodeljivanje težinskih faktora je dozvoljeno u ostalim primenama, i stoga donosilac odluke ima odgovornost da koristi dodeljivanje težinskih faktora na pravilan način.

Metode za dodeljivanje težinskih faktora u LCIA mogu se klasifikovati (Finnveden i dr., 2002, Pennington i dr., 2004; Soares i dr., 2006):

- prema pozicijama u mehanizmu uticaja na životnu sredinu i
- prema vrsti metoda dodeljivanja težinskih faktora.

Finnveden i saradnici (2006) objašnjavaju da mehanizam uticaja na životnu sredinu započinje sa emisijom ili nekom drugom aktivnošću koja dovodi do primarnih promena u životnoj sredini. Ove primarne promene dovode do sekundarnih, tercijarnih itd. promena. U ranoj fazi mehanizma uticaja na životnu sredinu promene su često hemijske i fizičke prirode, na primer promene u koncentraciji u atmosferi ili promene u infracrvenom zračenju (potencijal globalnog zagrevanja kao indikator globalnog zagrevanja). U daljim fazama mehanizma uticaja na životnu sredinu nastaju biološke promene, na primer promene u kvalitetu ekosistema ili ljudskog zdravlja. U zavisnosti od toga u kojoj fazi (poziciji) mehanizma uticaja na životnu sredinu se vrši vrednovanje (slika 4.7), metode vrednovanja se mogu deliti na metode usredsređene na:

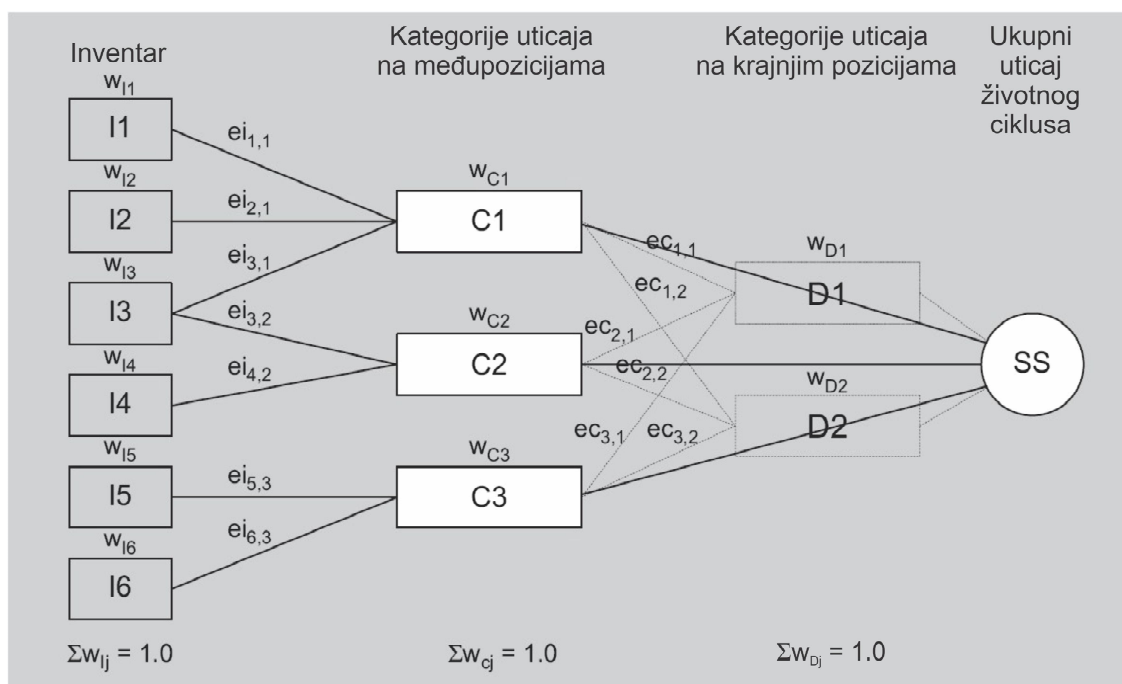
- *međupozicije* (engl. midpoint) u mehanizmu uticaja na životnu sredinu i
- *krajnje pozicije* (engl. endpoint) u mehanizmu uticaja na životnu sredinu.

Prema vrsti sve metode za dodeljivanje težinskih faktora u LCIA mogu se svrstati u tri glavne grupe metoda (Soares i dr., 2006):

- metode ekspertske ocene,
- metoda udaljenosti od ciljne vrednosti i
- metode za monetarno vrednovanje.

Kod metoda ekspertske ocene, relativan značaj rezultata indikatora kategorija uticaja dobija se na osnovu iskazanih preferencija ljudi ili ekspertske grupe MCDM metodama. Kao metode ekspertske ocene predlažu se: SMART, SMARTER, SMARTS, AHP, SWING, Eco-indicator 99 (Goedkoop i Spriensma, 2000). Metode ekspertiskih ocena imaju široku primenu u LCA. Kod monetarnog vrednovanja dodeljivanje težinskih faktora zasnovano je na novčanim vrednostima. Metoda monetarnog vrednovanja zasnovana je na troškovima izbegavanja štete, prevencije potencijalne štete koja se

može naneti životnoj sredini. Prema metodi monetarnog vrednovanja, što je veća monetarna vrednost kategorije uticaja toliko će ona imati veću značajnost. Kod metode ciljne vrednosti faktori vrednovanja se računaju kao funkcija ciljne vrednosti. Dodeljivanje težinskih faktora pristupom udaljenost od ciljne vrednosti (engl. distance-to-target), može se definisati kao odnos između stvarne vrednosti emisije na geografskom području i granične vrednosti za tu emisiju. Nedostatak pristupa udaljenost od ciljne vrednosti, jeste da ne uzima u obzir relativni značaj različitih kategorija uticaja i ne uzima u obzir sinergiju između supstanci.



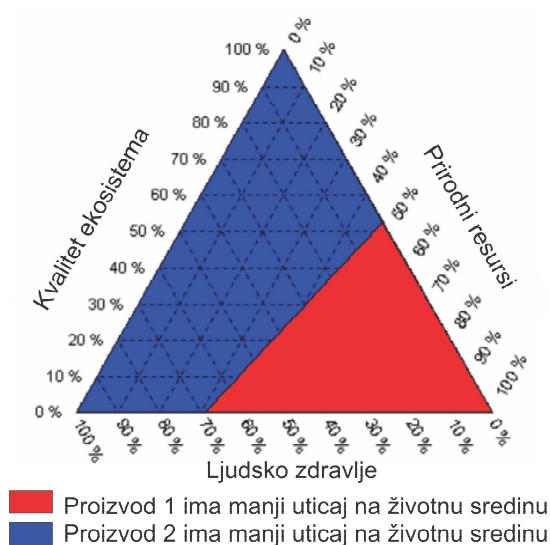
w_I – značajnost emisije u inventaru, w_C – značajnost kategorije uticaja na međupozicijama, w_D – značajnost kategorije uticaja na krajnjim pozicijama, e_j – vrednovanje emisije inventara prema određenoj kategoriji međupozicije, SS – ukupni uticaj životnog ciklusa, ec – vrednovanje kategorija uticaja međupozicija prema kategorijama uticaja krajnjih pozicija.

Slika 4.7. Dobijanje ukupnog uticaja životnog ciklusa primenom težinskih faktora kategorija uticaja na nivou srednjih i krajnjih pozicija (Soares i dr., 2006)

Razlika metoda za dodeljivanje težinskih faktora u LCIA može se napraviti između metoda zasnovanih na izjavljenim i otkrivenim preferencijama (engl. expressed and revealed preferences) (Finnveden i dr., 2002). Kod metoda sa izjavljenim preferencijama, od ljudi se zahteva da izjave svoje preferencije i te informacije se upotrebljavaju za dodeljivanje težinskih faktora. Sve „panel“ metode i monetarne metode su zasnovane na izjavljenim preferencijama. U metodama zasnovanim na otkrivenim preferencijama, preferencije otkrivene u različitim situacijama se koriste za izračunavanje težinskih faktora.

Dodeljivanje težinskih faktora u LCA je oduvek bio kontroverzan problem, delom jer zahteva primenu socijalnih, političkih i etničkih vrednosti (Finnveden i dr., 1997). Ove vrednosti nisu samo uključene prilikom izbora težinskih faktora, već i pri izboru metode za dodeljivanje težinskih faktora, kao i kod odlučivanja da li uopšte koristiti metode dodeljivanja težinskih faktora. Uprkos kontroverznosti, dodeljivanje težinskih faktora je široko primenjivano u praksi (Hansen, 1999).

Za pojedine metode kao što je Ekoindikator 99, moguće je predstaviti problem dodeljivanja težinskih faktora primenom trougla za dodeljivanje težinskih faktora (Hofstetter, 1998). U samom trouglu za dodeljivanje težinskih faktora ne mogu se menjati težinski faktori kategorija uticaja ali trougao se može primeniti za grafičko predstavljanje rezultata raznih kombinacija težinskih faktora. Svaka tačka u trougaonom grafiku predstavlja kombinaciju težinskih faktora čiji zbir uvek iznosi 100 %. Trouglom za dodeljivanje težinskih faktora moguće je odrediti u kojim uslovima je proizvod 1 bolji od proizvoda 2 (slika 4.8).



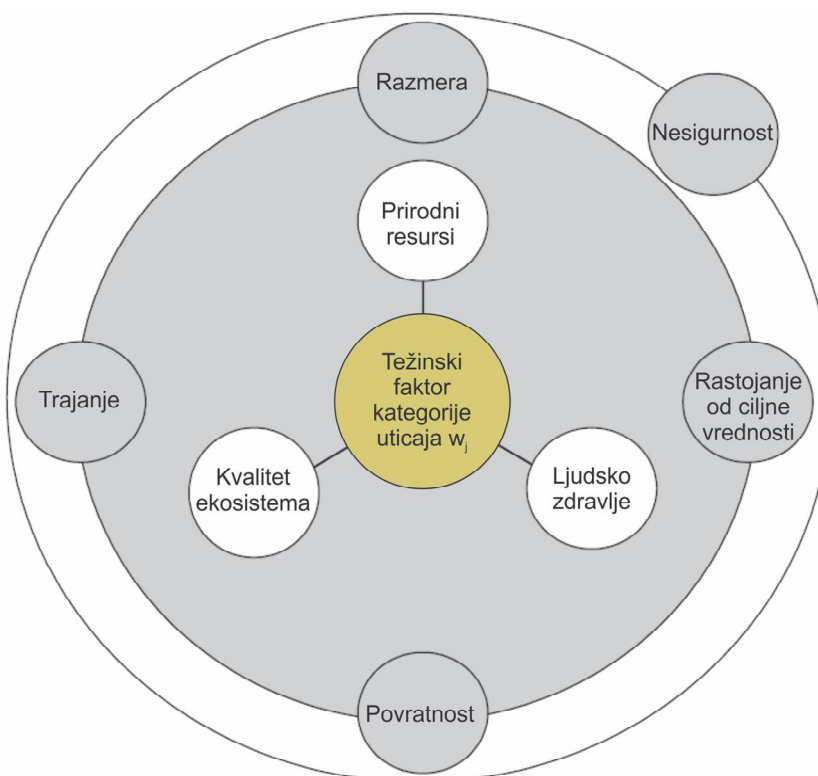
Slika 4.8. Primer dodeljivanja težinskih faktora kategorijama uticaja primenom trougla za dodeljivanje težinskih faktora (Hofstetter, 1998)

Ključna osobina trougla je linija jednakog uticaja (engl. line of indifference), koja prikazuje težinske faktore pod kojima proizvodi 1 i 2 imaju isto opterećenje životne sredine. Linija jednakog uticaja deli trougaoni grafik na površine gde proizvod 1 ima manji uticaj na životnu sredinu (slika 4.7, površina obojena crvenom bojom) od proizvoda 2 i obrnuto. Nedostatak trougla za dodeljivanje težinskih faktora je da on podržava vrednovanje samo tri kategorije uticaja na krajnjim pozicijama, tj. kategorije štete u metodi Ekoindikator 99 (ljudsko zdravlje, kvalitet ekosistema i prirodni resursi). Metode VKA omogućavaju da se odrede kategorije uticaja za neograničen broj

kriterijuma i stoga se mogu primeniti pri određivanju težinskih faktora kategorija uticaja na međupozicijama i krajnjim pozicijama.

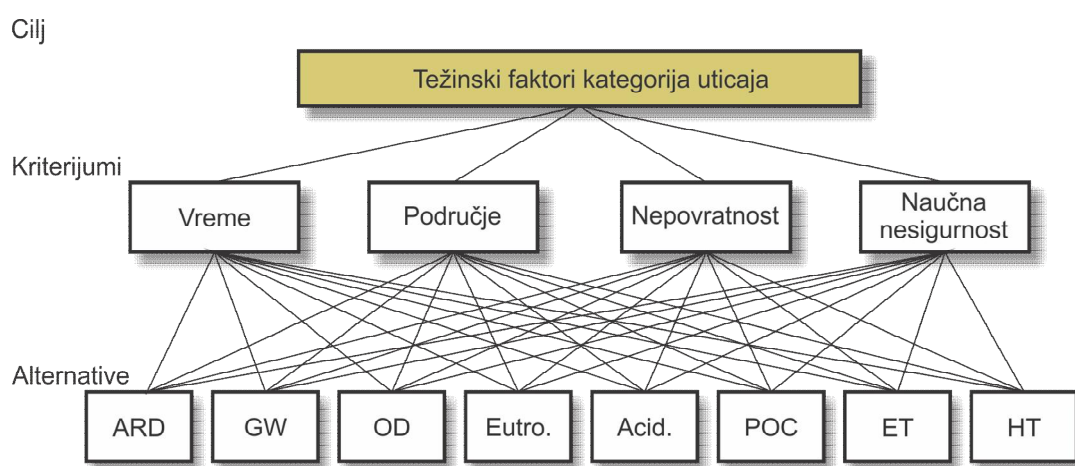
Soares i drugi (2006) razvili su metodu za određivanje težinskih faktora kategorija uticaja na nivou krajnjih pozicija u LCIA koja je zasnovana na pristupu ekspertske ocene u kombinaciji sa procedurom MCDM, i sastoji se iz tri koraka:

- Definisane kriterijuma za ocenu kategorija uticaja - za tri kriterijuma tj. za tri kategorije uticaja na nivou krajnjih pozicija (ljudsko zdravlje, kvalitet ekosistema i prirodni resursi), određuju se težinski faktori prema sledećim kriterijumima: razmera (geografskog područja), trajanje, povratnost i rastojanje od ciljne vrednosti;
- Ocenjivanje kriterijuma - svaki od kriterijuma ocenjuje se kvalitativnom ocenom sa šest vrednosti koje se nalaze u kvantitativnim intervalima 0-100. Relativna značajnost kriterijuma se izračunava primenom metode „*resistance to change*“. Za ovih šest vrednosti dodeljena je i odgovarajuća nesigurnost;
- Težinski faktori kategorija uticaja krajnjih pozicija – dobijaju se kroz proceduru VKA kao funkcija ocene značajnosti kategorije uticaja prema prethodno definisana četiri kriterijuma, težinski faktori i nesigurnosti vezani su za svaku kategoriju uticaja (slika 4.9).



Slika 4.9. Kriterijumi za dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja (Soares i dr., 2006)

Još jedan karakterističan primer primene VKA za dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja u LCIA, može se pronaći u Noh i Lee (2003). Cilj ove studije bio je predlog sistematičnog i jednostavnog metoda za određivanje težinskih faktora kategorija uticaja. Trajanje, područje, nepovratnost i naučna nesigurnost, odabrani su kao kriterijumi za izračunavanje značajnosti osam LCIA kategorija uticaja na nivou međupozicija koje se primenjuju u korejskoj ekoindikator metodi (slika 4.10). Tri MADM metode bile su primenjene sa ciljem određivanja težinskih faktora LCIA kategorija uticaja: AHP, „rank-order cetroid“ metoda i metoda sa fuzzy brojevima. Sve tri metode imaju svoje prednosti i nedostatke i može se zaključiti da su sve tri metode jednako primenljive za određivanje težinskih faktora LCIA kategorija uticaja jer su dale isti trend težinskih faktora.



ARD - Abiotička potrošnja resursa, GW - globalno zagrevanje, OD - smanjivanje ozonskog omotača, Eutro. - eutrofikacija, Acid. - zakišeljavanje, POC - formiranje fotohemijskih oksidanata, ET - ekotoksičnost i HT - toksičnost po ljude.

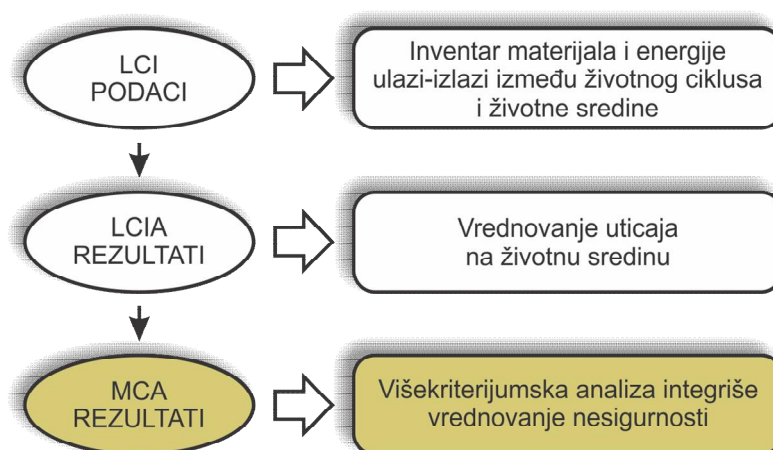
Slika 4.10. Hijerarhijska struktura za vrednovanje težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA (Noh i Lee, 2003).

Hermann i saradnici (2007) predstavili su analitički alat pod nazivom „Compliment“ koji se može koristiti za pružanje detaljnih informacija o ukupnom uticaju posla na životnu sredinu. „Compliment“ integriše delove alata kao što su LCA, VKA i EPI (engl. Environmental Performance Indicators). VKA je primenjena da bi se odredili težinski faktori za pet LCIA kategorija uticaja (globalno zagrevanje, zakišeljavanje, eutrofikacija, formiranje fotohemijskih oksidanata, toksičnost po ljude). Prilikom određivanja težinskih faktora kategorija uticaja, uzete su tri perspektive (globalna, regionalna, lokalna) za koje su primenom AHP određena tri skupa težinskih faktora kriterijuma. Na kraju je urađena analiza osetljivosti uticaja ulazne energije na konačni rezultat kategorija uticaja za tri slučaja kada se u ukupnoj energiji koristi 50, 75 i 95 % energije dobijene iz biomase.

Myllyviita i drugi (2012) opisali su proces vrednovanja uticaja dve alternativne sirovine na životnu sredinu i opisali procese i probleme vezane za ove alternative. Oni su primenili VKA u LCA za identifikovanje i dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja značajnim za vrednovanje uticaja proizvodnje biomase na životnu sredinu. Identifikovanje kategorija uticaja i dodeljivanje težinskih faktora urađeno je grupnim odlučivanjem finskih eksperata sa znanjem o uticaju proizvodnje biomase na životnu sredinu. Rezultati istraživanja su identifikovali probleme vezane za dodeljivanje težinskih faktora u LCA i pružili rešenja za unapređenje problematike dodeljivanja težinskih faktora u LCA.

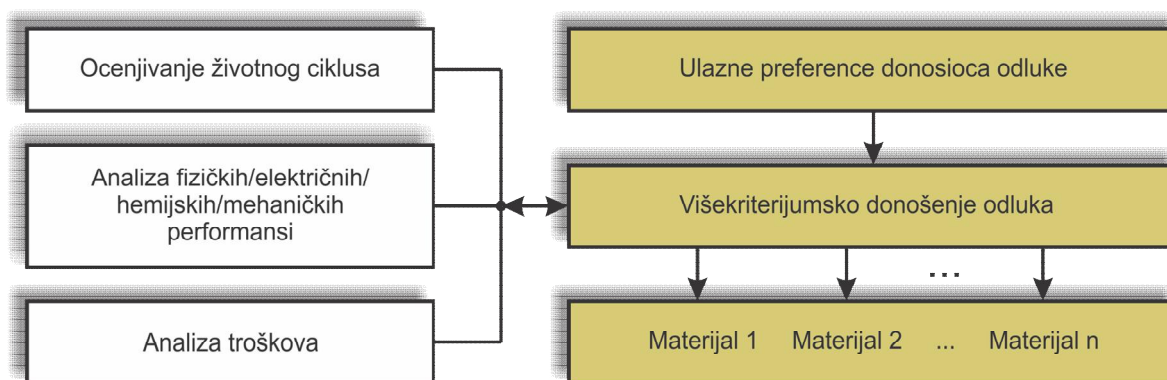
4.3.2 Primena višekriterijumske analize na rezultate ocenjivanja životnog ciklusa

VKA primenjena je na rezultate LCIA (Benetto i dr., 2008), na primeru vrednovanja šest različitih scenarija proizvodnje električne energije (dve vrste lokalnog uglja, dve vrste pomešanog goriva, uvozni ugalj i piljevina, uvozni ugalj), a za kriterijume vrednovanja uzeto je osam kategorija uticaja (slika 4.11). VKA urađena je modifikovanom fuzzy NAIADDE metodom koja je prilagođena primeni na rezultate LCA i koja omogućava vrednovanje nesigurnosti. Benetto i drugi (2008) prikazali su kako dobijeni rang scenarija i integracija rezultata nesigurnosti može doprineti usredsređivanju na kritične probleme LCA i može se koristiti za interpretaciju rezultata LCA, naročito u slučajevima kada rang scenarija nije u potpunosti konzistentan. Predloženi pristup može pomoći inženjerima, menadžerima i donosiocima odluka da reše probleme odlučivanja vezane za rezultate LCA.



Slika 4.11. Primena VKA na rezultate LCIA (Benetto i dr., 2008)

VKA u Milani i drugi (2011) izvršena je sa ciljem da bi se savladali problemi odlučivanja koji se često javljaju kod izbora odgovarajućih kompozitnih materijala, dok su rezultati LCIA korišćeni kao ulaz u VKA (slika 4.12). Primenom GaBi 4 softvera urađena je LCA analiza za tri faze životnog ciklusa: proizvodnja materijala, transport i odlaganje/reciklaža. VKA je rađena sa WSM (engl. Weighted Sum Method) za tri grupe kriterijuma (troškovi, mehaničke-termičke osobine i uticaj na životnu sredinu), za dva materijala: čistu PET plastiku i kompozitni materijal od 70% PET i 30% aluminijumskog praha. Na kraju rezultati VKA su testirani analizom osetljivosti u kojoj su varirani različiti skupovi težinskih faktora kriterijuma i razmatran je uticaj skupova težinskih faktora kriterijuma na konačni rezultat vrednovanja VKA.



Slika 4.12. Primena VKA kod izbora odgovarajućeg materijala (Milani i dr., 2011)

Integracija fuzzy logike u metodi PROMETHEE je preporučena (Geldermann i dr., 2000) sa ciljem primene VKA na rezultate LCA. Predloženi pristup je demonstriran na primeru vrednovanja uticaja četiri tehnike sinterovanja u čeličnoj industriji na životnu sredinu. Kriterijumi VKA su bili osam kategorija uticaja: formiranje fotohemijskih oksidanata, nitrifikacija, zakišeljavanje, toksičnost po ljude, ekotoksičnost-vazduh, ekotoksičnost-voda, opasan otpad, zaštita pomorskog okruženja i podaci iz inventara potrošnja fosilne i električne energije. Predložena je upotreba fuzzy brojeva za težinske faktore kategorija uticaja jer postojeći težinski faktori uticajnih kategorija predstavljaju grubu aproksimaciju stvarnih uticaja emisija na životnu sredinu. S obzirom na to da se analiza osetljivosti zahteva za rezultate LCA prema ISO 14040, na kraju je urađena analiza osetljivosti menjanjem prvobitnih težinskih faktora kategorija uticaja i posmatranjem promene ranga alternativa (tehnologije sinterovanja).

Višekriterijumskom analizom vrednovani su rezultati LCIA u Rogers i Seager (2009). LCA urađeno je metodom TRACI, razvijenom od strane U.S. EPA (Bare i dr., 2003). Opisan je novi pristup nazvan SMA-LCIA (engl. Stochastic MultiAttribute Life

Cycle Impact Assessment), koji kombinuje pristup rangiranja sa normalizacijom i stohastičnim pristupom dobijanja težinskih faktora, koji omogućuje da se istraži ceo prostor vrednosti težinskih faktora, čime se izbegavaju pojedini nedostaci postojećih metoda LCIA. Rezultati SMA-LCIA pristupa, upoređeni su sa rezultatima metode TRACI na primeru vrednovanja pet alternativa (pet vrsta goriva: benzin, dizel sa niskim sadržajem sumpora, sojin biodizel, električna energija za automobile na električni pogon i etanol na bazi kukuruza), prema šest TRACI kategorija uticaja na nivou srednjih tačaka (potrošnja fosilnih goriva, potencijal globalnog zagrevanja, potencijal eutrofikacije, potencijal nastanka fotohemijskog smoga).

4.3.3 Ostali pristupi primene višekriterijumske analize sa ocenjivanjem životnog ciklusa

Metode višeciljnog odlučivanja su primenjene u LCA u radovima Azapagic i Clift (1999a) i Wang i dr. (2013). Azapagic i Clift (1999a) predložili su rešavanje problema alokacije u LCA primenom modela linearnog programiranja (LP), gde su alokacioni koeficijenti jednaki marginalnim vrednostima izračunatim LP modelom. Wang i drugi (2013) predložili su model superstrukture sa višeciljnim nelinearnim programiranjem za optimizaciju ugljovodoničnih biorafinerija preko ekonomskih kriterijuma i kriterijuma zaštite životne sredine. Oni su predstavili pristup optimizacije životnog ciklusa koji integriše višeciljnu superstrukturu sa ocenjivanjem životnog ciklusa i tehn-ekonomskom analizom biorafinerije ugljovodonika.

Za primenu VKA u LCA potrebno je odabrati odgovarajuću metodu VKA. U radu (Rowley i Peters, 2009), autori navode da SAW, koji se primenjuje u metodi Ekoindikator 99 i softverima SimaPro (Pre-sustainability, 2014a, 2014b) i GaBi (GaBi-software, 2014), nije najbolja metoda za agregaciju uticaja životnog ciklusa. Za agregaciju uticaja na životnu sredinu u LCA pomenuti autori predlažu sofisticiranije metode zasnovane na složenijim MCDM, kao što su AHP, ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS itd. Prilikom uporednog vrednovanja uticaja na životnu sredinu potrebno je oceniti globalni uticaj na životnu sredinu u životnom ciklusu. Da bi se ocenio globalni uticaj na životnu sredinu neophodno je modelirati uticaje na životnu sredinu i primeniti VKA prema Benoit i Rousseaux (2003). Cilj studije (Benoit i Rousseaux, 2003) je bio da se pomogne korisniku metode LCA da odabere najprikladniju metodu VKA. Prilikom izbora najprikladnije metode VKA, metode VKA su vrednovane prema stepenu

kompensacije, osetljivosti prema graničnim vrednostima, kao i izvodljivosti i upotrebljivosti VKA.

Sve metode klasifikacije koriste uticajne kategorije, a najčešće se koriste tri glavne koje određuju uticaj na: resurse, kvalitet ekosistema i ljudsko zdravlje. Često su ove tri kategorije uticaja podeljene na nekoliko potkategorija koje se mogu razlikovati u zavisnosti od primenjene metode LCIA. Da bi se izabrala odgovarajuća familija kategorija uticaja na životnu sredinu za klasifikaciju u LCA, Chevalier i Rousseaux (1999) su predložili listu od deset neophodnih pravila koje treba ispoštovati.

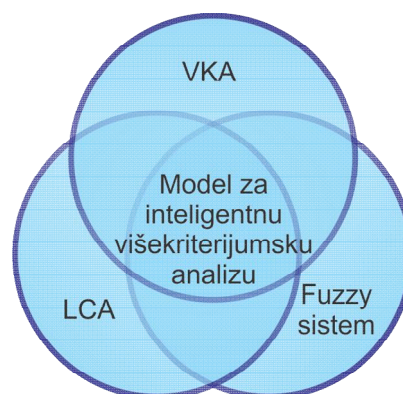
Güereca i saradnici (2007) postavili su novu metodu za vrednovanje u LCA, koja omogućava uključivanje nesigurnosti i subjektivnosti koje su prisutne u procesima normalizacije i dodeljivanja težinskih faktora. Predložena metoda omogućava definisanje normalizacije i dodeljivanje težinskih faktora sa matematičko podržanim pristupom. Matematičko podržani pristup koristi fuzzy skupove sa skalom od jedanaest termina koja omogućava rangiranje performansi alternativa prema stepenu pripadnosti.

5. RAZVOJ SISTEMA ZA VIŠEKRITERIJUMSKU PROCENU OPTEREĆENJA ŽIVOTNE SREDINE KOD OCENJIVANJA ŽIVOTNOG CIKLUSA

U okviru ovog poglavlja predstavljen je razvijen sistem za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa. U prvom delu poglavlja predstavljen je razvijeni model za inteligentnu višekriterijumsku analizu, a drugi deo sadrži detaljan opis programskog sistema realizovanog na bazi modela iz prvog dela poglavlja. Posebna pažnja je posvećena inovativnom pristupu za dodeljivanje težinskih faktora i kombinovanje subjektivnih i objektivnih težinskih faktora.

5.1 Razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu

Na osnovu analize literature u prethodnim poglavljima, razvijene su odgovarajuće podloge neophodne za razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku analizu za procenu opterećenja životne sredine, kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa. Osnovni okvir za razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu bazira na primeni VKA, LCA i fuzzy sistema (slika 5.1).



Slika 5.1. Osnovni okvir za razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu

Prilikom razvoja modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu, na osnovu postavljenih ciljeva i pripremljenih literaturnih podloga iz prethodnih poglavlja, pošlo se od sledećih zahteva koje programski sistem treba da omogući:

- primenu više različitih metoda za MCDM i za dodeljivanje težinskih faktora,
- primenu fuzzy logike za integrisanje težinskih faktora kriterijuma,
- podršku prilikom vrednovanja težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA,
- odgovarajući grafički prikaz za slučaj vrednovanja lokaliteta određenog geografskog područja,
- jednostavno i korisnički intuitivno okruženje pri interakciji korisnika sa programskim sistemom,
- univerzalnost i fleksibilnost da bi mogao da obezbedi rešavanje različitih problema VKA.

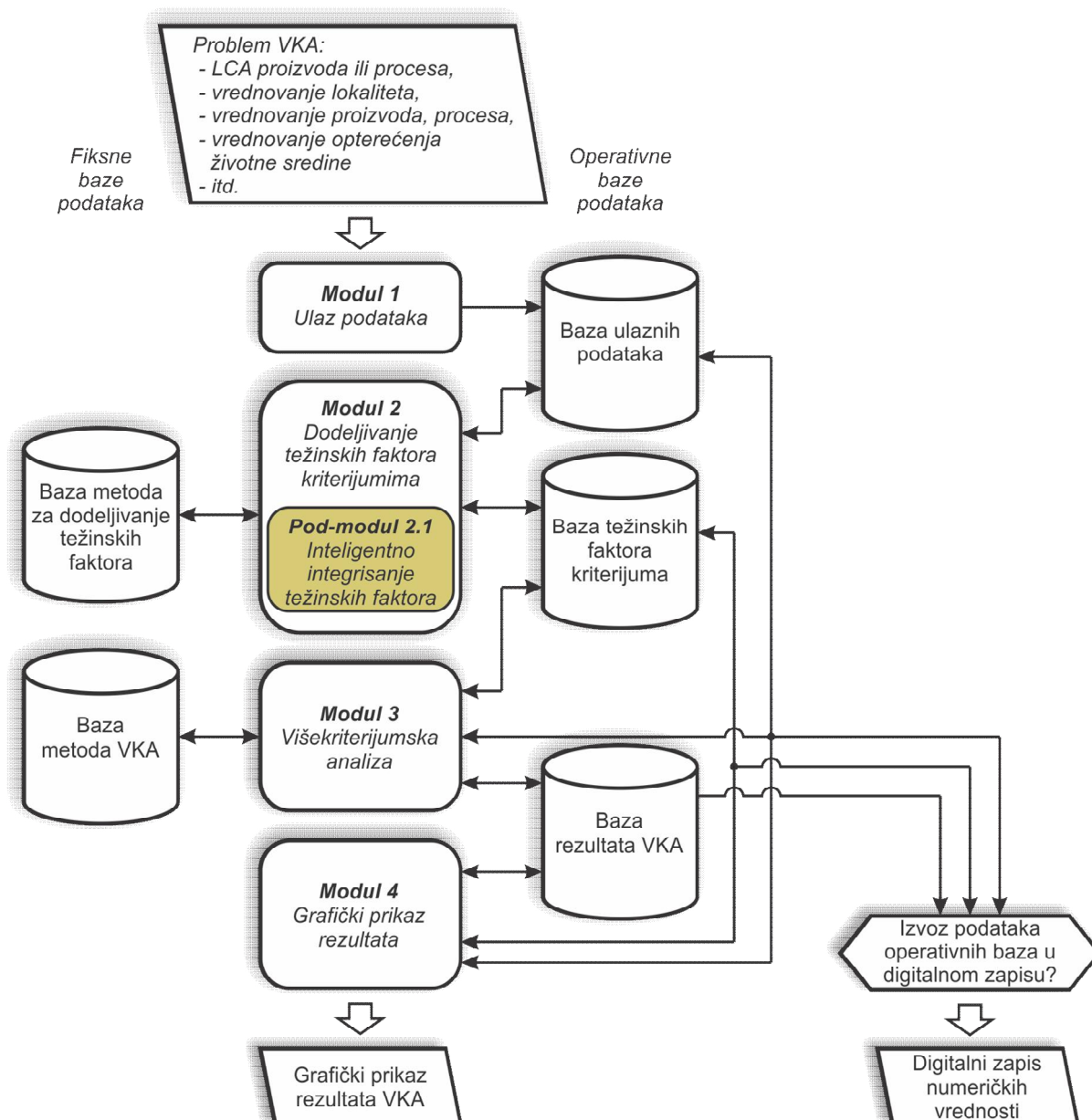
Model za inteligentnu višekriterijumsku analizu je modularne strukture i sastoji se od četiri modula (slika 5.2):

1. modul za unos podataka,
2. modul za dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma,
 - pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora,
3. modul za višekriterijumsku analizu,
4. modul za grafički prikaz rezultata.

Navedeni moduli su međusobno povezani sa pet baza podataka (slika 5.2) koje su grupisane u:

1. Fiksne baze podataka koje se ne menjaju prilikom primene IMCAT (engl. Intelligent MultiCriteria Analysis Tool) sistema: baza metoda za dodeljivanje težinskih faktora i baza metoda VKA;
2. Operativne baze podataka koje se menjaju u zavisnosti od unosa ulaznih podataka i izračunavanja rezultata VKA: baza ulaznih podataka, baza težinskih faktora kriterijuma i baza rezultata VKA.

Fiksne baze podataka metoda za dodeljivanje težinskih faktora i metoda VKA osmišljene su tako da mogu da se dopunjuju dodavanjem novih metoda. U cilju lakšeg razumevanja funkcionisanja modela, dijagram toka na slici 5.2 prikazuje međusobni odnos modula i baza podataka kod modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu.



Slika 5.2. Međusobni odnos modula i baza podataka u okviru modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu

Modul za ulaz podataka omogućava unos svih potrebnih podataka za rešavanje problema VKA u bazu ulaznih podataka:

- matrice performansi,
- tipa kriterijuma,
- koordinata lokaliteta (opciono),
- mape područja (opciono).

Modul za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima omogućava izračunavanje objektivnih, subjektivnih i integrisanih težinskih faktora kriterijuma izborom odgovarajuće

metode iz baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora. Prilikom izračunavanja objektivnih težinskih faktora iz baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora, mogu se odabrati metode: entropije, standardne devijacije, korelacije i CRITIC, koje su istim redom opisane u poglavljima 3.2.2, 3.3.1 i 3.2.3. Subjektivni težinski faktori mogu se dobiti izborom metoda direktnog dodeljivanja težinskih faktora, Fulerovim trouglom i AHP (detaljniji opis ovih metoda dat je u delu 2.2.3. i 3.1.) iz baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora. Integrisani težinski faktori mogu se dobiti metodom redukcionih koeficijenata i primenom pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora, detaljnije je opisano u poglavlju 5.1.1.

Modul za višekriterijumsku analizu pruža mogućnost izbora jedne od pet metoda VKA (SAW, TOPSIS, AHP, PROMETHEE i CP) iz baze metoda VKA. Ovih pet metoda spadaju u grupu višeatributnog odlučivanja i pokrivaju sve tri grupe višeatributnog odlučivanja (metode korisnosti, kompromisa i rangiranja). Detaljniji opis ovih metoda dat je u delu 2.0.

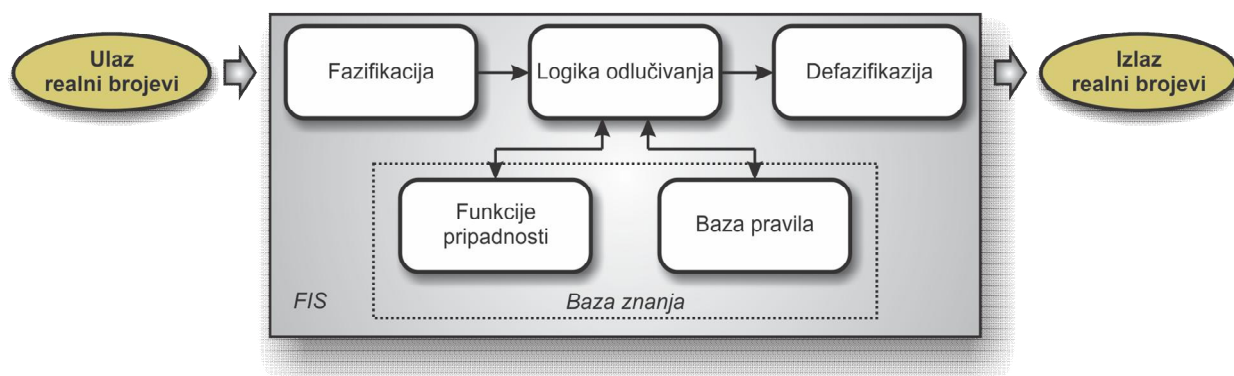
Modul za grafički prikaz rezultata daje prikaz težinskih faktora kriterijuma i ranga alternativa preko histograma. Pored ovih grafika, normalizovana matrica performansi može se prikazati polarnim dijagramom, a za slučaj vrednovanja lokaliteta na nekom području modul omogućuje trodimenzionalni prikaz gde je vrednost opterećenja životne sredine za svaki lokalitet označena odgovarajućom visinom stubaca grafika (slika 5.36) Z ose.

5.2 Pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora

Fuzzy logika predstavljena je šezdesetih godina XX veka (Zadeh, 1965) i pojednostavljuje proces donošenja odluka simuliranjem razmišljanja eksperta u okruženju koje karakteriše nesigurnost i nepreciznost. Fuzzy logika se često primenjuje u sistemima veštačke inteligencije koji služe za razvijanje inteligentnih mašina i programa. Ideja fuzzy logike jeste da element može delimično pripadati u više podskupova, za razliku od Bulove logike gde element može pripadati ili ne pripadati. Stepenn pripadanja elementa fuzzy skupu označava se vrednošću od 0 do 1. (Gonzalez i dr., 2002)

Fuzzy logika se primenjuje pri sastavljanju fuzzy kontrolera (engl. Fuzzy Inference System – FIS, slika 5.3), koji uspostavljaju vezu između ulaznih i izlaznih varijabli (Gonzalez i dr., 2002). Veliki pomak u odnosu na klasične matematičke modele nalazi

se u činjenici da odnos nije određen kompleksnim matematičkim jednačinama, već skupom logičkih pravila u koje je pretočeno razmišljanje i iskustvo eksperta.



Slika 5.3. Opšta blok šema fuzzy kontrolera

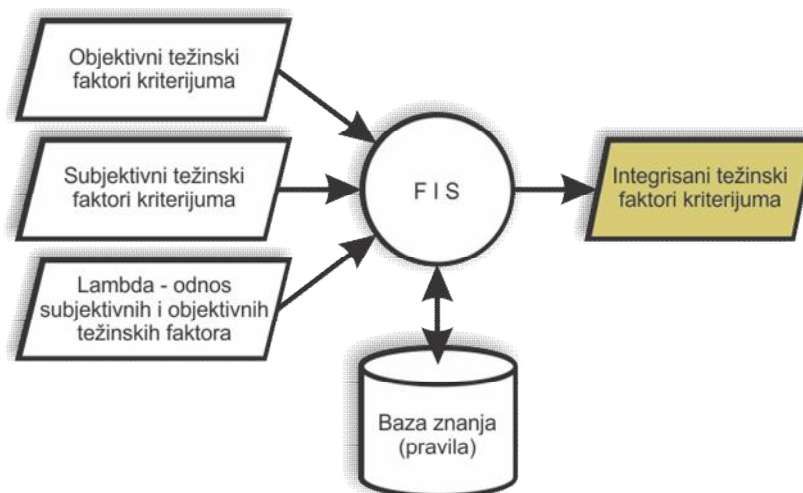
Baza pravila sastoji se od kombinacija-uzroka (engl. „antecedent“) ulaznih varijabli međusobno povezanih logičkim operatorima („i“, „ili“, „ne“) i izlaznih posledica (engl. „consequent“) koje predstavljaju stepen ostvarivanja izlaznih funkcija pripadnosti. Kada se definišu funkcije pripadnosti i baza pravila, fuzzy kontroler (slika 5.3) funkcioniše prema sledećim koracima:

1. Fuzzy-fikacija – prvi korak jeste pretvaranje svake vrednosti realnih brojeva ulaznih varijabli u fuzzy varijable u zavisnosti od stepena pripadanja odgovarajućim ulaznim funkcijama pripadnosti;
2. Agregacija uslovnih iskaza – agregacija ulaznih funkcija pripadnosti prema zadatoj ulaznoj varijabli i logičkim operatorima, gde se koriste različite metode agregacije da bi se dobio jedan ukupan stepen pripadnosti ulaza;
3. Zaključivanje (engl. inferencing): iz ukupnog stepena pripadnosti ulaza, može se izvesti funkcija pripadnosti izlaznih posledica. Mehanizam za zaključivanje određuje koja pravila su relevantna za trenutno stanje sistema i za odlučivanje logičkim sklopom kakav će biti signal izlaza na osnovu upravljačkih signala ulaza tako da mogu biti pravilno protumačeni. Razlikuju se dva procesa zaključivanja ulaznih uslovnih iskaza ka posledicama: Mamdani i Sugeno;
4. Agregacija posledica: s obzirom da nekoliko pravila mogu uticati na istu izlaznu varijablu, neophodno je odabrati odgovarajući način za agregaciju funkcija pripadnosti dobijenih u zaključku svih pravila. Najčešće metode su SUM (nudi konačnu funkciju pripadnosti kao sumu funkcija dobijenih nakon zaključka svih pravila), MAX (nudi funkciju koja uzima svaku tačku izlaza, maksimalnu vrednost dobijenu po svakoj funkciji pripadnosti) i PROBOR (slično SUM, ali pruža sumu

vrednosti dobijenih iz svake izlazne varijable umanjenu za krajnji rezultat množenja izlaznih varijabli);

5. Defuzzyfikacija – na kraju, primenjuje se metoda za pretvaranje funkcija pripadnosti dobijenih u prethodnom koraku u realne (engl. crisp) brojeve. Metode defuzzyfikacije uzimaju izlaznu vrednost u zavisnosti od minimuma, srednje vrednosti i maksimuma funkcija pripadnosti. Najčešće korišćena metoda je centroid, koji izlaznu vrednosti x dobija preko koordinata težišta površine između funkcije i x ose. Kroz proces defuzzyfikacije se transformiše zaključak fuzzy kontrolera iz fuzzy u realan broj.

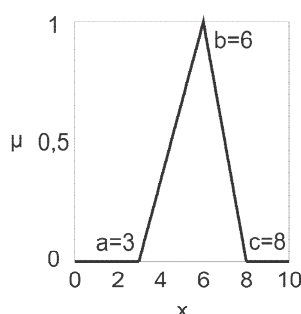
Osnovna ideja pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora zasnovana je na kombinovanju objektivnih i subjektivnih težinskih faktora prema pristupu opisanom u Jahan i Edwards (2013). Pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora omogućava donosiocu odluke da svoje subjektivne preferencije značajnosti kriterijuma koriguje objektivnim težinskim faktorima kriterijuma. Pored mogućnosti kombinovanja subjektivnih i objektivnih težinskih faktora, ukoliko postoje referentni (podrazumevani ili prethodno izračunati) težinski faktori za specifičan slučaj višekriterijumskog vrednovanja, predloženi pristup omogućuje da se isti koriste umesto objektivnih i na taj način da se kombinuju sa subjektivnim težinskim faktorima. U okviru ovih istraživanja je, polazeći od pristupa (Jahan i Edwards, 2013), razvijen inteligentni sistem, na bazi fuzzy logike koji karakteriše inovativni pristup modeliranja težinskih faktora kriterijuma. Blok šema pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora prikazana je na slici 5.4.



Slika 5.4. Pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora

Zbog jednostavnosti, funkcije pripadnosti trougaonog oblika su odabrane za sve varijable (grafik 5.1). U svom opštem obliku trougaone funkcije pripadnosti definisane su (Kukolj, 2007):

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}. \quad (5.1)$$



Grafik 5.1. Trougaona funkcija pripadnosti

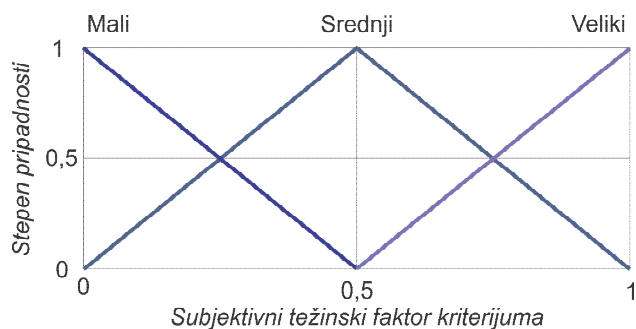
Prema slici 5.4, pod-modul predstavlja fuzzy kontroler sa tri ulaza i jednim izlazom. Ulazi su: objektivni, subjektivni težinski faktori i odnos subjektivnih i objektivnih težinskih faktora kriterijuma (lambda parametar), a izlaz su integrisani težinski faktori kriterijuma. Realni brojevi ulaza imaju interval [0-1], a vrednosti su fuzzy-fikovane tako da ulaz ima tri funkcije pripadnosti: mala, srednja, velika (grafik 5.2, 5.3 i 5.4). Izlaz, integrisani težinski faktori kriterijuma, ima „finiju rezoluciju“ sa pet funkcija pripadnosti: veoma mala, mala, srednja, velika i veoma velika (grafik 5.5), a defuzzy-fikacijom se prevodi na realni broj iz intervala [0-100] koji se zatim normalizacijom prevodi u vrednost raspona [0-1], kako bi zbir svih težinskih faktora kriterijuma bio jednak „1“:

$$w_{j,INTEG} = \frac{w_{j,FI}}{\sum_{j=1}^m w_{j,FI}}, \quad 0 < w_{j,INTEG} < 1, \quad \sum_{j=1}^m w_{j,INTEG} = 1, \quad (5.2)$$

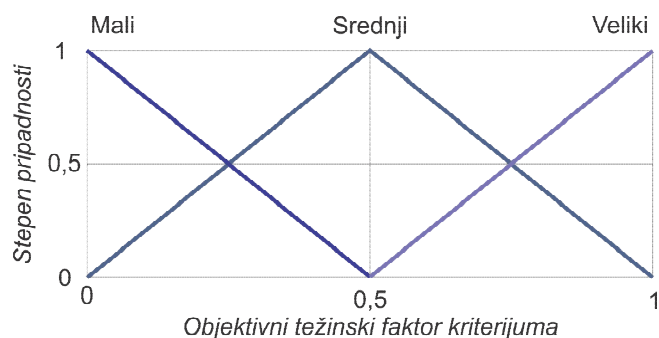
gde je:

$w_{j,INTEG}$ - integrisani težinski faktori kriterijuma sa rasponom [0-1],

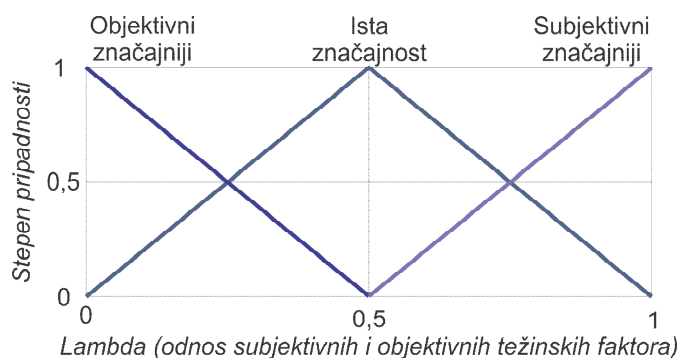
$w_{j,FI}$ - integrisani težinski faktori kao izlaz iz FIS-a sa rasponom [0-100].



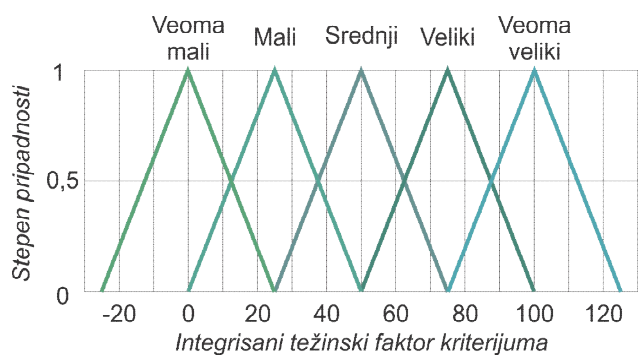
Grafik 5.2. Funkcije pripadnosti za ulaz: Subjektivni težinski faktori



Grafik 5.3. Funkcije pripadnosti za ulaz: Objektivni težinski faktori



Grafik 5.4. Funkcije pripadnosti za ulaz: Lambda



Grafik 5.5. Funkcije pripadnosti za izlaz: Integrisani težinski faktori

Vrednost lambda parametara određuje odnos značajnosti subjektivnih i objektivnih težinskih faktora. Ukoliko lambda ima vrednost „0“ objektivni težinski faktori kriterijuma

su apsolutno značajniji, a vrednost subjektivnih se zanemaruje i obrnuto, ako je lambda „1“, subjektivni težinski faktori su značajniji, a objektivni se zanemaruju. Primenom lambda parametra donosioc odluke može da iskaže svoju nesigurnost: male vrednosti lambda mogu koristiti donosioci odluke sa manje iskustva, a veće vrednosti lambda odgovaraju ekspertima sa većim znanjem, iskustvom i donosiocima odluke koji su sigurni u dodeljene subjektivne težinske faktore.

Pored osnovne mogućnosti integrisanja subjektivnih i objektivnih težinskih faktora, predloženi pristup za inteligentno integrisanje težinskih faktora može se primeniti i na integrisanje subjektivnih težinskih faktora dva donosioca odluke, ili za integrisanje objektivnih težinskih faktora dobijenih primenom dve metode. U slučaju integrisanja subjektivnih težinskih faktora dva donosioca odluke, lambda parametar određuje značajnost jednog donosioca odluke u odnosu na drugog, tj. od kojeg donosioca odluke su preferencije značajnije za formiranje integrisanih težinskih faktora.

Inovativni pristup modeliranja težinskih faktora zasnovan je na mogućnosti da se ulazne funkcije pripadnosti za subjektivne i objektivne težinske faktore menjaju u zavisnosti od broja kriterijuma. Ovakav pristup zasnovan je na metodi srednjih vrednosti težinskih faktora (poglavlje 3.2.1) i činjenici da je najveća verovatnoća da će težinski faktor kriterijuma biti blizak srednjoj vrednosti: $w = 1/m$, gde je m broj kriterijuma. Prema prethodnom, ulazne funkcije pripadnosti za subjektivne i objektivne težinske faktore imaće stepen pripadnosti „1“ za vrednost kriterijuma „0“ – mali težinski faktor (jednačina 5.4), „ $1/m$ “ – srednji težinski faktor (jednačina 5.5) i „1“ veliki težinski faktor (jednačina 5.6). Tako, na primer, za 5 kriterijuma srednja vrednost težinskih faktora iznosi 0,2 i funkcije pripadnosti bi imale oblik kao na grafiku 5.6a, dok za 10 kriterijuma srednja vrednost težinskih faktora bi bila 0,1 i funkcije pripadnosti bi izgledale kao na grafiku 5.6b i tako dalje.

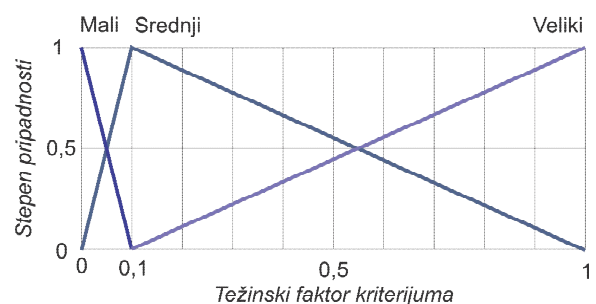
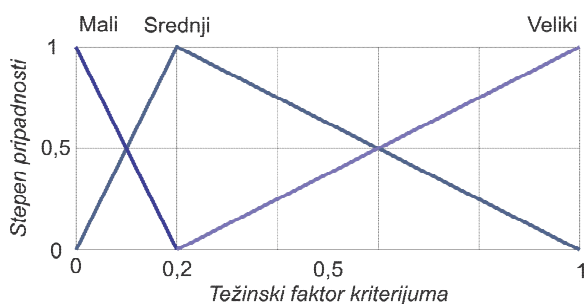
$$b = \frac{1}{m}, \quad (5.3)$$

gde je m broj kriterijuma.

$$\mu_{mali}(x;0,0,b) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq 0 \\ \frac{b-x}{b}, & 0 \leq x \leq b \\ 0, & b \leq x \end{array} \right\}. \quad (5.4)$$

$$\mu_{srednji}(x;0,b,1) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{b}, & 0 \leq x \leq b \\ \frac{1-x}{1-b}, & b \leq x \leq 1 \\ 0, & 1 \leq x \end{cases}. \quad (5.5)$$

$$\mu_{veliki}(x;b,1,1) = \begin{cases} 0, & x \leq b \\ \frac{x-b}{1-b}, & b \leq x \leq 1 \\ 0, & 1 \leq x \end{cases}. \quad (5.6)$$



a) Funkcije pripadnosti za 5 kriterijuma;

b) Funkcije pripadnosti za 10 kriterijuma

Grafik 5.6. Funkcije pripadnosti za subjektivne i objektivne težinske faktore za različit broj kriterijuma

Baza pravila modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora data je tabelom 5.1. Mehanizam fuzzy zaključivanja u pod-modulu za inteligentno integrisanje težinskih faktora zasnovan je na Mamdani metodi koja koristi minimum operacije, tj. minimum preseka da bi se formirala fuzzy funkcija. Mamdani metoda grafički je prikazana na slici 5.5. Rezultat implikacije primenom Mamdani metoda, primenom *i*-tog pravila, može se predstaviti (Kukulj, 2007):

Pi: ako x je A_i i y je B_i tada z je C_i

što je u opštem obliku predstavljeno jednačinom 5.7:

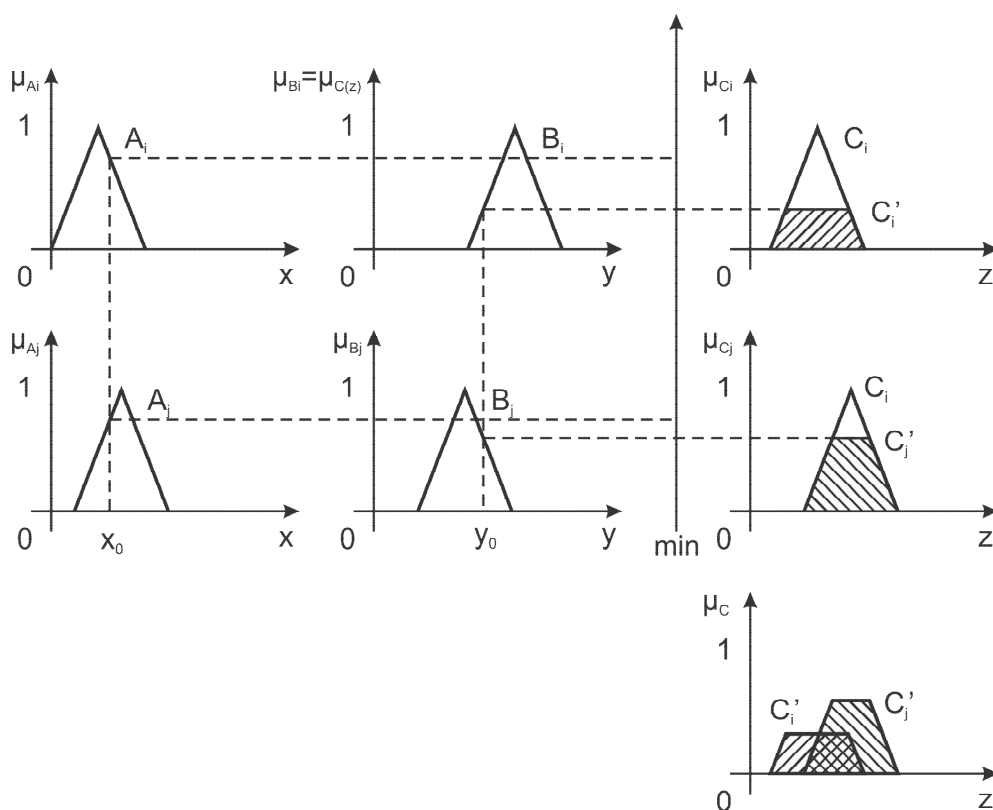
$$\mu_{C_i}(z) = w_i \wedge \mu_{C_i}(z), \quad (5.7)$$

gde je w_i intenzitet izvođenja *i*-tog pravila i predstavlja nivo uključenosti *i*-tog pravila u generisanju kontrolne akcije:

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y) \quad (5.8)$$

Tabela 5.1. Baza pravila modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora

Pravilo br.	Lambda	Subjektivni težinski faktori	Objektivni težinski faktori)	Integrirani težinski faktori
1.	Objektivni značajniji	-	Mali	Veoma mali
2.	Objektivni značajniji	-	Srednji	Srednji
3.	Objektivni značajniji	-	Veliki	Veoma veliki
4.	Ista značajnost	Mali	Mali	Veoma mali
5.	Ista značajnost	Mali	Srednji	Mali
6.	Ista značajnost	Mali	Veliki	Srednji
7.	Ista značajnost	Srednji	Mali	Mali
8.	Ista značajnost	Srednji </td <td>Srednji</td> <td>Srednji</td>	Srednji	Srednji
9.	Ista značajnost	Srednji	Veliki	Veliki
10.	Ista značajnost	Veliki	Mali	Srednji
11.	Ista značajnost	Veliki	Srednji	Veliki
12.	Ista značajnost	Veliki	Veliki	Veoma veliki
13.	Subjektivni značajniji	Mali	-	Veoma mali
14.	Subjektivni značajniji	Srednji	-	Srednji
15.	Subjektivni značajniji	Veliki	-	Veoma veliki



Slika 5.5. Grafički prikaz Mamdani metode zaključivanja (Kukolj, 2007)

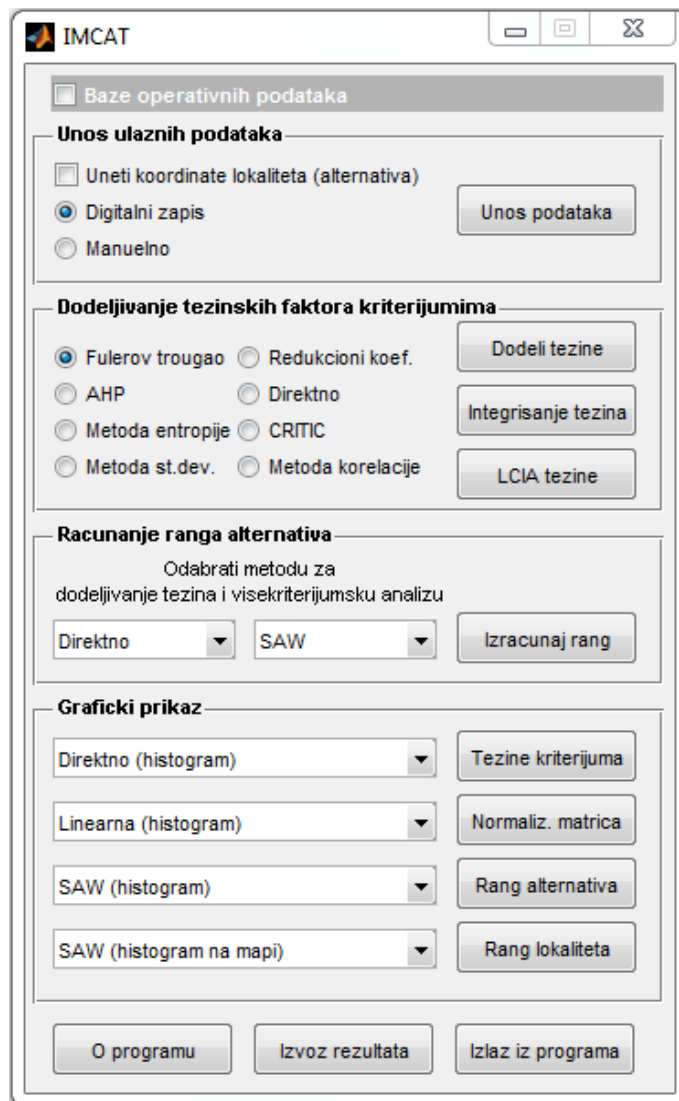
5.3 Programski sistem

Programski sistemi za višekriterijumsku analizu služe kao podrška donosilacu odluke u različitim fazama strukturisanja i rešavanja kompleksnih višekriterijumskih problema, kao i u radu sa velikim brojem informacija. Postoji veliki broj pristupa za rešavanje problema višekriterijumskog odlučivanja i programskih sistema za iste. Sistematičan pregled razvijenih programskih sistema za višekriterijumsku analizu može se naći u Figueira i drugi (2005), Srđević i drugi (2007). Treba napomenuti da je veći broj ovih programskih sistema eksperimentalan i služi za testiranje algoritama za rešavanje specifičnih problema.

Programski sistem, u okviru ovih istraživanja, razvijen je prema modelu za inteligentnu višekriterijumsku analizu predstavljenom u prethodnom poglavlju. Sistem je razvijen u Matlab programskom okruženju (verzija R2010a) (Mathworks, 2014). Matlab je odabran jer omogućava efikasan rad sa matricama i vektorima, a što je važno za primenu u oblasti VKA. Matlab se može definisati i kao softverski sistem i kao programski jezik, s obzirom da je okarakterisan osobinama i jedne i druge grupe. Sastavni deo Matlab-a su toolbox-ovi, koji predstavljaju biblioteke funkcija i kolekcije alata usko specijalizovane namene. Važan segment Matlab-a jeste aplikacijski programski interfejs (engl. application program interface), preko kojeg se ostvaruje veza sa programskim jezicima C i Fortran (Mathworks, 2014). Razvoj programskog rešenja izvršen je preko Matlab-ovih M datoteka (funkcija) - tekstualne datoteke sa nizom komandi u Matlab programskom jeziku. Realizovan programski sistem za procesiranje podataka zasnovan je na GUI pristupu. Programski sistem sastoji se iz osnovne GUI M-funkcije preko koje se pozivaju pomoćne M-funkcije. Na slici 5.6 prikazan je segment osnovne GUI M-funkcije.

Realizovani programski sistem nazvan je kao IMCAT i označava alat za inteligentnu višekriterijumsku analizu. IMCAT program sastoji se iz glavnog dijalog okvira (slika 5.7) i pomoćnih dijalog okvira zasnovanih na četiri modula koji služe za unos ulaznih podataka, dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma, višekriterijumsku analizu kao i za grafički prikaz rezultata VKA. Glavni dijalog okvir sastoji se iz pet panela:

1. panel operativnih podataka,
2. panel za unos ulaznih podataka,
3. panel za dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma,
4. panel za računanje ranga alternativa,



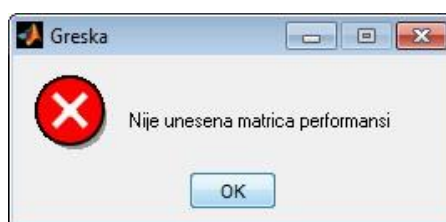
Slika 5.7. Glavni dijalog okvir razvijenog programskog sistema IMCAT

U krajnjem donjem delu glavnog dijalog okvira nalaze se opcije (realizovane u obliku dugmadi) „O programu“, „Izvoz rezultata“ i „Izlaz iz programa“. Opcija „O programu“ sadrži korisničko uputstvo u obliku PDF (engl. Portable Document Format) dokumenta sa opisom IMCAT programa čime se pruža pomoć korisnicima. Opcijom „Izvoz rezultata“ svi izračunati rezultati (težinski faktori kriterijuma, rang alternativa, normalizovane matrice itd.) se izvoze u obliku digitalnog zapisa (MS Excel dokumenta), čime je korisniku omogućeno da dobijene rezultate koristi u drugim računarskim aplikacijama.

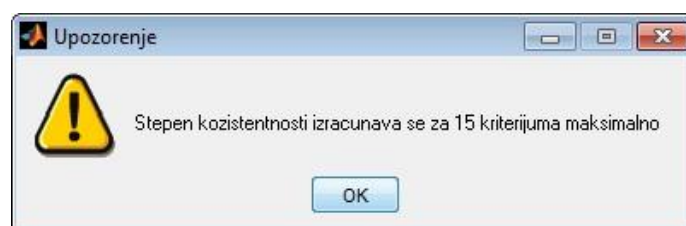
IMCAT sadrži sisteme za proveru ulaznih podataka i odluka korisnika, i obaveštava ga o vrsti greške ili u vidu upozorenja u slučaju da:

- nije uneta matrica performansi (slika 5.8) ili koordinate lokaliteta,

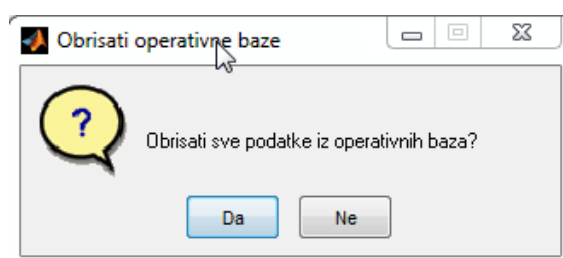
- su uneti podaci u obliku u kom se ne mogu dalje obrađivati, tj. na mestu gde se zahteva unos celog broja unese karakter (slovo, zarez, tačku itd.) koji nije broj ili decimalni broj,
- se bez prethodno izračunatih težinskih faktora kriterijuma pokuša izračunati rang alternativa ili pokrene opcija u panelu za grafički prikaz normalizovane matrice performansi pre nego što je ista izračunata,
- se pokušaju izračunati težinski faktori kriterijuma primenom metode entropije, a da se u matrici performansi nalaze jedan ili više vrednosti sa nulama,
- je pokrenut grafički prikaz polarnog dijagrama za manje od tri kriterijuma gde su za iscrtavanje dijagrama potrebne barem tri ose,
- se vrednuje više od 15 kriterijuma, kod AHP stepen konzistentnosti se ne može izračunati (slika 5.9); težinski faktori se i dalje mogu odrediti primenom AHP,
- se kod integracije težinskih faktora izaberu dve iste metode,
- pokrene opcija „Obrisi sve“ u panelu liste rezultata ili „Izlaz iz programa“ aktivira se dijalog okvir koji proverava da li je korisnik siguran u svoju odluku (slika 5.10).



Slika 5.8. Primer greške ako prilikom unosa ulaznih podataka nije unesena matrica performansi



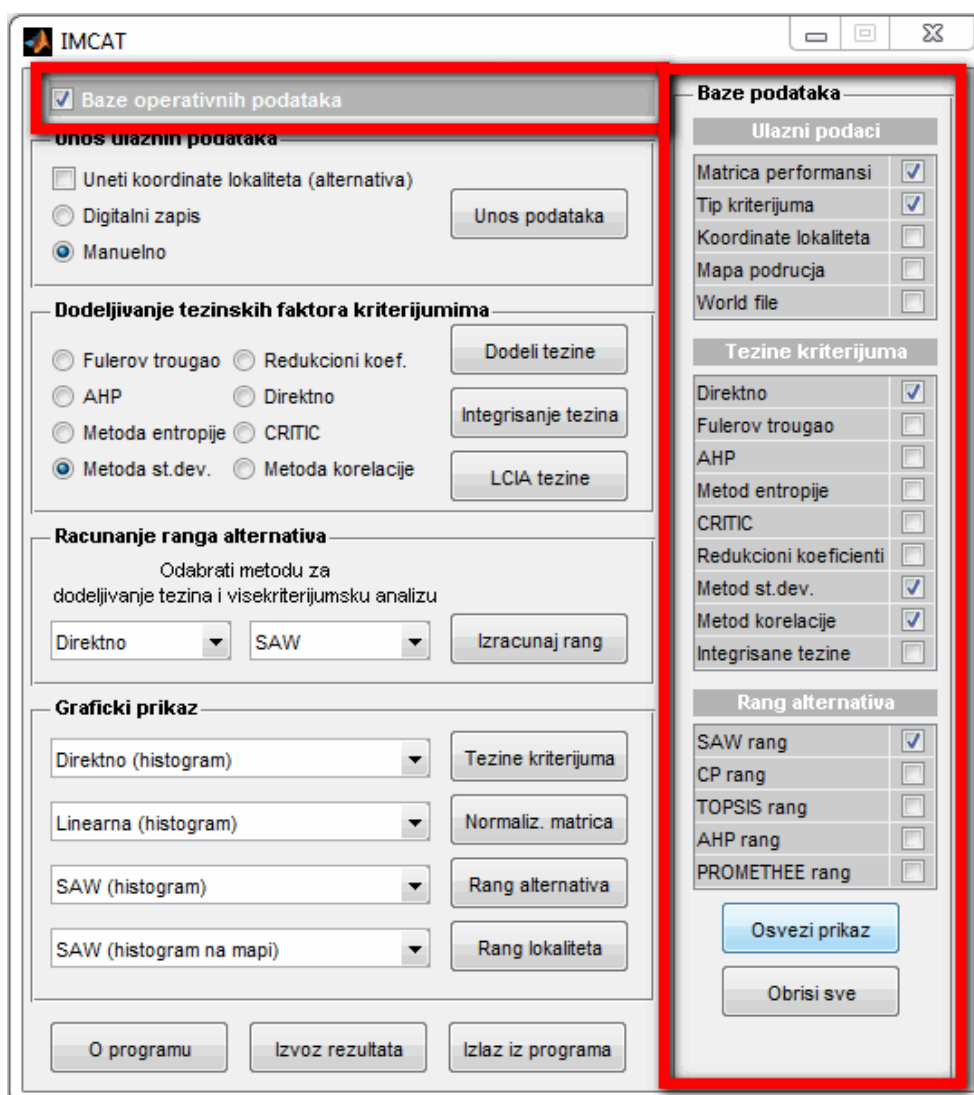
Slika 5.9. Primer upozorenja kod AHP



Slika 5.10. Dijalog okvir za brisanje svih podataka iz operativnih baza podataka

5.3.1 Panel operativnih podataka

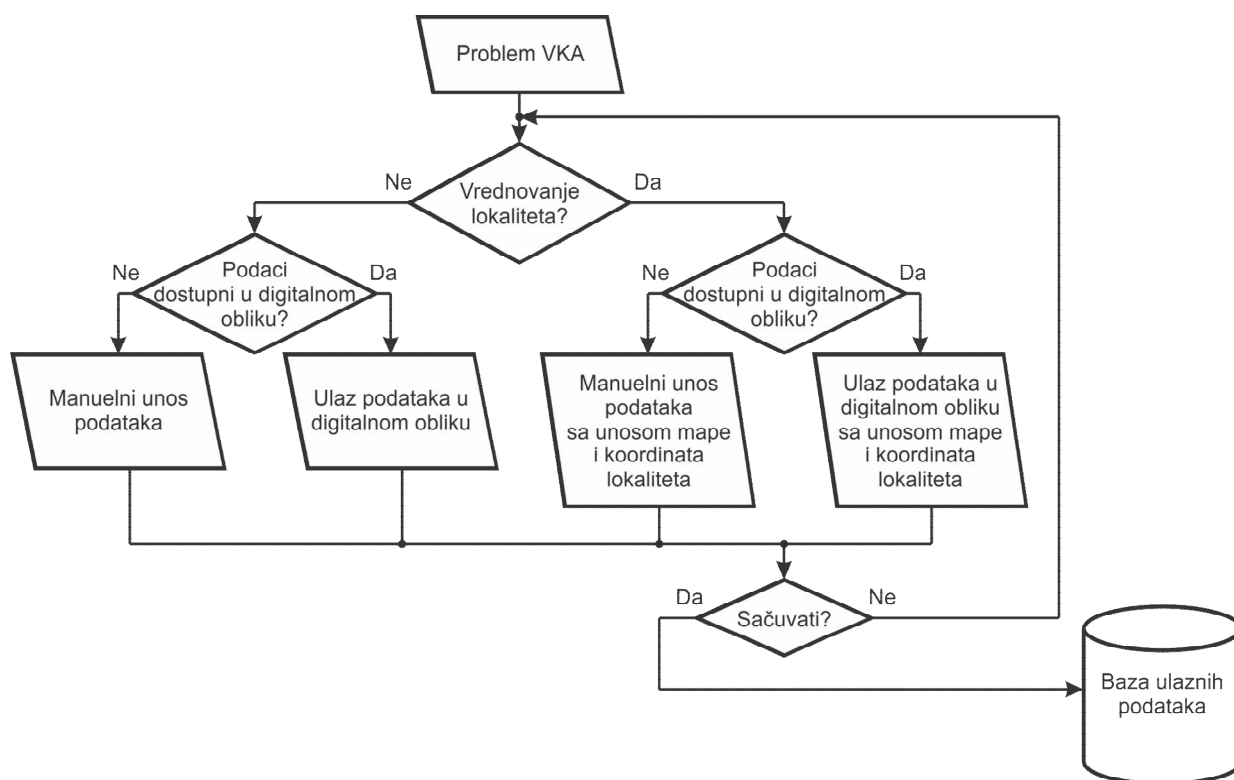
S obzirom na to da prilikom rada u IMCAT programu korisnik manipuliše sa velikom količinom podataka, glavni dijalog okvir IMCAT programa je proširiv. Aktiviranjem polja na vrhu glavnog dijaloga okvira „Baze operativnih podataka“, aktivira se proširenje glavnog dijaloga okvira sa panelom baze podataka (označeno crvenim pravougaonicima na slici 5.11) i korisniku je omogućeno da u bilo kom trenutku u toku rada proveri koji podaci se trenutno nalaze u operativnim bazama podataka IMCAT programa. U panelu operativnih podataka uneti podaci i izračunati rezultati označeni su simbolom u polju odgovarajuće promenljive. Opcija „Obrisi sve“ u panelu operativnih podataka koristi se za brisanje svih unetih podataka i izračunatih rezultata, ukoliko korisniku nisu više potrebni podaci u operativnim bazama podataka IMCAT programa i ako želi da radi novu analizu.



Slika 5.11. Panel operativnih podataka programskog sistema IMCAT

5.3.2 Panel za unos podataka

Panel za unos podataka zasnovan je na modulu za unos podataka prikazanom algoritmom na slici 5.12. Panel za unos podataka omogućava da se matrica performansi sastavi direktno upisivanjem u IMCAT programu (slika 5.13) ili da se uveze u obliku digitalnog zapisa (slika 5.14). Pored matrice performansi, pri unosu podataka potrebno je definisati i tip kriterijuma. Kod manualnog unosa pokretanjem opcije "Unos podataka" otvara se dijalog okvir prikazan na slici 5.13, čime je omogućeno direktno upisivanje vrednosti za matricu performansi, kao i odabir tipa kriterijuma („max“/ „min“). Kod unosa preko digitalnog zapisa (MS Excel dokumenta⁵⁾) potrebno je napraviti dva radna lista (engl. worksheet), gde se u jednom unosi matrica performansi, a u drugom tip kriterijuma, kao i treći (opciono) za unos koordinata lokaliteta ukoliko se radi vrednovanje opterećenja životne sredine na nekom području.



Slika 5.12. Algoritam modula za unos podataka

⁵⁾ U IMCAT programu datoteke se uvoze u digitalnom zapisu MS Excel dokumenta, a daljim unapređivanjem programa mogu se omogućiti i drugi oblici digitalnog zapisa.

Uneti matricu performansi, tip kriterijuma i koordinate lokaliteta (alternativa)

Tip kriterijuma (Max/Min)

	1	2	3	4	5	6
Max	Max	Max	Min	Max	Min	Min

Matrica performansi

	1	2	3	4	5	6
1	3800	72	8.1500	190	7	7
2	4000	70	8.4400	210	5	7
3	4700	73	8.9200	240	9	5
4	4400	71	8.1000	210	7	9

Uneti geografske koordinate lokaliteta (alternativa) u decimalnom zapisu

Na primer za podrucje grada Novog Sada
 longituda (geografska duzina) je 19.75-19.90
 a latituda (geografska sirina) 45.20-45.30

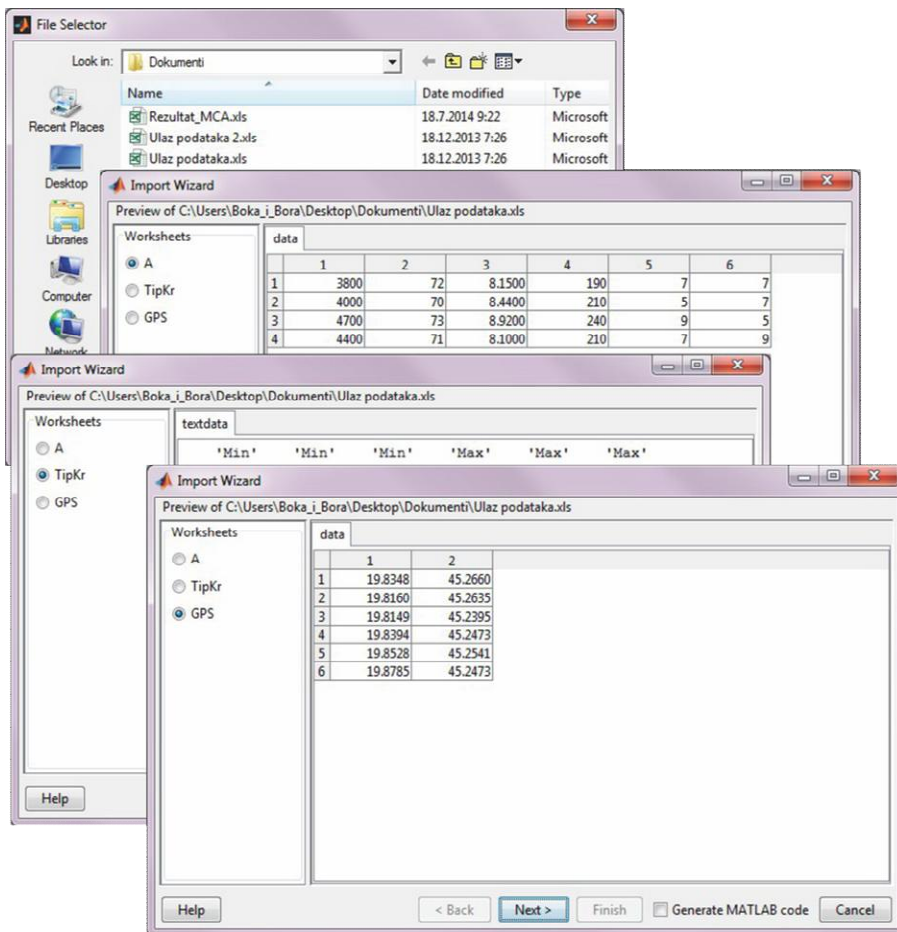
	Longituda	Latituda
1	19.8348	45.2660
2	19.8160	45.2635
3	19.8394	45.2395
4	19.8349	45.2473

Obrisi matricu performansi Sacuvaj matricu performansi Obrisi koordinate Sacuvaj koordinate

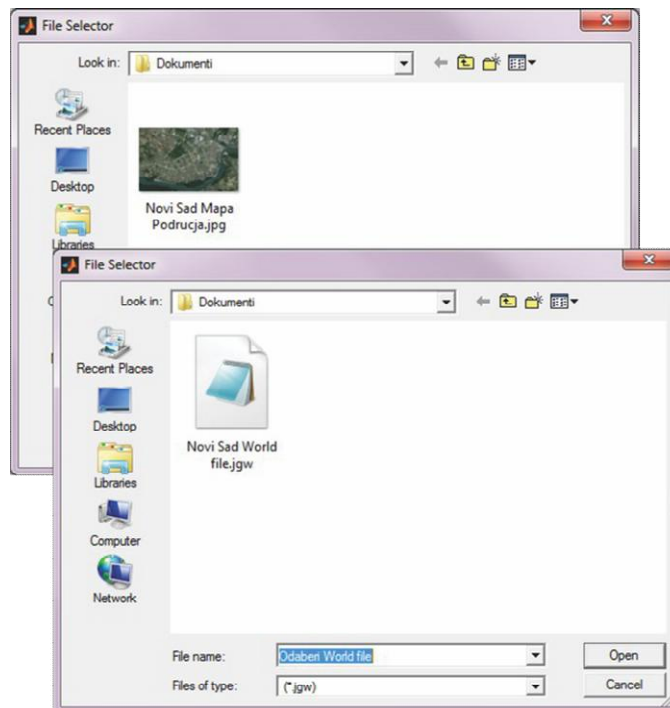
Slika 5.13. Manuelni unos matrice performansi, tipa kriterijuma i koordinata lokaliteta

Ukoliko se rešava problem vrednovanja opterećenja životne sredine na lokacijama (alternativama) nekog geografskog područja, sistem nudi mogućnost unosa geografskih koordinata ovih lokacija i mape područja na kom se nalaze vrednovane lokacije (slika 5.14). Korisnik aktiviranjem polja „Uneti koordinate lokaliteta (alternativa)“ i selektovanjem manualnog ili „Digitalni zapis“ ulaza podataka, najpre unosi matricu performansi i tip kriterijuma na prethodno opisan način. Nakon unosa matrice performansi i tipa kriterijuma korisnik unosi koordinate lokaliteta (geografsku dužinu i širinu) u decimalnom zapisu, kao i mapu područja preko slike u elektronskom zapisu sa „jpg“ ekstenzijom i „World file“ dokumenta⁶⁾ sa „jgw“ ekstenzijom (slika 5.15). Na osnovu geografskih koordinata, „World file“ dokumenta i slike područja, IMCAT program generiše trodimenzionalni grafički prikaz opterećenja životne sredine lokaliteta na mapi područja (pogledati panel za grafički prikaz).

⁶⁾ „World file“ dokument nosi informacije o geografskim koordinatama područja (koordinate levog gornjeg ugla slike, veličinu piksela (najmanji element rasterske slike) u x i y smeru mape/slike, rotaciju x i y ose slike).



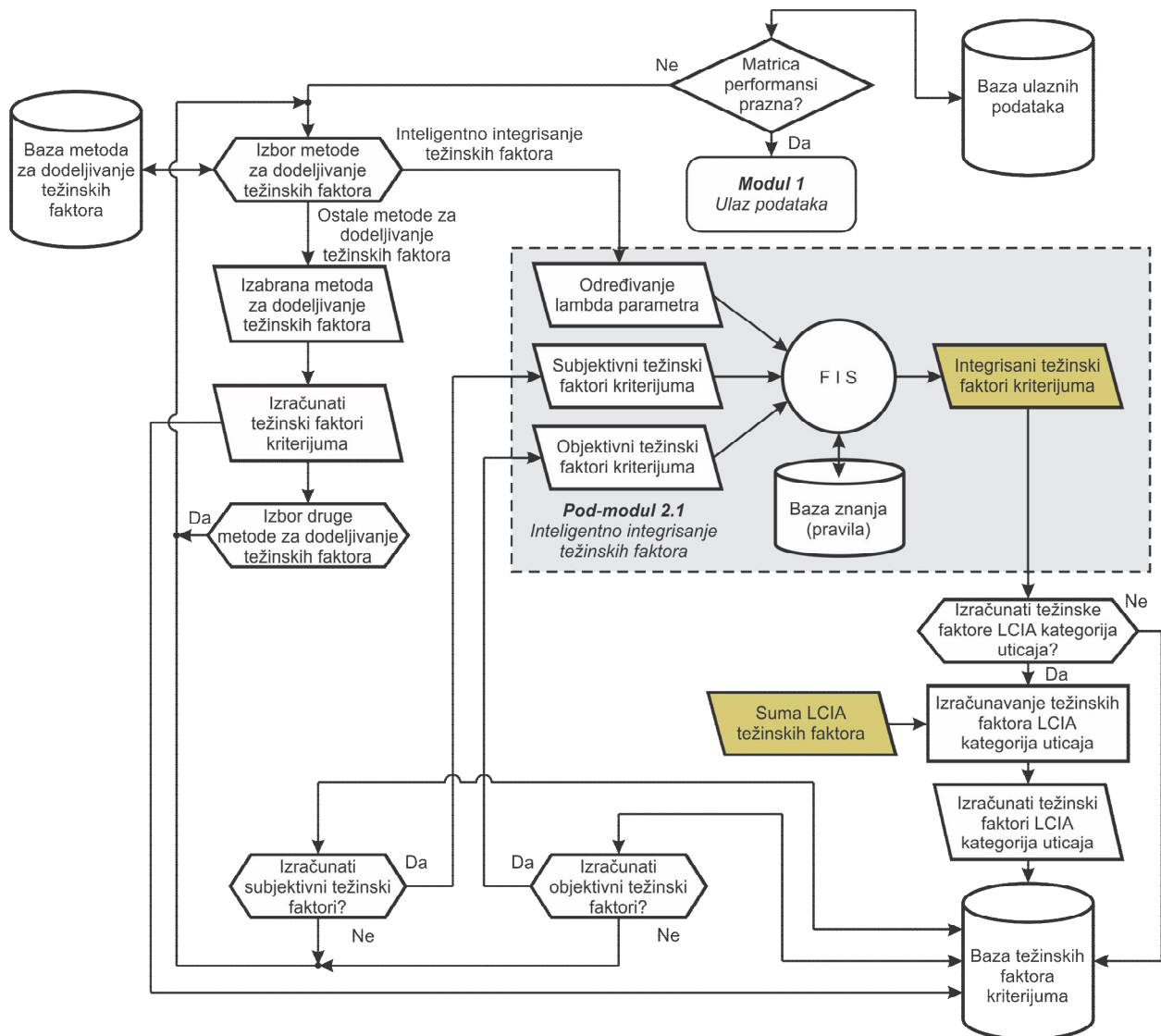
Slika 5.14. Unos matrice performansi, tipa kriterijuma i koordinata lokaliteta preko digitalnog zapisa



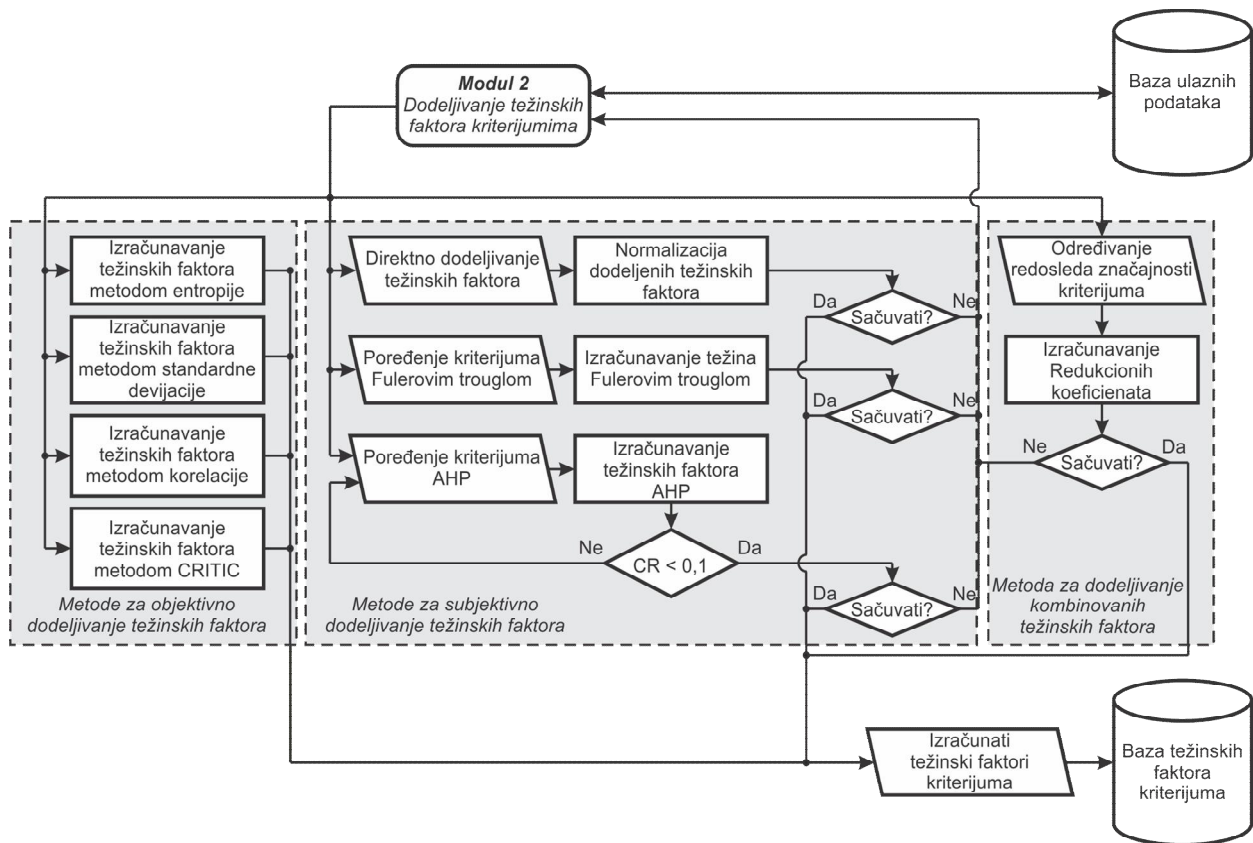
Slika 5.15. Unos mape područja preko slike u elektronskom zapisu i „World file“ dokumenta

5.3.3 Panel za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima

Panel za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima, zasnovan je na modulu za dodeljivanje težinskih faktora (slika 5.16) i omogućava korisniku da izabere jedan od osam ponuđenih metoda za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima, iz baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora (slika 5.17): Fulerov trougao, AHP, metoda entropije, metoda standardne devijacije, redukcioni koeficijenta, direktno dodeljivanje težinskih faktora, CRITIC i metoda korelacije. Od navedenih metoda Fulerov trougao, AHP i direktno dodeljivanje težinskih faktora jesu subjektivne, metoda entropije, standardne devijacije, korelacije i CRITIC jesu objektivne metode, dok metoda redukcioni koeficijenta spada u kombinovani pristup za dodeljivanje težinskih faktora.



Slika 5.16. Algoritam modula za dodeljivanje težinskih faktora kriterijumima



Slika 5.17. Algoritam baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora

Kod Fulerovog trougla (slika 5.18) kada korisnik završi parcijalno-parno poređenje kriterijuma pokretanjem opcije „Izračunaj težine“, izračunavaju se težinski faktori kriterijuma. Kod primene AHP, nakon pokretanja opcije "Izračunaj težine", izračunavaju se težinski faktori kriterijuma i stepen konzistentnosti (slika 5.19). Stepen konzistentnosti pokazuje koliko je korisnik bio dosledan (konzistentan) pri sastavljanju matrice poređenja kriterijuma. S obzirom da stepen konzistentnosti treba da bude manji od 0,1 da bi se poređenje smatralo konzistentim, ukoliko je stepen konzistentnosti veći od 0,1, IMCAT označava polje sa stepenom konzistentnosti crvenom bojom kako bi se upozorio korisnik (slika 5.19).

Fulerov trougao

Dodeljivanje tezina kriterijuma primenom Fulerovog trougla

vise
 jednako
 manje

Kriterijum broj **1** je jednako znacajan u odnosu na kriterijum broj **4**

Matrica poredjenja kriterijuma - popunjava se samo deo iznad dijagonale

	1	2	3	4	5	
1		0	1	1	0.5000	0.5000
2			0	0	0	1
3				0	0.5000	0.5000
4					0	1
5					0	0

Izracunate tezine kriterijuma

	1	2	3	4	5	
1		0.2500	0.1667	0.1667	0.1667	0.2500

Slika 5.18. Dijalog okvir za dodeljivanje težinskih faktora primenom Fulerovog trougla

AHP

Poredjenje kriterijuma primenom AHP skale

Obeleziti odnos znacajnosti kriterijuma primenom AHP skale (1-9) ako je

kriterijum broj **1** znacajniji, ili ako je kriterijum broj **5** znacajniji

9 8 7 6 5 4 3 2 1 2 3 4 5 6 7 8 9

AHP matrica poredjenja kriterijuma - popunjava se samo deo iznad jedinicne dijagonale

	1	2	3	4	5	
1		1	0.3333	0.2500	0.5000	0.3333
2			3	1	0.3333	0.2000
3				4	3	1
4					2	5
5						5
						1

Izracunati tezinski faktori kriterijuma

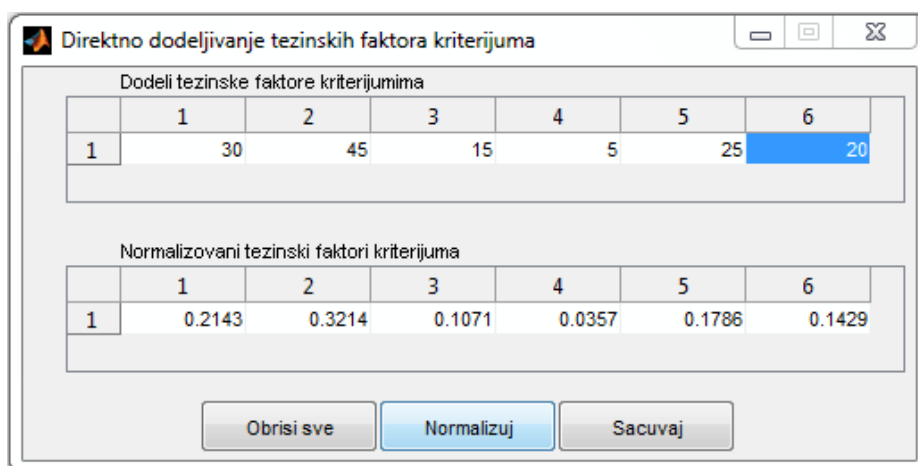
	1	2	3	4	5	
1		0.0647	0.0663	0.1290	0.2255	0.5145

Stepen konzistentnosti **0.274401**

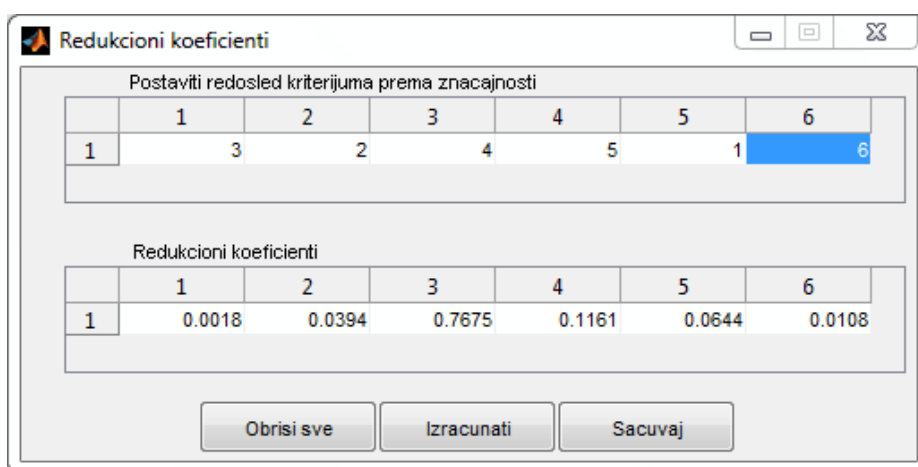
Slika 5.19. Dijalog okvir za AHP dodeljivanje težinskih faktora

Kod direktnog dodeljivanja težinskih faktora korisnik direktno upisuje željenu vrednost težinskog faktora. Izborom opcije "Normalizuj" težinski faktori se svode na raspon vrednosti od „0“ do „1“, tako da im ukupan zbir bude jednak „1“ (slika 5.20).

Objektivne metode koriste se u slučaju da korisnik želi da težinski faktori kriterijuma budu dodeljeni prema vrednostima iz matrice performanse ili u slučaju odsustva donosilaca odluke. Metode entropije, CRITIC, standardne devijacije i korelacije, zasnovane su na principu da kriterijumi čije vrednosti više odstupaju po alternativama imaju veću značajnost jer više utiču na konačni rezultat (rang alternativa) i obrnuto. Selektovanjem ovih metoda u glavnom dijalog okviru (slika 5.7) i pokretanjem opcije „Dodeli težine“, IMCAT izračunava objektivne težinske faktore kriterijuma bez potrebe za daljom interakcijom korisnika pri dodeljivanju težinskih faktora.



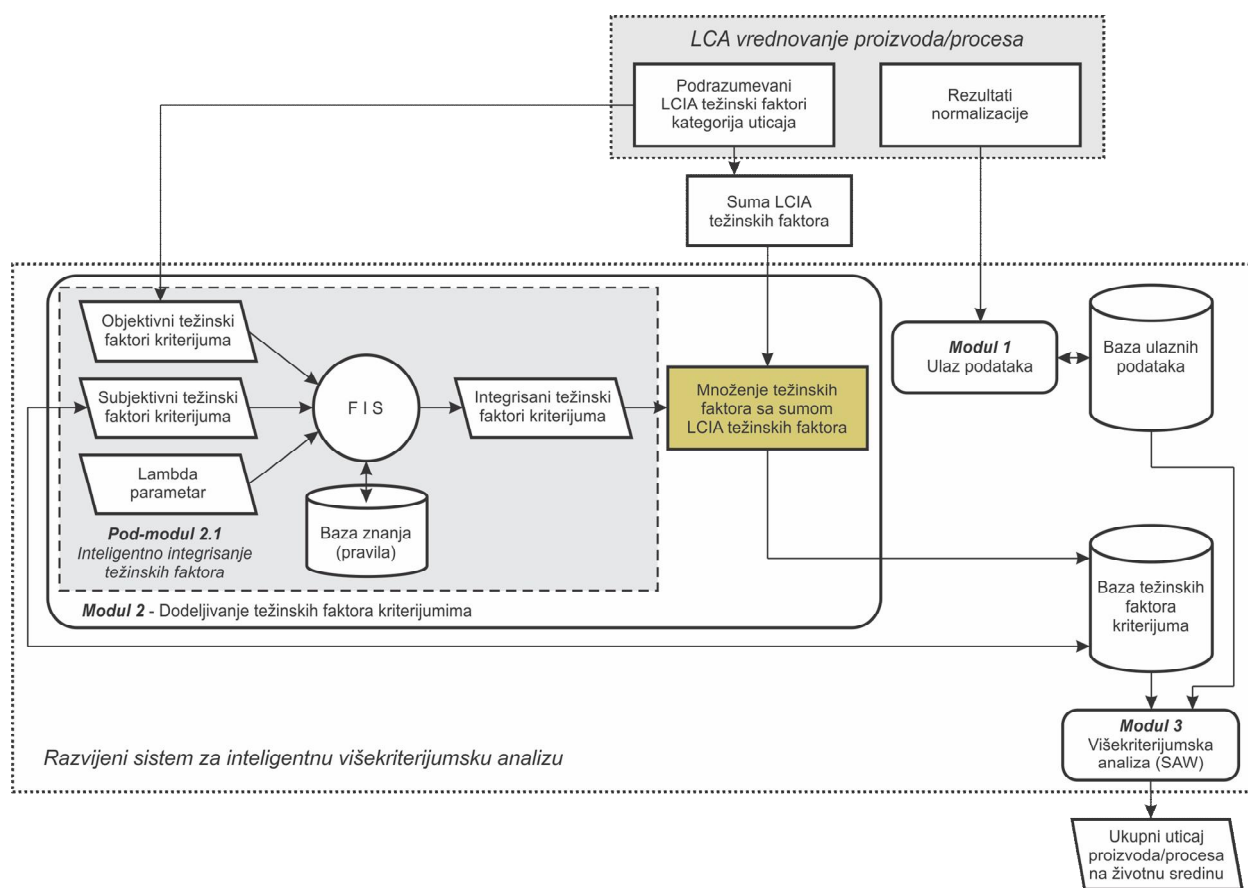
Slika 5.20. Dijalog okvir za direktno dodeljivanje težinskih faktora kriterijuma



Slika 5.21. Unos redosleda značajnosti kriterijuma kod metode redukcionih koeficijenata

Metoda redukcionih koeficijenata je kombinacija subjektivnog i objektivnog dodeljivanja težinskih faktora kriterijuma. Korisnik najpre subjektivno upisuje redosled kriterijuma prema značajnosti (slika 5.21), da bi se u narednom koraku metodom redukcionih koeficijenata odredili težinski faktori ostalih kriterijuma u opadajućem redosledu, od najviše do najmanje značajnog kriterijuma prema „jačini“ koeficijenta korelacije. Peporučljivo je da postoji više od 30 alternativa zbog efikasnosti koeficijenata korelacije i preciznosti dodeljivanja težinskih faktora.

Ukoliko korisnik želi da radi LCA vrednovanje proizvoda ili procesa, kriterijumi predstavljaju kategorije uticaja na životnu sredinu, a ulazna matrica performansi je sastavljena od rezultata LCA normalizacije. IMCAT program se u slučaju LCA koristi za dodeljivanje težinskih faktora kategorija uticaja i za izračunavanje ukupnog uticaja životnog ciklusa proizvoda/procesa na životnu sredinu (slika 5.22).



Slika 5.22. Primena razvijenog sistema za intilgentnu višekriterijumsku analizu sa metodom ocenjivanja životnog ciklusa

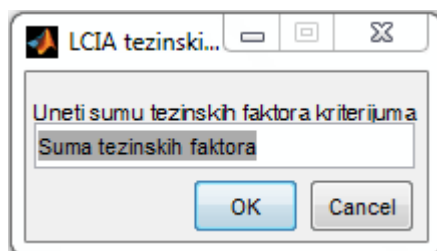
U IMCAT programu sve metode za dobijanje težinskih faktora izračunavaju težinske faktore tako da važi $0 \leq w_j \leq 1, \sum w_j = 1, j = 1, 2, \dots, m$, tj. suma težinskih faktora jednaka je „1“. Kod metoda LCIA postoje različite sume težinskih faktora kategorija

uticaja, tj. suma težinskih faktora je promenljiva i zavisi od metode LCIA. Na primer, kod metode Ekoindikatora 99 i kod ReCiPe metode, suma podrazumevanih težinskih faktora kategorija uticaja na nivou krajnjih pozicija iznosi „1000“, a kod IMPACT 2002+ „4“. Nadalje, kod metoda Ekoindikatora 99 i ReCiPe, težinski faktori kategorija uticaja na krajnjim pozicijama dodeljuju se odgovarajućim kategorijama uticaja na nivou međupozicija. Ako su za kategoriju uticaja resursi na nivou krajnjih pozicija težinski faktor 200, tada se 200 dodeljuje kategorijama uticaja na nivou međupozicija: 200 za eksploataciju metala i 200 za eksploataciju fosilnih goriva (slika 5.23).

w=300	Šteta po ljudsko zdravlje	w=300	Promena klime i ljudsko zdravlje	w=0,30	Kriterijum 1	w=0,06	Podkriterijum 11
		w=300	Smanjenje ozonskog omotača			w=0,06	Podkriterijum 12
		w=300	Toksičnost po ljude			w=0,06	Podkriterijum 13
		w=300	Fotohemijsko formiranje oksidanata			w=0,06	Podkriterijum 14
		w=300	Jonizujuće zračenje			w=0,06	Podkriterijum 15
w=500	Šteta po raznovrsnost ekosistema	w=500	Promena klime ekosistema	w=0,50	Kriterijum 2	w=0,06	Podkriterijum 21
		w=500	Zakiseljavanje zemljišta			w=0,06	Podkriterijum 22
		w=500	Eutrofikacija slatkovodnih voda			w=0,06	Podkriterijum 23
		w=500	Ekotoksičnost zemljišta			w=0,06	Podkriterijum 24
		w=500	Ekotoksičnost slatkovodne vode			w=0,06	Podkriterijum 25
		w=500	Morska ekotoksičnost			w=0,05	Podkriterijum 26
		w=500	Zaposedanje poljoprivrednog zemljišta			w=0,05	Podkriterijum 27
		w=500	Zaposedanje urbanog zemljišta			w=0,05	Podkriterijum 28
		w=500	Promena prirodnog područja			w=0,05	Podkriterijum 29
w=200	Šteta po dostupnost resursa	w=200	Eksploatacija metala	w=0,20	Kriterijum 3	w=0,10	Podkriterijum 31
		w=200	Eksploatacija fosilnih goriva			w=0,10	Podkriterijum 32
Suma težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA				Suma težinskih faktora u VKA			
Nivo krajnjih pozicija		Nivo međupozicija		Nivo kriterijuma		Nivo podkriterijuma	
$\Sigma w = 1000$		$\Sigma w = 6400$		$\Sigma w = 1,00$		$\Sigma w = 1,00$	

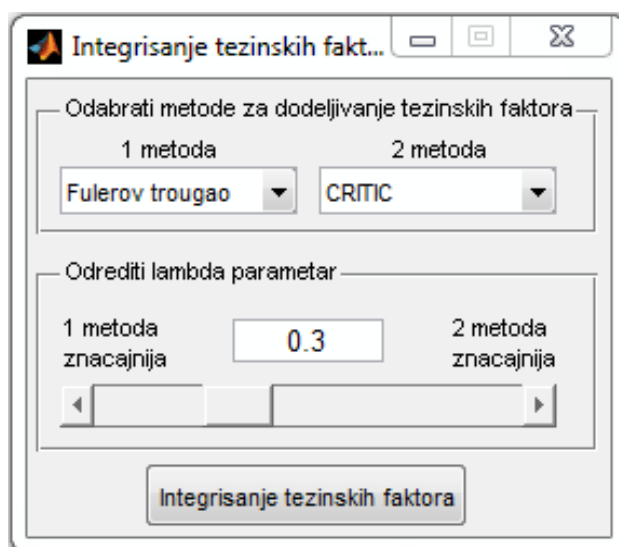
Slika 5.23. Suma težinskih faktora u ReCiPe i VKA

S obzirom na prethodno, za LCA vrednovanje u IMCAT programu potrebno je da suma težinskih faktora kategorija uticaja bude u skladu sa metodom LCIA, te korisnik pokretanjem opcije „LCIA tezinje“ unosi vrednost sume težinskih faktora kategorija uticaja (slika 5.24). Nakon unete sume težinskih faktora, IMCAT množi sumu sa prethodno dodeljenim težinskim faktorima.



Slika 5.24. Unos sume LCIA težinskih faktora

Centralni deo modula za dodeljivanje težinskih faktora čini pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora. Korisniku je omogućeno da izvrši integraciju dva skupa težinskih faktora primenom pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora. Da bi se težinski faktori mogli integrisati potrebno je prethodno izračunati težinske faktore primenom dve metode: jednom metodom se odrede objektivni, a drugom subjektivni težinski faktori. Nakon izračunatih i odabranih težinskih faktora, korisnik odabira značajnost jedne u odnosu na drugu metodu (subjektivnih u odnosu na objektivne težinske faktore) promenom lambda parametra u zavisnosti od toga koliko je siguran u svoje subjektivne preferencije (slika 5.25).

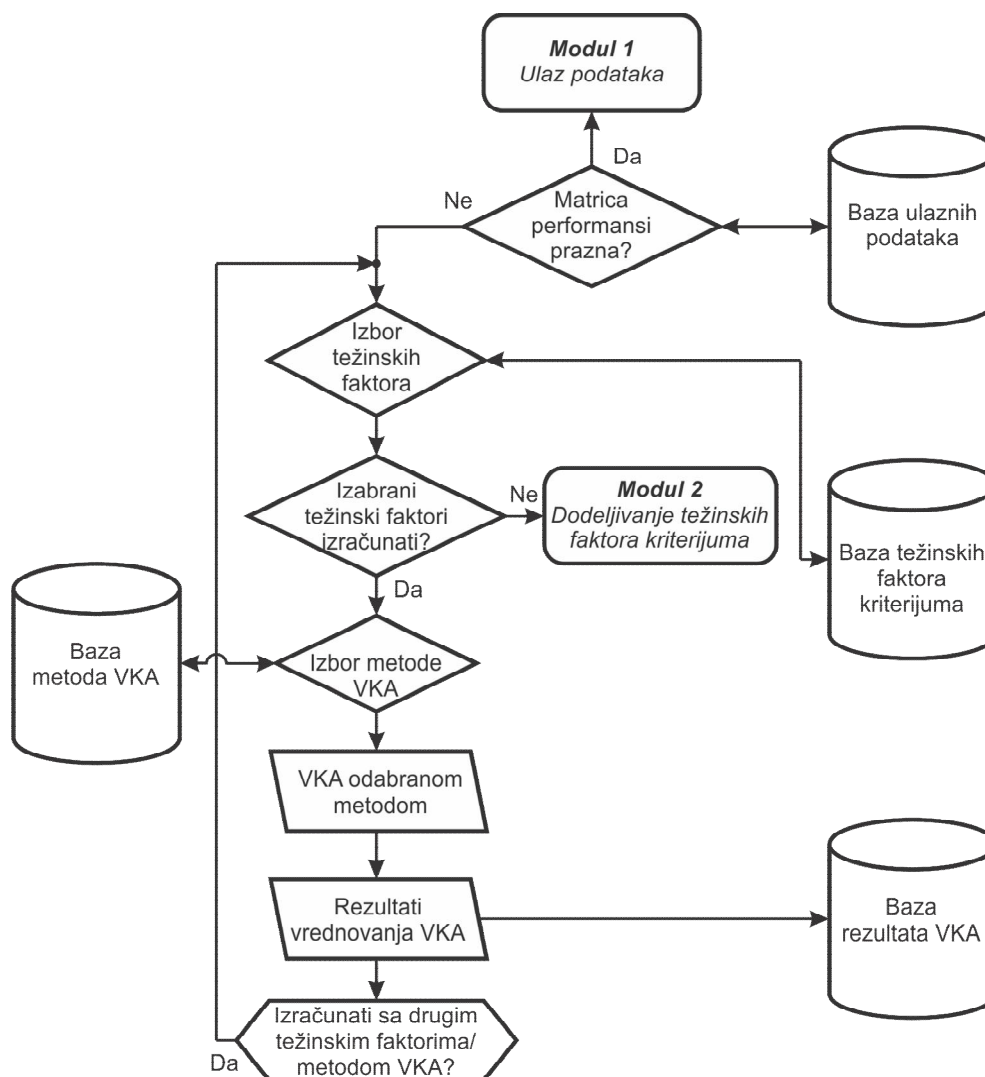


Slika 5.25. Dijalog okvir za inteligentno integrisanje težinskih faktora

Lambda parametar može imati vrednost između 0 i 1, gde vrednost 0 označava slučaj gde je prva metoda apsolutno značajnija, a 1 ako je druga metoda apsolutno značajnija. Male vrednosti lambda mogu koristiti donosioci odluke sa manje iskustva, dok veće vrednosti lambda odgovaraju ekspertima sa većim znanjem, iskustvom i donosiocima odluke koji su sigurni u dodeljene subjektivne težinske faktore. Na kraju, IMCAT integriše težinske faktore primenom fuzzy logike i dobijaju se integrisani težinski faktori.

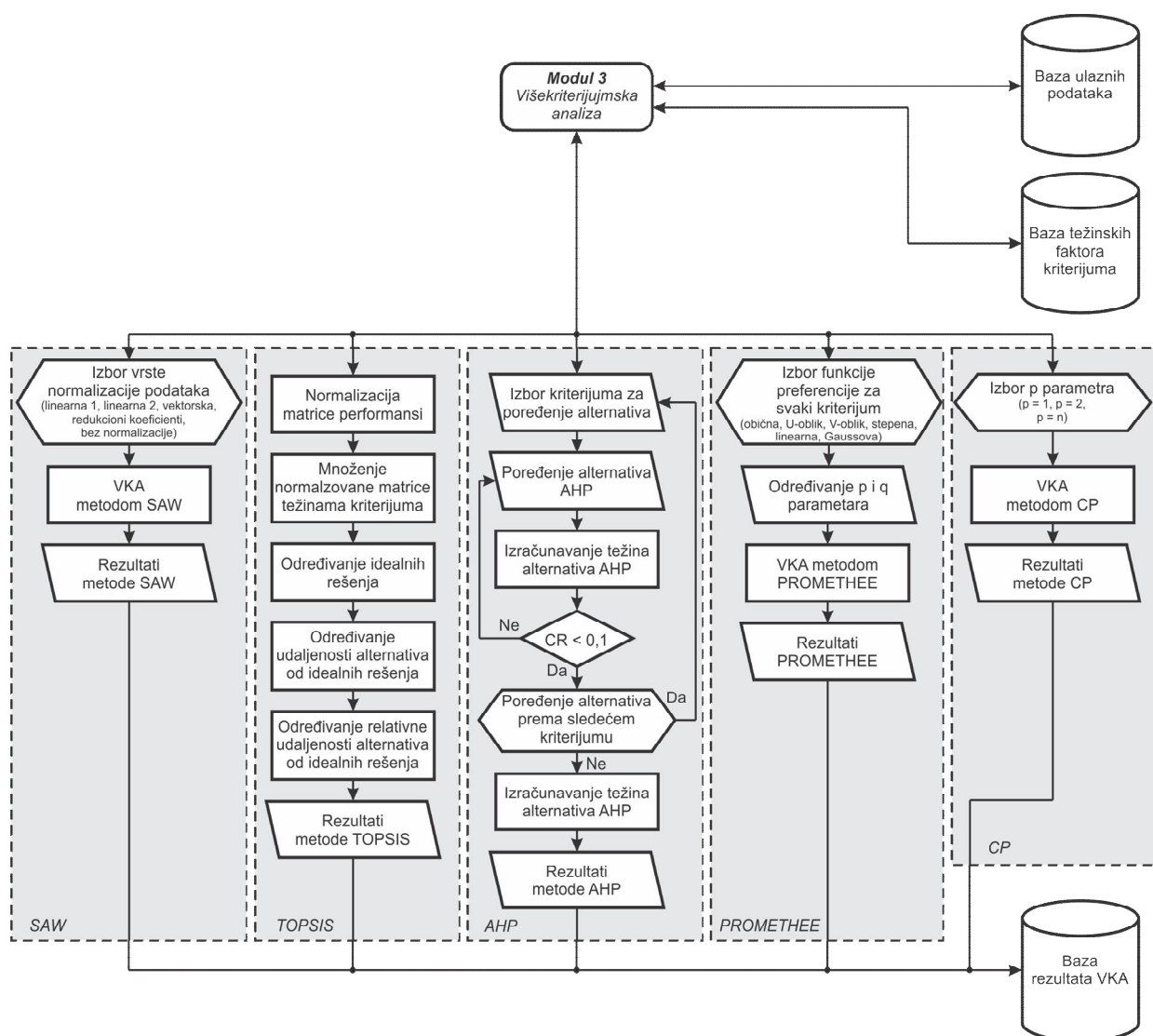
5.3.4 Panel za izračunavanje ranga alternativa

Panel za izračunavanje ranga alternativa zasnovan je na modulu za izračunavanje ranga alternativa prikazanom na slici 5.26.



Slika 5.26. Algoritam modula za izračunavanje ranga alternativa

Panel za izračunavanje ranga alternativa omogućava korisniku da iz padajućih listi izabere jednu od devet ponuđenih metoda za izračunavanje težinskih faktora kriterijuma (Direktno, Fulerov trougao, AHP, metoda entropije, CRITIC, metoda korelacije, metoda standardne devijacije, redukcioni koeficijenti i integrisani težinski faktori) iz baze metoda za dodeljivanje težinskih faktora (slika 5.17) i jednu od pet metoda za višekriterijumsku analizu (SAW, CP, TOPSIS, AHP i PROMETHEE) iz baze metoda VKA (slika 5.27).



Slika 5.27. Algoritam baze metoda VKA

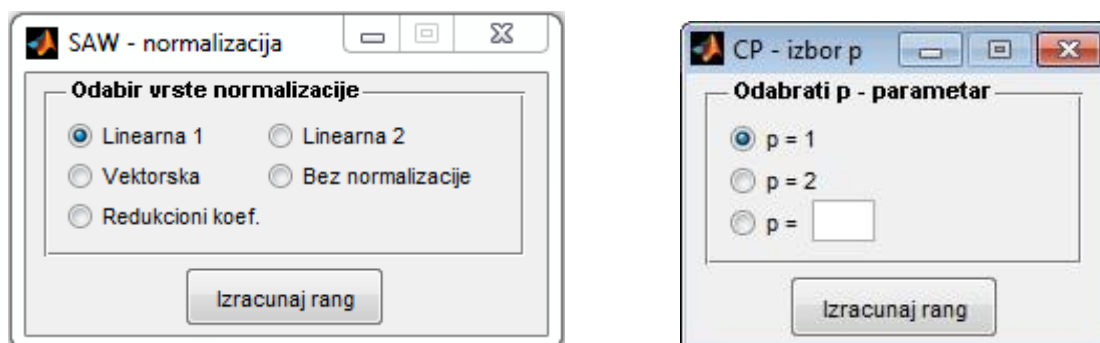
Kod metode SAW otvara se pomoćni dijalog okvir (slika 5.28a) u kojem korisnik bira željenu vrstu normalizacije matrice performansi: linearna 1, linearna 2, vektorska, redukcioni koeficijenti, i bez normalizacije nakon čega se izračunava rang alternativa. Ako je sa A označena matrica performansi sa elementima a_{ij} , tada su tabelom 5.2 prikazane jednačine za izračunavanje b_{ij} elemenata normalizovane matrice B prethodno spomenutih pet vrsta normalizacije koje se koriste u IMCAT programu.

Tabela 5.2. Vrste normalizacije koje se mogu odabrati u IMCAT programu za metodu SAW

Normalizacija	Za „max“ tip kriterijuma	Za „min“ tip kriterijuma
Linearna 1	$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^-}{a_j^* - a_j^-}$	$b_{ij} = 1 - \frac{a_{ij} - a_j^-}{a_j^* - a_j^-}$
Linearna 2	$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$	$b_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$
Vektorska	$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}$	$b_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}$
Redukcioni koeficijenti	$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^-}{\sigma_j}$	$b_{ij} = \frac{a_j^- - a_{ij}}{\sigma_j}$
Bez normalizacije	$b_{ij} = a_{ij}$	$b_{ij} = -a_{ij}$
gde je:	<p>a^* - idealno rešenje (maksimalna vrednost) j-kriterijuma; a^- - anti-idealno rešenje (minimalna vrednost) j-kriterijuma; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$;</p> $\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_j)^2}{n}}$ - standardna devijacija j -kriterijuma.	

U slučaju LCA vrednovanja u IMCAT programu, predviđeno je da se koristi metoda SAW na bazi na kojoj su zasnovana izračunavanja u mnogim metodama LCIA. Potrebno je izabrati „Bez normalizacije“ kod izbora vrste normalizacije. Dodatna normalizacija nije potrebna jer unesena matrica performansi predstavlja rezultate normalizacije LCIA koji su prethodno normalizovani u LCIA, i koji se mogu dalje množiti sa LCA težinskim faktorima kategorija uticaja kako bi se dobio ukupan uticaj životnog ciklusa na životnu sredinu. Specifičnost primene metode SAW za LCA vrednovanje opisana je u narednom tekstu. Kod tipičnog problema VKA tip kriterijuma može biti „max“ ili „min“ što se podrazumeva za sve vrednosti jednog kriterijuma. Međutim, kod LCIA normalizacije uobičajeno je da se pozitivan uticaj na životnu sredinu označava predznakom minus, dok pozitivan uticaj jedne kategorije uticaja za jedan proizvod/proces može biti negativan prilikom vrednovanja drugog proizvoda/procesa (kao što je slučaj u PROMETHEE II metodi).

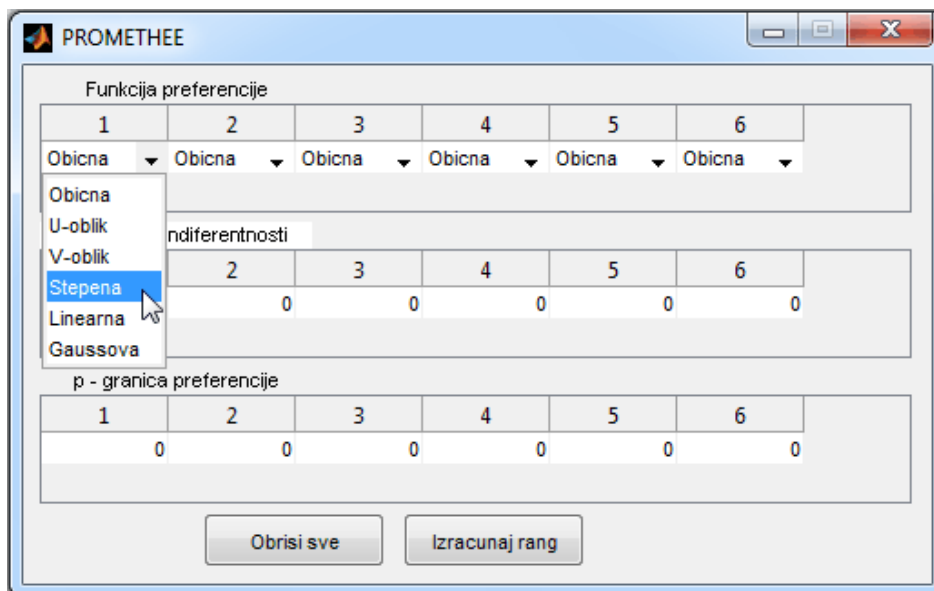
Prilikom izračunavanja metodom CP, pomoćni dijalog okvir korisniku omogućava izbor/unos vrednosti p -parametra (slika 5.28b). Kod metode TOPSIS nema dodatne interakcije korisnika i IMCAT direktno izračunava rang alternativa.



a) Izbor vrste normalizacije kod SAW; b) Izbor p – parametra kod CP

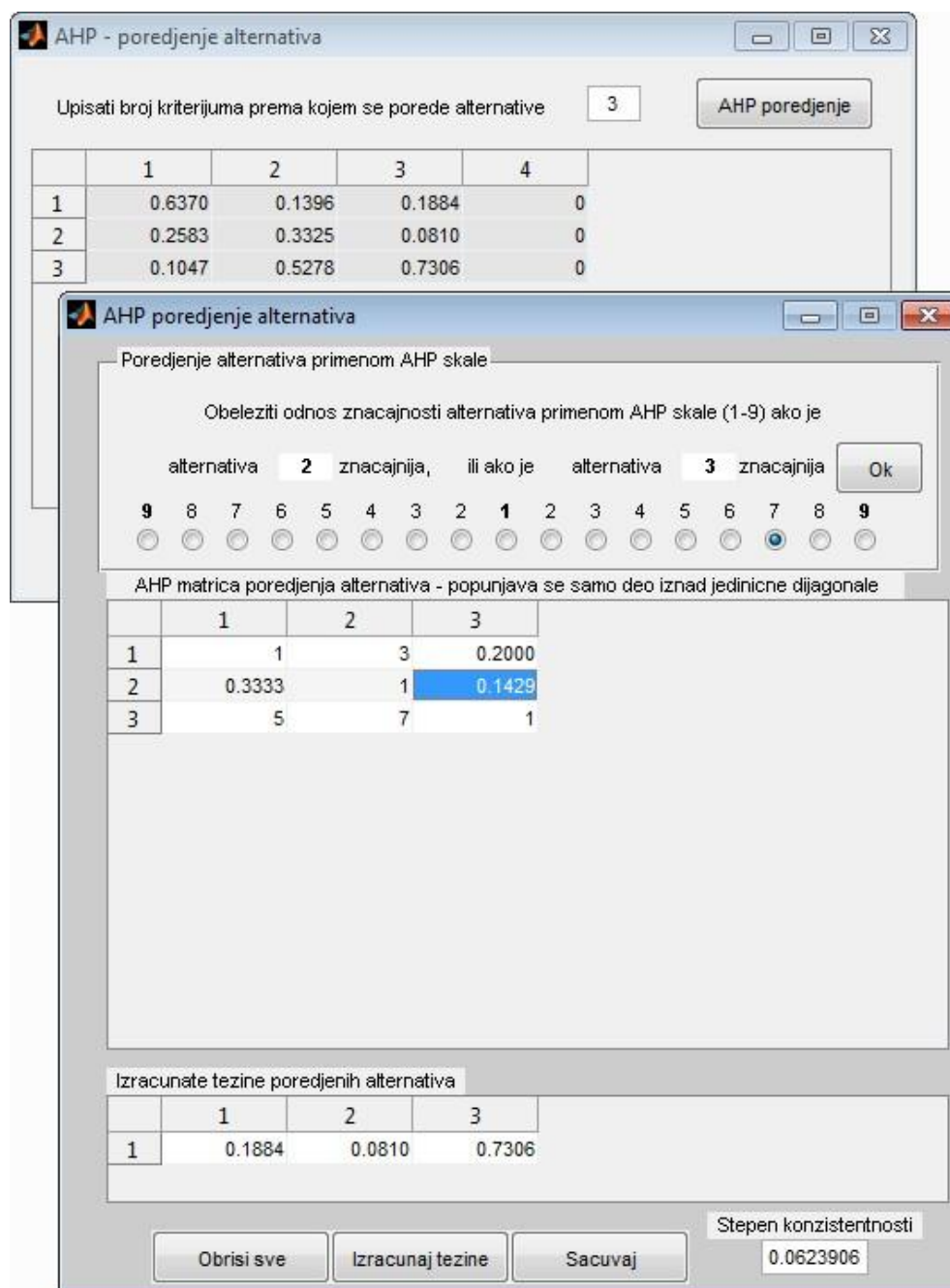
Slika 5.28. Pomoćni dijalog okviri za SAW i CP metodu

Odabirom metode PROMETHEE otvara se pomoćni dijalog okvir (slika 5.29), gde se bira jedna od šest funkcija preferencije (obična, U-oblik, V-oblik, stepena, linearna i Gaussova) i unose se q – parametar (granica indiferentnosti) i p – parametar (granica preferencije) za svaki kriterijum.



Slika 5.29. Dijalog okvir za PROMETHEE i izbor funkcije preferencije za svaki kriterijum

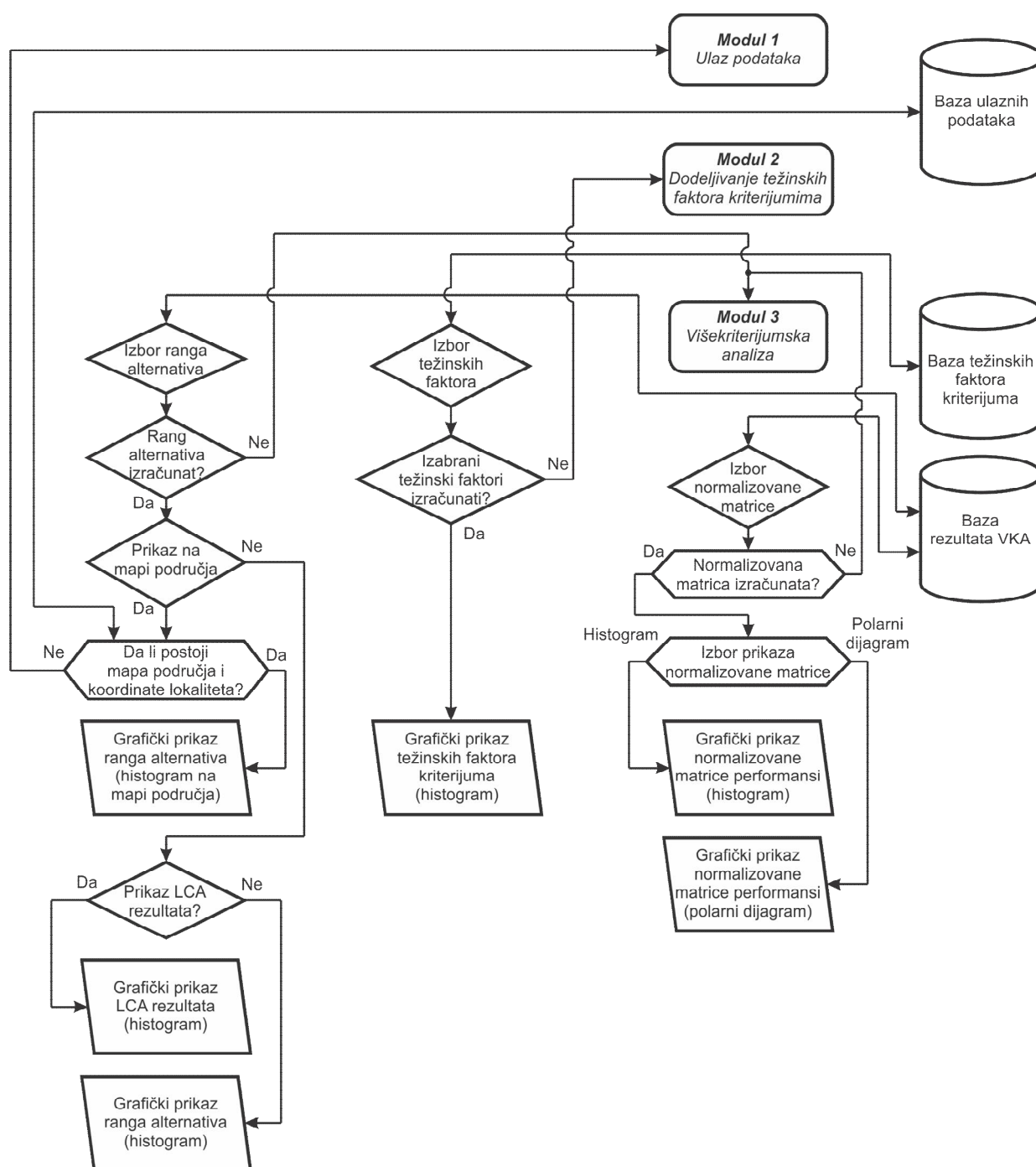
Izborom AHP otvara se pomoćni dijalog okvir (slika 5.30) za poređenje alternativa u zavisnosti od svakog kriterijuma. Kod poređenja alternativa u AHP najpre se izabere broj kriterijuma prema kojem će se porediti alternative, a nakon toga se pokretanjem opcije „AHP poređenje“ aktivira pomoćni dijalog okvir u kojem se vrši AHP poređenje alternativa. Rezultat poređenja se upisuje u tabelu dijaloga okvira „AHP – poređenje alternativa“ sve dok se ne popuni cela tabela, čime je završeno vrednovanje AHP.



Slika 5.30. Dijalog okviri za poređenje alternativa AHP

5.3.5 Panel za grafički prikaz

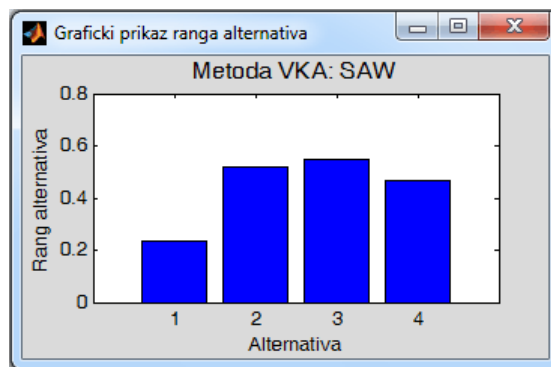
Panel za grafički prikaz zasnovan je na modulu za grafički prikaz (slika 5.31), čime je omogućeno da IMCAT program pruža grafički prikaz težinskih faktora kriterijuma i ranga alternativa pomoću histogramskih dijagrama (slika 5.32). Iznad histograma (slika 5.32) IMCAT generiše naziv metode za dodeljivanje težinskih faktora. Pre generisanja grafičkih prikaza modul za grafički prikaz proverava da li postoje i da li su izračunati svi potrebni podaci iz operativnih baza podataka.



Slika 5.31. Algoritam modula za grafički prikaz



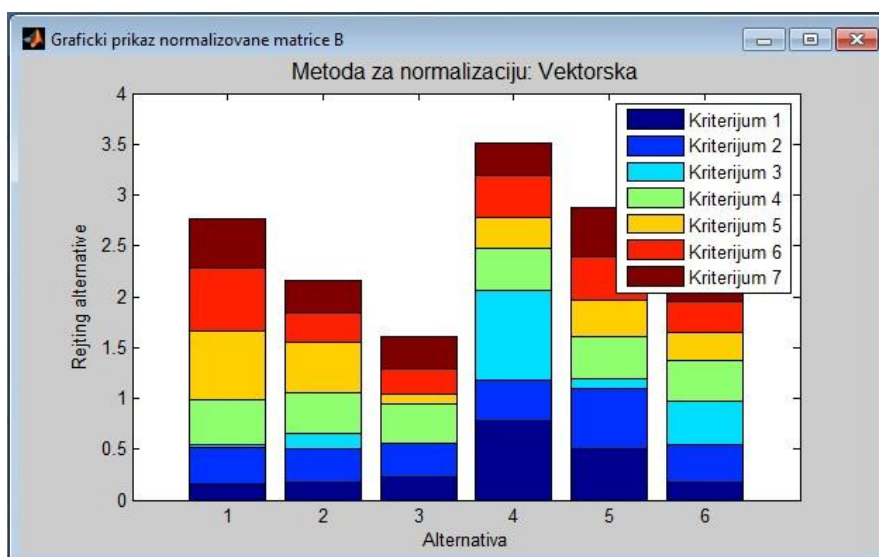
a) Težinski faktori kriterijuma;



b) Rang alternativa

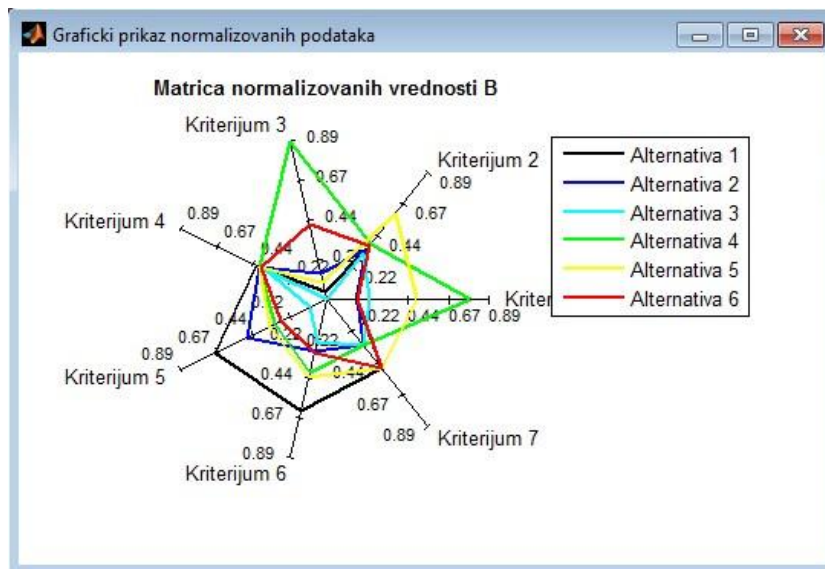
Slika 5.32. Grafički prikaz težinskih faktora kriterijuma i ranga alternativa

Normalizovana matrica može se prikazati histogramom (slika 5.33) i polarnim dijagramom (slika 5.34). Uslov za prikaz normalizovane matrice polarnim dijagramom je da minimalan broj kriterijuma bude 3. Prikaz normalizovane matrice je značajan zbog toga što ovim prikazom donosilac odluke može razmotriti stanje u kojem težinski faktori nemaju uticaj na konačni rezultat, tj. rang alternativa bez primene težinskih faktora⁷⁾. Kao i kod grafičkog prikaza težinskih faktora kriterijuma, iznad generisanog dijagrama normalizovane matrice histogramom, IMCAT ispisiuje kojom metodom je urađena normalizacija (slika 5.33).



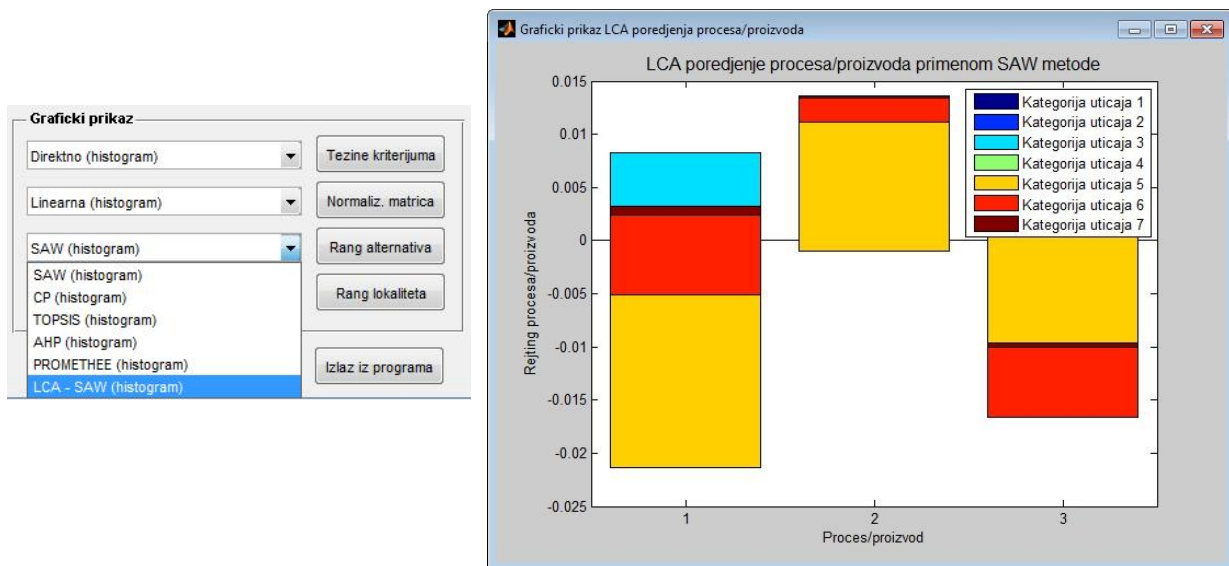
Slika 5.33. Grafički prikaz normalizovane matrice histogramom

⁷⁾ Ako se rezultati normalizovane matrice sumiraju za svaku alternativu pojedinačno, rezultat predstavlja specifičan slučaj metode SAW gde svi kriterijumimi imaju dodeljenu vrednosti težinskih faktora „1“.



Slika 5.34. Grafički prikaz normalizovane matrice polarnim dijagramom

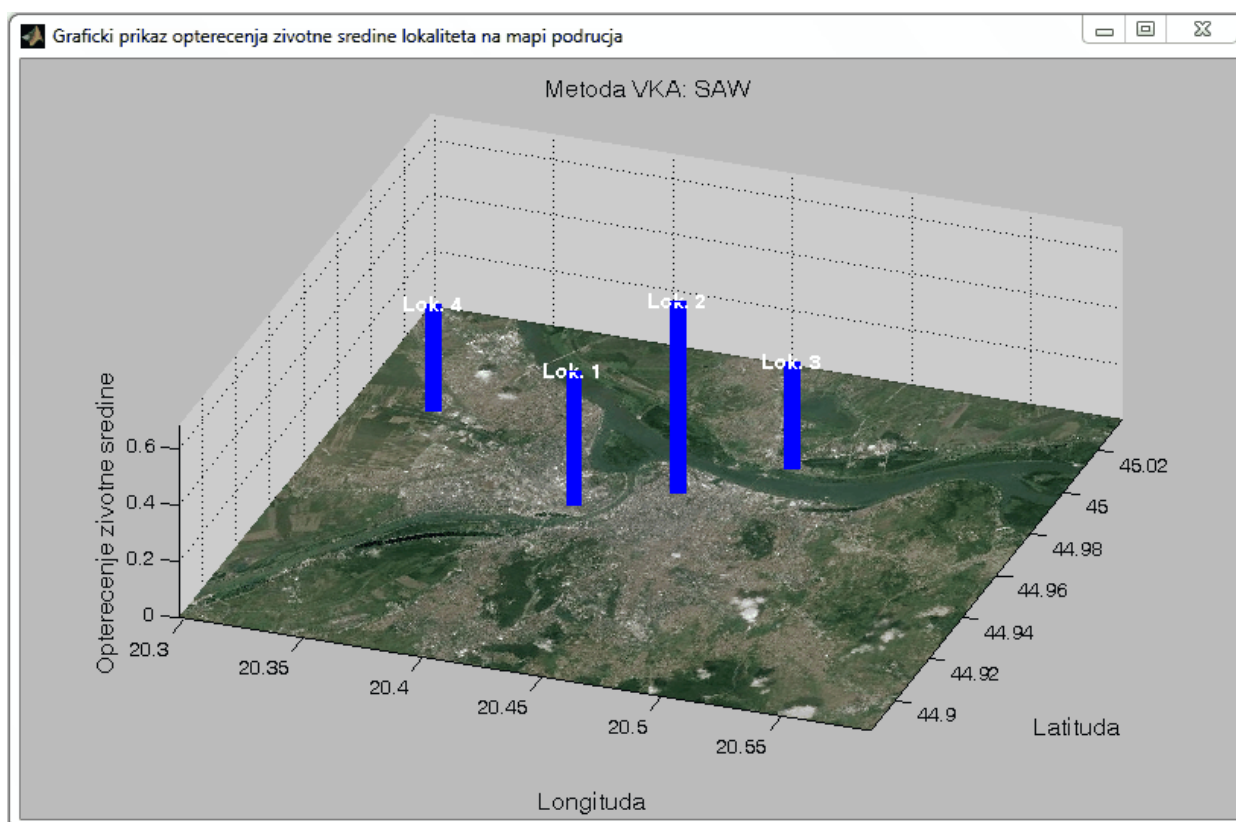
Za potrebe prikaza rezultata LCA iz padajuće liste panela za grafički prikaz potrebno je odabrati „LCA-SAW (histogram)“, slika 5.35. „LCA-SAW (histogram)“ za razliku od običnog prikaza ranga alternativa, prikazuje udeo svake kategorije uticaja u ukupnom uticaju procesa/proizvoda na životnu sredinu i može imati i negativne vrednosti koje ukazuju na pozitivan uticaj na životnu sredinu.



Slika 5.35. Izbor grafičkog prikaza rezultata LCA histogramom

Kod panela za grafički prikaz naročito se može istaći to da je korisniku prilikom unosa podataka u modulu 1 omogućeno da definiše geografske koordinate i sliku mape područja, ukoliko želi da poredi opterećenje životne sredine na različitim lokalitetima. IMCAT program pruža mogućnost trodimenzionalnog grafičkog prikaza preko

histograma na mapi područja (slika 5.36; za primer je prikazana mapa grada Beograda), gde se plavi stubci histograma (z osa grafika – opterećenje životne sredine) iscrtavaju na prethodno unetim geografskim koordinatama područja (x osa grafika - longituda i y osa grafika - latituda). Na vrhu stubca opterećenja životne sredine, svaki lokalitet označen je odgovarajućom oznakom sa „Lok. x“, gde je x broj lokaliteta. Kao i kod grafičkih prikaza težinskih faktora kriterijuma i normalizovane matrice, iznad generisanog dijagrama opterećenja životne sredine lokaliteta na mapi područja IMCAT ispisiuje kojom metodom je urađena VKA.



Slika 5.36. Grafički prikaz opterećenja životne sredine lokaliteta na mapi područja

6. VERIFIKACIJA RAZVIJENOG SISTEMA

Verifikacija razvijenog sistema realizovana je kroz dve studije slučaja:

1. dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja kod ocenjivanja životnog ciklusa procesa,
2. vrednovanje opterećenja životne sredine u urbanim područjima.

U verifikaciji akcenat je stavljen na IMCAT program i pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora; vrednovani procesi, lokaliteti i proizvodi u verifikaciji iskorišćeni su samo kao primeri.

6.1 Primer 1: Dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja kod ocenjivanja životnog ciklusa procesa

6.1.1 Opis višekriterijumskog problema dodeljivanja težinskih faktora kod ocenjivanja uticaja životnog ciklusa

U cilju određivanja težinskih faktora kategorija uticaja u LCIA prvo će biti urađena LCA analiza, a nakon toga dodeljivanje težinskih faktora kategorija uticaja primenom IMCAT programa i pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora. Za LCA analizu odabrana su četiri procesa tretmana otpada: insineracija, bio-gasifikacija, kompostiranje i deponovanje (slika 6.1), za koje je urađeno ocenjivanje životnog ciklusa za slučaj tretmana 1 kg otpada od hrane. LCA je realizovana u SimaPro 8.0 programu.

Insineracija je termički tretman otpada u stacionarnom ili mobilnom postrojenju sa ili bez iskorišćenja energije proizvedene sagorevanjem, čija je primarna uloga termički tretman otpada koji obuhvata i pirolizu, gasifikaciju i sagorevanje u plazmi (Zakon o upravljanju otpadom, 2009). Bio-gasifikacija je proces gasifikacije u kom se konvertuje biodegradabilna organska materija (biomasa) u ugljen-monoksid, vodonik i ugljen dioksid hemijskim reakcijama na visokim temperaturama (preko 700 °C), bez sagorevanja, sa kontrolisanom količinom kiseonika i/ili vodene pare. Kompostiranje je

tretman biorazgradivog otpada pod dejstvom mikroorganizama u cilju stvaranja komposta, u prisustvu kiseonika i pod kontrolisanim uslovima (Zakon o upravljanju otpadom, 2009). Deponovanje je odlaganje otpada na deponiju koja predstavlja mesto za odlaganje otpada na površini ili ispod površine zemlje. Glavni proizvod ovih procesa jeste usluga tretmana otpada u kilogramima suvog čvrstog otpada (Pre-sustainability, 2014a). Pored tretmana otpada, ostali proizvodi insineracije, bio-gasifikacije i deponovanja jesu električna energija, vodena para i topla voda, dok kod kompostiranja nema drugih proizvoda osim usluge tretmana. Detaljnji podaci o ovim procesima dostupni su u opisu sistema za DK i EU27 IO baze podataka (Pre-sustainability, 2014b).

LCIA urađena je ReCiPe⁸⁾ metodom krajnjih pozicija (ReCiPe Endpoint (H) V1.05 / Europe ReCiPe H/A) sa evropskim skupom (setom) normalizacije/ponderisanja. Rezultati normalizacije ReCiPe metode dati su u tabeli 6.1 i ovde se može primetiti razlika u odnosu na klasičnu postavku problema VKA. Rezultati LCIA normalizacije imaju pozitivnu i negativnu vrednost, zbog čega će i rang VKA vrednovanih procesa (ukupni uticaj životnog ciklusa) imati pozitivnu i/ili negativnu vrednost.

6.1.2 Dodeljivanje težinskih faktora u ocenjivanju uticaja životnog ciklusa

Iz rezultata normalizacije ReCiPe metode (tabela 6.1), dobija se normalizovana matrica kao ulaz podataka za VKA (tabela 6.2). Kategorije uticaja smanjenje ozonskog omotača, toksičnost po ljude, jonizujuće zračenje, eutrofikacija slatkovodnih voda, kopnena eutrofikacija, ekotoksičnost slatkovodne vode, morska ekotoksičnost, zaposedanje poljoprivrednog zemljišta, zaposedanje urbanog zemljišta, promena prirodnog područja imaju vrednosti „0“ za sva četiri procesa, te se ove kategorije neće razmatrati u VKA i nisu prikazane u tabeli 6.2.

⁸⁾ ReCiPe metoda je razvijena od strane instituta RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu – nacionalni institut za javno zdravlje i životnu sredinu, Danska), CML (Institut o naukama životne sredine, Norveška) i PRÉ (PRÉ konsultanti, Norveška) od čijih inicijala je i sastavljen naziv ReCiPe metode gde sama reč „recipe“ prevedena sa engleskog označava „recept“ za izračunavanje indikatora kategorija uticaja ocenjivanja životnog ciklusa (Goedkoop i dr., 2013).

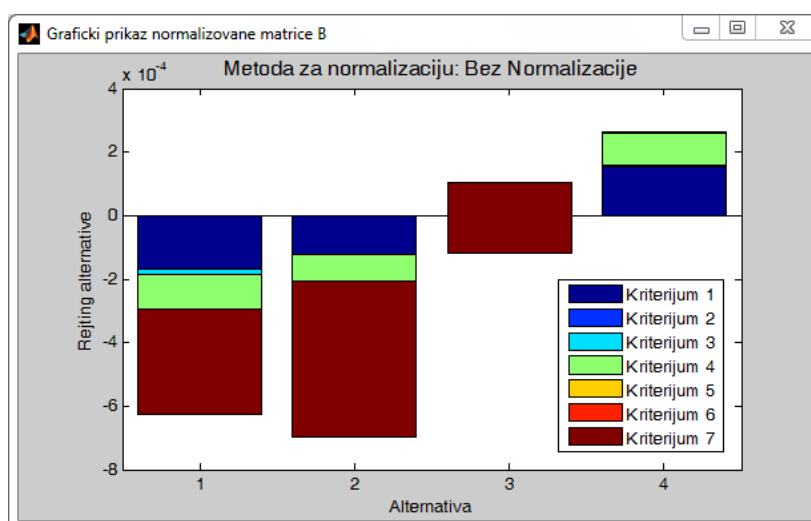
Tabela 6.1. Rezultati normalizacije ReCiPe metode

Kategorija uticaja		Insineracija [-]*10 ⁻⁶	Bio- gasifikacija [-]*10 ⁻⁶	Komposti- ranje [-]*10 ⁻⁶	Deponovanje [-]*10 ⁻⁶
Krajnje pozicije	Međupozicije				
Šteta po ljudsko zdravlje	Promena klime i ljudsko zdravlje	-166,900759	-130,928118	16,396583	156,633154
	Smanjene ozonskog omotača	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
	Toksičnost po ljude	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
	Fotohemijsko formiranje oksidanata	-0,010444	-0,004078	0,000394	0,000241
	Nastanak čestica	-17,034028	10,194958	75,316368	0,559165
	Jonizujuće zračenje	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
	Šteta po kvalitet eko- sistema	Promena klime ekosistema	-109,152302	-85,655059	10,713915
Kiselost zemljišta		-0,129896	0,276392	1,477138	0,006152
Eutrofikacija slatkovodnih voda		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Ekotoksičnost zemljišta		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Ekotoksičnost slatkovodne vode		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Morska ekotoksičnost		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Zaposedanje poljoprivrednog zemljišta		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Zaposedanje urbanog zemljišta		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Promena prirodnog područja		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Šteta po dostu- pnost resursa		Eksploatacija metala	0,002063	-0,006836	0,001096
	Eksploatacija fosilnih goriva	-330,768811	-492,017425	-221,061922	5,810611

Tabela 6.2. Normalizovana matrica kao ulaz za VKA

Kategorija uticaja		Insineracija [-]*10 ⁻⁴	Bio- gasifikacija [-]*10 ⁻⁴	Kompostiranje [-]*10 ⁻⁴	Deponovanje [-]*10 ⁻⁴
Krajnje pozicije	Međupozicije				
Šteta po ljudsko zdravlje	Promena klime i ljudsko zdravlje	-1,669008	-1,309281	0,163966	1,566332
	Fotohemijsko formiranje oksidanata	-0,000104	-0,000041	0,000004	0,000002
	Nastanak čestica	-0,170340	0,101950	0,753164	0,005592
Šteta po kvalitet ekosistema	Promena klime ekosistema	-1,091523	-0,856551	0,107139	1,023113
	Kiselost zemljišta	-0,001299	0,002764	0,014771	0,000062
Šteta po dostupnost resursa	Eksploatacija metala	0,000021	-0,000068	0,000011	0,000068
	Ekspoloatacija fosilnih goriva	-3,307688	-4,920174	-2,210619	0,058106

Normalizacija nije korišćena u IMCAT programu kao što je prikazano na slici 6.1. Za insineraciju (alternativa 1), bio-gasifikaciju (alternativa 2) i kompostiranje (alternativa 3), najveći uticaj na životnu sredinu ima kategorija uticaja „eksploatacija fosilnih goriva“ (kriterijum 7), dok za deponovanje (alternativa 4) najviše doprinosi „promena klime i ljudsko zdravlje“ (kriterijum 1).



Slika 6.1. Rezultati normalizacije ReCiPe metode za hijerarhist perspektivu

Sima Pro 8.0 program pruža četiri perspektive težinskih faktora za ReCiPe metodu: prosečna (A), hijerarhist (H), „egalitarska“ (E) i individualna (I) - tabela 6.3.

Podrazumevani (engl. default) skup težinskih faktora za tri kategorije uticaja na krajnjim pozicijama u ReCiPe prema prosečnoj perspektivi je 400 za ljudsko zdravlje, 400 za ekosistem i 200 za resurse (tabela 6.3).

Tabela 6.3 Četiri perspektive težinskih faktora u ReCiPe metodi (Pre-sustainability, 2014a)

Perspektiva	Težinski faktori kategorija uticaja krajnjih pozicija		
	Šteta po ljudsko zdravlje	Šteta po kvalitet ekosistema	Šteta po dostupnost resursa
„Prosečna“ (A)	400	400	200
„Hijerarhist“ (H)	300	400	300
„Egalitarska“ (E)	300	500	200
„Individualna“ (I)	550	250	200

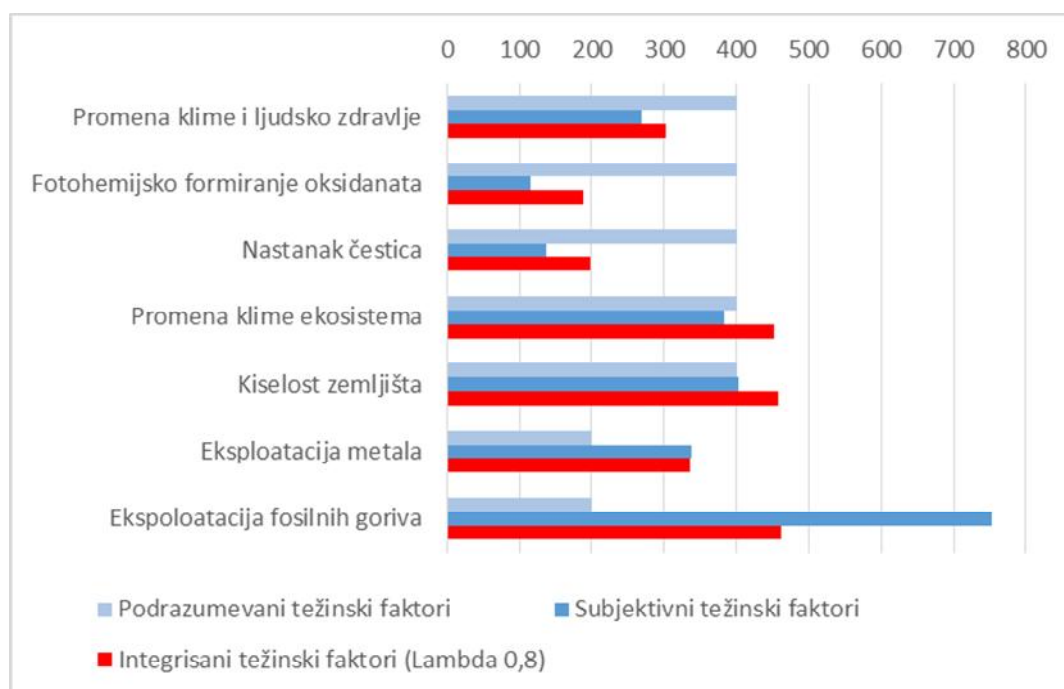
Podrazumevani ReCiPe skup težinskih faktora primenjuje se i na međupozicijama tako što se sve kategorije uticaja na međupozicijama koje pripadaju ljudskom zdravlju množe sa 400, kvalitetu ekosistema sa 400 i resursima sa 200. S obzirom na to da u razmatranom slučaju tretmana otpada postoje tri kategorije uticaja na međupozicijama za štetu po ljudsko zdravlje, dve za ekosistem i dve za resurse, suma težinskih faktora iznosi 1200 za ljudsko zdravlje, 800 za kvalitet ekosistema i 400 za resurse. Stoga, u ReCiPe metodi za prosečnu perspektivu, suma podrazumevanih težinskih faktora kategorija uticaja na krajnjim pozicijama iznosi 1000, a na međupozicijama, za četiri procesa tretmana otpada, iznosi 2400. Da bi rezultat VKA bio uporediv sa rezultatom LCA, VKA težinski faktori kategorija uticaja množiće se sa 2400 (slika 6.2).

Zbog specifičnosti problema (kao što su na primer geografsko područje, država, vremenski period uticaja na životnu sredinu i sl.), podrazumevani težinski faktori zameniće se integrisanim težinskim faktorima dobijenim IMCAT programom. Da bi se subjektivno odredile kategorije uticaja iskorišćeni su pristupi u Soares i drugi (2006), Noh i Lee (2003), gde je AHP upotrebljen za određivanje težinskih faktora kategorija uticaja. S obzirom na to da je kod kategorija uticaja na nivou krajnjih pozicija nesigurnost veća (Goedkoop i dr., 2013), a nasuprot tome, kod međupozicija nesigurnost manja, parcijalno parnim poređenjem AHP odrediće se težinski faktori na nivou međupozicija. Kriterijumi za vrednovanje kategorija uticaja su: vreme, područje i nepovratnost, a nesigurnost vezana za subjektivne težinske faktore (stepen koliko je

donosilac odluke siguran u svoje preferencije), biće iskazana preko odnosa podrazumevanih i subjektivnih težinskih faktora (lambda parametar).

Vreme, područje, nepovratnost i nesigurnost se često koriste kod LCA (Soares i dr., 2006; Noh i Lee, 2003) prilikom dodeljivanja težinskih faktora u LCIA. Kriterijum vreme odnosi se na to da su problemi životne sredine koji traju duži vremenski period mnogo ozbiljniji od onih koji traju kraći vremenski period. Za područje, problemi životne sredine koji pogađaju veće područje (globalno ili regionalno) su ozbiljniji od onih na manjim područjima (lokalno) i ako pogađaju značajnije geografsko područje (blizina zaštićenih prirodnih dobara, naseljeno područje). Nepovratne posledice na životnu sredinu su veći problem od zagađenja koje se vrati u prvobitno stanje nakon nekog vremena. Parcijalno-parna poređenja primenom AHP predstavljena su u prilogu 1, a subjektivni AHP težinski faktori i podrazumevani težinski faktori kategorija uticaja dati su u tabeli 6.4.

Da bi se uvrstila nesigurnost u subjektivno dodeljene težinske faktore kategorija uticaja (grafik 6.1), primenom pod-modula za inteligentno izračunavanje integrisanih težinskih faktora na podrazumevane ReCiPe i subjektivne težinske faktore za odgovarajući lambda parametar, dobijaju se integrisani težinski faktori (tabela 6.4). Lambda parametar je za slučaj vrednovanja LCIA kategorija uticaja postavljen na 0,8 jer se subjektivni težinski faktori smatraju za značajnije.

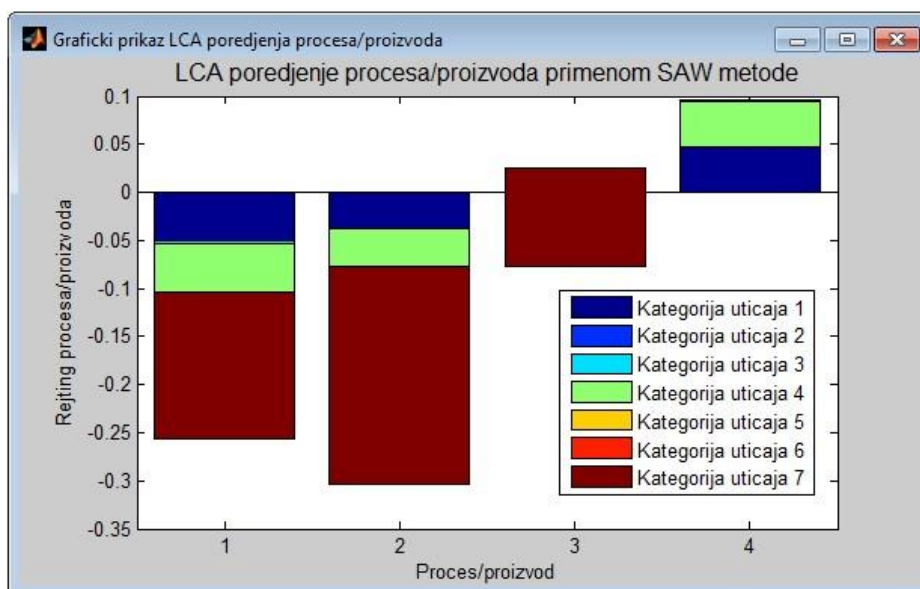


Grafik 6.1. Podrazumevani, subjektivni i integrisani težinski faktori kategorija uticaja

Tabela 6.4. Podrazumevani, subjektivni i integrisani težinski faktori kategorija uticaja

Krajnje pozicije	Podrazumevani težinski faktori (A)	Subjektivni težinski faktori	Međupozicije	Podrazumevani težinski faktori	Subjektivni težinski faktori	Integrisani težinski faktori (Lambda 0,8)
Šteta po ljudsko zdravlje	400,00	217,00	Promena klime i ljudsko zdravlje	400,00	268,80	302,64
			Fotohemijsko formiranje oksidanata	400,00	115,20	188,40
			Nastanak čestica	400,00	136,80	198,72
Šteta po kvalitet ekosistema	400,00	328,00	Promena klime ekosistema	400,00	384,0	452,88
			Kiselost zemljišta	400,00	403,20	458,64
Šteta po dostupnost resursa	200,00	455,00	Eksploatacija metala	200,00	338,40	336,24
			Ekspoloatacija fosilnih goriva	200,00	753,60	462,48
Suma težinskih faktora	1000,00	1000,00	Suma težinskih faktora	2400,00	2400,00	2400,00

Ukupni uticaj životnog ciklusa za četiri procesa tretmana otpada: insineraciju (proces 1), bio-gasifikaciju (proces 2), kompostiranje (proces 3) i deponovanje (proces 4) sa primenom integrisanih težinskih faktora kategorija uticaja prikazan je slikom 6.2 i tabelom 6.5. Slično kao i kod rezultata normalizacije (tabela 6.2, slika 6.1), kod ukupnog uticaja životnog ciklusa za insineraciju (proces 1), bio-gasifikaciju (proces 2) i kompostiranje (proces 3), najveći uticaj na životnu sredinu ima kategorija uticaja „eksploatacija fosilnih goriva“ (kategorija uticaja 7), dok za deponovanje (proces 4) najviše doprinosi „promena klime i ljudsko zdravlje“ (kategorija uticaja 1) i „kiselost zemljišta“ (kategorija uticaja 4).



Slika 6.2. Ukupni uticaj životnog ciklusa za četiri procesa tretmana otpada

Tabela 6.5. Ukupni uticaj životnog ciklusa za četiri procesa tretmana otpada

Kategorija uticaja		Insineracija	Bio-	Komposti-	Deponovanje
Krajnje pozicije	Međupozicije	$[-]*10^{-4}$	gasifikacija	ranje	$[-]*10^{-4}$
			$[-]*10^{-4}$	$[-]*10^{-4}$	
Šteta po ljudsko zdravlje	Promena klime i ljudsko zdravlje	-505,1091	-396,2405	49,6227	474,0341
	Fotohemijsko formiranje oksidanata	-0,0197	-0,0077	0,0007	0,0005
	Nastanak čestica	-34,8500	20,2595	149,6688	1,1112
Šteta po kvalitet ekosistema	Promena klime ekosistema	-494,3276	-387,9148	48,5211	463,3461
	Kiselost zemljišta	-0,5958	1,2676	6,7748	0,0282
Šteta po dostupnost resursa	Eksploatacija metala	0,0069	-0,0230	0,0037	0,0227
	Ekspoloatacija fosilnih goriva	-1529,7405	-2275,4802	-1022,3676	26,8729

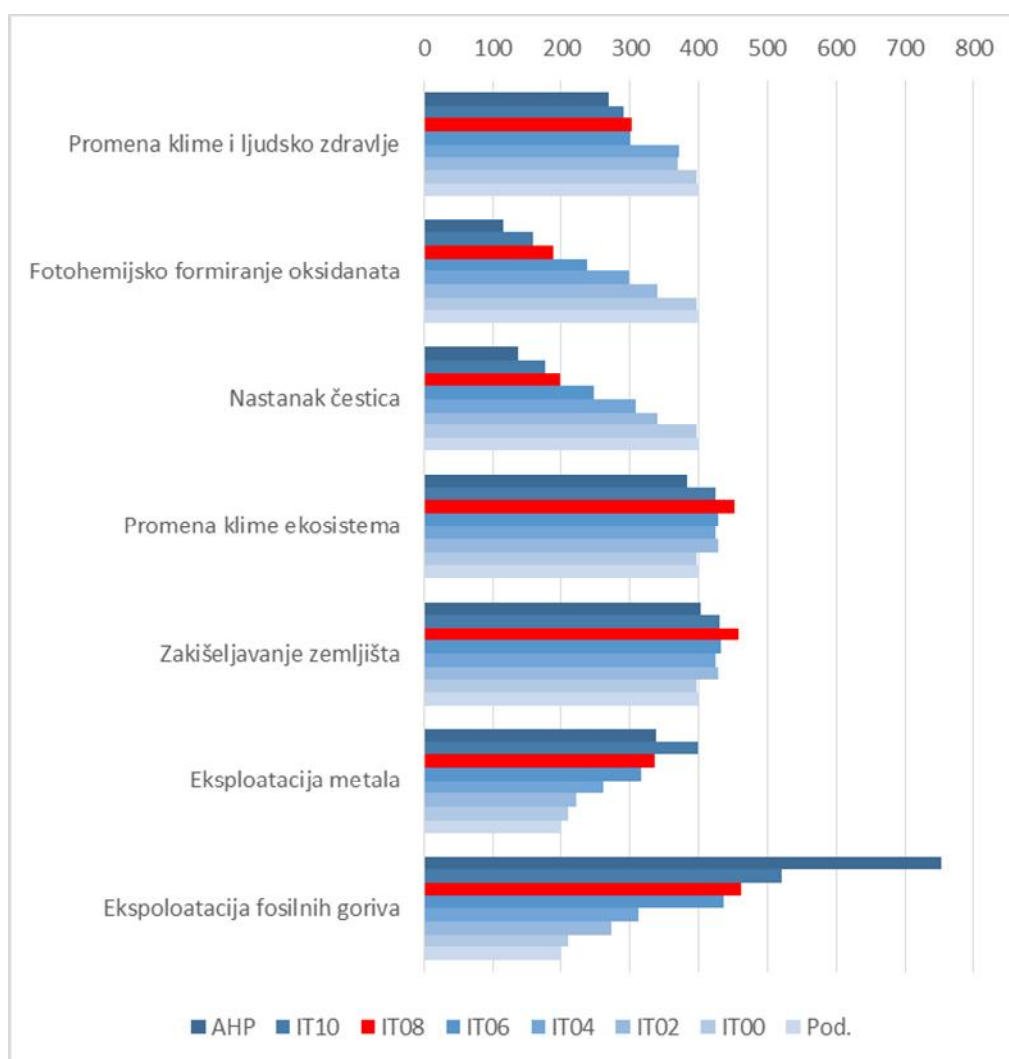
6.1.3 Analiza osetljivosti rezultata višekriterijumske analize

Da bi se ispitala robusnost odabranog skupa integrisanih težinskih faktora, sprovedena je analiza osetljivosti razmatranjem subjektivnih, objektivnih težinskih faktora, kao i šest skupova (setova) integrisanih težinskih faktora kriterijuma dobijenih promenom vrednosti lambda parametra. Skupovi težinskih faktora kategorija uticaja prikazani su tabelom 6.6.

Tabela 6.6. Opis skupova težinskih faktora kategorija uticaja

Oznaka	Značenje	Vrednost lambda parametra
AHP	subjektivni AHP težinski faktori	-
IT10	integrirani subjektivni AHP težinski faktori apsolutno značajniji	1,0
IT08	integrirani subjektivni AHP težinski faktori veće značajnosti	0,8
IT06	integrirani subjektivni AHP težinski faktori blago značajniji	0,6
IT04	integrirani podrazumevani ReCiPe težinski faktori blago značajniji	0,4
IT02	integrirani podrazumevani ReCiPe težinski faktori veće značajnosti	0,2
IT00	integrirani podrazumevani ReCiPe težinski faktori apsolutno značajniji	0,0
Pod.	podrazumevani ReCiPe težinski faktori	-

Subjektivni, objektivni i šest skupova integriranih težinskih faktora kriterijuma dati su tabelom 6.7 i grafikom 6.2, gde je odabrani skup integriranih težinskih faktora ISZ označen crvenom bojom.

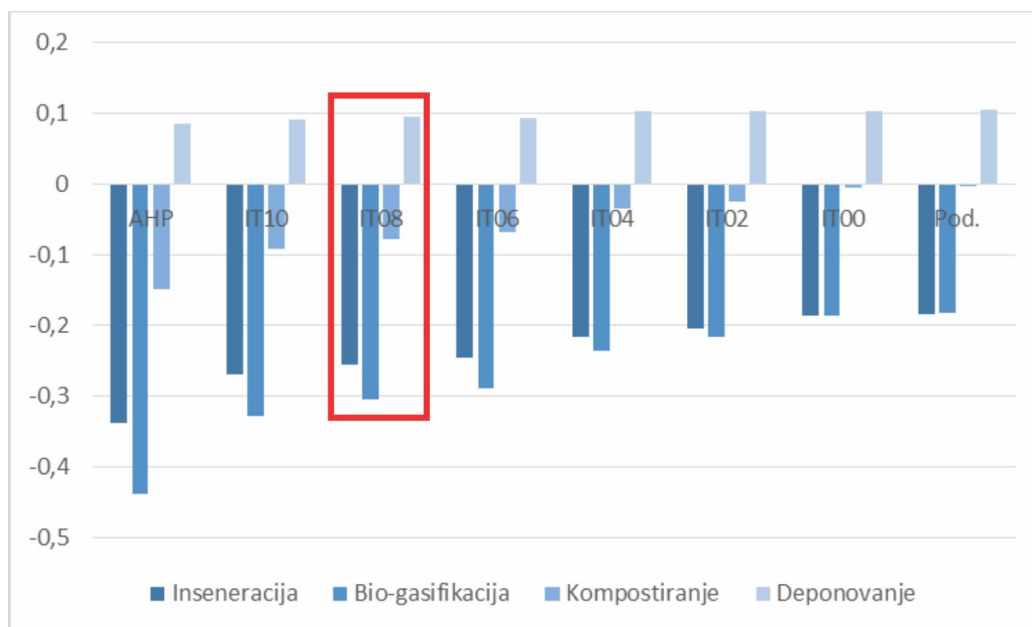


Grafik 6.2. Skupovi težinskih faktora kategorija uticaja

Tabela 6.7. Skupovi težinskih faktora kategorija uticaja

Skup težinskih faktora/Kategorija uticaja	AHP	IT10	IT08	IT06	IT04	IT02	IT00	Pod.
Promena klime i ljudsko zdravlje	268,80	291,36	302,64	301,20	371,28	368,88	396,24	400,00
Fotohemijsko formiranje oksidanata	115,20	158,16	188,40	238,32	297,84	339,60	396,24	400,00
Nastanak čestica	136,80	176,64	198,72	247,92	307,68	339,60	396,24	400,00
Promena klime ekosistema	384,00	424,32	452,88	427,44	424,56	428,16	396,24	400,00
Kiselost zemljišta	403,20	431,04	458,64	432,24	424,80	428,64	396,24	400,00
Eksploatacija metala	338,40	398,64	336,24	316,56	261,12	222,48	209,52	200,00
Eksploatacija fosilnih goriva	753,60	520,08	462,48	436,56	312,72	272,64	209,52	200,00

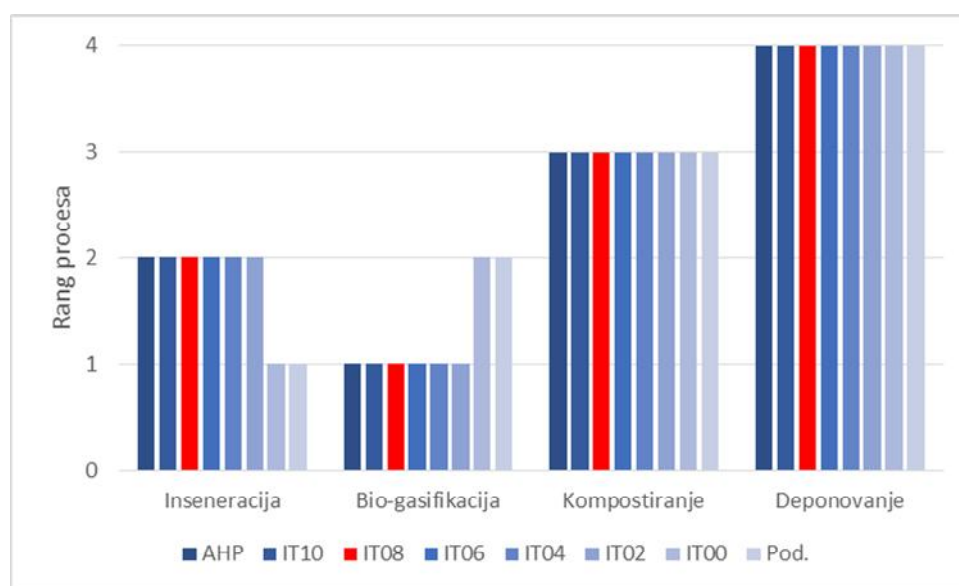
Ukupan uticaj životnog ciklusa procesa tretmana otpada na životnu sredinu izračunat je metodom SAW, i za različite skupove težinskih faktora kriterijuma prikazan je grafikom 6.3, gde je rang alternativa za odabrani skup integrisanih težinskih faktora IT08 označen pravougaonikom crvene boje.



Grafik 6.3. Ukupan uticaj životnog ciklusa procesa tretmana otpada na životnu sredinu

Tabela 6.8. Ukupan uticaj životnog ciklusa za različite skupove težinskih faktora kategorija uticaja

Skup težinskih faktora/Proces tretmana otpada	AHP	IT10	IT08	IT06	IT04	IT02	IT00	Pod.
Insineracija	-0,3384	-0,2700	-0,2564	-0,2456	-0,2170	-0,2043	-0,1855	-0,1834
Bio-gasifikacija	-0,4374	-0,3284	-0,3038	-0,2882	-0,2356	-0,2155	-0,1847	-0,1809
Kompostiranje	-0,1472	-0,0917	-0,0768	-0,0677	-0,0347	-0,0234	-0,0051	-0,0027
Deponovanje	0,0859	0,0922	0,0965	0,0936	0,1036	0,1034	0,1040	0,1050



Grafik 6.4. Rang procesa za različite skupove težinskih faktora kategorija uticaja

*Tabela 6.9. Rang procesa za različite skupove težinskih faktora kategorija uticaja**

Skup težinskih faktora / Proces tretmana otpada	AHP	IT10	IT08	IT06	IT04	IT02	IT00	Pod.
Insineracija	II	II	II	II	II	II	I	I
Bio-gasifikacija	I	I	I	I	I	I	II	II
Kompostiranje	III	III	III	III	III	III	III	III
Deponovanje	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV

* gde su I, II i III procesi sa pozitivnim uticajem na životnu sredinu, a IV proces sa negativnim uticajem na životnu sredinu.

6.1.4 Diskusija rezultata višekriterijumske analize

Posmatrajući grafik 6.2 i tabelu 6.7, može se primetiti da se vrednosti subjektivnih težinskih faktora dobijenih AHP i podrazumevanih ReCiPe težinskih faktora značajno razlikuju prema svim kriterijumima. Najveća razlika subjektivnih i objektivnih težinskih

faktora je kod kriterijuma „eksploatacija fosilnih goriva“. Subjektivnim postupkom AHP najveći težinski faktor je dodeljen kriterijumu „eksploatacija fosilnih goriva“, dok nasuprot tome podrazumevani ReCiPe težinski faktori imaju najmanju vrednost za isti kriterijum. Slična situacija važi i za kriterijume „nastanak čestica“ i „fotohemijsko formiranje oksidanata“ gde su subjektivnim AHP dodeljene najmanje vrednosti težinskih faktora, a podrazumevani ReCiPe težinski faktori su značajno veći. Primenom integrisanih težina donosilacu odluke omogućeno je da prilikom dodeljivanja težinskih faktora kriterijuma, pored subjektivnih preferencija, uključi i podrazumevane ReCiPe težinske faktore, čime se uzima u obzir i nesigurnost pri donošenju odluka. Postavljanjem lambda parametra na vrednost 0,8 donosilac odluke određuje da će pored svojih subjektivnih težinskih faktora uključiti sa 20% značajnosti i vrednosti podrazumevanih težinskih faktora.

Promena skupova težinskih faktora skoro da ne utiče na promenu ranga procesa (alternativa) (grafik 6.3 i 6.4, tabela 6.9). Za AHP, IT10, IT08, IT06, IT04 i IT02 skupove težinskih faktora dobija se identičan rang procesa, dok za IT00 i Pod. skupove težinskih faktora, dolazi do promene ranga za insineraciju (proces 1) i bio-gasifikaciju (proces 2). S obzirom na to da pozitivne i negativne vrednosti rezultata LCIA imaju suprotan uticaj na životnu sredinu, sa grafika 6.3 može se primetiti da za sve slučajeve promene težinskih faktora kategorija uticaja, deponovanje ima negativan ukupan uticaj na životnu sredinu dok insineracija, bio-gasifikacija i kompostiranje imaju pozitivan uticaj na životnu sredinu. Ako se saberu uticaji procesa insineracija, bio-gasifikacije i kompostiranje dobijeni primenom subjektivnih AHP težinskih faktora, može se primetiti da je ukupan uticaj porastao u odnosu na podrazumevani skup težinskih faktora. Razlog porasta ukupnog uticaja sa AHP težinskim faktorima leži u činjenici da subjektivni težinski faktori daju veću značajnost kategoriji uticaja „eksploatacija fosilnih goriva“ koja ima najveći udeo uticaja na životnu sredinu za procese insineracija, bio-gasifikacija i kompostiranje (grafik 6.3).

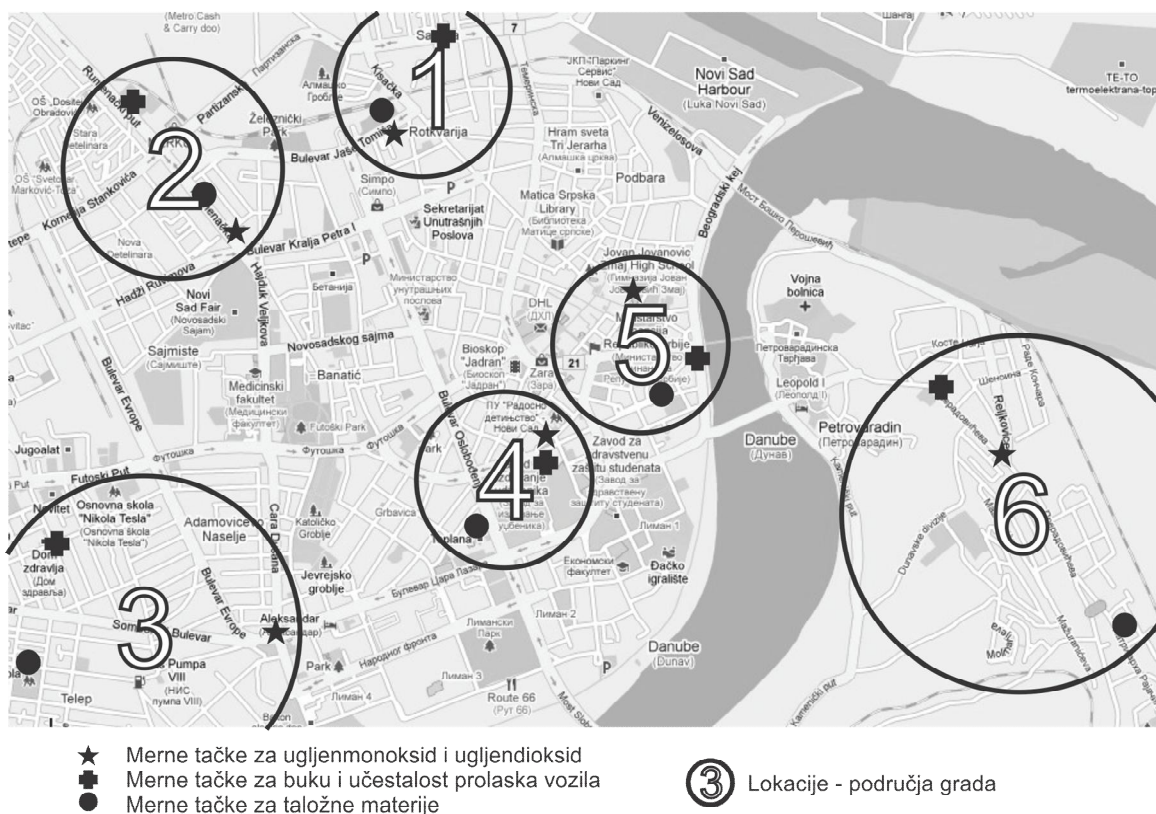
Na kraju može se zaključiti da za posmatrani slučaj vrednovanja procesa tretmana otpada odabrani skup integrisanih težinskih faktora (IT08) odgovarajuće reflektuje preferencije donosilaca odluke. Sa promenom različitih skupova težinskih faktora kategorija uticaja, rang vrednovanih procesa ostaje nepromenjen, u odnosu rang procesa dobijen primenom subjektivnih AHP težinskih faktora, a pored subjektivnih AHP uzima se u obzir i uticaj podrazumevanog skupa težinskih faktora.

6.2 Primer 2: Vrednovanje opterećenja životne sredine u urbanim područjima

6.2.1 Opis višekriterijumskog problema opterećenja životne sredine

U drugom primeru verifikacije cilj višekriterijumske analize je vrednovanje opterećenja životne sredine od strane motornih vozila na lokalitetima grada Novog Sada. Kriterijumi na osnovu kojih se vrednuje opterećenje životne sredine su fizičkog karaktera sa kvantitativnim vrednostima. Odnose se na kvalitet vazduha, nivo komunalne buke i učestalost prolazaka vozila na pojedinim delovima grada Novog Sada. Kvalitet vazduha predstavljen je preko izmerenih vrednosti aerosedimenta, koncentracije ugljenmonoksida CO i ugljendioksida CO_2 . Učestalost prolaska vozila daje informacije o broju prolaska teških (teretnih), lakih (putničkih) vozila i motocikala na prometnim saobraćajnicama u gradu Novom Sadu.

Merenje vrednosti kriterijuma urađeno je za period od mesec dana, a merena mesta kriterijuma grupisana su u šest lokaliteta na sledeći način (slika 6.3): L1. lokalitet – Salajka, L2. lokalitet – Detelinara, L3. lokalitet – Telep, L4. lokalitet – Grbavica, L5. lokalitet – Stari grad i L6. lokalitet – Petrovaradin.



Slika 6.3. Lokaliteti i pozicije mernih mesta

Prema definisanim kriterijumima i lokalitetima formirana je matrica performansi (tabela 6.10).

Tabela 6.10. Izmerene vrednosti kriterijuma prema lokacijama (Environovisad, 2014)

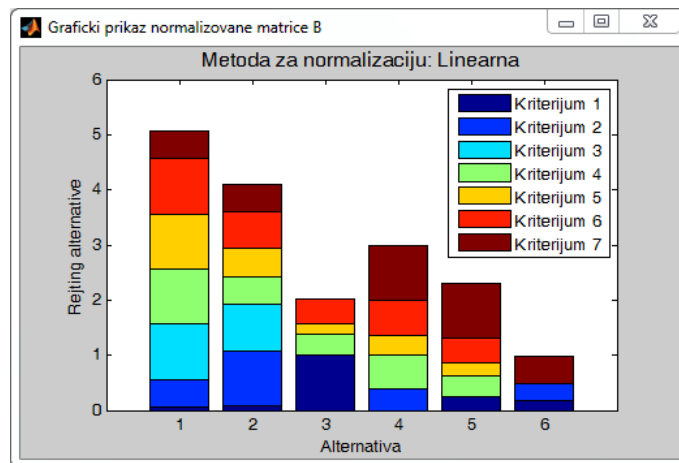
Grupa kriterijuma	Kvalitet vazduha			Buka	Učestalost prolaska			
	Kriterijum/ Lokalitet	Aerose- diment [mg/m ²]	Koncentra- cija CO ₂ [mg/m ³]		Konce- ntracija CO* [mg/m ³]	Komuna- lna buka [dB]	Teških vozila [-]	Lakih vozila [-]
Tip kriterijuma**	max	max	max	max	max	max	max	max
L1 – Salajka	146	988,63	0,92000	73	48	615	4	
L2 – Detelinara	159	1205,87	0,77000	69	28	510	4	
L3 – Telep	780	766,36	0,00001	68	14	447	3	
L4 – Grbavica	107	933,82	0,00001	70	21	501	5	
L5 – Stari grad	275	764,80	0,00001	68	16	445	5	
L6 - Petrovaradin	227	897,05	0,00001	65	6	305	4	

* za potrebe metode entropije, vrednosti „0“ su postavljene na 0,00001 koja se smatra za zanemarljivu u odnosu na ostale prilikom vrednovanja.

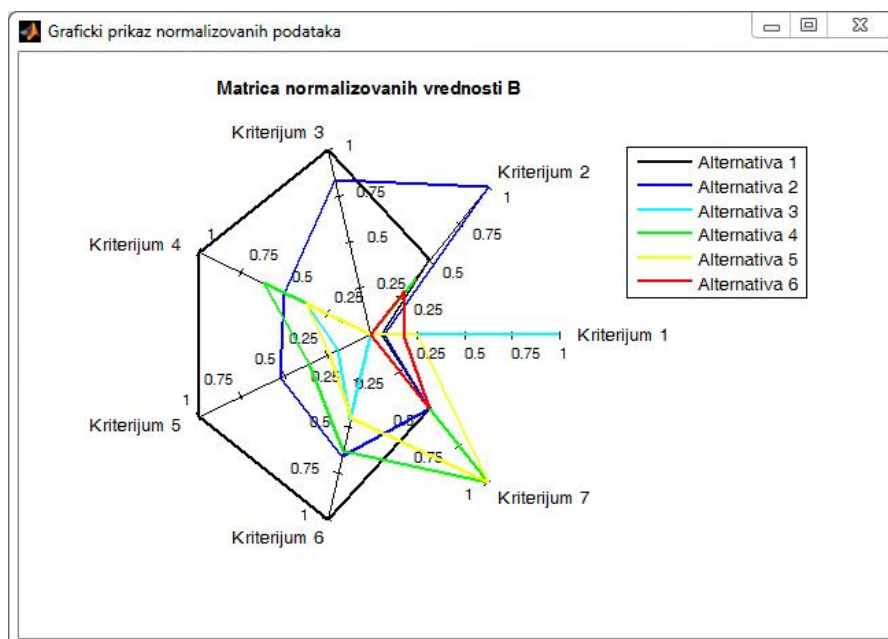
** tip kriterijuma je za sve kriterijume postavljen na „max“ zbog čega će krajnji rezultat prikazati opterećenje životne sredine na lokalitetima (što je veća vrednost ranga lokaliteta toliko je veće opterećenje životne sredine).

6.2.2 Višekriterijumska analiza opterećenja životne sredine

Preko linearne normalizacije metode CP dobija se normalizovana matrica (slika 6.4 i 6.5, tabela 6.11), koja pruža početne informacije o opterećenju životne sredine na lokalitetima bez uticaja težinskih faktora na krajnji rezultat, iz čega se jasno može primetiti da prvi lokalitet (Salajka) i šesti lokalitet (Petrovaradin) imaju najveće i najmanje opterećenje životne sredine u odnosu na ostale lokalitete.



Slika 6.4. Grafički prikaz normalizovane matrice performansi histogramom



Slika 6.5. Grafički prikaz normalizovane matrice performansi polarnim dijagramom

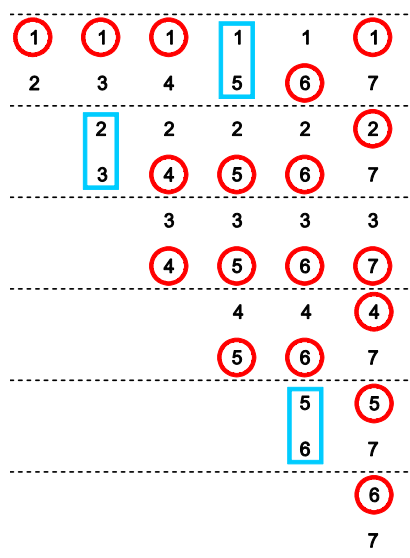
Tabela 6.11. Normalizovana matrica performansi

Kriterijum/ Lokalitet	Kvalitet vazduha			Buka	Učestalost prolaska		
	Aerose- diment [mg/m ²]	Konce- ntracija CO ₂ [mg/m ³]	Konce- ntracija CO [mg/m ³]	Komuna- lna buka [dB]	Teških vozila [-]	Lakih vozila [-]	Moto- cikala [-]
L1 – Salajka	0,0579	0,5075	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,5000
L2 – Detelinara	0,0773	1,0000	0,8370	0,5000	0,5238	0,6613	0,5000
L3 – Telep	1,0000	0,0035	0,0000	0,3750	0,1905	0,4581	0,0000
L4 – Grbavica	0,0000	0,3832	0,0000	0,625	0,3571	0,6323	1,0000
L5 – Stari grad	0,2496	0,0000	0,0000	0,375	0,2381	0,4516	1,0000
L6 - Petrovaradin	0,1783	0,2998	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000

Za posmatrani problem težinski faktori kriterijuma određeni su subjektivnim pristupom metodom FT (Agarski i dr., 2012a) (slika 6.6 i 6.7, tabela 6.12) i objektivnim pristupom metodom entropije. Metoda entropije daje veću značajnost kriterijumima sa većom disperzijom uzorka. Integracija subjektivnih i objektivnih težinskih faktora kriterijuma urađena je tako što je veća značajnost data subjektivnim težinskim faktorima (lambda parametar 0,75). Subjektivni, objektivni i integrisani težinski faktori kriterijuma dati su tabelom 6.13 i grafikom 6.5.

Težinski faktori dobijeni Fulerovim trouglom normalizovani su na sledeći način:

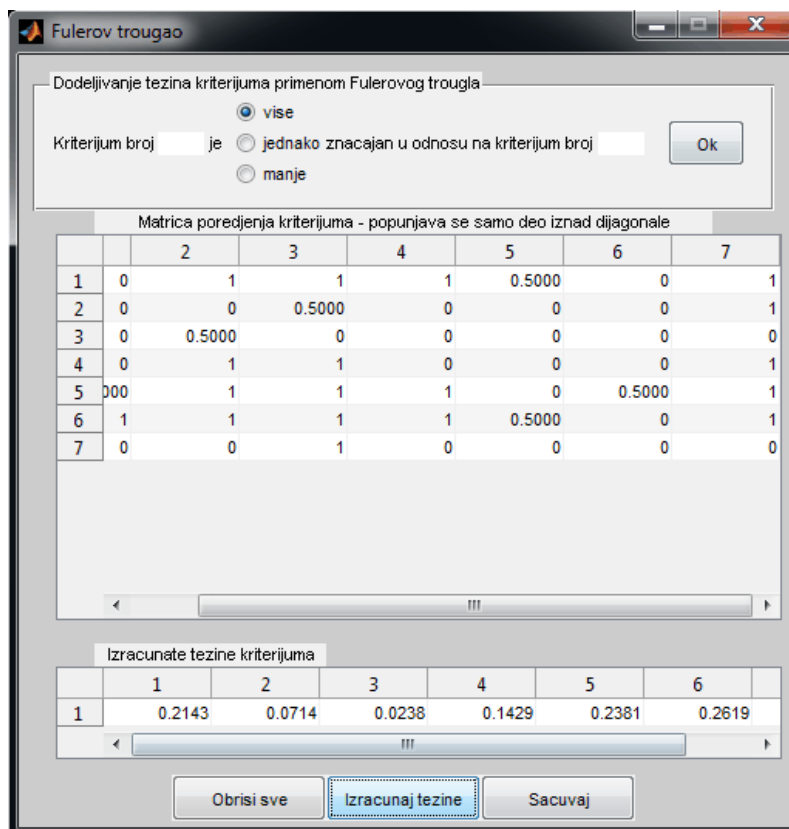
$$w_{NORM,j} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^7 w_j}, \quad j = 1, 2, \dots, 7. \quad (6.1)$$



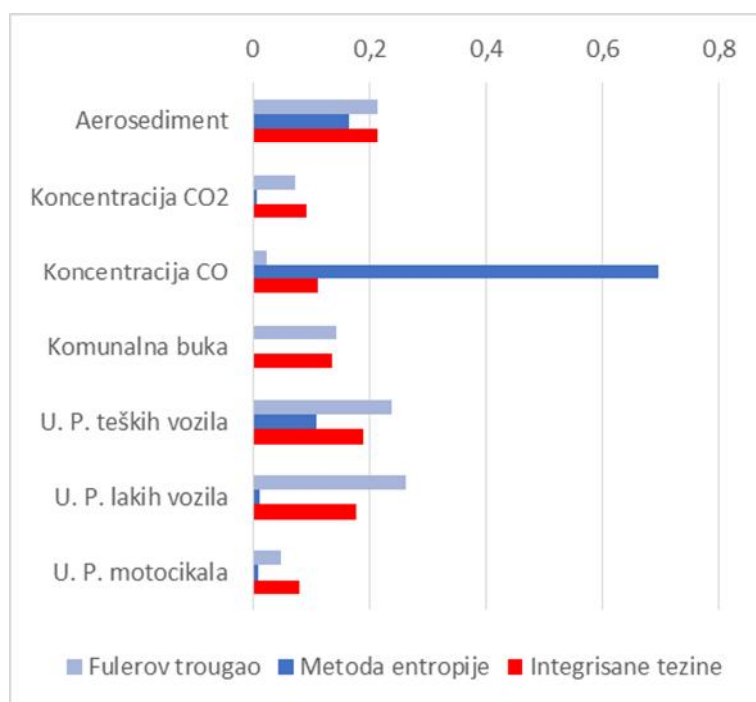
Slika 6.6. Fulerov trougao poređenja kriterijuma (Agarski i dr., 2012a)

Tabela 6.12. Težinski faktori kriterijuma dobijene Fulerovim trouglom (Agarski i dr., 2012a)

Kriterijum	Težinski faktor kriterijuma dobijen Fulerovim trouglom	Normalizovani težinski faktor kriterijuma
1 – Aerosediment	4,5000	0,2143
2 – Koncentracija CO ₂	1,5000	0,0714
3 – Koncentracija CO	0,5000	0,0238
4 – Komunalna buka	3,0000	0,1429
5 – Učestalost prolaska teških vozila	5,0000	0,2381
6 - Učestalost prolaska lakih vozila	5,5000	0,2619
7 - Učestalost prolaska motocikala	1,0000	0,0476



Slika 6.7. Fulerov trougao poređenja kriterijuma u IMCAT programu

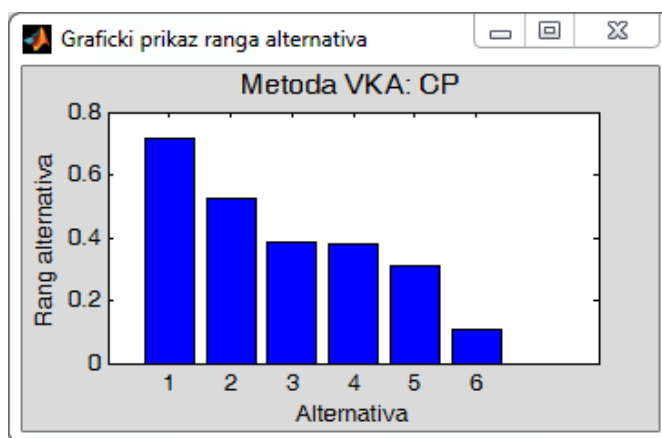


Grafik 6.5. Težinski faktori kriterijuma dobijeni Fulerovim trouglom, metodom entropije i integrisanjem

Tabela 6.13. Subjektivni, objektivni i integrisani težinski faktori

Skup težinskih faktora/Kriterijum	FT	Metoda entropije	Integrirani težinski faktori (Lambda 0,75)
Aerosediment	0,2143	0,1655	0,2148
Koncentracija CO ₂	0,0714	0,0080	0,0913
Koncentracija CO	0,0238	0,6954	0,1117
Komunalna buka	0,1429	0,0004	0,1368
U. P. teških vozila	0,2381	0,1091	0,1903
U. P. lakih vozila	0,2619	0,0128	0,1763
U. P. motocikala	0,0476	0,0088	0,0788

Na osnovu normalizovane matrice (slika 6.4 i 6.5, tabela 6.11) i integriranih težinskih faktora (grafik 6.5, tabela 6.13), primenom metode CP sa parametrom p postavljenim na „1“ dobija se konačni rezultat vrednovanja VKA, opterećenje lokaliteta (slika 6.8, tabela 6.14) koje IMCAT program može grafički prikazati na mapi područja (slika 6.9). Na slici 6.9, isto kao i na običnom histogramu (slika 6.8), visina plavih stubaca proporcionalna je sa opterećenjem životne sredine. Prilikom određivanja geografskih koordinata (longituda i latituda) lokaliteta za tačne koordinate lokaliteta, uzete su koordinate središta kruga kojeg obrazuju merna mesta lokaliteta za koje se smatra da najbolje opisuje stanje životne sredine na tom području.

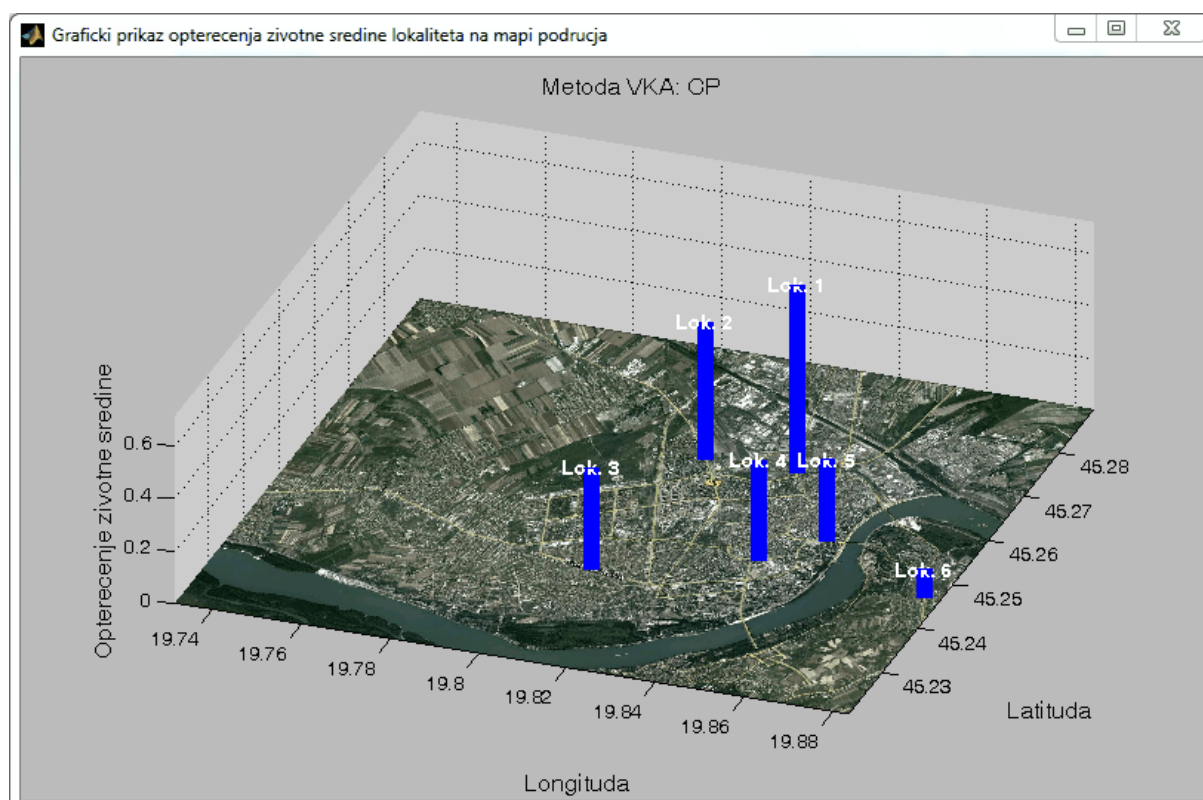


Slika 6.8. Grafički prikaz vrednovanja

Tabela 6.14. Opterećenje lokaliteta za integrisane težinske faktore ($\lambda = 0,75$)

Lokalitet	Vrednost opterećenja ZS	Rang lokaliteta*
L1 – Salajka	0,7133	VI
L2 – Detelinara	0,5254	V
L3 – Telep	0,3834	IV
L4 – Grbavica	0,3787	III
L5 – Stari grad	0,3086	II
L6 - Petrovaradin	0,1050	I

* I najmanje opterećen lokalitet, VI najviše opterećen lokalitet



Slika 6.9. Grafički prikaz opterećenja životne sredine na mapi područja

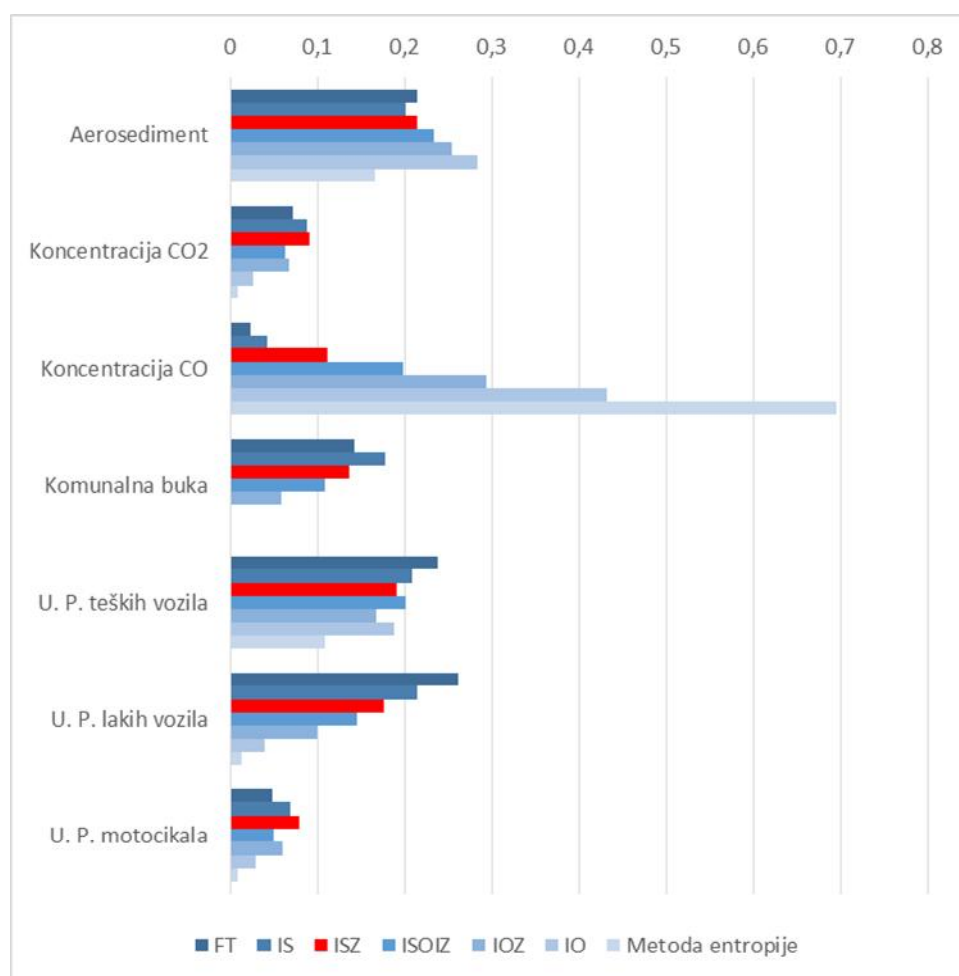
6.2.3 Analiza osetljivosti rezultata višekriterijumske analize

Da bi se ispitala robusnost odabranog skupa integrisanih težinskih faktora sprovodi se analiza osetljivosti uzimanjem subjektivnih, objektivnih, kao i pet skupova integrisanih težinskih faktora kriterijuma dobijenih promenom vrednosti λ parametra. Skupovi težinskih faktora za vrednovanje opterećenja životne sredine prikazani su tabelom 6.15.

Tabela 6.15. Opis skupova težinskih faktora kriterijuma

Oznaka	Značenje	Vrednost lambda parametra
FT	subjektivni FT težinski faktori	-
IS	integrirani subjektivni FT težinski faktori apsolutno značaniji	1,00
ISZ	integrirani subjektivni FT težinski faktori blago značajniji	0,75
ISOIZ	integrirani subjektivni FT i objektivne težinski faktori iste značajnosti	0,50
IOZ	integrirani objektivni težinski faktori metode entropije blago značajniji	0,25
IO	integrirani objektivni težinski faktori metode entropije apsolutno značajniji	0,00
Metoda entropije	objektivni težinski faktori metode entropije	-

Subjektivni, objektivni i pet skupova integriranih težinskih faktora kriterijuma dati su tabelom 6.16 i grafikom 6.6, gde je odabrani skup integriranih težinskih faktora ISZ označen crvenom bojom.

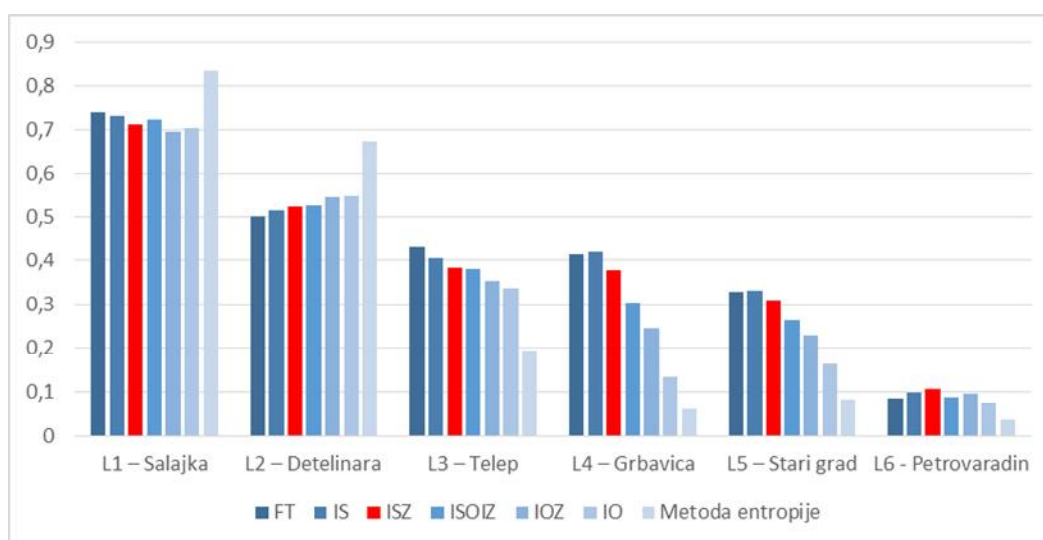


Grafik 6.6. Skupovi težinskih faktora kriterijuma

Tabela 6.16. Skupovi težinskih faktora kriterijuma

Skup težinskih faktora/Kriterijum	FT	IS	ISZ	ISOIZ	IOZ	IO	Metoda entropije
Aerosediment	0,2143	0,2016	0,2148	0,2339	0,2547	0,2834	0,1655
Koncentracija CO ₂	0,0714	0,0886	0,0913	0,0631	0,0672	0,0268	0,0080
Koncentracija CO	0,0238	0,0424	0,1117	0,1976	0,2943	0,4320	0,6954
Komunalna buka	0,1429	0,1771	0,1368	0,1082	0,0580	0,0015	0,0004
U. P. teških vozila	0,2381	0,2081	0,1903	0,2018	0,1670	0,1875	0,1091
U. P. lakih vozila	0,2619	0,2140	0,1763	0,1452	0,0990	0,0399	0,0128
U. P. motocikala	0,0476	0,0682	0,0788	0,0501	0,0598	0,0289	0,0088

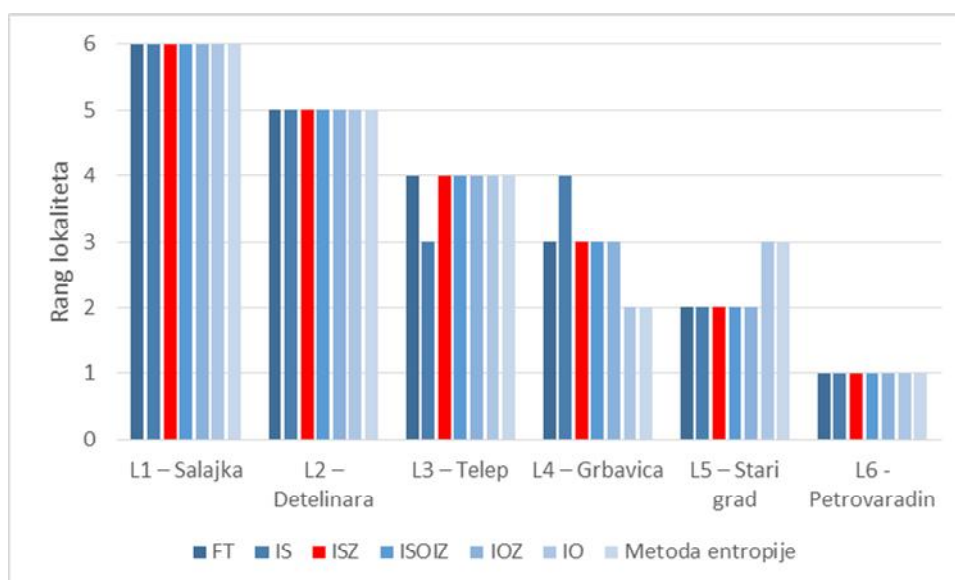
Opterećenje lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma prikazano je grafikom 6.7 i 6.8, kao i tabelama 6.17 i 6.18, gde je rang alternativa za odabrani skup integriranih težinskih faktora ISZ označen crvenom bojom.



Grafik 6.7. Opterećenje lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma

Tabela 6.17. Opterećenje lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma

Skup težinskih faktora/Lokalitet	FT	IS	ISZ	ISOIZ	IOZ	IO	Metoda entropije
L1 – Salajka	0,7391	0,7324	0,7133	0,7235	0,6970	0,7053	0,8357
L2 – Detelinara	0,5011	0,5128	0,5254	0,5275	0,5451	0,5500	0,6730
L3 – Telep	0,4334	0,4060	0,3834	0,3797	0,3538	0,3381	0,1924
L4 – Grbavica	0,4149	0,4224	0,3787	0,3058	0,2440	0,1323	0,0592
L5 – Stari grad	0,3297	0,3311	0,3086	0,2627	0,2296	0,1629	0,0820
L6 - Petrovaradin	0,0834	0,0966	0,1050	0,0857	0,0955	0,0730	0,0363



Grafik 6.8. Rang opterećenja lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma

Tabela 6.18. Rang opterećenja lokaliteta za različite skupove težinskih faktora kriterijuma*

Skup težinskih faktora/Lokalitet	FT	IS	ISZ	ISOZ	IOZ	IO	Metoda entropije
L1 – Saljka	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
L2 – Detelinara	V	V	V	V	V	V	V
L3 – Telep	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV
L4 – Grbavica	III	IV	III	III	III	II	II
L5 – Stari grad	II	II	II	II	II	III	III
L6 - Petrovaradin	I	I	I	I	I	I	I

* gde je I najmanje opterećen lokalitet, VI najviše opterećen lokalitet

6.2.4 Diskusija rezultata višekriterijumske analize

Posmatrajući grafik 6.5 i tabelu 6.16, može se primetiti da se vrednosti subjektivnih težinskih faktora dobijenih Fulerovim trouglom i objektivnih težinskih faktora dobijenih metodom entropije, značajno razlikuju prema svim kriterijumima. Najveća razlika subjektivnih i objektivnih težinskih faktora je kod kriterijuma „koncentracija CO“. Subjektivnim postupkom Fulerovog trougla, najmanji težinski faktor je dodeljen kriterijumu „koncentracija CO“ jer se izmerene vrednosti smatraju za male i da ne utiču značajno na opterećenje životne sredine, dok nasuprot tome objektivni pristup metodom entropije je najveću vrednost težinskog faktora dodelio istom kriterijumu zbog velike disperzije vrednosti. Slična situacija važi i za kriterijum „učestalost prolaska lakih vozila“,

gde je subjektivnim pristupom dodeljena najveća vrednost težinskog faktora, a objektivnim pristupom izračunat je vrlo mali težinski faktor.

Ako se posmatraju skupovi težinskih faktora metode entropije i IO težinskih faktora za kriterijum „Aerosediment“, može se primetiti jedna „ekstremna situacija“ gde IO značajno odstupa od težinskih faktora metode entropije. Značajno odstupanje IO od težinskih faktora metode entropije, ukazuje na potencijalnu slabu tačku razvijenog pristupa inteligentnog integrisanja težinskih faktora ukoliko se koristi lambda parametar sa vrednostima postavljenim na 0 i 1. Međutim, integrisanje težinskih faktora radi se sa ciljem uzimanja u obzir oba skupa težinskih faktora gde će lambda parametar uvek imati vrednost između „0“ i „1“, ne uključujući „ekstremne vrednosti“ „0“ i „1“. Navedeno ukazuje na to da bi pod-modul za inteligentno integrisanje težinskih faktora trebalo dodatno ispitati.

Promena skupova težinskih faktora neznatno utiče na promenu ranga alternativa (grafik 6.7 i 6.8, tabela 6.18). Za FT, ISZ, ISOIZ i IOZ skupove težinskih faktora dobija se identičan rang alternativa, dok za IS, IO skupove težinskih faktora i težinske faktore dobijene metodom entropije dolazi do promene ranga: kod IS za Telep (lokalitet L3) i Grbavicu (lokalitet L4), a kod IO Grbavica (lokalitet L4) i Stari grad (lokalitet L5). Salajka (lokalitet L1) i Detelinara (lokalitet L2) su najopterećeniji lokaliteti, a Petrovaradin (lokalitet L6) najmanje opterećen lokalitet za svih sedam skupova težinskih faktora.

Na kraju, može se zaključiti da za posmatrano vrednovanje opterećenja životne sredine odabrani skup integrisanih težinskih faktora (ISZ) dobro reflektuje preferencije donosilaca odluke, jer sa promenom različitih skupova težinskih faktora rang opterećenja lokaliteta neznatno se menja. Integrisani skup težinskih faktora (ISZ), pored subjektivnih preferencija donosioca odluke, omogućava uzimanje u obzir i objektivnih težinskih faktora čime donosilac odluke iskazuje svoju nesigurnost. Primenom integrisanih težinskih faktora, donosilacu odluke omogućeno je da prilikom određivanja težinskih faktora kriterijuma pored subjektivnih preferencija uključi i objektivne težinske faktore kriterijuma, čime se uzima u obzir i uticaj brojčanih vrednosti iz matrice performanse, tj. disperzija vrednosti kriterijuma.

7. ZAKLJUČAK

Zaštita životne sredine kao relativno mlada naučna disciplina ima značaj prilikom definisanja održivog razvoja koji se oslanja na tri stuba: ekonomski, socijalni i ekološki. Međutim, održivi razvoj predstavlja ideal koji treba postići pravilnom upotrebom odgovarajućih standarda, zakona, pravilnika i metoda. Jedna od metoda za postizanje održivog razvoja je i metoda LCA koja predstavlja alat za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa i uticaja na životnu sredinu. Sa druge strane, VKA je metoda koja ima široku primenu u različitim sferama, pa nalazi primenu i u LCA. Za VKA se može primetiti da ne donosi rešenje problema već služi kao alat za podršku odlučivanju i pomaže donosilacu odluke prilikom rešavanja kompleksnih problema VKA. Razvoj novih informacionih alata je neophodan za kontinualno unapređivanje znanja i rešavanje kompleksnih i specifičnih problema što se naročito može primeniti u oblasti VKA i LCA, kao i kombinacije ovih dveju metoda.

Osnovna tema istraživanja, realizovanih u okviru ove disertacije, je upravo razvoj informacionog alata (programskog sistema) sa ciljem unapređenja metode VKA u delu dodeljivanja težinskih faktora, kao i primena metoda VKA za dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja u LCA. U nastavku, dat je pregled najvažnijih rezultata istraživanja, kao i izvedenih zaključaka, a posebno su komentarisani i pravci mogućih budućih istraživanja.

7.1 Rezultati istraživanja

Polazeći od postavljenih ciljeva disertacije, realizovana su odgovarajuća istraživanja, čiji se rezultati mogu podeliti u tri celine.

Prva celina se odnosi na teorijski deo rada, u okviru koga su stvorene podloge za razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa. Osnovni rezultati teorijskog dela istraživanja su:

- Sistematizacija istraživanja u oblasti metoda VKA;

- SWOT analiza metoda VKA;
- Sistematizacija istraživanja u oblasti subjektivnih, objektivnih i kombinovanih pristupa za dodeljivanje težinskih faktora;
- SWOT analiza metoda za dodeljivanje težinskih faktora;
- Sistematizacija istraživanja u oblasti primene VKA u ocenjivanju životnog ciklusa, sa posebnim akcentom na aktuelno stanje primene VKA u LCA gde su definisana dva glavna pravca razvoja VKA u LCA: dodeljivanje težinskih faktora kategorijama uticaja u LCIA i primena VKA na rezultate LCA.

Drugu celinu rezultata istraživanja čini razvoj modela za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa. Druga celina predstavlja centralni deo istraživanja disertacije u kojoj je predstavljen inovativni pristup za dodeljivanje težinskih faktora i integrisanje subjektivnih i objektivnih težinskih faktora, a u okviru njega i inovativni pristup za modeliranje težinskih faktora kriterijuma.

Posebno se mogu naglasiti prednosti razvijenog modela za inteligentnu višekriterijumsku analizu:

- Mogućnost integrisanja subjektivnih i objektivnih težinskih faktora kriterijuma kao i kombinovanja subjektivnih preferencija dva donosilaca odluke. Ukoliko postoje referentni (podrazumevani ili prethodno izračunati) težinski faktori za specifičan slučaj višekriterijumskog vrednovanja, predloženi pristup omogućuje da se isti koriste umesto objektivnih i na taj način da se kombinuju sa subjektivnim težinskim faktorima.
- Inovativni pristup modeliranja težinskih faktora kriterijuma fuzzy funkcijama pripadnosti;
- Inovativni pristup primene fuzzy logike za rešavanje višekriterijumskih problema koji u svojim informacijama sadrže nesigurnost i iskazivanja nesigurnosti donosioca odluke;
- Korisnička fleksibilnost zbog mogućnosti izbora i kombinovanja različitih vrsta metoda VKA, primeni istih kod LCA;
- Mogućnost analize osetljivosti rezultata promenom lambda parametra koji utiče na odnos dva odabrana skupa težinskih faktora.

Sa druge strane, nedostaci razvijenog modela su sledeći:

- razvijeni model ne pruža podršku prilikom definisanja i strukturiranja problema VKA što predstavlja važan korak VKA i značajno utiče na krajnji rezultat VKA,
- razvijeni model je predviđen za individualno donošenje odluka i ne podržava grupno donošenje odluka,
- pod-modul za inteligentno dodeljivanje težinskih faktora razvijen je tako da može da podrži samo dva skupa težinskih faktora,
- nije definisan postupak na osnovu kojeg bi se na odgovarajući način subjektivno odredila vrednost lamda parametra i obrazloženje zašto je baš izabrana veličina najbolja za određeno vrednovanje,
- pod-modul za inteligentno dodeljivanje težinskih faktora trebalo bi unaprediti u smislu istraživanja i pronalaženja novih funkcija pripadnosti, kao i pravila u bazi FIS-a koje bi pružale bolje rezultate (navedeno se odnosi i na rešavanje potencijalnog problema integrisanja težinskih faktora ukoliko se koristi lambda parametar sa vrednostima postavljenim na 0 i 1).

Treću celinu rezultata istraživanja čini razvoj i verifikacija programskog rešenja IMCAT, koje karakteriše:

- Intuitivan i fleksibilan korisnički interfejs za unos podataka;
- Omogućuje rad sa više različitih metoda VKA;
- Podržava dodeljivanje težinskih faktora LCIA kategorija uticaja i vrednovanje ukupnog uticaja životnog ciklusa prilikom rada sa rezultatima metoda za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa;
- Pruža jasan grafički prikaz rezultata vrednovanja VKA, gde se naročito može istaći grafički prikaz opterećenja lokaliteta životne sredine na mapi područja;
- Omogućava razmenu podataka sa dokumentima u digitalnom zapisu, čime se obezbeđuje odgovarajući ulaz/izlaz podataka i rezultata vrednovanja VKA;
- Sadrži korisničko uputstvo u obliku dokumenta sa opisom IMCAT programa, čime se pruža pomoć korisnicima kojima je potrebno detaljnije objašnjenje pojedinih funkcija IMCAT programa ili pomoć novim korisnicima koji se upoznaju sa osnovama IMCAT programa.

Na osnovu prethodno navedene tri celine rezultata istraživanja može se zaključiti da su potvrđeni i ostvareni postavljeni ciljevi istraživanja. Rezultati naučnih istraživanja u okviru ove disertacije značajni su kako sa teorijskog, tako i sa praktičnog stanovišta

za oblast višekriterijumskog vrednovanja i sistema za upravljanje zaštite životne sredine. Vrednost rezultata doktorske disertacije ogleda se pre svega u aktuelnosti i širokom pristupu razmatranja problematike vezane za višekriterijumsko vrednovanje i ocenjivanje životnog ciklusa, odnosno sagledavanju mogućnosti i definisanju načina uspešne kombinacije ove dve metode sa ciljem dobijanja ukupnog uticaja na životnu sredinu.

Naučni doprinos disertacije predstavlja razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku analizu opterećenja životne sredine, koji omogućava integrisanje subjektivnih i objektivnih težinskih faktora prilikom dodeljivanja težinskih faktora LCIA kategorijama uticaja. U okviru razvijenog sistema, u pod-modulu za inteligentno dodeljivanje težinskih faktora primenjen je inovativni pristup za modeliranje težinskih faktora kriterijuma. Primena metode VKA za vrednovanje kategorija uticaja inteligentnim sistemom za dodeljivanje težinskih faktora, po prvi put je sprovedena u ovoj disertaciji. Rezultati naučno-istraživačkog rada doktorske disertacije predstavljaju originalni rad sa aplikativnim karakterom u oblasti VKA i LCA.

7.2 Pravci budućih istraživanja

Razvijeni model i programski sistem IMCAT otvoreni su za dalje kontinualno unapređenje sa ciljem otklanjanja nedostataka i povećanja efikasnosti. U tom kontekstu, pravci budućih istraživanja razvijenog modela za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine, kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa i programskog sistema IMCAT obuhvataju:

- Unapređenje pojedinih elemenata modela koji bi se u toku intenzivnije upotrebe konstatovali kao neefikasni;
- Dodavanje novih metoda za dodeljivanje težinskih faktora (kao što su na primer l-odstojanje, kvadratno l-odstojanje) i višekriterijumsku analizu (kao što su na primer VIKOR, ELECTRE);
- Razvoj pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora tako da podržava integrisanje više od dva skupa težinskih faktora;
- Istraživanje pod-modula za inteligentno integrisanje težinskih faktora uvođenjem novih funkcija pripadnosti i pravila u bazi FIS-a koje bi pružale bolje rezultate;
- Definisane postupka na osnovu kog bi se na odgovarajući način subjektivno odredila vrednost lambda parametra;

- Razvoj ekspertskog višekriterijumskog vrednovanja za prikupljanje ekspertskog znanja prilikom dodeljivanja težinskih faktora za specifične slučajeve (određena metoda LCIA, ili specifičan proces/proizvod koji se vrednuje) i baze znanja – gde bi se uzimali u obzir težinski faktori dobijeni u prethodnim vrednovanjima i koristili kao baza podataka za generisanje težinskih faktora kod novih slučajeva LCA vrednovanja;
- Nadogradnja modela za specifične probleme životne sredine (procena uticaja na životnu sredinu, vrednovanje opterećenja lokaliteta životne sredine, izbor najbolje dostupne tehnologije itd.) i razvoj fuzzy sistema za davanje preporuka na osnovu konačnih rezultata VKA;
- Razvoj modula za grafički prikaz analize osetljivosti dobijenih rezultata zasnovan na Expert Choice programu (program za podršku AHP-a);
- Razvoj modela i IMCAT programskog sistema za podršku grupnom donošenju odluka;
- Podrška za pravljenje hijerarhijske strukture kod vrednovanja kriterijuma zasnovano na AHP hijerarhijskoj strukturi. IMCAT trenutno podržava vrednovanje kriterijuma u jednom hijerarhijskom nivou bez mogućnosti dodavanja podkriterijuma, čime bi se olakšalo vrednovanje većeg broja kriterijuma;
- Razvoj internet aplikacije – s obzirom na to da internet tehnologije omogućavaju pristup sistemu sa bilo kojeg mesta u bilo koje vreme, inženjeri i eksperti bi mogli u realnom vremenu da rešavaju višekriterijumski problem kad god je to potrebno, bilo da se nalaze unutar ili izvan matične ustanove.

S obzirom na svakodnevne probleme donošenja odluka u raznim oblastima ljudskih aktivnosti, odlučivanje i razvoj sistema za podršku odlučivanju su od velikog značaja za razvoj društva uopšte. Navedeni pravci budućih istraživanja imaju značaj za razvoj oblasti višekriterijumske analize i ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa, kao i praktične primene kod vrednovanja različitih alternativa i pri donošenju odluka. Razvijeni model i realizovani programski sistem IMCAT mogu da posluže kao podloge za razvoj savremenih sistema za višekriterijumsku podršku odlučivanja.

8. LITERATURA

- Agarski, B.; Budak, I.; Hodolič, J.; Vukelić, Đ. (2010). Multicriteria Approach For Assessment Of Environmental Quality. *International Journal for Quality research*, 4(2), str. 131-137, ISSN: 1800 - 6450.
- Agarski, B.; Budak, I.; Kosec, B.; Hodolič, J. (2012a). An Approach to Multi-criteria Environmental Evaluation with Multiple Weight Assignment. *Environmental Modeling & Assessment*, 17(3), str. 256-266., ISSN: 1420-2026.
- Agarski, B.; Budak, I.; Puškar, T.; Vukelić, Đ.; Marković, D.; Hadzistević, M.; Hodolič, J. (2012b). Multi-Criteria Assessment of Environmental and Occupational Safety Measures in Dental Prosthetics Laboratories. *Journal of Production Engineering*, 15(1), str. 53-56, ISSN: 1821-4932.
- Agarski, B.; Kljajin, M.; Budak, I.; Tadić, B.; Vukelić, Đ.; Bosak, M.; Hodolič, J. (2012c). Application of multi-criteria assessment in evaluation of motor vehicles' environmental performances, *Tehnički vjesnik - Technical Gazette*, 19(2), str. 221-226, ISSN: 1330-3651.
- Agarski, B.; Budak, I.; Puskar, T.; Vukelic, Đ.; Markovic, D.; Hadzistevic, M.; Hodolic, J. (2012d). Multi-Criteria Assessment of Environmental and Occupational Safety Measures in Dental Prosthetics Laboratories, *Journal of Production Engineering*, 15(1), str. 53-56, ISSN: 1821-4932.
- Agarski, B.; Milanović, B.; Milanković, D.; Ilić, M.; Budak, I.; Vukelić, Dj.; Hodolič, J. (2013). Application of Analytic Hierarchy Process for Weighting of Impact Categories in Life Cycle Impact Assessment. *7th International Quality Conference*, 24th May 2013, Kragujevac, str. 181-187, ISBN 978-86-86663-94-8.
- Agarski B.; Budak I.; Vukelić Đ.; Kuric I.; Hodolič J. (2014). Weighting of impact categories and sensitivity analysis in life cycle assessment, *15. International Conference: Automation in Production Planning and Manufacturing*, Žilina: Faculty of Mechanical Engineering, 19-21 Maj, 2014, str. 9-14, ISBN: 978-80-5540-878-1.

- Anojkumar, L.; Ilangkumaran, M.; Sasirekha, V. (2014). Comparative analysis of MCDA for pipe material selection in sugar industry, *Expert Systems with Applications*, 41, str. 2964-2980, ISSN: 0957-4174.
- Azapagic, A; Clift., R. (1999a). Allocation of environmental burdens in multiple-function systems. *Journal of Cleaner Production* 7(2), str. 101–119, ISSN: 0959-6526.
- Azapagic, A; Clift., R. (1999b). Life Cycle Assessment and Multiobjective Optimisation. *Journal of Cleaner Production* 7(2), str. 195–143, ISSN: 0959-6526.
- Baker, D.; Bridges, D.; Hunter, R.; Johnson, G.; Krupa, J.; Murphy, J.; Sorenson, K. (2002). Guidebook to Decision-Making Methods. WSRC-IM-2002-00002, Department of Energy, USA.
- Bana e Costa, C. A.; Vansnick, J. C. (1999). The MACBETH approach: basic ideas, software, and an application. *Advances in decision analysis. Mathematical modelling: theory and applications* (4). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, str. 131-157. ISBN 9780792355632.
- Bare, J. C.; Norris, G. A.; Pennington, D. W.; McKone, T. (2003). TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3-4), str. 49–78, ISSN: 1530-9290.
- 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, str. 198-215, ISSN: 0377-2217.
- Benayoun, R.; Roy, B.; Sussman, N. (1966). Manual de Reference du programme electre. *Mote de Synthese et Formaton*, No. 25, Direction Scientifique SEMA, Paris, France.
- Benetto, E.; Dujet, C.; Rousseaux, P. (2008). Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment. *Environmental Modelling & Software*, 23(12), str. 1461–1467, ISSN: 1364-8152.
- Benoit, V.; Rousseaux, P. (2003). Aid for Aggregating the Impacts in Life Cycle Assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), str. 74-82, ISSN: 1614-7502.
- Bernardini, A.; Turcksin, L.; Macharis, C. (2007). CLEVER - Clean Vehicle Research Report - Multi Criteria analysis: method, analysis and results. URL: <http://www.belspo.be/belspo/ssd/science/Reports/CLEVER%20WP7%20Multi-Criteria%20Analysis.pdf>, (datum pristupa 09.08.2014).
- Brans, J.P.. (1982). Lingenierie de la decision. Elaboration dinstruments daide a la decision. Methode PROMETHEE. *Laide a la Decision: Nature, Instrument s et*

- Perspectives Davenir*. Presses de Universite Laval, Qu ebec, Canada, str. 183–214.
- Brans, J.P.; Mareschal, B. (1992). PROMETHEE V – MCDM problems with segmentation constraints. *INFOR*, 30(2), str. 85–96.
- Brans, J.P.; Mareschal, B. (1994). The PROMETHEE GAIA decision support system for multicriteria investigations. *Investigation Operative*, 4(2), str. 107–117.
- Brans, J.P.; Mareschal, B. (1995). The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems. *Journal of Decision Systems*, 4, str. 213–223, ISSN: 2116-7052.
- Brauers, W. K. M. (2004). Optimization methods for a stakeholder society. A revolution in economic thinking by multiobjective optimization: Non-convex Optimization and its Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston, U.S.A.
- Brown, B. (1968). Delphi Process: A Methodology Used for the Elicitation of Opinions of Experts, An earlier paper published by RAND (Dokument Br.: P-3925, 1968, 15 strana) <http://www.rand.org/pubs/papers/2006/P3925.pdf> (datum pristupa 09.08.2014.).
- Cinelli, M.; Coles, S. R.; Kirwan, K. (2013). Use of multi criteria decision analysis to support life cycle sustainability assessment: An analysis of the appropriateness of the available methods, The 6th International Conference on Life Cycle Management in Gothenburg, 25-28 August 2013, <http://conferences.chalmers.se/index.php/LCM/LCM2013/paper/view/510/111> (datum pristupa 09.08.2014.).
- Chai, J.; Liu, J.; Ngai, E. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications*, 40(10), str. 3872–3885, ISSN: 0957-4174.
- Chevalier, J.; Rousseaux, P. (1999). Clasification in LCA: Building of a Coherent Family of Criteria. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(6), str. 352-356, ISSN: 1614-7502.
- Čupić, M. (2004). Specijalna poglavlja iz teorije odlučivanja: kvantitativna analiza, Beograd, ISBN: 9788680249827.
- Dantzig, G. B.; Thapa, M. N. (1997). Linear programming 1: Introduction. Springer-Verlag.
- Diakoulaki, D.; Mavrotas, G.; Papayannakis, L. (1995) Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method. *Computers & Operational Research*, 22(7), str. 763-70, ISSN: 0305-0548.

- Edwards, W. (1977). How to use multiattribute utility measurement for social decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 7, str. 326-340.
- Edwards, W.; Barron, F.H. (1994). SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational behavior and human decision processes*, 60, str. 306–325.
- Eghali, L. (2002). Decision Support Tools for Environmental Policy Decisions and their Relevance to Life Cycle Assessment. *CES Working paper 2/02*, ISSN: 1464 - 8083.
- Environdec (2013). Creating EPD in the international EPD system – The EPD process <http://www.environdec.com/en/Creating-EPD/the-epd-process/#.Uil5idJHKks>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Environovisad (2014). Grad Novi Sad Gradska uprava za zaštitu životne sredine, Ekobilten broj 363, Maj 2010, ISSN: 1452-4171, <http://www.environovisad.org.rs/images/Ekobilten/2010maj.pdf>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- EPA (2006). Life cycle assessment: principles and practice. U.S. Environmental Protection Agency, EPA dokument: EPA/600/R-06/060. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1000L86.txt>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Figueira, J.; de Smet, Y.; Brans, J.P. (2004). MCDA methods for sorting and clustering problems: Promethee TRI and Promethee CLUSTER, Université Libre de Bruxelles. Service de Mathématiques de la Gestion, Technical Report TR/SMG/2004-002.
- Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (editori) (2005). Multycriteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, Springer Science + Business Media, Inc., Boston. ISBN: 0-387-23067-X.
- Finnveden, G. (1997). Valuation methods within LCA – where are the values?. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2, 163–169, ISSN: 1614-7502.
- Finnveden, G.; Hofstetter, P.; Bare, J.; Basson, L.; Ciroth, A.; Mettler, T.; Seppala, J.; Johansson, J.; Norris, G.; Volkwein, S. (2002). Normalization, grouping and weighting in life cycle impact assessment, *Life-Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practise*. SETAC Press, Pensacola, FL, str. 177–208, ISBN: 9781880611548.
- Finnveden, G.; Eldh, P.; Johansson, J. (2006). Weighting in LCA Based on Ecotaxes Development of a Mid-point Method and Experiences from Case Studies. *The*

- International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (Special Issue 1), str. 81 – 88, ISSN: 1614-7502.
- Finnveden, G.; Hauschild, M. Z.; Ekvall, T.; Guinee, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, 91(1), str. 1-21, ISSN: 0301-4797.
- GaBi-software (2014). <http://www.gabi-software.com/ce-eu-english/index/>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Gabus, A.; Fontela, E. (1972). World Problems an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL. *Battelle Geneva Research Centre*, Switzerland, Geneva.
- Geldermann, J.; Spengler, T.; Rentz, O. (2000). Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry, *Fuzzy Sets and Systems*, 115(1), str. 45-65, ISSN: 0165-0114.
- Geldermann, J.; Rentz, O. (2005). Multi-criteria Analysis for Technique Assessment: Case Study from Industrial Coating, *Journal of Industrial Ecology*, 9(3), str. 127 - 142, ISSN: 1530-9290.
- Goedkoop, M.; Spriensma, R. (2000). The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment, Methodology Report, second edition. Pré Consultants, Amersfoort (NL), Netherlands.
- Goedkoop, M.J.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J.; Van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; May 2013, <http://www.lcia-recipe.net>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Gonzalez, B.; Adenso-Diaz, B.; Gonzalez-Torre, P.L. (2002). A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 37, str. 61-79, ISSN: 0921-3449.
- Green, P. E.; Srinivasan, V. (1978). Conjoint Analysis in Consumer Behavior: Status and Outlook. *Journal of Consumer research* 5, str. 103–123, ISSN: 0093-5301.
- Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. (2002). Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 692 str, ISBN: 1-4020-0228-9.

- Güereca L. P.; Agell N.; Gassó S.; Baldasano J.M. (2007). Fuzzy Approach to Life Cycle Impact Assessment. An Application for Biowaste Management Systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7), str. 488–496, ISSN: 1614-7502.
- Harris, R. (2014). Introduction to Decision Making, <http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Hansen, O.J. (1999). Status of Life Cycle Assessment (LCA) activities in the Nordic region. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(6), str. 315–320, ISSN: 1614-7502.
- Hermann, B.G.; Kroeze, C.; Jawjit, W. (2007). Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), str. 1787-1796, ISSN: 0959-6526.
- Hertwich, E. G.; Hammitt, J. K. (2001a). A Decision-Analytic Framework for Impact Assessment, Part 1: LCA and Decision Analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(1), str. 5-12, ISSN: 1614-7502.
- Hertwich, E. G.; Hammitt, J. K. (2001b). A Decision-Analytic Framework for Impact Assessment, Part 2: Midpoints, Endpoints, and Criteria for Method Development. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(1), str. 5-12, ISSN: 1614-7502.
- Hodolič, J.; Badida, M.; Majernik, M.; Šebo, D. (2003). Mašinstvo u inženjerstvu zaštite životne sredine, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ISBN: 86-80249-75-0.
- Hodolič, J.; Budak, I.; Hadžistević, M.; Vukelić, Đ.; Majernik, M.; Chovancova, J.; Pankova-Jurikova, J.; Čulibrk, M. (2013). Sistemi za upravljanje zaštitom životne sredine, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 263 str., ISBN: 978-86-7892-469-9.
- Hofstetter, P. (1998). Perspectives in Life Cycle Impact Assessment. A structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere. Kluwer Academic Publishers. 484 str., ISBN: 978-1-4615-5127-0.
- Hwang, C.L.; Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and Applications – A State of the Art Survey“, Springer-Verlag, New York.
- Hugonnard, J.; Roy, B. (1982), Le plan d’extension du métro en banlieue parisienne, un cas type d’application de l’analyse multicritère. *Les Cahiers Scientifiques de la Revue Transports*, 6, str. 77–108.

- Huang, I. B.; Keisler, J.; Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, 409(19), str. 3578–3594, ISSN: 0048-9697.
- ILCD (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook. General guide for life cycle assessment—detailed guidance - first edition. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.
- ISO 14040 (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, International Organisation for Standardisation (ISO). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- ISO 14044 (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, International Organisation for Standardisation (ISO). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Ivanović, B. (1973). A method of establishing a list of development indicators. Paris: United Nations educational, scientific and cultural organization.
- Jahan, A.; Mustapha, F.; Sapuan, S. M.; Ismail, M. J.; Bahraminasab, M. (2012). A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1-4), str. 411-420, ISSN: 1433-3015.
- Jahan, A.; Edwards, K. L. (2013). Weighting of dependent and target-based criteria for optimal decision-making in materials selection process: Biomedical applications. *Materials and Design*, 49, str. 1000–1008, ISSN: 0261-3069.
- Jahan, A.; Edwards, K. L. (2014). Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design, Elsevier, ISBN: 978-0-08-099386-7.
- Jeremić, V.; Isljamović, S.; Petrović, N.; Radojičić, Z.; Marković, A.; Bulajić, M. (2011a). Human development index and sustainability: What's the correlation? *Metalurgia International*, 16(7), str. 63-67, ISSN: 1582-2214.
- Jeremić, V.; Vukmirović, D.; Radojičić, Z.; Djoković, A. (2011b). Towards a framework for evaluating ICT infrastructure of countries: a Serbian perspective. *Metalurgia International*, 16(9), str. 15-18, ISSN: 1582-2214.

- Jeremić, V.; Seke, K.; Radojčić, Z.; Jeremić, D.; Marković, A.; Slović, D.; Aleksić, A. (2011c). Measuring health of countries: a novel approach. *HealthMED*, 6(1), ISSN: 1840-2291.
- Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(8), str. 324-330, ISSN: 1614-7502.
- Kaplan, P.O. (2006). A New Multiple Criteria Decision Making Methodology for Environmental Decision Support, PhD disertacija, Faculty of North Carolina State University, USA.
- Keeney, R.L.; Raiffa, H. (1976). Decisions with Multiple Objectives: Performances and Value Trade-Offs, Wiley, New York.
- Kiš, F. (2011). Ekonomsko vrednovane ekoloških efekata primene biodizela, Doktorska disertacija, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, str. 305.
- Kočí, V. (2009). Posuzování životního cyklu - Life Cycle Assessment - LCA. Ekomonitor, Chrudim, str. 263, ISBN 978-80-86832-42-5.
- Kukolj, D. (2007). Sistemi zasnovani na računarskoj inteligenciji, FTN izdavaštvo, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, ISBN: 9788678920684.
- Ma, J.; Fan, Z.P.; Huang, L.H. (1999). A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights. *European Journal of Operational Research*, 112(2), str. 397–404, ISSN: 0377-2217.
- Macharis, C.; Brans, J.P.; Mareschal, B. (1998). The GDSS PROMETHEE procedure – a PROMETHEE–GAIA based procedure for group decision support. *Journal of Decision Systems*, 23(7), str. 283–307, ISSN: 2116-7052.
- Manoliadis, O. G.; Pantouvakis, J. P.; Tsolas, I. E. (2007). Compromise programming model in site selection for construction temporary facilities. *Operational Research*, 7(3), str. 381-400, ISSN 1109-2858.
- Mathworks (2014). <http://www.mathworks.com/help/index.html>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Milani, A. S.; Eskicioglu, C.; Robles, K.; Bujun, K.; Hosseini-Nasab, H. (2011) Multiple criteria decision making with life cycle assessment for material selection of composites, *eXPRESS Polymer Letters*, 5(12), str. 1062–1074, ISSN: 1788-618X.

- Milićević, M.; Župac, G. (2012a). Objektivni pristup određivanju težina kriterijuma, *Vojnotehnički glasnik*, 60(1), str. 39-56, ISSN: 0042-8469.
- Milićević, M.; Župac, G. (2012b). Subjektivni pristup određivanju težina kriterijuma, *Vojnotehnički glasnik*, 60(2), str. 48-70, ISSN: 0042-8469.
- Munda, G. (1995). Multicriteria evaluation in a fuzzy environment. Theory and applications in ecological economics. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Myllyviita, T.; Holma, A.; Antikainen, R.; Lahtonen, K.; Leskinen, P. (2012). Assessing environmental impacts of biomass production chains e application of life cycle assessment (LCA) and multi-criteria decision analysis (MCDA). *Journal of Cleaner Production*. 29-30, str. 238-245, ISSN: 0959-6526.
- Noh, J.; Lee; K. M. (2003). Application of Multiattribute Decision-Making Methods for the Determination of Relative Significance Factor of Impact Categories. *Environmental Management*, 5(31), str. 633–641, ISSN: 1432-1009.
- Opricović, S. (1990). Programski paket VIKOR za višekriterijumsko kompromisno rangiranje. SYM-OP-IS '90, Jugoslovenski simpozijum o operacionim istraživanjima, Dubrovnik-Kupari, Beograd: Naučna knjiga
- Opricović, S. (1998). Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu, Građevinski fakultet, Beograd, 302 str. ISBN 86-80049-82-4.
- 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), str 445-455, ISSN: 0377-2217.
- Pennington, D.; Potting, J.; Finnveden, G.; Lindeijer, E.; Jolliet, O.; Rydberg, T.; Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment, Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), str. 721 – 739, ISSN: 0160-4120.
- Pires, A.; Chang, N. B.; Martinho, G. (2011). An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setúbal Peninsula, Portugal, *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), str. 7-21, ISSN: 0921-3449.
- Polatidis, H.; Haralambopoulos, D. A.; Munda, G.; Vreeker, R., (2006). Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources, Part B.*, 1, str. 181-193, ISSN: 1556-7257.
- Poyhonen, M.; Hamalainen, R. (2001). On the convergence of multiattribute weighting methods. *European Journal of Operational Research*, 129(3), str. 569–585, ISSN: 0377-2217.

- Pre-sustainability (2014a). Sima Pro 7, Database manual, Methods Library, May 2008, <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Pre-sustainability (2014b). All about SimaPro Life Cycle Assessment software package, <http://www.pre-sustainability.com/all-about-simapro>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Rogers, M.; Bruen, M. (1998). A new system for weighting environmental criteria for use within ELECTRE III. *European Journal of Operational Research*, 107(3), str. 552–563, ISSN: 0377-2217.
- Rogers, K.; Seager, T. P. (2009). Environmental Decision-Making Using Life Cycle Impact Assessment and Stochastic Multiattribute Decision Analysis: A Case Study on Alternative Transportation Fuels, *Environmental Science and Technology*, 43(6), str. 1718–1723, ISSN: 0013-936X.
- Rowley, H. V.; Peters, G. M. (2009). Multi-criteria Methods for the Aggregation of Life Cycle Impacts, 6th Australian Conference on LCA, ALCAS - Australian Life Cycle Assessment Society, 16th February 2009, Melbourne.
- Roy, B.; Bertier, P. (1971). La méthode ELECTRE II, Note de travail 142, SEMA-METRA, Metra International, Paris, France.
- Roy, B. (1978). ELECTRE III: un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples, *Cahiers du CERO*, 20(1), str. 3–24.
- Roy, B.; Skalka, J. (1984). ELECTRE IS: aspects méthodologiques et guide d'utilisation, Document du LAMSADE 30, University Paris-Dauphine.
- Roy, B.; McCord, M. R. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Springer, ISBN 9780792341666.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T. L. (1996). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. ISBN 0-9620317-9-8.
- SETAC (1991). Society of Environmental Toxicology and Chemistry. *A Technical Framework for Life Cycle Assessment*. Fava, J., Denison, R., Jones, B., Curran, M.A., Vigon, B., Selke, S., and Barnum, J. (eds).
- SETAC (1993). Society of Environmental Toxicology and Chemistry. *Guidelines for Life Cycle Assessment: A 'Code of Practice.'* Consoli, F., Allen, D., Boustead, I.,

- Fava, J., Franklin, W., Jensen, A.A., Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Seguin, J., and Vigon, B. (eds).
- Science Watch (2009). Serafim Opricovic & Gwo-Hshiung Tzeng talks with ScienceWatch.com and answers a few questions about this month's Emerging Research Front Paper in the field of Economics & Business. <http://archive.sciencewatch.com/dr/erf/2009/09aperf/09aperfOpriET/>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Seiford, L.M.; Thrall, R.M. (1990). Recent Developments in DEA: The Mathematical Programming Approach to Frontier Analysis. *Journal of Econometrics*, 46(1-2), str. 7–38, ISSN: 0304-4076.
- Seppala, J. (2003). Life Cycle Impact Assessment based on Decision Analysis., Doctor of Science Dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics. Espoo, Finland. ISBN 951-22-6592-3. <http://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/rsep03.pdf>, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Shannon, C.E.; Weaver, W. (1947). The mathematical theory of communication, Urbana: The University of Illinois Press.
- Soares, S.; Toffoletto, L.; Deschenes, L. (2006). Development of weighting factors in the context of LCIA. *Journal of Cleaner Production*, 14(6-7), str. 649-660, ISSN: 0959-6526.
- Srđević, B. (2005). Diskretni modeli odlučivanja u optimizaciji korišćenja kanalske mreže u Vojvodini, *Letopis naučnih radova*, Poljoprivredni Fakultet, Novi Sad, broj 1, str. 19-30, ISSN: 0546-8264, UDK: 634.51:65.012.123.
- Srđević, B.; Srđević, Z.; Suvočarev, K. (2007). Kompjuterski alati i sistemi za podršku odlučivanju u poljoprivredi, *Letopis naučnih radova*, broj 1, str. 55-64, ISSN: 0546-8264, UDK: 634.51:65.012.123.
- Steen, B. (1999). A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS) Version 2000 – General System Characteristics, Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems. Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning. CPM report 1999:4. http://lifecyclecenter.se/wordpressnew/wp-content/uploads/2012/12/1999_4.pdf, (datum pristupa 09.08.2014.).
- Triantaphyllou, E. (2000). Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers (Springer). p. 320. ISBN 0-7923-6607-7.

- Velasquez, M.; Hester, P. T. (2013). An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods, *International Journal of Operations Research*, 10(2), str. 56-66, ISSN: 1813-713X.
- Vještica, S. (2014). Model upravljanja uticajima proces proizvodnje podnih obloga na životnu sredinu primenom metode ocenjivanja životnog ciklusa (LCA). Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- Vještica, S.; Budak, I.; Kljajin, M.; Vukelic, Dj.; Milanovic, B.; Milankovic, D.; Hodolic, J. (2014). Model for analysis of environmental impacts of production processes in flooring industry based on LCA, *Tehnički Vjesnik*, 21(3), str. 457-466, ISSN: 1330-3651.
- Von Winterfeldt, D.; Edwards, W. (1986). Decision analysis and behavioral research. Cambridge, UK: Cambridge University Press, ISBN: 9780521253086.
- Votruba, L.; Kos, Z. (1988). Analysis of water resource systems. Amsterdam: Elsevier, ISBN: 978-0-444-98944-4.
- Wang, B.; Gebreslassie, B. H.; You, F. (2013) Sustainable design and synthesis of hydrocarbon biorefinery via gasification pathway: Integrated life cycle assessment and techno-economic analysis with multiobjective superstructure optimization, *Computers and Chemical Engineering*, 52, str. 55– 76, ISSN: 0098-1354.
- Weber, M.; Borcherding, K. (1993). Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. *European Journal of Operational Research*, 67(1), str. 1–12, ISSN: 0377-2217.
- Xu, X. (2004). A note on the subjective and objective integrated approach to determine attribute weights. *European Journal of Operational Research*, 156(2), str. 530–532, ISSN: 0377-2217.
- Yoon, K. (1980). Systems Selection By Multiple Attribute Decision Making. Ph.D. Dissertation. Kansas State University.
- Yu, P.L. (1973). A class of solutions for group decision problems. *Management Science*, 19(8), str. 936–946, ISSN: 1526-5501.
- Yu, W. (1992). ELECTRE TRI: Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation, Document du LAMSADE 74, University Paris-Dauphine.
- Zadeh L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*; 8:338-53.
- Zakon o upravljanju otpadom (2009). Zakon o upravljanju otpadom, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 36/2009 i 88/2010.
- Zeleny, M. (1982). Multiple Criteria Decision Making. Mc-Graw-Hill, New York, ISBN: 978-0670727957.

9. PRILOZI

9.1 Prilog 1: Matrice poređenja AHP

Tabela 9.1. Matrica poređenja kriterijuma

Kriterijum	Vreme	Područje	Nepovratnost	Težinski faktor kriterijuma
Vreme	1	1/3	3	0,2583
Područje	3	1	5	0,6370
Nepovratnost	1/3	1/5	1	0,1047

Stepen konzistentnosti: 0,0370.

Tabela 9.2. Matrica poređenja kategorije uticaja prema kriterijumu vreme

Katego- rija uticaja	Prome- na klime i ljudsko zdravlje	Foto- hemijsko formi- ranje kiseonika	Nasta- nak čestica	Promena klime eko- sistema	Kiselost zemljišta	Eksplo- atacija metala	Eksplo- -atacija fosilnih goriva	Težinski faktori katego- rije uticaja
Promena klime i ljudsko zdravlje	1	5	5	1/3	3	3	1/3	0,1625
Foto- hemijsko formiranje kiseonika	1/5	1	3	1/5	1/3	1/3	1/5	0,0443
Nastanak čestica	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1/5	1/7	0,0284
Promena klime eko- sistema	3	5	5	1	3	3	1/3	0,2247
Kiselost zemljišta	1/3	3	3	1/3	1	1/3	1/5	0,0687
Eksplo- atacija metala	1/3	3	5	1/3	3	1	1/5	0,1032
Eksplo- atacija fosilnih goriva	3	5	7	3	5	5	1	0,3683

Stepen konzistentnosti: 0,0769.

Tabela 9.3. Matrica poređenja kategorije uticaja prema kriterijumu područje

Kategorija uticaja	Promena klime i ljudsko zdravlje	Foto-hemijsko formiranje kiseonika	Nastanak čestica	Promena klime ekosistema	Kiselost zemljišta	Eksploatacija metala	Eksploatacija fosilnih goriva	Težinski faktori kategorije uticaja
Promena klime i ljudsko zdravlje	1	3	1	1/3	1/3	1/3	1/5	0,0654
Foto-hemijsko formiranje kiseonika	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	0,0470
Nastanak čestica	1	3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	0,0709
Promena klime ekosistema	3	3	3	1	1/3	1/3	1/3	0,1160
Kiselost zemljišta	3	3	3	3	1	3	1/3	0,2198
Eksploatacija metala	3	3	3	3	1/3	1	1/3	0,1597
Eksploatacija fosilnih goriva	5	3	3	3	3	3	1	0,3210

Stepen konzistentnosti: 0,09.

Tabela 9.4. Matrica poređenja kategorija uticaja prema kriterijumu nepovratnost

Kategorija uticaja	Promena klime i ljudsko zdravlje	Foto-hemijsko formiranje kiseonika	Nastanak čestica	Promena klime ekosistema	Kiselost zemljišta	Eksploatacija metala	Eksploatacija fosilnih goriva	Težinski faktori kategorije uticaja
Promena klime i ljudsko zdravlje	1	3	5	1	3	3	3	0,2599
Foto-hemijsko formiranje kiseonika	1/3	1	3	1/3	1/3	1/3	1/3	0,0611
Nastanak čestica	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/7	0,0374
Promena klime ekosistema	1	3	3	1	5	3	3	0,2706
Kiselost zemljišta	1/3	3	3	1/5	1	1/3	1/3	0,0791
Eksploatacija metala	1/3	3	3	1/3	3	1	1/3	0,1139
Eksploatacija fosilnih goriva	1/3	3	7	1/3	3	3	1	0,1780

Stepen konzistentnosti: 0,0917.

Tabela 9.5. Subjektivni težinski faktori kategorija uticaja

Kriterijum	Vreme	Područje	Nepovratnost	Težinski faktori kategorija uticaja
Težinski faktor kriterijuma / Kategorija uticaja	0,2583	0,6370	0,1047	-
Promena klime i ljudsko zdravlje	0,1625	0,0654	0,260	0,1108
Foto-hemijsko formiranje kiseonika	0,0443	0,0470	0,061	0,0478
Nastanak čestica	0,0284	0,0709	0,037	0,0564
Promena klime ekosistema	0,2247	0,1160	0,271	0,1603
Kiselost zemljišta	0,0687	0,2198	0,079	0,1661
Eksplo-atacija metala	0,1032	0,1597	0,114	0,1403
Eksplo-atacija fosilnih goriva	0,3683	0,3210	0,178	0,3182

9.2 Prilog 2: Izvorni kod IMCAT programskog sistema

Izvorni kod razvijenog IMCAT programskog sistema prikazan je u prilogu 2 doktorske disertacije koji se može dobiti na uvid na Katedri za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko inženjerske aspekte Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.