



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Danijel S. Marković

**RAZVOJ LOGISTIČKOG MODELA ZA
UPRAVLJANJE KOMUNALNIM OTPADOM
PRIMENOM HEURISTIČKIH METODA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
IN NIŠ



Danijel S. Marković

**DEVELOPMENT OF A LOGISTIC MODEL
FOR MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT
BY APPLYING HEURISTIC METHODS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	Dr Goran Petrović, docent Univerzitet u Nišu – Mašinski fakultet u Nišu
Naslov:	Razvoj logističkog modela za upravljanje komunalnim otpadom primenom heurističkih metoda
Rezime:	<p>Neadekvatno sakupljanje i transport, kao funkcije upravljanja komunalnim otpadom, za rezultat imaju velike ekonomske i ekološke gubitke i predstavljaju značajan podsticaj velikom broju istraživača ka pronalaženju odgovarajućih sistemskih rešenja. Skup transportnih sredstava koja podržavaju proces sakupljanja i transporta komunalnog otpada, najčešće čine većinu voznog parka komunalnih preduzeća, a to je obično 50-70% transportnih jedinica. Ovaj proces je dominantan i u onim poslovnim sistemima koji integrišu više komunalnih delatnosti. U njima se nalazi 15-40% transportnih jedinica koje podržavaju proces sakupljanja i transporta komunalnog otpada. Optimizacijom i primenom kombinacije heurističkih i meta-heurističkih metoda samo na jednom ovakvom sistemu, moguće je smanjiti troškove energenata za mehanizaciju za 10 ÷ 25%. Izbor optimalnog logističkog modela za sakupljanje i transport komunalnog otpada u urbanim sredinama podrazumeva sagledavanje velikog broja ograničenja. Veliki broj ograničenja za definisanje modela, nametnuo je potrebu za primenu raznovrsnih algoritama za dobijanje optimalnog rešenja. U ovoj disertaciji, za dobijanje optimalnog logističkog modela sakupljanja i transporta komunalnog otpada, primenjen je C-W algoritam uštede za dobijanje početnog rešenja a poboljšanje je izvršeno primenom algoritma 2-OPT pretrage i algoritma SA. U disertaciji su predstavljena četiri modela i njihovim simuliranjem došlo se do optimalnog modela koji predstavlja dinamički model usmeravanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada. Razvijena metodologija je primenjena na realni problem sakupljanja i transporta otpada u gradu Nišu i dobijeni rezultati pokazuju da se postiže ušteda energenata za mehanizaciju i vremena rada za 10%. Ovako razvijen model poslužio je za razvoj konceptualnog modela ekspertnog sistema koji predviđa upotrebu informaciono-komunikacionih tehnologija za projektovanje optimalnih ruta u realnom vremenu. Ovakav jedan model može kompanijama koje se bave sakupljanjem i transportom otpada da donese još veće uštede u pogledu energenata kao i smanjenje troškova operatera.</p>
Naučna oblast:	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Transportna tehnika i logistika
Ključne reči:	Sakupljanje i transport komunalnog otpada, optimizacija problema usmeravanja vozila, heurističke i meta-heurističke metode, razvoj ekspertnog

modela za dinamičko usmeravanje vozila.

UDK: 628.465:621.86/.87]:519.8(043.3)

CERIF
klasifikacija: T280.P160

Tip licence
Kreativne
zajednice:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Goran Petrović, Assistant Professor University of Niš - Faculty of Mechanical Engineering in Niš
Title:	Development of a logistic model for municipal waste management by applying heuristic methods
Abstract:	<p>Inadequate collection and transport, as functions of municipal waste management, result in enormous economic and ecological losses, and represent a significant incentive to a great number of researchers with the aim of discovering appropriate systemic solutions. A set of vehicles that support the process of collection and transport of municipal waste most often comprise the majority of vehicle fleets of public utility companies, which is usually around 50–70% of transport units. This process is also dominant in those business systems that integrate several public utilities. In such systems, there are 15–40% of transport units that support the process of collection and transport of municipal waste. Through optimization and application of heuristic and meta-heuristic methods on only one of these systems, it is possible to reduce the cost of fuel for vehicles by 10 ÷ 25%. The choice of the optimal logistic model for collection and transport of municipal waste in urban areas implies the consideration of a large number of limitations. This number has imposed the need for the application of various algorithms for obtaining optimal solutions. In this dissertation, for the purpose of obtaining an optimal logistic model of collection and transport of municipal waste, the C-W savings algorithm was applied to yield an initial solution, while its improvement was performed by applying the 2-OPT search algorithm and the SA algorithm. The dissertation presents four models, whose simulation led to the optimal model that represents the dynamic model of vehicle routing for collection and transport of municipal waste. The developed methodology was applied to a real problem of waste collection and transport in the City of Niš, and the obtained results show the achieved reduction in fuel for vehicles and operation time of 10%. Thus developed model served as the basis for the development of a conceptual expert system model that predicts the use of information and communication technologies in the design of optimal routes in real time. Such a model can help companies that deal with waste collection and transport to achieve even greater fuel savings and reduction in operating costs.</p>
Scientific Field:	Mechanical engineering
Scientific Discipline:	Transport technics and logistics
Key Words:	Collection and transport of municipal waste, optimization of vehicle routing problems, heuristic and meta-heuristic methods, development of an expert

model for dynamic vehicle routing.

UDC: 628.465:621.86/.87]:519.8(043.3)

CERIF
Classification: T280.P160

Creative
Commons
License Type: **CC BY-NC-ND**

Sadržaj

Rezime.....	i
Summary	iii
Spisak slika.....	viii
Spisak tabela.....	x
Uvod	1
1.1. Struktura disertacije	3
Pregled dosadašnjih istraživanja problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada	6
2.1. Dosadašnja istraživanja u oblasti rešavanja problema usmeravanja vozila	6
2.2. Dosadašnja istraživanja u oblasti rešavanja problema usmeravanja vozila za sakupljanje otpada	8
2.3. Mogući pravci istraživanja u oblasti rešavanja problema usmeravanja vozila za sakupljanje otpada	10
Upravljanje komunalnim otpadom	12
3.1. Pravne osnove upravljanja otpadom	13
3.1.1. Evropske pravne osnove upravljanja otpadom	13
3.2. Definisanje, vrste i klasifikacija otpada	14
3.3 Principi upravljanja otpadaom	16
3.4 Regionalni sistem upravljanja otpadom	19
3.5 Integralni sistem upravljanja otpadom	19
3.6. Funkcije upravljanja otpadom	21
3.6.1. Sakupljanje otpada	22
3.6.2. Transport otpada	25
3.6.2.1 Vozila za transport otpada	25
3.6.2.1 Pretovarne stanice	29
3.6.2.2 Izbor vozila i proračun transporta komunalnog otpada	29
3.6.3. Tretman otpada	32
3.6.4. Odlaganje otpada	32
Definisanje problema usmeravanja vozila	34
4.1. Varijante problema usmeravanja vozila	36
4.2 Problem usmeravanja vozila sa determinističkim zahtevima	38
4.2.1 Problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta	38

4.2.1.1 Matematička formulacija standardnog problema usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta	40
4.2.2 Problem usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjima	42
4.2.2.1 Matematička formulacija standardnog problema usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem	42
4.2.3 Problem usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom	44
4.2.3.1 Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom	45
4.2.4 Problem usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem....	46
4.2.4.1 Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem	47
4.3 Problem usmeravanja vozila sa stohastičkim zahtevima	48
4.3.1. Matematička formulacija problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom	49
4.3.2. Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem i stohastičkim vremenom putovanja i opsluživanja	51
Naučni pristup za rešavanje problema usmeravanja vozila	55
5.1. Osnovni koncept optimizacije i podela optimizacionih metoda	55
5.1.1 Problemi stohastičke optimizacije	59
5.1.1.1. Primena Ch-C metoda za rešavanje CVRPSD.....	60
5.1.1.2. Primena Ch-C metoda za rešavanje SVRPTW	61
5.2. Heurističke metode za rešavanje problema usmeravanje vozila	62
5.2.1. Clark-Wright-ov algoritam uštede	63
5.2.2. Sweep-ov algoritam	65
5.2.3. 2-OPT algoritam lokalne ptratrage	66
5.3 Meta-heurističke metode za rešavanje problema usmeravanje vozila	68
5.3.1 Algoritam harmonijskog pretraživanja.....	70
5.3.2 Metod Simuliranog kaljenja	74
Logistika sakupljanja komunalnog otpada u urbanim sredinama	77
6.1 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta.....	81
6.1.1 Opis <i>modela I</i>	82
6.1.2 Matematička formulacija <i>modela I</i>	84
6.1.3 Rezultati optimizacije ruta za <i>model I</i> primenom C-W-ovog algoritma uštede i Sweep-ovog algoritma	85

6.1.4. Rezultati optimizacije ruta za <i>model I</i> primenom SA algoritma	88
6.1.5 Rezultati optimizacije ruta za <i>model I</i> primenom IHS algoritma	92
6.2 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta i udaljenošću	94
6.2.1 Opis <i>modela II</i>	94
6.2.2 Matematička formulacija <i>modela II</i>	95
6.2.3 Rezultati optimizacije ruta za model II primenom C-W-ovog algoritma uštete	97
6.2.4 Rezultati optimizacije ruta za <i>model II</i> primenom SA algoritma	100
6.2.5 Rezultati optimizacije ruta za <i>model II</i> primenom IHS algoritma	102
6.3 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom	104
6.3.1 Opis <i>modela III</i>	104
6.3.2 Matematička formulacija <i>modela III</i>	107
6.3.3 Rezultati optimizacije ruta za <i>model III</i>	110
6.4 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa vremenskim ograničenjem sa stohastičkom potražnjom i stohastičkim vremenom putovanja	115
6.4.1 Matematička formulacija <i>modela IV</i>	115
6.4.2 Rezultati optimizacije ruta za <i>model IV</i>	119
6.5. Analiza rezultata	123
Razvoj konceptualnog modela ekspertnog sistema za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada	127
Zaključna razmatranja	136
Literatura	139
Prilog 1: Matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova – <i>model I</i>	146
Prilog 2: Matrica najkraćih vremena putovanja između svih parova čvorova- <i>model II</i>	147
Prilog 3: Matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova - <i>model III</i>	148
Prilog 4: Karton rutiranja	149
Prilog 5: Mesečni izveštaj JKP „Mediana – Niš“ za „rejon“ 103	150
Prilog 6: Matrica najkraćih vremena putovanja između svih parova čvorova – <i>model IV</i>	151

Spisak slika

<i>Slika 3.1</i> Podela otpada	15
<i>Slika 3.2</i> Morfološki sastav komunalnog otpada u Republici Srbiji.....	16
<i>Slika 3.3</i> Principi upravljanja otpadom	17
<i>Slika 3.4</i> Piramida upravljanja otpadom sa aspekta optimizacije sistema sakupljanja otpada	20
<i>Slika 3.5</i> Funkcije upravljanja otpadom.....	21
<i>Slika 3.6</i> Autosmečar sa nadograđenim rotacionim bubnjem.....	26
<i>Slika 3.7</i> Autosmečar sa zamjenjivim kontejnerom.....	27
<i>Slika 3.8</i> Autosmečari sa nadogradjenom teleskopskom dizalicom	29
<i>Slika 3.9</i> Autosmečar sa nadgradnjom gde se otpad sabija pomoću potisne ploče: a) utovar sa zadnje strane; b) utovar sa čeone strane, c) utovar sa bočne strane.....	28
<i>Slika 4.1</i> Primer transportna mreža $G(V, E)$	35
<i>Slika 4.2</i> Primer transportna mreža sa isplaniranom rutom $(0-a-b-c-0)$	36
<i>Slika 4.3</i> Osnovni problemi usmeravanja vozila sa determinističkim zahtevima i njihovi odnosi	37
<i>Slika 4.4</i> Primer transportne mreže sa isprojektovanom rutom uz ograničenje kapaciteta vozila.....	41
<i>Slika 4.5</i> Transportna mreža sa isprojektovanom rutom uz poštovanje vremenskog ograničenja	44
<i>Slika 4.6</i> Transportna mreža sa isprojektovanom rutom uz poštovanje ograničenje kapaciteta vozila sa verovatnoćom P	51
<i>Slika 4.7</i> Transportna mreža sa isprojektovanom rutom uz poštovanje vremenskog ograničenja sa verovatnoćom P	54
<i>Slika 5.1</i> Klasifikacija optimizacionih problema	57
<i>Slika 5.2</i> Klasifikacija optimizacionih metoda	58
<i>Slika 5.3</i> Izračunavanje "uštede" pomoću Clarke-Wright-ovog algoritma uštede	63
<i>Slika 5.4 a)</i> Koordinatni početak prvi čvor i odgovarajući uglovi, b) Novi prvi čvor i odgovarajući uglovi	65
<i>Slika 5.5</i> Zoniranje primenom Sweep-ovog algoritma u okviru pristupa „zoniranje – rutiranje“	66
<i>Slika 5.6</i> Primena 2-OPT procedure a) Ruta pre 2-OPT zamene; b) Ruta posle 2-OPT zamene..	67
<i>Slika 5.7</i> Podela meta-heurističkih metoda	69
<i>Slika 5.8</i> Promena parametara a) PAR, b) bw.....	74
<i>Slika 6.1</i> Šematski prikaz faza rešavanje problema usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada	78
<i>Slika 6.2</i> Etape projektovanja ruta: a) transportna mreža; b) količina otpada u čvorovima; c) matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova; d) grane (deonice puta) bez i sa usponom; e) popravni faktor konfiguracije terena	80
<i>Slika 6.3</i> Transportna mreža za sakupljanje komunalnog otpada <i>modela I</i>	82
<i>Slika 6.4</i> Isprojektovane rute <i>modela I</i> primenom algoritma 2-OPT pretrage	88

<i>Slika 6.5</i> Grafički prikaz ruta <i>modela I</i> dobijenih C-W algoritmom uštede sa poboljšanjem lokalne pretrage 2-OPT	88
<i>Slika 6.6</i> Grafički prikaz ruta <i>modela I</i> dobijenih SA algoritmom	90
<i>Slika 6.7</i> Isprojektovane rute <i>modela I</i> primenom SA algoritma	90
<i>Slika 6.8</i> Promena ukupne dužine ruta u odnosu na broj iteracija $7e2$	91
<i>Slika 6.9</i> Promena ukupne dužine ruta u odnosu na broj iteracija $12e2$	91
<i>Slika 6.10</i> Isprojektovane rute <i>modela I</i> primenom IHS algoritma	93
<i>Slika 6.11</i> Grafički prikaz ruta <i>modela I</i> dobijenih IHS algoritmom	94
<i>Slika 6.12</i> Grafički prikaz ruta <i>modela II</i> dobijenih algoritmom 2-OPT pretrage	99
<i>Slika 6.13</i> Isprojektovane rute <i>modela II</i> primenom algoritma 2-OPT pretrage	99
<i>Slika 6.14</i> Isprojektovane rute <i>modela II</i> primenom SA algoritma	100
<i>Slika 6.15</i> Grafički prikaz ruta <i>modela II</i> dobijenih primenom SA algoritma	101
<i>Slika 6.16</i> Promena ukupnog vremena trajanja ruta u odnosu na broj iteracija $7e2$	101
<i>Slika 6.17</i> Promena ukupnog vremena trajanja ruta u odnosu na broj iteracija $12e2$	102
<i>Slika 6.18</i> Isprojektovane rute <i>modela II</i> primenom IHSA algoritma	103
<i>Slika 6.19</i> Grafički prikaz ruta <i>modela II</i> dobijenih primenom IHS algoritma	103
<i>Slika 6.20</i> Transportna mreža čvorova kontejnera za sakupljanje komunalnog otpada	104
<i>Slika 6.21</i> Podzemni kontejneri za sakupljanje komunalnog otpada – “rejon”103	106
<i>Slika 6.22</i> Isprojektovane rute <i>modela III</i> primenom algoritma 2-OPT pretrage	113
<i>Slika 6.23</i> Grafički prikaz ruta <i>modela III</i> dobijenih algoritmom 2-OPT pretrage	113
<i>Slika 6.24</i> Isprojektovane rute <i>modela III</i> primenom SA algoritma	114
<i>Slika 6.25</i> Grafički prikaz ruta <i>modela III</i> dobijenih SA algoritmom	114
<i>Slika 6.26</i> Grafički prikaz očekivanog opterećenja vozila	115
<i>Slika 6.27</i> Isplanirane rute <i>modela IV</i> primenom algoritma 2-OPT pretrage	121
<i>Slika 6.28</i> Grafički prikaz ruta <i>modela IV</i> dobijenih algoritmom 2-OPT pretrage	121
<i>Slika 6.29</i> Isplanirane rute <i>modela IV</i> primenom SA algoritma	122
<i>Slika 6.30</i> Grafički prikaz ruta dobijenih SA algoritmom	122
<i>Slika 6.31</i> Odnos ukupnih dužina ruta i vremena potrebna za izvođenje algoritma rutiranja	123
<i>Slika 6.32</i> Grafički prikaz ukupne dužine ruta <i>modela III</i> i postojećih ruta JKP “Mediana” Niš	125
<i>Slika 6.33</i> Grafički prikaz trajanja ruta <i>modela IV</i> i postojećih ruta JKP “Mediana” Niš	125
<i>Slika 7.1</i> Konceptualni model za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada	129
<i>Slika 7.2</i> Primer dinamičkog VRP-a primenom informacionog sistema	131
<i>Slika 7.3</i> Principijalna šema informacionog sistema pri sakupljanju komunalnog otpada	133
<i>Slika 7.4</i> Primer dinamičkog VRP-a primenom informacionog sistema sa dva “rejona”	134

Spisak tabela

Tabela 6.1 Koordinate i broj kontejnera za posmatranu transportnu mrežu <i>modela I</i>	83
Tabela 6.2 Pretpostavljena količina otpada po čvorovima	83
Tabela 6.3 Ukupna dužina ruta <i>modela I</i> dobijena primenom C-W-ovog algoritma uštede i Swep-ovog algoritma	86
Tabela 6.4 Rezultati lokalne pretrage u odnosu na početno rešenje	87
Tabela 6.5 Vremena pražnjenja kontejnera po čvorovima	97
Tabela 6.6 Rezultati lokalne pretrage u odnosu na početno rešenje	98
Tabela 6.7 Koordinate i broj kontejnera za posmatranu transportnu mrežu <i>modela III</i>	105
Tabela 6.8 Intervali praćenja procene količine otpada po čvorovima transportne mreže	107
Tabela 6.9 Vreme pražnjenja kontejnera po čvorovima transportne mreže	118
Tabela 6.10 Rezultati simulacije <i>modela I</i> u odnosu na početno rešenje	123
Tabela 6.11 Rezultati simulacije <i>modela II</i> u odnosu na početno rešenje	124

Poglavlje 1

UVOD

Tokom nekoliko poslednjih dekada, veliki broj istraživača, posebnu pažnju posvećuje pravilnom upravljanju otpadom sa osnovnim ciljem da se negativan uticaj na životnu sredinu svede na minimum. Tokom razvoja ljudskog društva menjao se kvalitet i kvantitet otpada, pristup prikupljanju, transportu, tretmanu i njegovom odlaganju. Ove promene bile su uslovljene fazama razvoja ljudskog društva, nivoom razvoja kolektivne i individualne svesti, stanjem nacionalne ekonomije, načinom življenja i tehnološkim razvojem.

Sam termin upravljanje otpadom se odnosi obično na proizvode nastale ljudskim aktivnostima, a proces se preduzima da bi se smanjio negativan uticaj otpadnih materijala na zdravlje ljudi, životnu sredinu ili estetiku neke urbane sredine. Sistemi upravljanja otpadom obuhvataju sprovođenje svih procesa, postupaka i mera propisanih za pravilno postupanje otpadom, od njegovog nastanka do odlaganja. Sav otpadni materijal, bilo da je čvrst, tečni, gasoviti ili opasan otpad, spada u nadležnost upravljanja otpadom.

Upravljanje otpadom je veoma složen proces koji počinje od generisanja otpada, preko njegovog sakupljanja i transporta, različitih opcija za tretman do konačnog odlaganja otpada, a zahteva poštovanje određenih principa, poznavanje opcija i funkcija upravljanja otpadom, ali i poznavanje vrsta i karakteristika otpada. Ako se svaki funkcionalni element razmatra ponaosob onda je moguće prepoznati osnovne ciljeve i njihove odnose uključene u svaki element i razviti kvantifikovane odnose za inženjersko poređenje, analize i procene. U sistemu upravljanja otpadom, transport predstavlja nezaobilaznu kariku koja povezuje sve faze toka otpada i zato je njegoa optimizacija jedan od glavnih ciljeva u sistemu.

Pri sagledavanju problematike upravljanja komunalnim otpadom, imajući u vidu njenu složenost, potrebno je sagledavanje više aspekata, kao što su ekonomski, ekološki, socijalni i drugi. Jedan od bitnijih ekonomskih aspekata pri upravljanju komunalnim otpadom jeste

pravilan (optimalan) izbor ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. Iz tog razloga sistem sakupljanja komunalnog otpada podeljen je na tri nivoa: strateški, taktički i operativni. Ova disertacija je usmerena na rešavanje operativnog nivoa, odnosno optimizaciju ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. Optimizacija ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada spada u grupu problema usmeravanja vozila (*eng. vehicle routing problem* - VRP) i u ovoj disertaciji problem se posmatra kao kombinatorni problem optimizacije.

Izborom optimalnih ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada postižu se direktne uštede smanjenjem pređenog puta i utrošenog vremena, smanjenjem broja vozila, smanjenjem broja radnika. Ovaku tvrdnju potkrepljuju brojni radovi i studije slučaja. Teixeira i saradnici [Teixeira i sar., 2004] u svom radu pokazali su da se optimizacijom ruta kretanja vozila sa sakupljanje optada može smanjiti pređeni put za oko 29%. Tavares i saradnici [Tavares i sar., 2009] su prikazali u svom radu da se optimizacijom može smanjiti za oko 12% utrošenog goriva pri sakupljanju otpada.

Egzaktni odabir optimalnih ruta kretanja vozila zahteva intenzivnu pretragu gde za realne situacije vreme pretrage značajno prevazilazi vremenski period u kojem se donosi odluka o novim rutama kretanja vozila. Pošto se radi o takvim matematičkim problemima gde rastom broja korisnika vreme rešavanja raste eksponencijalno, potrebno je uvesti aproksimativne ili heurističke metode rešavanja problema.

Za projektovanje ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada potrebno je pravilno definisati problem. Pri definisanju realnog problema neophodno je posedovati podatke o količinama komunalnog otpada, geografskim i saobraćajnim karakteristikama prostora, floti vozila, itd. Nakon definisanja i razumevanja problema potrebno je izabrati i prilagoditi matematičke metode koje će u razumnom vremenskom intervalu rešiti definisani problem.

Predmet istraživanja u okviru ove doktorske disertacije je razvoj logističkog modela za upravljanje komunalnim otpadom izborom optimalnih ruta prikupljanja i transporta komunalnog otpada, odnosno optimizacija operativnog nivoa. Primena ovakvog logističkog modela upravljanja komunalnim otpadom predstavlja primarne ekonomske i ekološke aktivnosti za kompanije koje se bave sakupljanjem i transportom otpada uopšte.

Osnovni cilj ove disertacije je da predloži naučno zasnovanu metodologiju za razvoj optimalnog logističkog modela tehničkog sistema za sakupljanje i transport komunalnog otpada u urbanim sredinama. Ciljevi optimizacije biće definisani u odnosu na: dužinu putanje (rute), vreme trajanja rute i troškove kretanja vozila. Ograničenja optimizacije sistema u disertaciji odnose se na: kapacitet vozila, trajanje ruta kretanja vozila, broj operatera koji

opslužuju vozilo, promenljivost saobraćajnih uslova, sezonske varijacije u generisanju otpada, ograničeno vreme skladištenja otpada u kontejnerima i dr.

Za razvoj optimalnog logističkog modela sistema biće primenjene heurističke i meta-heurističke metode. Osim toga, biće korišćeni odgovarajući matematički alati za integraciju velikog broja informacija u cilju izbora optimalnih rešenja sistema koja će ispuniti sve praktične kriterijume nauke i prakse. Prilagođavanjem i kombinovanjem heurističkih i meta-heurističkih metoda, u ovoj disertaciji, rešavana su četiri problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. Dobijeni rezultati su upoređeni sa realnim podacima kompanije koja se bavi sakupljanjem komunalnog otpada.

1.1. Struktura disertacije

Nakon uvodnih razmatranja, u drugom poglavlju ove disertacije, dat je sistematičan prikaz najznačajnijih literaturnih referenci iz oblasti kombinatorne optimizacije i optimizacije sistema sakupljanja i transporta komunalnog otpada uz poseban osvrt na primenu najboljih metoda za optimizaciju ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. U prvom delu drugog poglavlja dat je opšti pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti kombinatorne optimizacije. Ovaj deo disertacije započet je kratkim osvrtom na autore koji su prvi uveli metode za određivanje optimalnih ruta kretanja vozila. U drugom delu poglavlja predstavljena su istraživanja problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. U ovom delu poglavlja poseban akcenat je stavljen na radove koji su za rešavanje problema projektovanja ruta za sakupljanje i transport komunalnog otpada koristili heurističke i meta-heurističke algoritme. Takođe, razmatrani su radovi u kojima su predstavljene ekonomske i ekološke analize dobijenih rešenja u odnosu na postojeća rešenja sistema sakupljanja i transporta komunalnog otpada.

Sve veće količine otpada u svetu zahtevaju nove pravce razvoja i usavršavanja sistema upravljanja otpadom. U okviru trećeg poglavlja predstavljeno je upravljanje komunalnim otpadom. Ovaj deo disertacije, započet je pravnim osnovama upravljanja otpadom. Tu se predstavljene evropske pravne osnove kao i osnove za nacionalni i lokalni ekološki akcioni plan. U nastavku ovog poglavlja date su definicije, vrste i klasifikacija otpada. Da bi se uspešno implementirala strategija upravljanja otpadom moraju se uzeti u obzir brojni ključni principi. O principima upravljanja otpadom posvećen je jedan deo ovog poglavlja. U drugom delu poglavlja objašnjene su funkcije upravljanja otpadom sa posebnim osvrtom na sakupljanje i transport komunalnog otpada.

Osnovni pojmovi i definisanje problema usmeravanja vozila dati su u četvrtom poglavlju. Na početku ovog poglavlja dato je objašnjenje pojmova problema usmeravanja vozila (*eng. vehicle routing problem - VRP*) i transportnih mreža, kao i pojmova koji se koriste za definisanje transportne mreže. U nastavku četvrtog poglavlja predstavljene su varijante VRP-a. Prvo su predstavljene varijante VRP-a sa determinističkim zahtevima i to VRP sa ograničenjem kapaciteta i vremena, VRP sa prikupljanjem i dostavom i VRP sa dostavom i povratnim prikupljanjem. U drugom delu ovog poglavlja predstavljene su varijante VRP-a sa stohastičkim zahtevima, odnosno VRP sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom i VRP sa vremenskim ograničenjem i stohastičkim vremenom putovanja i opsluživanja kao i njihova matematička formulacija.

Da bi se neki problem uspešno definisao i rešio na adekvatan način neophodna je primena nekih metoda. U petom poglavlju predstavljen je naučni pristup za rešavanje problema usmeravanja vozila. U uvodnom delu ovog poglavlja objašnjen je sam pojam optimizacije kao i podela optimizacionih metoda. U nastavku poglavlja dato je objašnjenje problema stohastičke optimizacije primenom metode uslovne nezvesnosti (*eng. chance-constrained method*). Zatim, u nastavku poglavlja predstavljen je heuristički i meta-heuristički pristup za rešavanje VRP-a. Iz grupe heurističkih metoda predstavljene su i objašnjene sledeće metode: Clark-Wright-ov algoritam uštede, Sweep-ov algoritam i algoritam 2-OPT lokalne pretrage. Za meta-heurističke metode je prvo data podela prema različitim osnovama a u nastavku su detaljno objašene dve metode: algoritam harmonijskog pretraživanja i algoritam simuliranog kaljenja. Ove navedene heurističke i meta-heurističke metode su primenjene u šestom poglavlju za rešavanje definisanih modela.

Sakupljanje i transport, kao funkcije sistema upravljanja komunalnim otpadom, predstavljaju bitan aspekt koji utiče na operativne troškove upravljanja otpadom i zaštitu životne sredine. Iz tog razloga mnogi istraživači pokušavaju da kroz definisanje i rešavanje različitih modela minimiziraju operativne troškove koji se javljaju pri sakupljanju i transportu komunalnog otpada. U uvodnom delu šestog poglavlja ove disertacije opisana je logistika sakupljanja i transporta komunalnog otpada u urbanim sredinama. Nakon toga, uzimajući u obzir visoke troškove, varijacije u količini otpada, broj angažovanih vozila, broj operatera i drugih ograničenja definisana su četiri matematička modela za dobijanje optimalnog VRP-a za sakupljanje komunalnog otpada u urbanim sredinama. Nakon definisanja modela primenjene su optimizacione metode, koje su objašnjene u petom poglavlju, za simuliranje modela.

U sedmom poglavlju ove disertacije predstavljen je razvoj konceptualnog modela ekspertnog sistema za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada. U

ovom delu disertacije detaljno je dato objašnjenje modela upotrebom informaciono-komunikacionih tehnologija. Takođe je predstavljeno kako funkcioniše model usled projektovanja novih ruta zbog otkaza prvobitno isprojektovanih ruta.

U poslednjem, osmom poglavlju disertacije predstavljena su zaključna razmatranja vezana za optimizaciju modela za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada kada su zahtevi stohastičke veličine. Posebna pažnja je posvećena analizi ekonomskih performansi definisanog modela za sakupljanje i transport komunalnog otpada. Istaknuta je fleksibilnost definisane metodologije, kao i mogućnost njene primene u izboru optimalnih sistema sakupljanja i transporta komunalnog otpada za bilo koju lokalnu samoupravu na teritoriji Republike Srbije. Pored toga, ukazano je, u smislu budućih istraživanja, i na moguća unapređenja koncepta same metodologije i njenih pojedinačnih segmenata.

Poglavlje 2

PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA PROBLEMA USMERAVANJA VOZILA ZA SAKUPLJANJE KOMUNALNOG OTPADA

Na osnovu pregleda dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da je optimizacija sistema upravljanja otpadom u svetu već dugi niz godina predmet obimnih istraživanja. Optimizacija sistema upravljanja otpadom odnosi se najčešće na optimizaciju ruta kojima se kreću komunalna vozila pri sakupljanju komunalnog otpada u urbanim sredinama, kao i na optimizaciju ostalih segmenata sistema upravljanja otpadom kao što je uvođenje pretovarnih stanica u sistemu upravljanja otpadom.

U nastavku ovog poglavlja u prvom delu biće predstavljena analiza pregleda metoda za rešavanje generalnog problema usmeravanja vozila, a u drugom delu biće predstavljena analiza pregleda metoda i problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada.

2.1 Dosadašnja istraživanja u oblasti rešavanja problema usmeravanja vozila

Dantzig i Ramser [Dantzig i Ramster, 1959] su u svom radu prvi predstavili problem usmeravanja vozila (*eng. vehicle routing problem -VRP*) sa ograničenjem kapaciteta. Od tada do danas postoje brojna istraživanja za rešavanje problema usmeravanja vozila i njegove varijante.

Clark i Wright [Clark i Wright, 1964] su u svom radu na osnovu razmatranih teorijskih aspekata predstavili algoritam za dobijanje optimalnih ruta kretanja vozila. Ovaj algoritam, nazvan po njihovim imenima, tj. Clark-Wright-ov algoritam uštede, se od tada do danas vrlo uspešno primenjuje za rešavanje raznih teorijskih i praktičnih problema.

Gilber i saradnici [Gilber i sar., 2000] su u prvom delu svog rada dali pregled klasičnih heurističkih metoda za rešavanje VRP-a. U drugom delu su predstavili neke od meta-heurističkih metoda za rešavanje standardnog VRP-a.

Baker i Ayechev [Baker i Ayechev, 2008] predstavili su primenu genetskog algoritma iz grupe meta-heurističkih algoritama za rešavanje VRP-a sa ograničenjem kapaciteta. U zaključku svog rada naveli su da primena genetskog algoritma daje poboljšanje u odnosu na rezultate dobijene primenom algoritma tabu pretrage. Takođe, navode da je bolje primenjivati genetski algoritam za poboljšavanje rešenja dobijenih primenom klasičnih heurističkih metoda.

Geem i saradnici [Geem i sar., 2005] su u svom radu predstavili primenu algoritma harmonijskog pretraživanja za rešavanje VRP-a sa vremenskim ograničenjem. Oni su u prvom delu rada predstavili samu strukturu algoritma a u drugom su predstavili primenu algoritma harmonijskog pretraživanja na rešavanje problema školskog autobusa. Ovaj problem je poznat pod nazivom *eng. School bus routing problem* gde je ograničavajući faktor vreme dolaska i polaska autobusa. Oni su dobijene rezultate uporedili sa rezultatima koji su dobijeni primenom genetskog algoritma. U zaključku svog rada naveli su da algoritam harmonijskog pretraživanja daje bolje rezultate od genetskog algoritma u vidu minimizacije prosečnih troškova putovanja autobusa kao i vremenski kraće trajanje pretraga u odnosu na genetski algoritam.

Tavakkoli-Moghaddam i saradnici [Tavakkoli i sar., 2007] su predstavili primenu algoritma simuliranog kaljenja za rešavanje VRP-a sa ograničenjem kapaciteta. Nakon definisanje VRP-a sa ograničenjem kapaciteta predstavili su heuristički algoritam najbližeg suseda koji je služio za dobijanje početnog rešenja i predstavili su algoritam simuliranog kaljenja. Kao zaključke u svom radu naveli su da heuristički algoritam pretrage najbliži sused daje dobro početno rešenje za male probleme. Algoritam simuliranog kaljenja je primenjen za rešavanje problema sa većim brojem čvorova i dobijeni rezultati su prihvatljivi. Postoje još dosta istraživanja primene algoritma simuliranog kaljenja na rešavanje raznih varijanti VRP-a.

Teodorović i Pavković [Teodorović i Pavković, 1992] su razvili heuristički algoritam za projektovanje ruta kada je stohastička potražnja u čvorovima. Razvijeni algoritam zasnovan je na tehnici simuliranog kaljenja. U ovom radu autori su razmatrali slučaj otkaza rute. To znači kada vozilo sa svojim kapacitetom nije u stanju da zadovolji potražnju u određenom čvoru, vozilo treba da se vrati u bazu, isprazni prikupljenu količinu, vrati se do čvora u kome je došlo do otkaza, opsluži ga i nastavi sa opslugom duž planirane rute.

Michel i saradnici [Michel i sar., 1996] su u svom radu predstavili pregled problema usmeravanja vozila kada su zahtevi stohastički. Oni su predstavili algoritme za rešavanje problema usmeravanja vozila sa stohastičkim: brojem korisnika, vremenom trajanja rute i vremenskim intervalom. Takođe su dali pregled istraživanja i za kombinovanje stohastičkih zahteva.

2.2 Dosadašnja istraživanja u oblasti rešavanja problema usmeravanja vozila za sakupljanje otpada

Bautista i saradnici [Bautista i sar., 2008] su u svom radu predstavili primenu heurističkih i meta-heurističkih algoritama za rešavanje problema projektovanja ruta za sakupljanje komunalnog otpada. Oni su primenili metod najbližeg suseda i lokalnu pretragu za dobijanje početnog rešenja a dalju optimizaciju ruta vršili su primenom algoritma mrava (*eng. Ant algorithm*). Primenu ovog algoritma su testirali na rešavanju realnog problema za opštinu Sant del Lobregat, Barselona. Takođe, primenu ovog algoritma testirali su i na studijama pojedinih autora i pokazali da se primenom algoritma mrava dobijaju rešenja koja su oko 4 % bolja od analiziranih studija.

Li i saradnici [Li i sar., 2008] su rešavali problem sakupljanja komunalnog otpada u Porto Alegre, Brazil. Oni su u radu predstavili plan rada vozila za sakupljanje komunalnog otpada u cilju minimiziranja operativnih i fiksnih troškova rada vozila. Za optimizaciju ruta kretanja vozila primenili su heurističke metode. U razmatranom problemu sakupljeni otpad se transportovao do reciklažnog centra umesto do deponije. Rezultati do kojih su autori ovog rada došli pokazuju da je ušteda u smanjenju korišćenih broja vozila od oko 25.24 % a ušteda u vidu transportnih troškova od oko 27.21 %.

Rad autora Nuortio i saradnika [Nuortio i sar., 2006] opisuje optimizaciju rasporeda i ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada u istočnoj Finskoj. Rešenja su generisana meta-heurističkim algoritmom, adaptivno vođena varijabilna pretraga suseda (*eng. Adaptive Guided Variable Neighborhood Search-AGVNS*) koji je prilagođen rešavanju realnih problema sakupljanja komunalnog otpada. Eksperimentalni rezultati pokazuju da se primenom heurističkih i meta-heurističkih algoritama postiže značajna ušteda u odnosu na trenutnu praksu sakupljanja komunalnog otpada i to u oba nivoa optimizacije.

Tung i Pinnoni [Tung i Pinnoni, 2000] su u svom radu predložili heurističku proceduru za rešavanje problema sakupljanja komunalnog otpada u Hanoi, Vietnam. Rzmatrani problem su tretirali kao varijantu VRP-a sa vremenskim ograničenjem. Rute su prvo dobili pomoću Solomon-ovog pristupa a zatim vršili poboljšanje za tako dobijene rute. Poboljšanje ruta je vršeno kombinovanjem Or-OPT i 2-OPT algoritmima pretrage. Dobijeni rezultati pokazuju da se dobija ušteda operativnih troškova vozila za sakupljanje komunalnog otpada od 4.6 % u odnosu na trenutnu praksu sakupljanja komunalnog otpada.

Kim i saradnici [Kim i sar., 2006] su u svom radu rešavali problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa vremenskim ograničenjem. Za rešavanje ovog problema izvršili su proširenje standardnog Solomon-ovog algoritma dodavanja. Oni su u

radu pored minimiziranja broja vozila i ukupnog vremena putovanja razmatrali i kompaktnost ruta i balansiranje radnog opterećenja rešenja, jer smatraju da je to veoma važan aspekt u rešavanju realnih problema. Za kompaktnost ruta i balansiranje rešenja primenili su *clustering-based* algoritam. Za dobijene rezultate primenom algoritma dodavanja i *clustering-based* izvršili su poboljšanje primenom algoritma simuliranog kaljenja.

Vera i saradnici [Vera i sar., 2013] su u radu razmatrali realan problem sakupljanja staklenog, metalnog, PET i papirnog otpada koji korisnicu odlažu na određenim lokacijama u određenom regionu. Ovaj problem su predstavili kao periodičan problem usmeravanja vozila. Predložen je hibridni algoritam za rešavanje navedenog problema. Hibridizacija se odnosi na kombinovanje algoritma najbližeg suseda i algoritma lokalne pretrage. Primenom predloženog algoritma, za pojedine realne primere, dobijena je ušteda od oko 25 %.

Sahoo i saradnici [Sahoo i sar., 2005] su u svom radu predstavili sistem pod nazivom *Waste Route* čijom implementacijom bi smanjili operativne troškove kompanija koje se bave sakupljanjem otpada. Predstavljen je primer jednog područja u kome je izvršeno poboljšanje produktivnosti ruta za oko 11%.

Agha [Agha, 2016] je u svom radu primenio model kombinovanog celobrojnog programiranja za optimizaciju sistema sakupljanja otpada u Deir Al-Balah, Gaza Strip. Problem obuhvata 58 lokacija za sakupljanje otpada, deponiju i tri vozila za sakupljanje otpada. Dobijeni rezultati su upoređeni sa postojećim sistemom u smislu ukupnog pređenog puta. Rezultat pokazuje da je postignuto smanjenje za 23.4 % u pređenom putu, tako da se smanjuju mesečni troškovi za oko 1140 USD.

Ghose i saradnici [Ghose i sar., 2006] su kombinovali probleme sa i bez zamene (*eng. skip and non-skip problem*) kako bi odredili minimalne troškove prikupljanja komunalnog otpada na deponiji kompanije Asansol Municipal Corporation (AMC) države zapadni Bengal, Indija. Problem uključuje 1405 posuda za sakupljanje komunalnog otpada sa tri različite veličine. Za sakupljanje ovih posuda se koriste tri tipa vozila. Tip vozila-A i tip vozila-B koriste se kao problemi zamene i bez zamen, respektivno. Dok tip vozila-C sakuplja otpad od posuda tipa-C i odlaže otpad u najbližu posudu tipa-A, vozilo će ponoviti proces sve dok se ne sakupi sav otpad iz posuda tipa-C. Tada se vozilo vraća na deponiju sa lokacije poslednje posude tipa-A. U radu je izvršeno upoređenje operativnih godišnjih troškova kompanije AMC sa procenjenim operativnim troškovima predloženog rešenja. Rezultati upoređivanja ukazuju da AMC može uštedeti oko 66,8% svake godine ako se predloženo rešenje primenjuje.

McLeod i Cherrett [McLeod i Cherrett, 2008] su u svom radu razmatrali tri scenarija sakupljanja i transporta otpada u Hampšir-u UK. Došli su do rezultata da je moguće za oko 14 % smanjiti pređeni put vozila za sakupljanje otpada.

Poslednjih godina sve je aktuelnija primena geografskog informacionog sistema-GIS za rešavanju problema sakupljanja i transporta komunalnih otpada. Tako autori Chalkias i Lasaridi [Chalkias i Lasaridi, 2009] u svom radu navode da optimalna rešenja u mnogome zavise od kvaliteta i kvantiteta dostupnih podataka. Zbog toga primena GIS-a za rešavanje ovog problema služi za prikupljanje neophodnih podataka pri definisanju modela.

Arribas i saradnici [Arribas i sar., 2010] su u svom radu predstavili metodologiju za efikasno sakupljanje komunalnog otpada za zapadno-centralnu zonu opštine Santiago. Predložena metodologija podrazumeva matematičke modele korišćenjem kombinacije lineranog programiranja i meta-heurističkog algoritma tabu pretraga u GIS okruženju. Studija koja je predstavljena sadrži 1600 kanti za komunalni otpad sa pretpostavkom da su maksimalno ispunjene za period od dva dana. Rezultati koji su predstavljeni pokazuju da se predloženom metodologijom za sakupljanje komunalnog otpada smanjuju 50% troškovi sistema sakupljanja otpada u odnosu na trenutno stanje.

Pirs i saradnici [Pirs i sar., 2011] su u svom radu izvršili pregled broja i structure publikovanih analiza procesa upravljanja čvrstim otpadom u Evropi. Iz ovog rada, uočava se da udeo sistemskih analiza upravljanja komunalnim otpadom u ukupnom broju prelazi 50 % što govori da je unapređenje sistema upravljanja ovom vrstom otpada najčešći cilj istraživača u okviru ovog sektora.

2.3 Mogući pravci istraživanja u oblasti rešavanja problema usmeravanja vozila za sakupljanje otpada

Poslednjih godina istraživači su se bavili istraživanjima u oblasti rešavanja VRP-a za sakupljanje i transport komunalnog otpada sa različitih aspekata u cilju dobijanja optimalnih rešenja. Istraživanja su doprinela razvoju modela koji se uspešno primenjuju u procesu sakupljanja i transporta komunalnog otpada.

Detaljnou analizom publikovanih naučnih i stručnih radova, prepoznati su sledeći pravci istraživanja u oblasti rešavanja VRP-a za sakupljanje i transport komunalnog otpada:

- U najvećem broju istraživanja analizirani su uglavnom deterministički zahtevi odnosno fiksne količine komunalnog otpada i fiksno vreme sakupljanja i transporta komunalnog otpada. Razvijeni modeli sa determinističkim zahtevima mogu imati velika odstupanja od modela koji se optimiziraju prilikom praktičnog testiranja odnosno u realnom vremenu.
- Veliki broj istraživanja pokazuje da je primena kombinacije heurističkih i meta-heurističkih metoda opravdana.

- Veliki nedostatak prethodnih istraživanja je rešavanje VRP-a sa malim brojem ograničenja. Uglavnom se razmatraju modeli sa jednim ograničenjem, i to ograničenje kapaciteta vozila za sakupljanje komunalnog otpaa ili ograničenje vremena trajanja ruta.
- U cilju definisanja dovoljno dobrog modela za sakupljanje i transport komunalnog otpada potrebno je sagledati veliki broj dopunskih ograničenja koja približavaju teorijski model praktičnim problemima.
- Različite matematičke metode optimizacije (heurističke i meta-heurističke metode) mogu biti kombinovane kako bi se istovremeno iskoristile njihove prednosti.
- Još jedan od nedostataka prethodnih istraživanja jeste što se samo teoriski definišu dinamički modeli i to uglavnom statički dinamički problemi usmeravanja vozila, a vrlo malo se radi sa dinamičkim modelima sa stohastičkim zahtevima. Primena dinamičkih modela sa stohastičkim zahtevima u realnom vremenu preslikavaju realne probleme čiju optimizaciju težimo da dobijemo.

Poglavlje 3

UPRAVLJANJE KOMUNALNIM OTPADOM

Ubrzani rast populacije, ekonomski razvoj, a posebno nagli razvoj gradova i porast broja stanovnika u njima, uzrokuje povećanje potrošnje, a samim tim i rast količine otpada. Sve ovo utiče na kompleksnost odgovornog upravljanja otpadom u urbanim sredinama. Povećane količine otpada u urbanim područjima diktiraju pravce razvoja i usavršavanja sistema za upravljanje otpadom. U skladu sa principima održivog razvoja, održivo upravljanje otpadom obuhvata bolje iskorišćenje resursa, redukciju količine generisanog otpada na izvoru i u slučaju da je otpad već generisan, njegov tretman treba da doprinese osnovnim ciljevima održivog razvoja. Savremeni sistemi upravljanja otpadom podrazumevaju maksimalno iskoriscenje otpada pre njegovog konačnog odlaganja. Sistemi upravljanja otpadom obuhvataju sprovođenje svih procesa, postupaka i mera, propisanih za pravilno postupanje otpadom, od njegovog nastanka do njegovog odlaganja.

U praksi se upravljanje otpadom razlikuje u razvijenim i nerazvijenim zemljama, u urbanim i ruralnim područjima, u industrijskoj i rezidencijalnoj proizvodnji. Treba imati u vidu da pravilan odnos prema iskorišćavanju otpada kao resursa u svakom slučaju može doprineti ekonomskom razvitku određene zemlje, boljem zapošljavanju i opštoj dobrobiti društva. Poboljšanje u sistemu upravljanja otpadom bi se postiglo ako bi organizovanim sakupljanjem otpada bila obuhvaćena sva urbana i ruralna područja jedne države.

Upravljanje komunalnim otpadom je kompleksan sistem, a sakupljanje i transport komunalnog otpada je neizbežan pod-sistem tog sistema u modernim urbanim sredinama. Sakupljanje i transport otpada sprovodi se namenskim vozilima, koja na periodičnoj osnovi (najčešće jednom dnevno) moraju da obiđu kontejnere u koje građani odlažu otpad iz svojih domaćinstava. Izbor putanje kojom će se kretati vozila za sakupljanje otpada je od ključne važnosti, pošto je procenjeno da se, od ukupnog iznosa novca koji se troši za sakupljanje,

transport i odlaganje komunalnog otpada, oko 50-70% troši u fazi sakupljanja. Prema tome, mali procenat poboljšanja u radu podsistema sakupljanja može rezultovati znatnim uštedama u ukupnim troškovima.

Neadekvatno sakupljanje i transport za rezultat imaju velike ekonomske i ekološke gubitke i predstavljaju značajan podsticaj velikom broju istraživača ka pronalaženju odgovarajućih sistemskih rešenja. Vrlo često, razvoj novih metodologija za sakupljanje i transport otpada ne prati trend pomenutog rasta populacije u urbanim sredinama.

3.1 Pravne osnove upravljanja otpadom

Upravljanje otpadom predstavlja veoma složen proces i iz tog razloga neophodna je pravna regulativa kako bi se odgovorno upravljalo otpadom. Pravnu regulativu je potrebno sagledati na globalnom nivou i prilagoditi je lokalnom nivou država i lokalnih zajednica. Upravljanje tokovima otpada, na globalnom nivou, je pravno regulisano tako da je za svaki tok upravljanja otpadom posebno definisana zasebna direktiva kojom se jasnije utvrđuju ciljevi i preporuke za pravilno tretiranje. Odgovornosti i nadležnosti u upravljanju otpadom na lokalnom nivou su podeljene između države i lokalne samouprave.

3.1 Evropske pravne osnove upravljanja otpadom

U Evropskoj povelji o životnoj sredini i zdravlju, koju je usvojio Savet Evropske Unije 1989. godine na prvoj Evropskoj konferenciji o životnoj sredini i zdravlju Svetske zdravstvene organizacije, naglašava se garancija prava građana na čistu i zdravu životnu sredinu.

Zakonodavstvo u oblasti upravljanja komunalnim otpadom u Evropskoj Uniji (EU) zasniva se na strategiji za upravljanje komunalnim otpadom koja je data u okviru Direktive o otpadu iz 1975. godine (*Waste Framework Directive, 1975 - Directive 75/442/EEC*) [DIR75, 1975], Direktive o opasnom otpadu (*Hazardous Waste Directive, 1991- Directive 91/689/EEC*) [DIR91, 1991], kao i Regulativa o transportu komunalnog otpada (*Regulations of Waste Shipment, 1993 - Council Regulation 259/93/EEC*) [REG93, 1993]. Direktiva o deponijama otpada EU (*Council Directive 1999/31/EC - the landfill of waste*) [DIR99, 1999] predstavlja najvažniji zakonodavni dokument u tom području. Osnovni cilj ove direktive je da se zabrani deponovanje otpada koji prethodno nije pretpeo neki vid tretmana na deponije komunalnog otpada. Ovo se naročito odnosi na biološki razgradivi otpad koji je najčešći uzrok procesa truljenja pod uticajem nedostatka kiseonika unutar deponovanog otpada.

Osnovno pitanje, sa kojima se evropske zemlje u tranziciji suočavaju jeste usklađivanje zakonodavstva u oblasti životne sredine sa zakonodavstvom EU. Usklađivanje

zakonodavstva u oblasti životne sredine sa zakonodavstvom EU, u slučaju zemalja kandidata EU, je jedan od preduslova za dobijanje statusa kandidata i otpočinjanje procesa priprema za članstvo.

Zakon o upravljanju otpadom RS uređuje: „*vrste i klasifikaciju otpada, planiranje upravljanja otpadom, subjekte, odgovornosti i obaveze u upravljanju otpadom, upravljanje posebnim tokovima otpada, uslove i postupak izdavanja dozvola, prekogranično kretanje otpada, izveštavanje, finansiranje upravljanja otpadom, nadzor i druga pitanja od značaja za upravljanje otpadom*“ [SLGRS, 2016].

3.2 Definisane, vrste i klasifikacija otpada

U svojoj disertaciji Jovanović [Jovanović, 2015] navodi sledeću definiciju otpada: „*Otpad predstavlja svaki materijal ili predmet koji nastaje u toku obavljanja proizvodne, uslužne ili druge delatnosti, predmeti isključeni iz upotrebe, kao i otpadne materije koje nastaju u potrošnji i koje sa aspekta proizvođača, odnosno potrošača nisu pogodne za dalje korišćenje i moraju se odbaciti*“. Dok Uredba o vrstama otpada [Uredba, 2012] otpad definiše na sledeći način: „*Otpad jeste svaka materija ili predmet sadržan u listi kategorije otpada (Q lista), koji vlasnik odbacuje, namerava ili mora da odbaci, u skladu sa zakonom kojim se uređuje upravljanje otpadom*“. Iz prethodnih definicija može se zaključiti da otpad obuhvata proizvode koji preostanu na kraju nekog procesa ili delatnosti. Otpad posmatran sa ekonomskog aspekta još uvek se tretira kao negativna pojava. Iz tog razloga veoma je važno definisati jasne granice između *otpada* i *neotpadnih materijala* u cilju determinisanja odlučujućih faktora na ekonomskom tržištu otpada.

Klasifikacija otpada se može izvršiti na različite načine i to: prema mestu nastanka, prema toksičnosti i prema sastavu (sl. 3.1). Detaljnije o razvrstavanju otpada može se naći u Evropskom katalogu otpada (*eng. European List of Waste/European Waste Catalog*) [EUW, 2002].

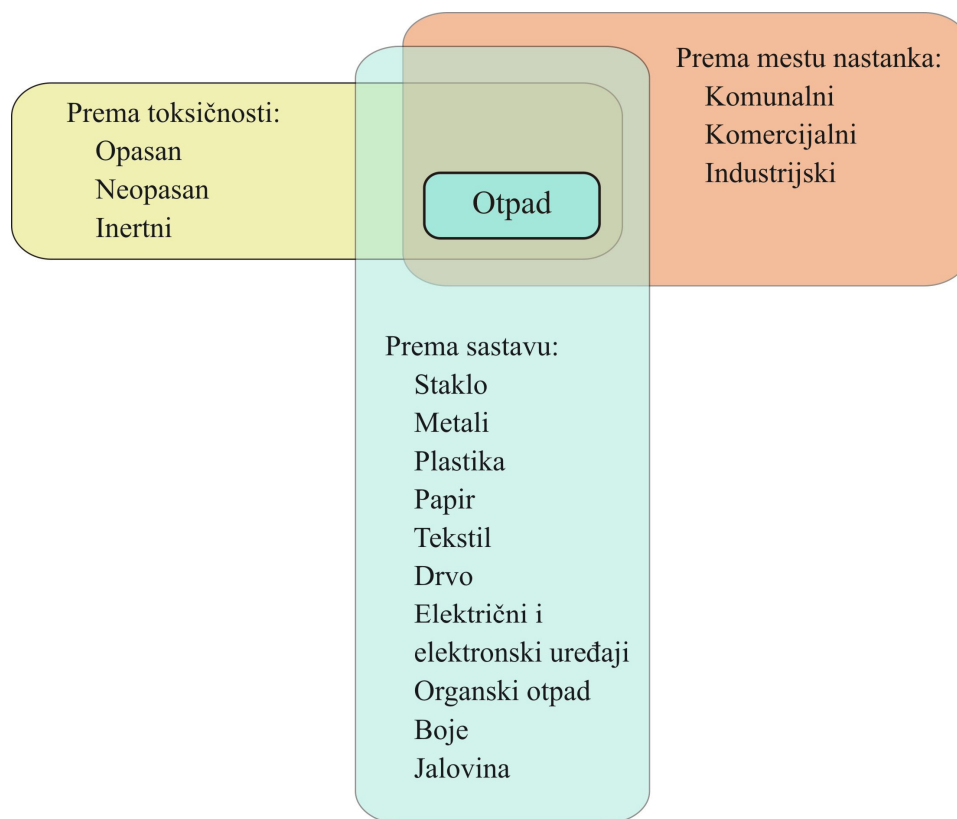
Prema mestu nastanka otpad može biti: komunalni otpad, komercijalni otpad i industrijski otpad.

Komunalni otpad predstavlja otpad koji generišu domaćinstva, koji nije opasan, kao i ostali otpad koji je zbog sastava sličan otpadu koji nastaje iz domaćinstva (npr. baštenski otpad).

Komercijalni otpad obično nastaje u organizacijama koje se bave trgovinom, uslugama, kancelarijskim poslovima, sportom itd.

Industrijski otpad predstavlja otpad koji je generisan iz industrije ili sa mesta na kojoj je smeštena industrija. U industrijski otpad ne spadaju jalovine i prateće mineralne sirovine iz

rudnika i kamenoloma. Industrijski otpad, koji se stvara u procesu proizvodnje, može se ponovo iskoristiti u sličnom ili nekom drugom tehnološkom procesu kao sekundarne sirovine, ako su ispunjene tražene tehničke karakteristike neophodne za samu primenu.



Slika 3.1 Podela otpada [SEPA, 2013]

Na osnovu toksičnosti otpad se može podeli na: opasan, neopasan i inertan otpad.

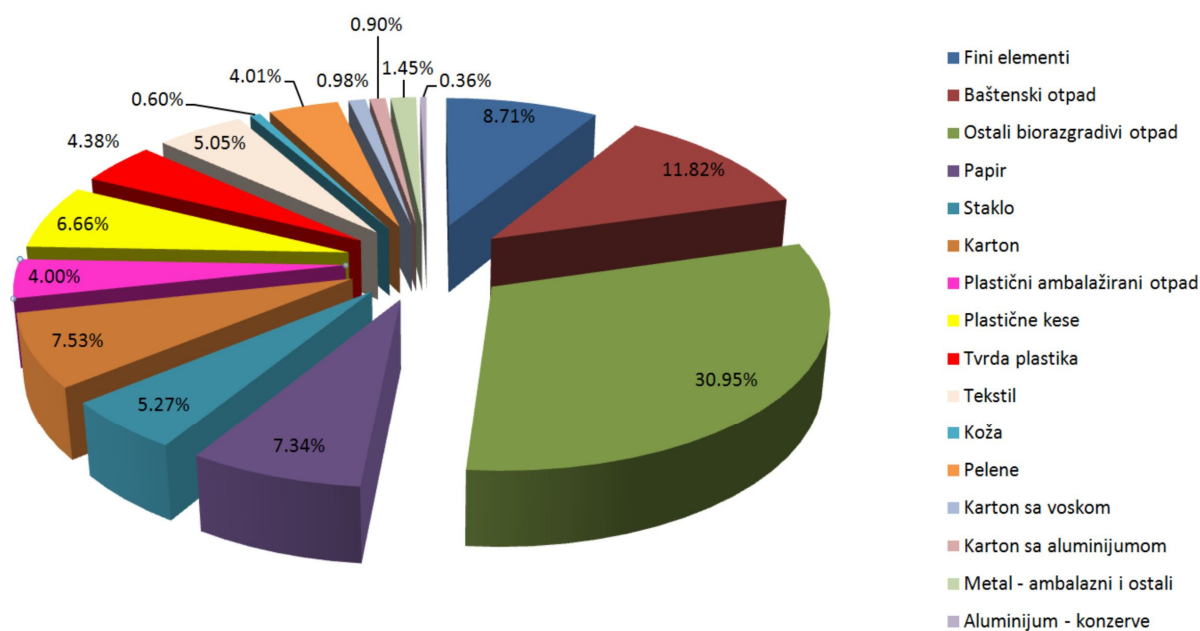
Pod opasnim otpadom se podrazumeva onaj otpad koji, svojim poreklom i sastavom, može ugroziti životnu sredinu, i sadrži bar jednu od opasnih karakteristika (zapaljivost, infektivnost, otrovnost itd.).

Pod neopasnim otpadom se podrazumeva otpad koji, zbog svoje količine, sastava ili fizičke, hemijske i biološke prirode, ne utiče životnu sredinu.

Inertni otpad predstavlja otpad koji nije podložan bilo kojim fizičkim, hemijskim ili biološkim promenama. To znači da se ne rastvara, ne reaguje na bilo koji fizički ili hemijski način, ne utiče nepovoljno na druge materije sa kojima dolazi u kontakt na način koji može da dovede do zagađenja životne sredine. Takođe, inertni otpad ne poseduje ni jednu od karakteristika opasnog otpada.

Količina otpada koja se generiše za određeni region određuje se na osnovu broja stanovnika za definisani vremenski period planiranja i na osnovu potrebnog broja stanovnika koji će biti obuhvaćen sistemom sakupljanja otpada, porasta broja stanovnika u određenom vremenskom periodu i specifičnoj količini otpada po stanovniku. Osnovni podaci o

količinama otpada bazirani su uglavnom na proceni. Masa i sastav otpada zavise od mnogih faktora. Neki od faktora su: ekonomska razvijenost posmatranog regiona, veličina regiona, način stanovanja (individualni ili kolektivni), način sakupljanja i transporta otpada itd. Generisana dnevna, a time i godišnja masa komunalnog otpada, po glavi stanovnika, se razlikuje između samih država. U razvijenim zemljama dnevna količina otpada po stanovniku iznosi 1.4 kg a u srednje ili nerezvijenim zemljama dnevna količina otpada po stanovniku kreće se od 0.2 do 0.7 kg [Janošević i sar., 2010].



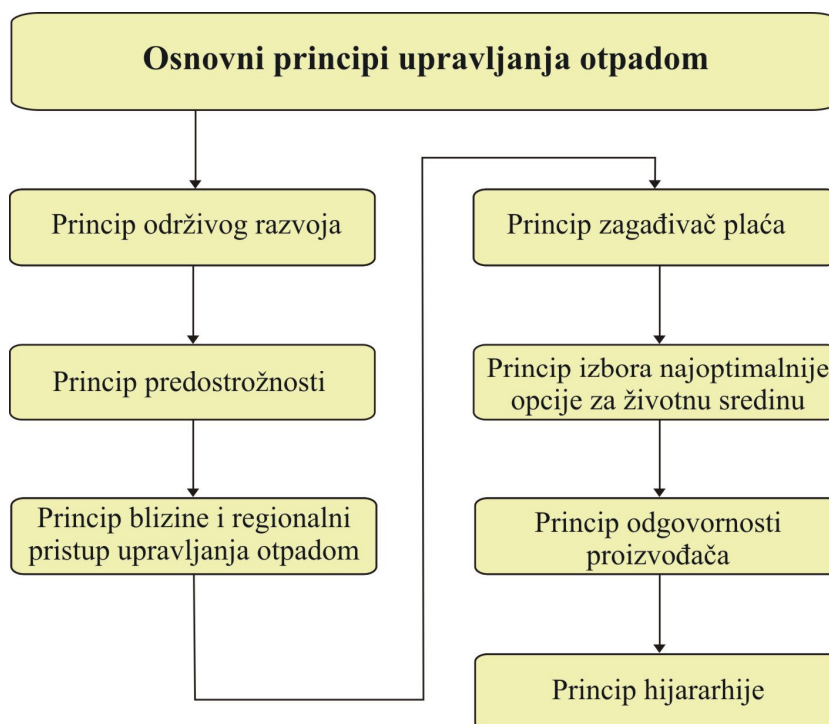
Slika 3.2 Morfološki sastav komunalnog otpada u Republici Srbiji [Vujić i sar., 2009]

Maseni udeo pojedinih vrsta otpada u karakterističnom uzorku otpada predstavlja morfološki sastav otpada. Postoje brojne metode za određivanje morfološkog sastava otpada a jedna od njih jeste prosejavanje otpada srednjeg uzorka kroz sito otvora 15x15mm. Maseni sastav se uglavnom određuje u odnosu na: papir, staklo, karton, plastiku, metal, tekstil, baštenski otpad i ostali otpad. Morfološki sastav komunalnog otpada za Republiku Srbiju prikazan je na slici (sl.3.2).

3.3 Principi upravljanja otpadom

Uspostavljanje i implementacija strategije upravljanja otpadom zahteva brojne ključne principe koji se moraju uzeti u obzir i to [Janošević]: princip održivog razvoja, princip predostrožnosti, princip blizine i regionalni pristup upravljanja otpadom, princip zagađivač plaća, princip primene najoptimalnije opcije za životnu sredinu, princip odgovornosti proizvođača i hijerarhije u upravljanju otpadom (sl. 3.3).

Princip održivog razvoja predstavlja usklađeni sistem tehničko-tehnoloških, ekonomskih i društvenih aktivnosti u celokupnom razvoju sa ciljem da se sačuva i unapredi kvalitet životne sredine. Održivo upravljanje otpadom podrazumeva bolje iskorišćenje resursa, smanjenje količine otpada na samom izvoru i kada je otpad nastao postupati sa njim na takav način da to doprinosi ostvarenju ciljevima održivog razvoja. Koraci koji doprinose postizanju održivog razvoja uključuju sledeće mere: osnaživanje postojećih mera, razvoj i implementacija novih mera, prihvatanje veće pojedinačne odgovornosti za životnu sredinu.



Slika 3.3 Principi upravljanja otpadom

Princip predostrožnosti nalaže da svaka aktivnost pri upravljanju otpadom mora biti planirana i sprovedena, na takav način da minimizira mogućnost nastanka svake promene na životnoj sredini. U slučaju mogućih uticaja na životnu sredinu potrebno je koristiti instrumente procene uticaja na životnu sredinu.

Princip blizine i regionalni pristup upravljanja otpadom nalaže da se otpad tretira ili zbrinjava što je bliže moguće mestu nastanka, da bi se minimizirali rizici mogućih neželjenih posledica, nastalih u toku njegovog transporta. Pri definisanju lokacija postrojenja za tretman i lokacije za zbrinjavanje otpada neophodno je pridržavati se principu blizine. Kako bi se smanjio neželjeni uticaj transporta otpada na kvalitet životne sredine, neophodno je voditi računa o ravnoteži između principa blizine i ekonomičnosti. Regionalni princip upravljanja otpadom podrazumeva razvoj i implementaciju regionalnih planova koji se zasnivaju na evropskom i nacionalnom zakonodavstvu.

Princip zagađivač plaća nalaže da zagađivač snosi celokupne troškove vezane za nastajanje, tretman i odlaganje otpada, tj. da ti troškovi moraju biti uračinati u cenu proizvoda.

Princip izbora najoptimalnije opcije za životnu sredinu predstavlja proces donošenja neophodnih odluka koje utiču na očuvanje životne sredine. Odluka, predstavlja najoptimalniju opciju ili kombinaciju opcija, za date ciljeve i okolnosti, koje će dati najveću dobit ili najmanju štetu po životnu sredinu.

Princip odgovornosti proizvođača nameće svim privrednim subjektima, u sferama proizvodnje, distribucije i prodaje proizvoda, odgovornost za otpad koji nastaje usled njihovih aktivnosti i porast količine otpada. Proizvođač otpada ima najveću odgovornost, jer direktno utiče na sastav i osobine proizvoda i zato se obavezuje da se stara o smanjenju nastajanja otpada i mogućnosti reciklaže svojih proizvoda.

Princip hijerarhije u upravljanju otpadom predstavlja redosled prioriteta u upravljanju otpadom, a Janošević sa saradnicima [Janošević i sar., 2010 navodi da ovaj princip čine:

- Prevencija nastajanja i redukcija - minimizacija korišćenja resursa i smanjenje količina nastalog otpada;
- Ponovna upotreba - ponovno korišćenje proizvoda za istu ili drugu namenu;
- Reciklaža - ponovni tretman otpada radi korišćenja kao sirovine u proizvodnji istog ili različitog proizvoda;
- Iskorišćenje - iskorišćenje vrednosti otpada primenom različitih tehnologija tretmana (kompostiranje, anaerobna digestija, insineracija otpada sa iskorišćenjem energije, piroliza, gasifikacija, plazma proces, otpad kao gorivo, ...);
- Spaljivanje bez iskorišćenja energije;
- Sanitarno odlaganje - ukoliko ne postoji nijedno drugo odgovarajuće rešenje, odlaganje otpada deponovanjem;
- Nesanitarno odlaganje i nekontrolisano spaljivanje.

Hijerarhijom upravljanja otpadom se pokazuje da je prevencija nastajanja i redukcija otpada najefektivnije rešenje za zaštitu životnu sredinu. Međutim, nije uvek moguće praktično primeniti princip smanjenja otpada na izvoru ali je neophodno da proizvodi i materijali mogu biti iskorišćeni ponovo, bilo za istu ili drugu namenu. Ukoliko ta mogućnost ne postoji, otpad se dalje može iskoristiti kroz reciklažu ili neki drugi vid tretmana. U slučaju da nije moguće primeniti ni jednu od prethodnih opcija onda otpad treba zbrinuti na deponiju.

Prevencija nastajanja i redukcija predstavlja osnovnu opciju u hijerarhiji upravljanja otpadom. O redukciji se mora razmišljati već u fazi projektovanja proizvoda, a onda i u svim ostalim fazama, izrade, pakovanja, transporta i plasmana proizvoda.

3.4 Regionalni sistem upravljanja otpadom

Kako bi se izgradio efikasniji sistem upravljanja otpadom, potrebno je da više lokalnih samouprava pristupe formiranju regiona. Formiranje regiona je pre svega politička odluka, koja mora da bude zasnovana na tehničkim uslovima, postojećoj infrastrukturi, kao i postojanju potencijalnih lokacija za regionalnu deponiju i regionalnih postrojenja za preradu otpada. Osnovni cilj formiranja regionalnog sistema upravljanja otpadom je da doprinese održivom razvoju sistema za upravljanje otpadom koji će kontrolisati stvaranje otpada, omogućiti pravilno zbrinjavanje, stimulisati ulaganja i maksimizirati ekonomske vrednosti koje nastaju iz otpada.

Regionalni plan upravljanja otpadom primarno razmatra upravljanje komunalnim i komercijalnim otpadom. Ovaj plan podrazumeva usvajanje integralnog pristupa koji:

- Osigurava da svi tokovi otpada tretiraju zajedno i da se izabrana rešenja za upravljanje pojedinim tokovima tretiraju na taj način da imaju uticaj na upravljanje drugim tokovima,
- Razmatra prevenciju nastajanja otpada, ponovno iskorišćenje, odlaganje, promociju i edukaciju, razvoj lokalnog tržišta na koherentan način,
- Osigurava integraciju regionalnog plana sa nacionalnom strategijom upravljanja otpadom.

Osnovni parametri za realizaciju regionalnog plana upravljanja otpadom su: generatori i stanovništvo (veličina naselja, saobraćajna infrastruktura i lokacija deponije), vrsta, količina i sastav otpada. Da bi se formirao region potrebno je da bude ispunjen jedan od osnovnih kriterijuma, a to je da region treba da obuhvati najmanje 200 000 stanovnika [Janošević i sar., 2010]. Broj stanovnika jednog regiona se određuje na osnovu propisa, urbanističkog, odnosno prostornog plana. Takođe, da bi lokalne samouprave činile funkcionalni region upravljanja otpadom potrebno je da ispune i kriterijum saobraćajne infrastrukture, tj. da budu dobro međusobno povezane.

3.5 Integralni sistem upravljanja otpadom

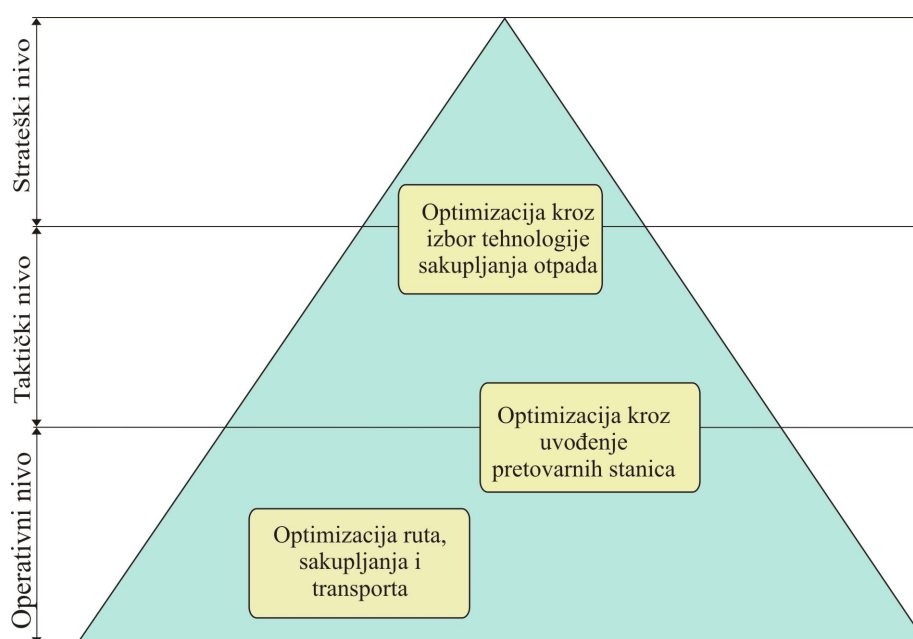
Integralni sistem podrazumeva pravilan izbor i primenu adekvatnih tehnologija kojima se ostvaruju posebni ciljevi upravljanja otpadom uz definisanje adekvatne zakonske regulative. Kako bi se omogućila implementacija i efikasno funkcionisanje integralnog sistema upravljanja otpadom neophodno je da se aktivnosti u okviru njega odvijaju po definisanoj hijerarhiji.

Kako bi se postigla optimizacija sakupljanja otpada, način upravljanja podjeljen je na tri nivoa upravljanja (sl. 3.4), odnosno optimizacije [Erdelez i sar., 2007]:

- Strateški nivo - optimizacija sistema upravljanja otpadom izborom tehnologije sakupljanja otpada;
- Taktički nivo - optimizacija sistema upravljanja otpadom izborom lokacija pretovarnih stanica;
- Operativni nivo - optimizacija sistema upravljanja izborom „ruta“ sakupljanja i transporta otpada.

Strateški nivo se uglavnom pojavljuje kada se planira dugoročni plan upravljanja otpadom. Takođe, strateški nivo se javlja kada se vrši promena ili uvođenje novih zakonskih okvira ili kada se uvodi nova tehnologija upravljanja otpadom. U ovom slučaju nužno je sagledati sve elemente upravljanja otpadom kako bi se odredile smernice za dugoročni razvoj. Izbor novih tehnologija upravljanja otpadom može da utiče na organizaciju transporta otpada a samim tim i na troškove, što posredno ima širi uticaj na okolinu.

Taktički nivo optimizacije podrazumeva optimizaciju sistema upravljanja otpadom izborom lokacije pretovarnih stanica. Izbor pretovarnih stanica u sistemu upravljanja otpadom spada u grupu lokacijskih problema. Uvođenje pretovarnih stanica u sistem upravljanja otpadom javlja se kada je regionalni plan upravljanja otpadom formiran ili kada se posmatrani region znatno povećao. U tom slučaju je uvođenje pretovarnih stanica u sistem upravljanja otpadom veoma značajno za racionalizaciju rada i minimizaciju troškova kompanija koje se bave sakupljanjem otpada. O pretovarnim stanicama biće više reči u okviru poglavlja transport otpada.



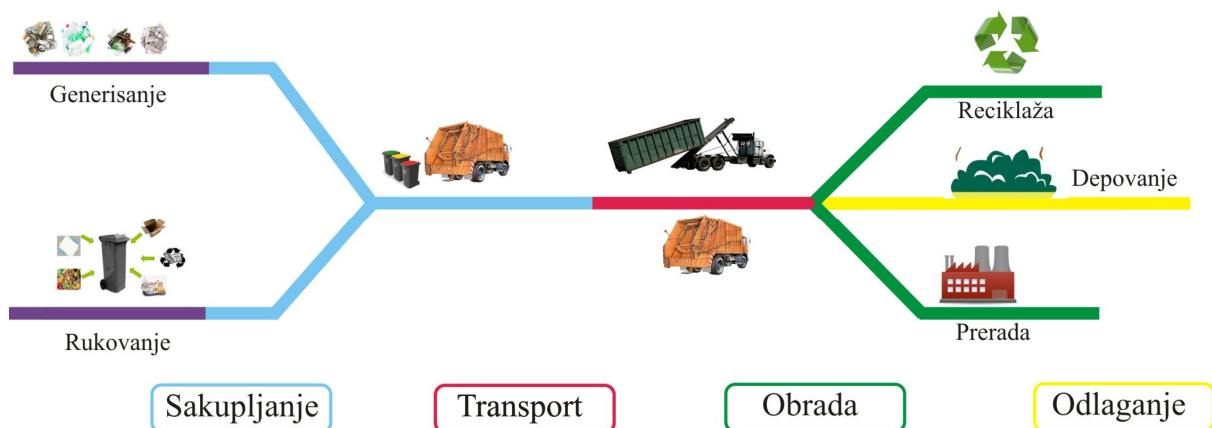
Slika 3.4 Piramida upravljanja otpadom sa aspekta optimizacije sistema prikupljanja otpada [Erdelez i sar., 2007]

Operativni nivo, odnosno izvršni nivo kako se još naziva u literaturi, predstavlja optimizaciju sistema upravljanja otpadom izborom optimalnih ruta sakupljanja i transporta otpada. Optimizacija ruta sakupljanja i transporta otpada jeste zapravo trajni zadatak svakog komunalnog preduzeća i taj nivo optimizacije trebalo bi kontrolisati po pravilu svakih 5 godina [Erdelez]. Optimizacija ruta je nužna jer se tokom vremena stalno menjaju faktori koji utiču na učinak prevoza: broj stanovnika, količina otpada, vrsta prevoznih sredstava, i tako dalje. Izborom povoljnih ruta kretanja vozila postižu se direktne uštede smanjenjem pređenog puta i utrošenog vremena.

Operativni nivo odnosno projektovanje optimalnih ruta za sakupljanje i transport komunalnog otpada biće detaljno razmatran u narednim poglavljima disertacije, a koji imaju za cilj je da se razvije logistički model za upravljanje komunalnim otpadom izborom optimalnih ruta sakupljanja i transporta komunalnog otpada. Primena ovakvog logističkog modela upravljanja komunalnim otpadom predstavlja bitan ekonomski i ekološki segment za bilo koju kompaniju koja se bavi sakupljanjem i transportom otpada.

3.6 Funkcije upravljanja otpadom

Problemi koji se javljaju u okviru upravljanja otpadom u savremenom društvu složene su prirode zbog razlike u količinama i prirodi otpada, širenju urbanih zona, ograničenih fondova za javne usluge u velikim gradovima, razvoja tehnologije, ograničenja u dostupnosti energije i sirovina. Stoga, ako se teži upravljanju otpadom na efikasan i propisan način, moraju se identifikovati osnovni aspekti i odnosi vodeći računa o pouzdanosti podataka i njihovom pravilnom tumačenju.



Slika 3.5 Funkcije upravljanja otpadom

Sve faze koje su uključene za pravilno upravljanje komunalnim otpadom od tačke izvora do krajnjeg odlaganja mogu se podeliti u nekoliko funkcionalnih elemenata (sl. 3.5), a to su: sakupljanje, transport, obrada i odlaganje. Uzimajući u obzir svaki funkcionalni elementa pojedinačno moguće je prepoznati osnovne aspekte i odnose uključene u svaki element i razviti, gde je to moguće, kvantifikovane odnose za inženjersko poređenje, analize i procene. Izdvajanje funkcionalnih elemenata na ovaj način je važno jer omogućava razvoj okvira za procenu uticaja očekivanih promena i budućeg unapređenja tehnologije.

3.6.1 Sakupljanje otpada

Sakupljanje otpada uključuje privremeni razvrstavanje i privremeno zbrinjavanje otpada u cilju daljeg transporta do postrojenja za tretman ili do deponije. Proces sakupljanja otpada je veoma važan, zbog očuvanja zdravlja ljudi i životne sredine, estetskih i finansijskih razloga. Pojam sakupljanja otpada je onaj funkcionalni element, koji uključuje ne samo njegovo sakupljanje, već i prenošenje tih materija nakon sakupljanja, do mesta gde se vozilo za sakupljanje prazni. U urbanim sredinama, koje su industrijski i ekonomski razvijenije, usluge koje se odnose na uklanjanje komunalnog otpada su nešto bolje, odnosno na nešto višem nivou nego što je to praksa u drugim naseljenim mestima, ali ni one se ne mogu svrstati u zadovoljavajuće.

Organizacija ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada se najčešće zasniva na slobodnoj proceni operatera ili prethodnoj praksi, a ne na neophodnim analizama zasnovanim na frekvenciji punjenja kontejnera i kapacitetu vozila. Sistem za sakupljanje komunalnog otpada za određeno područje treba da bude zasnovan na realnim podacima o zapremini i sastavu otpada, planovima upravljanja komunalnim otpadom i finansijskim planovima za nabavku, rad i održavanje komunalne opreme. Sistem sakupljanja i transporta komunalnog otpada u urbanim sredinama je najčešće definisan planovima kao i načinom njegovog konačnog tretmana.

Sakupljanje i transport komunalnog otpada predstavljaju najskuplje operacije u celom sistemu upravljanja otpadom. Naime, uprkos raznim promenama i poboljšanjima kod ovog funkcionalnog elementa, troškovi sakupljanja i transporta komunalnog otpada čine 2/3 do 3/4 ukupnih troškova sistema upravljanja komunalnim otpadom. Obično se sakupljanje vrši na različite načine, počev od gradskih službi do raznih privatnih uslužnih preduzeća koja imaju različite ugovore. U nekim zemljama kompanije koje se bave odlaganjem otpada, koje imaju ugovore u mnogim gradovima, vlasnici su vozila za sakupljanje kao i mesta na kojima se otpad odlaže

Planiranje procesa sakupljanja otpada podrazumeva donošenje važnih odluka u vezi sa osnovnim elementima sistema upravljanja otpadom i to:

- Lokacija sakupljanja,
- Metod sakupljanja,
- Učestalost sakupljanja,
- Vrsta kontejnera za zbrinjavanje otpada.

U zavisnosti od stepena spremnosti generatora otpada da se posvete primarnoj separaciji, u literaturi postoje četiri osnovna tipa sakupljanja otpada i to: sakupljanje sa centralizovane lokacije za sakupljanje otpada; pored zgrada, duž ulice ili staze; sakupljanje od vrata do vrata. Proces planiranja sakupljanja komunalnog otpada je dosta pojednostavljen upotrebom većih kontejnera za zbrinjavanje otpada. Centralizovane lokacije za sakupljanje otpada predstavlja najrentabilnije rešenje za sakupljanje otpada. Međutim, u praksi se vrlo često dešava da su centralizovane lokacije kontejnera dosta udaljene od samih generatora otpada što uzrokuje neadekvatno zbrinjavanje. Kao rezultat se javlja da se otpad odlaže na mestima koja su pogodna generatorima što predstavlja veliki problem za životnu sredinu. Sakupljanje otpada iz kanti ili kontejnera koji su postavljeni duž ulice je vrlo efikasan način sakupljanja zbog smanjene potrebe za operaterima. Ovaj način sakupljanja odgovara generatorima zato što imaju mogućnost da postavljaju posudu gde im najviše pogoduje. Sa aspekta rentabilnosti, sakupljanje otpada od vrata do vrata, je najskuplja varijanta jer zahteva veliki broj operatera i zahteva angažovanje najviše opreme.

Što se tiče metoda sakupljanja obično se razlikuju tri osnovna metoda sakupljanja: manuelno; poluautomatizovano i automatizovano. Manualni metod sakupljanja otpada podrazumeva da se manipulacija otpadom od lokacije za sakupljanje do vozila za sakupljanje vrši bez angažovanja bilo kakve mehaničke opreme. Sa aspekta rentabilnosti ovo je najskuplji metod sakupljanja otpada. Poluautomatizovani metod sakupljanja se trenutno najviše primenjuje. Ovaj metod zahteva korišćenje specijalizovanih kontejnera za zbrinjavanje otpada, koji mogu mehanički da se pomeraju do vozila sa sakupljanje da bi se mehanički ispraznili. Ovaj metod je rentabilan jer je potrebno mnogo manje angažovanje operatera. Automatizovani metod sakupljanja eliminiše potrebu za bilo kakvim manualnim radom primenom specijalizovanih vozila za sakupljanje otpada. Primena ovog metoda sa aspekta bezbednosti i efikasnosti predstavlja optimalni metod. U odnosu na predhodne metode ovaj metod ima veća startna ulaganja ali posmatrano na duži vremenski period je veoma rentabilan i ekonomičan.

Komunalni otpad se sakuplja u posudama/kontejnerima koje su predviđene za tu namenu. Postoji različite vrste posuda/kontejnera za sakupljanje otpada. Najčešće u urbanim

sredinama, na javnim površinama, se postavljaju kontejneri zapremine od 660 - 1100 l. U zavisnosti od namena oni su veoma rasprostranjeni, što zbog svojih odličnih karakterisika (otporni na koroziju, truljenje, mraz, toplotu i hemi-kalije), tako i zbog jednostavne upotrebe. Ovi kontejneri imaju točkove što ih čini lako pomerljivim bez upotrebe velike sile. Izrađuju se u različitim bojama u zavisnosti od namene, tj. od vrste otpada koji se u njima sakuplja. Takođe treba napomenuti da ovi kontejneri, zbog svog dizajna, lako se čiste. Materijal od koga se izrađuju je metal (pocinkovani lim) ili od visoko kvalitetnog i otpornog polietelena. Najčešće se koriste za sakupljanje otpada iz naselja i industrijskih centara. Kontejneri zapremine 240 - 360 l, takođe različitih boja u zavisnosti od namena, imaju odlične karakteristike rukovanja, stabilni su jer su točkovi izbačeni bočno. Zglobno postolje omogućuje lako čišćenje, a konstrukcija omogućava da nema prodora vode prilikom otvaranja poklopca. Najčešće se koriste za odvojeno sakupljanje otpada iz domaćinstva. Materijal od koga se izrađuju je visoko kvalitetan i otporan polietilen.

Prethodno opisani kontejneri su uglavnom standardni kontejneri za sakupljanje komunalnog otpada, međutim postoje i specijalne posude za sakupljanje komunalnog otpada. Takođe postoje specijalno dizajnirane posude za odgovarajuću vrstu otpada. Tako na primer postoje posude za sakupljanje stakla, plastike, metala, zatim posude za sakupljanje otpadnih ulja i proizvoda na bazi ulja, sakupljanje građevinskog otpada itd. Postoje kontejneri od 5.5 m³ koji se uglavnom koriste za industrijski otpad. Takođe, postoje posude sa raznim dekoracijama, različitih oblika, atraktivnog izgleda koje se najčešće postavljaju u parkovima i uglavnom služe za sakupljanje otpada na javnim površinama.

U poslednje vreme se sve češće koriste tzv. podzemni kontejneri odnosno sistemi podzemnih kontejnera. Podzemni sistemi predstavljaju najmobilniji sistem sakupljanja otpada u velikim gradskim sredinama. Posebno su pogodni za urbane sredine sa visokim koficijentom zagađenosti. Podzemni sistemi sa jedne strane omogućavaju oslobađanje ulica i zelenih površina od uličnih kontejnera, a sa druge strane doživljavaju oslobađanje osetno velike količine otpada. Konačno, predstavljaju urbani mobilijar koji doprinosi vizuelnom i prostornom identitetu grada. Kontejneri ovog tipa su standardizovanog kapaciteta (najčešće 3 m³, 4 m³ i 5 m³). Ovakvi kontejneri su prevashodno namenjeni za odlaganje komunalnog otpada.

Na kraju procesa sakupljanja treba definisati koliko često treba sakupljati otpad. Pri definisanju perioda sakupljanja treba uzeti u obzir količine otpada koje se genirišu za posmatrano područje kao i raspoloživi prostor za skladištenje. U centralnim jezgrima urbane sredine sakupljanje otpada se uglavnom vrši svakodnevno a u ostalim delovima dva do tri puta nedeljno. U ruralnim područjima period sakupljanja otpada je jednom nedeljno.

3.6.2 Transport otpada

Transport otpada se može definisati kao spoljašni transport otpada koji podrazumeva utovar, prevoz (aka je neophodno i pretovar) i istovar otpada. U sistemu upravljanja otpadom, transport predstavlja nezaobilaznu kariku koja povezuje sve faze toka otpada i zato je njegova optimizacija jedan od glavnih ciljeva u sistemu. Kako je već navedeno transport otpada predstavlja najveće troškove komunalnih preduzeća. Iz tog razloga neophodno je odabrati adekvatna vozila za sakupljanje i transport otpada, odabrati, ukoliko je neophodno, optimalne lokacije transfer stanica, isprojektovati optimalne putanje kretanja vozila. U nastavku biće predstavljene varijante vozila za sakupljanje i transport otpada, opis transfer stanica i proračun za izbor vozila.

3.6.2.1 Vozila za transport otpada

Vozila za sakupljanje i transport otpada se razlikuju po njihovoj nameni, vrsti nadgradnje, kapacitetima i drugim parametrima. Transport se uglavnom ostvaruje na drumskim saobraćajnicama pomoću vozila tzv. autosmećara. Autosmećari se prvenstveno koriste za sakupljanje otpada u urbanim sredinama, ali se mogu koristiti i za dalji transport do postrojenja za preradu otpada ili do deponija. Autosmećari su specijalna teretna vozila sa namenskom nadgradnjom tovarnog prostora. Konceptije autosmećara su različite u zavisnosti od proizvođača, načina sabijanja otpada, nadgradnje za manipulaciju opremom i dr. U slučaju, da u sistemu upravljanja otpadom postoje pretovarne stanice, koriste se i različiti kamioni veće nosivosti sa odgovarajućom zahvatnom opremom. Za sakupljanje i transport otpada postoji veliki spektar različitih vozila i oni spadaju u grupu specijalnih vozila. Veliki broj tih vozila je univerzalan i lako prilagodljiv savremenim potrebama pri sakupljanju otpada. Glavni uticaj nastanka toliko raznovrsnih autosmećara je veliki broj različitih posuda za sakupljanje otpada o čemu je bilo reči u predhodnom delu ovog poglavlja. U nastavku biće predstavljena neka od vozila koja se najčešće koriste za sakupljanje i transport otpada.

Autosmećari sa nadograđenim **roto bubnjem**, vrše sabijanje smeća pomoću bubnja i spirale (sl. 3.6). Roto bubanj je jednostavne konstrukcije, lako se održava i ima visok stepen sabijanja. Međutim, autosmećari sa ovakvim tipom nadogradnje se danas manje proizvode.

Autosmećari sa **zamenjivim kontejnerom**, odlikuju se svojim pristupom raznim potrebama (sl. 3.7). Ovaj autosmećar se vrlo često u literaturi naziva autopodizač. Kontejneri koje transportuje ovaj tip autosmećara se postavljaju samo na zahtev pri većoj koncentraciji otpada na nekom mestu. Uglavnom se ovakvi kontejneri koriste za industrijski otpad.

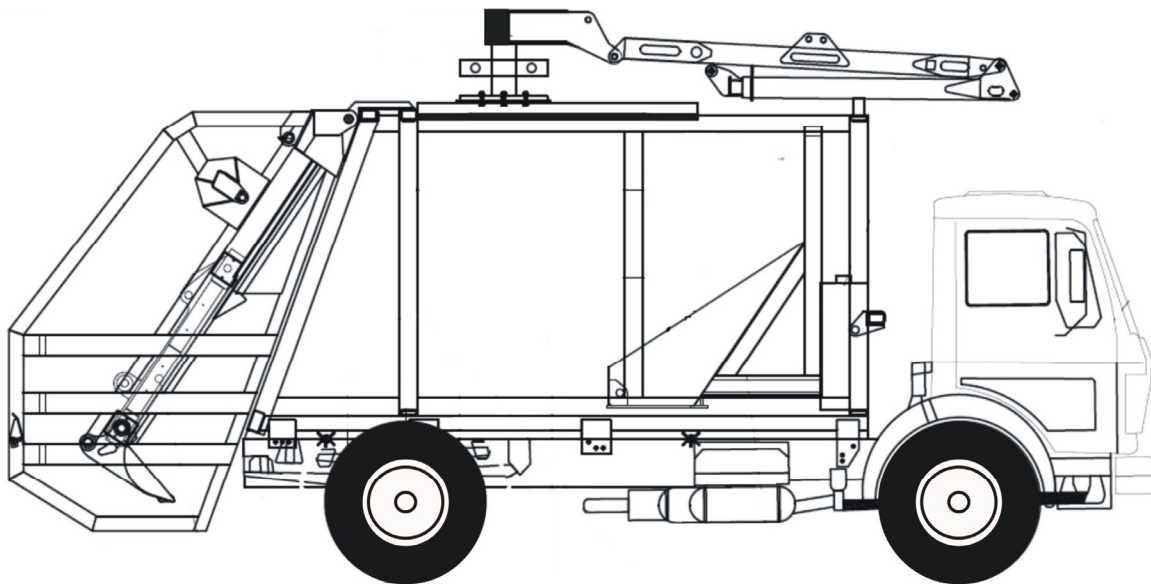


Slika 3.6 Autosmečar sa nadograđenim rotacionim bubnjem



Slika 3.7 Autosmečar sa zamenjivim kontejnerom

Autosmečari sa nadogradjenom **teleskopskom dizalicom**. Ovakav tip vozila se koristi za opsluživanje podzemnih kontejnera (sl. 3.8). Teleskopske dizalice se ugrađuju na vrhu nadgradnje autosmečara i služe za izvlačenje podzemnih kontejnera za otpad. Prednost primene ovakve vrste autosmečara je u tome što ne zahteva veliki broj operatera. Uglavnom pražnjenje kontejnera može opslužiti jedan operater odnosno operater samog vozila što znatno smanjuje fiksne troškove kompanije koja se bavi sakupljanjem i transportom otpada. Međutim, kao nedostatak ovakvog autosmečara jeste potreba za veliku manipulativnu površinu prilikom pražnjenja kontejnera.

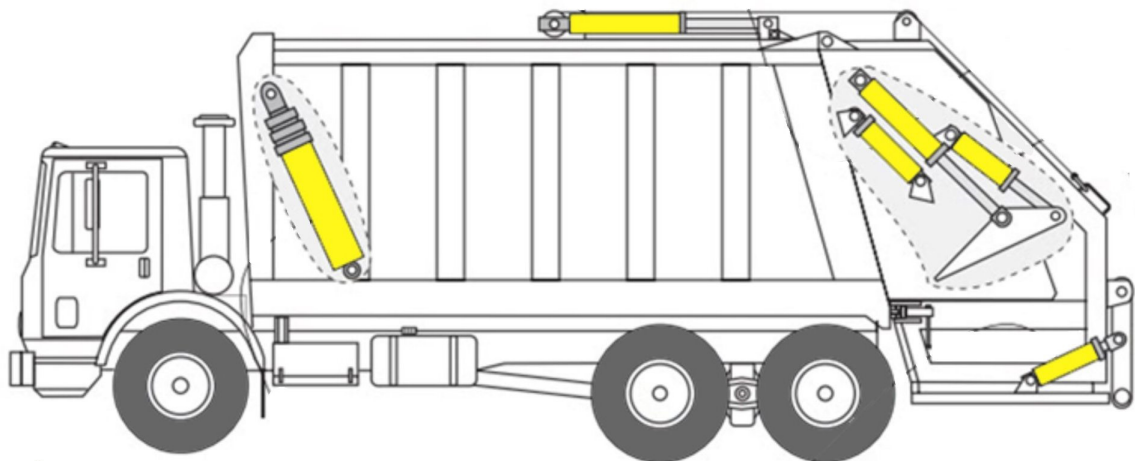


Slika 3.8 Autosmećari sa nadogradjenom teleskopskom dizalicom

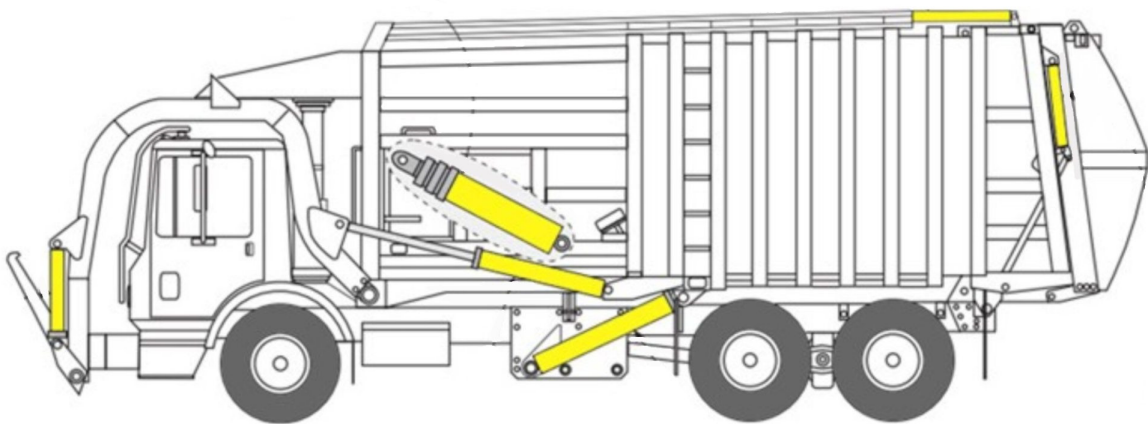
Autosmećari sa **utovarom sa zadnje strane**, vrše sabijanje otpada pomoću potisne ploče i stepen sabijanja je nešto manji nego kod roto bubnja. Na slici (sl. 3.9a) je prikazan hidraulični sistem za prihvatanje i pražnjenje kontejnera kao i za sabijanje otpada. Ovaj autosmećar ima mane iz razloga što ima složenu konstrukciju i masivni zadnji deo gde je smešten mehanizam za manipulaciju kontejnerima što dosta opterećuje samo vozilo. U RS ovakav tip autosmećara trenutno najviše koriste kompanije koje se bave sakupljanjem i transportom komunalnog otpada.

Autosmećari sa **bočnim uredajima za utovar** otpada, takođe sadrže mehanizam sa potisnom pločom. Jednako su primenjivi za utovar standardnih kanti i kontejnera (sl. 3.9b). Uglavnom se koriste za urbanu sredinu gde je gusta populacija odnosno saobraćajnice su uskog koloseka. Da bi se primenio ovaj tip autosmećara za sakupljanje otpada zahteva se poseban plan rasporeda posuda za zbrinjavanje otpada. To znači da posude moraju biti raspoređene pored samih ulica ili se mora napraviti terminološki plan kada vlasnik treba da pripremi posudu na isplaniranoj lokaciji. Primena ovakvog tipa autosmećara zahteva veću posadu što povećava fiksne troškove.

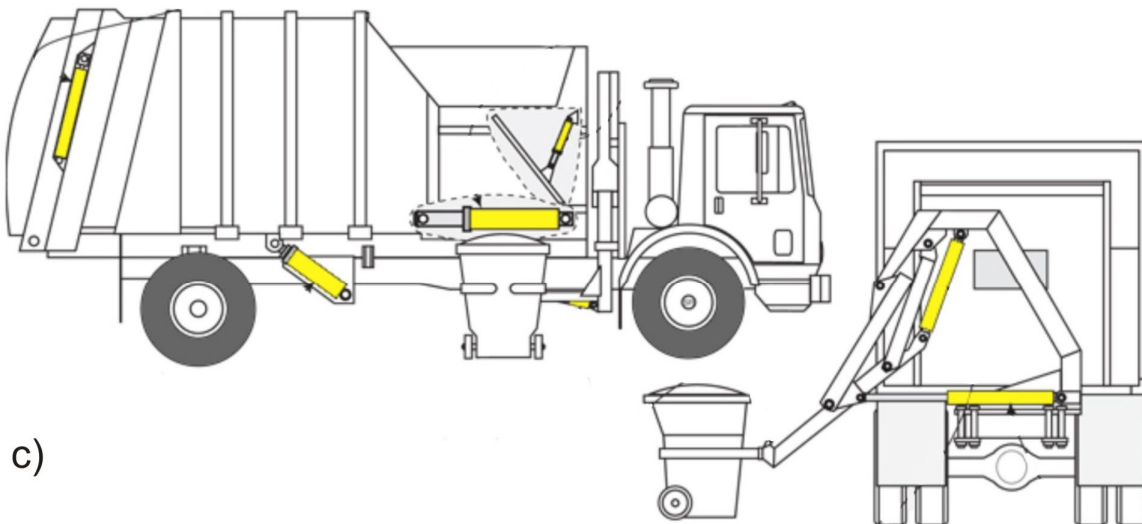
Autosmećari sa **čeonim utovarom** se koriste za specijalne tipove kontejnera. Karakteristično za ove autosmećare da vozač pomoću džojstika iz kabine vrši utovar i nema potrebe za velikom posadom (sl. 3.9c). Nedostatak ovakvih autosmećara je taj što se zahteva veliki manipulativni prostor. Takođe, ovakav tip autosmećara se koristi za kontejnere u kojima se zbrinjava industrijski otpad ili građevinski otpad. Primena ovakvih autosmećara u urbanim sredinama nije preporučljiva.



a)



b)



c)

Slika 3.9 Autosmečar sa nadgradnjom gde se otpad sabija pomoću potisne ploče: a) utovar otpada sa zadnje strane; b) utovar otpada sa čelone strane, c) Utoovar otpada sa bočne strane

3.6.2.2 Pretovarne stanice

Pretovarne stanice ili transfer stanice, kako se još nazivaju u literaturi, imaju bitnu funkciju u integralnom sistemu upravljanja otpadom i koriste se kao sprega između programa sakupljanja otpada u okviru urbane sredine, tretmana otpada i konačnog odlaganja otpada. Najjednostavnija pretovarna stanica predstavlja objekat sa prostorom za privremeno zbrinjavanje otpada, gde vozila vrše funkciju istovara prethodno sakupljenog otpada. U ovakvim pretovarnim stanicama vrši se presovanje otpada u tzv. balama i kao takav se utovaruje u vozilima za transport na daljinu, a zatim šalje na tretman ili na udaljena odlagališta – sanitarne deponije. Na pretovarnim stanicama se ne vrši dugoročno zbrinjavanje otpada, već otpad u roku od nekoliko sati napusti ovu lokaciju.

Na pretovarnim stanicama mogu da se realizuju i neke druge aktivnosti, kao što su instaliranje kontejnera za reciklabilne materijale. Ovi kontejneri bi se periodično uklanjali ili praznili, i otpad bi se transportovao na odgovarajućim lokacijama za dalji tretman.

Najčešći razlog za primenu pretovarnih stanica u sistemu upravljanja otpadom je minimizacija transportnih troškova otpada do deponija ili postrojenja za tretman. Primenom sistema pretovara komunalnog otpada iz manjih vozila za sakupljanje otpada (autosmećara) u vozila za transport na daljinu, znatno se smanjuju transportni troškovi i daje se veća mogućnost operaterima za sakupljanje otpada da racionalizuju vreme sakupljanja, tj. potroše manje vremena putujući do dalekih deponija ili postrojenja za tretman, a utroše više vremena na sakupljanje otpada. Primenom ovakvog sistema se smanjuju dodatni troškovi vozila kao što su potrošnja goriva i troškovi za održavanje vozila, a s druge strane se smanjuje intenzitet saobraćaja čime se smanjuje zagađenje vazduha i habanja infrastrukture. Postoje različite koncepcije pretovarnih stanica. Neke od koncepcija su: pretovarne stanice sa stacionarnim kompaktorom, pretovarne stanice sa prekompaktorskim sistemom, pretovarne stanice sa baler sistemom, pretovarne stanice sa specijalnim modularnim kontejnerima i dr [USEPA, 2002].

3.6.2.3 Izbor vozila i proračun transporta komunalnog otpada

Pri izboru vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada treba izabrati veličinu autosmećara odnosno zapreminu nadogradnje autosmećara. Za izbor veličine autosmećara i za proračun transporta komunalnog otpada od značaja su dnevna zapremina otpada, količine otpada, karakteristike posuda za sakupljanje otpada, način i učestalost odnošenja otpada, udaljenost mesta za odlaganje ili pretovar otpada.

Za proračun transporta komunalnog otpada korišćena je sledeća notacija:

V_d - dnevna zapremina otpada;
 ε_{ss} - stepen sabijanja komunalnog otpada auto smećara;
 n_{pp} - period sakupljanja otpada [*dan*];
 V_{sm} - potrebna radna zapremina auto smećara;
 Q_d - dnevna količina otpada;
 Q_g - godišnja količina otpada;
 Q_{trd} - količina komunalnog otpada za transport po jednom radnom danu;
 q_{do} - otpad po glavi stanovnika;
 q_{km} - nosivost kontejnera;
 Δq_d - ostatak otpada nakon obavljene ture;
 Δn_{td} - broj dana kada preostali otpad ispuni dodatnu turu
 n_{dg} - broj dana u godini;
 n_{kv} - broj kontejnera po vozilu;
 n_{st} - broj stanovnika obuhvaćen sistemom sakupljanja otpada;
 N_{td} - broj tura po radnom danu;
 N_{td}^* - celobrojni deo tura [*ruta/dan*];
 N_{tg} - broj tura na godišnjem nivou;
 d - udaljenost pretovarne stanice od deponije;
 U_{tg} - godišnji transportni učinak vozila;
 U_{sg} - godišnji saobraćajni učinak vozila.

Na osnovu prethodne notacije i pomoću izraza (3.1) može se izračunati zapremina nadgradnje auto smećara:

$$V_{sm} = \frac{V_d \cdot n_{pp}}{\varepsilon_{ss} \cdot N_{td}} \left[\frac{m^3}{dan} \right] \quad 3.1$$

Kada se sračuna potrebna radna zapremina onda se može izabrati auto smećar na osnovu modela određenog proizvođača.

U nastavku biće predstavljen proračun transporta komunalnog otpada. Proračunom se definiše: broj tura u jednom radnom dana i na godišnjem nivou; transportni učinak i saobraćajni učinak angažovanog vozila.

Prvi korak pri proračunu transporta jeste određivanje dnevne količine komunalnog otpada koja se generiše na posmatranom području. Dnevna količina komunalnog otpada se određuje pomoću izraza (3.2):

$$Q_d = n_{st} \cdot q_{do} \left[\frac{t}{dan} \right] \quad 3.2$$

Kada je određena dnevna količina komunalnog otpada onda pomoću izraza (3.3) se može odrediti godišnja količina komunalnog otpada:

$$Q_g = Q_d \cdot n_{dg} \left[\frac{t}{god} \right] \quad 3.3$$

Za ovako određene količine komunalnog otpada primenom izraza (3.4) može se definisati broj tura po radnom danu:

$$N_{td} = \frac{Q_d}{n_{kv} \cdot q_{km}} \left[\frac{tura}{dan} \right] \quad 3.4$$

Kada se odredi broj tura po radnom danu onda se usvaja celebroyjni deo tura (N_{td}^*). Preosta količina komunalnog otpada od ture se određuje primenom izraza (3.5):

$$\Delta q_d = n_{kv} \cdot q_{km} \cdot (N_{td} - N_{td}^*) \quad 3.5$$

Broj dana kada ostatak komunalnog otpada ispuni dodatnu turu se određuje primenom izraza (3.6):

$$\Delta n_{td} = \frac{n_{kv} \cdot q_{km}}{\Delta q_d} \quad 3.6$$

Broj tura na godišnjem nivou se može izračunati pomoću izraza (3.7):

$$N_{td} = \frac{Q_g}{n_{kv} \cdot q_{km}} \left[\frac{tura}{god} \right] \quad 3.7$$

Kada se odredi broj tura na godišnjem nivou onda se primenom izraza (3.8) može odrediti transportni učinak:

$$U_t = 2 \cdot d \cdot n_{kv} \cdot N_{td} \left[\frac{km}{god} \right] \quad 3.8$$

Primenom izraza (3.9) može se sračunati saobraćajni učinak:

$$U_s = 2 \cdot d \cdot n_{kv} \cdot Q_g \left[\frac{t \cdot km}{god} \right] \quad 3.9$$

Pri proračunu transporta komunalnog otpada mogu da se definišu i neki drugi parametri koji prethodno nisu objašnjeni, kao što su varijabilni troškovi transporta (troškovi poterošnje goriva na godišnjem odnosno mesečnom nivou).

Na osnovu sprovedenih analiza, kao glavni nedostaci u okviru funkcije sakupljanja i transporta komunalnog otpada mogu se izdvojiti:

- neodgovarajući broj i struktura posuda za sakupljanje otpada;
- nepravilan raspored posuda;
- nedostatak specijalizovanih vozila za transport otpada;

- neodgovarajuća frekvencija transporta otpada;
- neadekvatan plan ruta kretanja vozila;

3.6.3 Tretman otpada

Sagledavanjem koncepta hijerarhije upravljanja otpadom dolazi se do zaključka da smanjenje nastajanja otpada predstavlja najefektivnije rešenje za životnu sredinu. Međutim, nije uvek moguće praktično primeniti princip smanjenja otpada na izvoru ali je neophodno da proizvodi i materijali mogu biti iskorišćeni ponovo, bilo za istu ili drugu namenu. Ukoliko se ova mogućnost ne može sprovesti, onda otpad treba dalje iskoristiti kroz reciklažu ili neki drugi vid tretmana. Pod tretmanom otpada podrazumevaju se svi fizički, termički, hemijski ili biološki procesi gde u obzir dolazi i razvrstavanje otpada, koji menjaju osnovne karakteristike otpada čiji je osnovni cilj smanjenje zapremine, olakšanja rukovanja sa otpadom ili podsticanja reciklaže i uključuje ponovno iskorišćenje i reciklažu otpada. Kada se radi o termičkim metodama mogu se podeliti na metode sa iskorišćenjem energije i bez iskorišćenja energije. Do sada najčešće korišćena metode su bile likvidacione gde je osnovna ideja bila uništavanje otpada. Sada se koriste utilizacione metode gde je primarna ideja iskorišćenje energije (insineracija, piroliza, gasifikacija, plazma proces). Kada se radi o biološkim metodama njihova osnovna razlika je u tome da li se vrši povraćaj i energije i materije ili samo materije. Za uspostavljanje sistema reciklaže neophodno je uspostavljanje čitave logistike počevši od edukacije generatora otpada, preko separacije, sakupljanja i transporta do tretmana otpada i njegovo vraćanje u prvobitni oblik (upcycling) ili nižu kategoriju proizvoda (downcycling). Da bi se povećala ekonomska vrednost reciklabilnog otpada neophodno je definisati optimalni logistički model sakupljanja i transporta ovakvog otpada. Kako bi se uspešno sakupila što veća količina reciklabilnog otpada neophodno je analizirati određenu urbanu sredinu i napraviti optimalnu transportnu mrežu kako bi se sa što manjim transportnim troškovima izvršio proces sakupljanja. Takođe, neophodno je izvršiti analizu generatora reciklabilnog otpada urbane sredine kako bi se odabrale optimalne lokacije, optimalan broj i tip posuda i nadgradnja vozila za sakupljanje ovakve vrste otpada.

3.6.4 Odlaganje otpada

Odlaganje komunalnog otpada, kao jedan od načina upravljanja otpadom, je kontrolisano, trajno odlaganje otpada na deponiji. Odlaganje otpada na deponijama

predstavlja najčešći način upravljanja otpadom, ali i najmanje poželjan način upravljanja otpadom prema hijerarhiji upravljanja otpadom. Prema najnovijim pozitivnim principima upravljanja otpadom na deponije se smeju odlagati samo one vrste materijala koje su prethodno pretrpele neke oblike tretmana otpada. Na deponijama ne smeju da se nađu reciklabilne bilo organske bilo neorganske materije.

Deponija se može definiše kao lokacija za zbrinjavanje otpada na površini ili ispod površine zemlje. Otpad se može zbrinjavati na: privremene lokacije gde generator otpada odlaže otpad na mestu izvora, stalne lokacije gde se otpad odlaže na period od jedne godine i ove deponije se koriste za privremeno zbrinjavanje otpada i ne uključuju transfer stanice i skladištenja otpada pre tretmana ili ponovnog iskorišćenja. Odlaganje otpada se vrši na sanitarnim deponijama koje imaju zadatak potpunog izolovanje uticaja deponovanog otpada na životnu sredinu. U tom smislu se vrši izolovanje tela deponije od prodiranja procednih voda u podzemne i površinske vode. Pored toga ne treba dozvoliti raznošenje materijala što se postiže kompaktiranjem i prekrivanjem slojeva otpada inertnim materijalom. Takođe, da bi se sprečila nekontrolisana emisija deponiskih gasova uvodi se sistem biotnova sa zadatkom njegovog sakupljanja. Postoje sanitarne deponije koje vrše iskorišćenje deponijskog gasa kao energenta. U zavisnosti od vrste otpada koji se skladište, odnosno od njihovih karakteristika, postoje deponije za odlaganje neopasnog otpada, deponije za odlaganje inertnog otpada i deponije za odlaganje opasnog otpada. Deponije za odlaganje opasnog otpada se grade sa povišenim standardima zaštite uticaja na životnu sredinu.

Poglavlje 4

DEFINISANJE PROBLEMA USMERAVANJA VOZILA

Problemi sa kojima se danas vrlo često susrećemo su problemi određivanja putanja kojima treba da se kreću vozila. Sakupljanje otpada, pošte, razvoženje novina, mleka, hleba raznošenje poštanskih paketa, raspoređivanje autobusa i aviona na mrežu linija, predstavlja probleme sa kojima se istraživači i saobraćajni stručnjaci svakodnevno susreću u praksi [Teodorović, 2007].

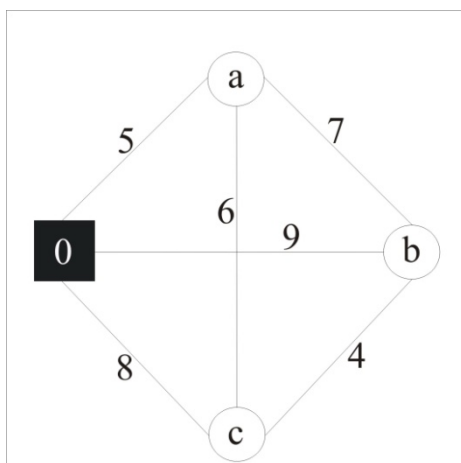
Problem usmeravanja vozila (*Vehicle routing problem – VRP*) je jedan od najizazovnijih problema kombinatorne optimizacije. Prvi put ovaj problem pominju 1959. godine *Dantzig* i *Ramser* [Dantzig i Ramster, 1959]. Od tada do danas VRP problem se sve više primenjuje za rešavanje različitih problema i ima veliki ekonomski značaj za smanjenje operativnih troškova u distributivnim sistemima.

Pojmovi koje srećemo u literaturi a definišu VRP problem jesu transportna mreža, broj vozila, korisnici usluga i depo.

Pojam „*transportna mreža*” može da se posmatra kao skup čvorova i skup veza na kojima se odvija saobraćajno-transportna delatnost [Teodorović, 2007]. Transportne mreže se javljaju gotovo u svim saobraćajnim granama. U zavisnosti od toga o kojoj je saobraćajnoj grani reč pod čvorovima u transportnoj mreži mogu se podrazumevati gradovi, raskrsnice ulice, aerodromi, železničke stanice, vodna pristaništa, autobuske stanice, robni terminali, lokacije kontejnera za otpad itd. Čvorovi u transportnoj mreži povezani su određenim vezama, pod kojima se podrazumevaju ulice, drumske saobraćajnice, vazdušni putevi, železničke pruge ili vodni putevi. Na svim transportnim mrežama u pojedinim čvorovima pojavljuju se zahtevi za transport robe i putnika ili za transferom određenih informacija. Međutim, na transportnim mrežama dolazi i do određenih problema vezanih za udaljenost, vreme, zahteve za opslugom itd. Takve probleme je potrebno optimizirati kako bi transportna mreža bila što

kvalitetnija, te kako bi se povećala njena iskorišćenost. Neadekvatna organizacija procesa može dovesti do smanjenja iskorišćenosti transportne mreže. Primenom matematičkih metoda i programskih alata mogu se značajno poboljšati određeni logistički procesi, te tako poboljšati i iskorišćenost transportne mreže. Odlučivanje takođe ima važnu ulogu u iskorišćenosti transportne mreže. Odluke se uglavnom odnose na neka od sledećih pitanja: kakav treba da bude oblik mreže linija vazdušnog saobraćaja ili železničkog saobraćaja u jednom regionu, kako treba da izgleda mreža linija javnog saobraćaja u jednom gradu, kojim rutama treba da se kreću saobraćajna sredstva prilikom snabdevanja prodavnica, kako organizovati sakupljanje otpada u jednom gradu. Donošenjem odluka čije su faze detaljno i kvalitetno odrađene može se poboljšati rad logističkih procesa, što dovodi do veće iskorišćenosti transportne mreže, jer nivo iskorišćenosti zavisi od kvaliteta procesa na mreži. Isto tako donošenjem loših i neproverenih odluka može se smanjiti iskorišćenost transportne mreže. U literaturi transportne mreže se označavaju na isti način kao i grafovi. Oznaka transportne mreže $G(V, E)$ označava mrežu u kojoj je skup čvorova označen sa V , a skup veza između tih čvorova sa E . Veze u transportnoj mreži često se nazivaju i granama. Uređeni par (i, j) predstavlja vezu, odnosno granu koja povezuje čvor $i \in V$ sa čvorom $j \in V$. Na slici (sl. 4.1) prikazan je primer transportne mreže sa elementima. Detaljnije o podelama i vrstama transportnih mreža može se naći u knjizi Teodorovića [Teodorović, 2007]. U nastavku biće više reči o problemu usmeravanja vozila na transportnoj mreži.

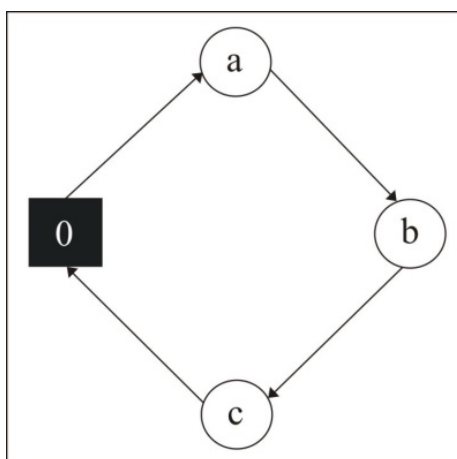
Pojam *depo* podrazuma: deponiju, skladište, distributivni centar, terminale, luke, aerodrome, autobuska i železnička pristaništa itd.



Slika 4.1 Primer transportna mreža $G(V, E)$

Problem usmeravanja vozila može se definisati kao problem projektovanja puteva sa najnižim troškovima transporta za vozila poznatih kapaciteta, koji vode iz depoa (npr. centralno skladište) do grupe korisnika, koji se nalaze na određenom geografskom području,

sa ne-negativnim zahtevima [Benjamin, 2011]. Pri tome se mora ispoštovati osnovni uslov da svaki korisnik mora biti uslužen samo jednom. Put koji naprave vozila od depoa do grupe korisnika i nazad do depoa na transportnoj mreži, u literaturi se naziva rutom (sl. 4.2). Da bi se ispunili svi zahtevi korisnika, vozilo može napraviti nekoliko ruta. Pri rešavanju VRP problema moguće je uvoditi različita ograničenja koja utiču na projektovanje ruta u procesu optimizacije. Neka od ograničenja koja se javljaju pri rešavanju realnog VRP problema su: karakteristika mreže saobraćajnice kojom se kreću vozila pri dostavi/sakupljanju robe; veličina flote vozila za dostavu/sakupljanje robe; vremenski period u kome se mora izvršiti dostava/sakupljanje robe; kapaciteti vozila za dostavu/sakupljanje robe itd. Često se zahteva da se određeni korisnici opsluže u unapred zadatom vremenskom intervalu. Problem VRP-a je dosta složeniji ako u transportnoj mreži postoji više depoa saobraćajnih sredstava (vozila), u slučajevima kada se opsluživanje vrši vozilima različitih kapaciteta, kao i u slučajevima kada se u transportnoj mreži javljaju stohastički zahtevi za opsluživanjem.



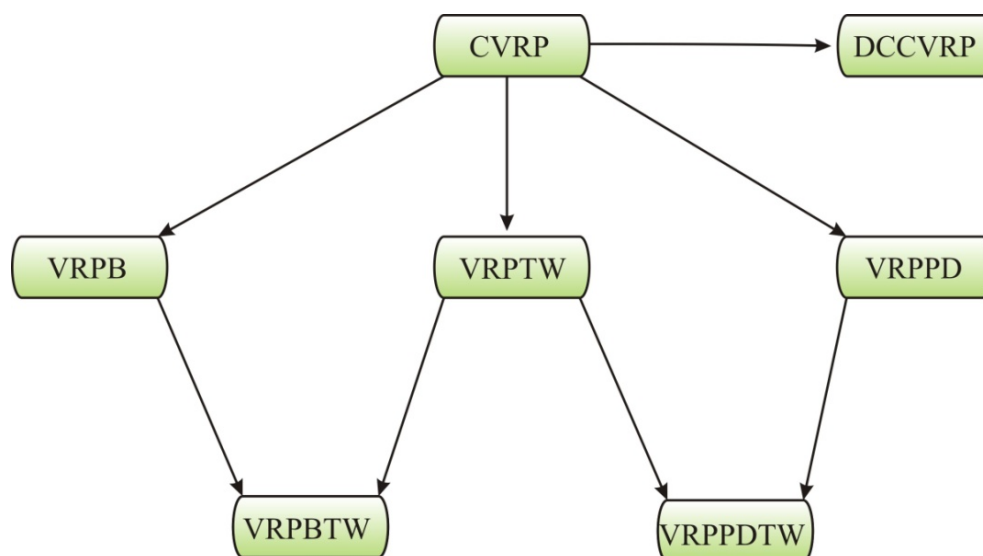
Slika 4.2 Primer transportna mreža sa isplaniranom rutom (0-a-b-c-0)

4.1 Varijante problema usmeravanja vozila

U cilju zadovoljavanja realnih problema za rešavanje VRP-a, obično se uključuju više ograničenja pri rešavanju problema, kao što je veći broj depoa, različiti tipovi vozila (homogeni i heterogeni), različite vrste zahteva korisnika (deterministički i stohastički), ograničenja na infrastrukturi (jednosmerne ulice, zabranjeni putevi), vrste obavljanja usluga (prikupljanje, isporuka i mešoviti), itd. Ukoliko se uzmu u obzir sva ova ograničenja, onda VRP problem postaje znatno složeniji za rešavanje. Iz tog razloga u literaturi su uvedene različite varijante VRP-a. Na slici (sl. 4.3) prikazana je veza između posebnih (izvedenih)

VRP-a sa determinističkom potražnjom kojima je posvećena posebna pažnja u naučnoj literaturi [Milić i sar., 2009; Toth i Vigo, 2002].

Zbog jednostavnijeg prikaza na slici (sl. 4.3) korišćene su skraćnice. Detaljno objašnjenje slike (sl. 4.3) je dato u nastavku teksta. CVRP (*eng. capacitated vehicle routing problem*) predstavlja problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta; DCVPR (*eng. Distance–Constrained capacitated vehicle routin problem*) predstavlja problem usmeravanja vozila sa ograničenom udaljenošću i kapacitetom; VRPB (*eng. vehicle routing problem with backhaults*) predstavlja problem usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem; VRPTW (*eng. vehicle routing problem with time windows*) predstavlja problem usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem; VRPPD (*eng. vehicle routing problem with pickup and delivery*) predstavlja problem usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom; VRPBTW (*eng. vehicle routing problem with backhaults and time windows*) predstavlja problem usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem sa vremenskim ograničenjem; VRPPDTW (*eng. vehicle routing problem with pickup and delivery and time windows*) predstavlja) predstavlja problem usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom sa vremenskim ograničenjem. U daljem tekstu biće detaljnije predstavljene varijante VRP-a sa determinističkim zahtevima. Takođe, biće predstavljene i neke varijante VRP-a sa stohastičkim zahtevima.



Slika 4.3 Osnovni problemi usmeravanja vozila sa determinističkim zahtevima i njihovi odnosi

4.2 Problem usmeravanja vozila sa determinističkim zahtevima

U cilju zadovoljavanja realnih problema za rešavanje VRP-a, obično se uključuju više ograničenja pri rešavanju problema tako da u ovom delu poglavlja biće detaljnije objašnjene pojedine varijante VRP-a sa determinističkim zahtevima. Deterministički zahtevi podrazumevaju da su za zadatu transportnu mrežu unapred poznati zahtevi korisnika (npr. poznata količina robe na lokaciji korisnika, poznato vreme zadržavanja na lokaciji, poznato vreme vožnje između dva korisnika, itd).

4.2.1 Problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta

Osnovni model problema usmeravanja vozila je VRP sa ograničenjem kapaciteta (*eng. capacitated vehicle routing problem CVRP*). Kod CVRP-a pretpostavlja se da su vozila identična (jednak kapacitet) i da imaju zajedničku polaznu tačku a jedino ograničenje koje postoji je kapacitet vozila. Funkcija cilja izražava zahtev za minimiziranje ukupnih troškova (npr. težinska funkcija broja ruta i njihove ukupne dužine ili vremena) pri opsluživanju svih korisnika [Toth i Vigo, 2002]. CVRP se može izraziti korišćenjem osnovnih oznaka iz teorije transportnih mreža na sledeći način [Teodorović, 2007].

Neka je definisana transportna mreža sledećom jednakošću (4. 1):

$$G=(V, A) \tag{4.1}$$

Gde je: $V= \{0, \dots, n\}$ - skup korisnika, A - skup grana.

Korisnik označen sa nulom (0) predstavlja depo odakle polaze vozila. Matrica troškova c_{ij} povezana je sa korisnikom $(i,j) \in A$ i predstavlja troškove transporta između korisnika i i j . Ako je G usmereni graf, matrica troškova c je asimetrična, pa se odgovarajući problem naziva asimetrični VRP sa ograničenjima kapaciteta (*eng. Asymmetric CVRP*). U suprotnom, ako je $c_{ij}=c_{ji}$ za svaki $(i,j) \in A$ tada se problem naziva simetrični VRP sa ograničenjima kapaciteta (*eng. Symetric CVRP*) i skup grana A najčešće zamenjuje sa skupom neusmerenih grana E [Milić i sar., 2009; Teodorović, 2007].

U nekim praktičnim slučajevima, matrica troškova zadovoljava *trougao nejednakosti*:

$$c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij} \quad \forall \quad i, j, k \in V \tag{4.2}$$

Prisutnost ove nejednakosti ponekad je od izuzetne važnosti za neke od algoritama za rešavanja CVRP-a. Matrica troškova često je sastavljena od cena minimalnog puta između korisnika. U slučajevima kada korisnici (čvorovi) transportne mreže odgovaraju koordinatama korisnika (čvorova) u ravni, koristi se euklidsko rastojanje gde cena c_{ij} za svakog korisnika

$(i,j) \in V$ odgovara udaljenosti korisnika i i j u ravni. U takvom slučaju matrica je simetrična, zadovoljava nejednakost trougla a rezultirajući problem naziva se euklidski SCVRP.

Svaka lokacija i ($i=1, \dots, n$) povezana je sa poznatim nenegativnim zahtevom q_i , dok depo ima fiktivni zahtev $q_0=0$. Za podskup $S \in V$ postoji $q_{(S)} = \sum_{i \in V} q_i$ koji predstavlja ukupni zahtev skupa. U depou se nalazi skup od K identičnih vozila, svako sa kapacitetom Q . Da bi rešenje problema bilo izvodljivo potrebno je da $q_i \leq Q$ za svaki i ($i=1, \dots, n$).

Ako se pretpostavi da svako vozilo može izvesti najviše jednu rutu i da K nije manji od K_{min} , gde je K_{min} minimalni broj vozila potrebnih da se opsluže sve lokacije, vrednost K_{min} moguće je odrediti rešavajući problem (*eng. Bin Packing Problem*), koji ovde rešava minimalni broj vozila kapaciteta Q potrebnih da se ostvare svi zahtevi d_i . Rešavanje CVRP-a predstavlja određivanje r ruta (svaka ruta je povezana samo sa jednim vozilom) gde ukupni troškovi rute treba da budu minimalni. Ukupni troškovi rute dobijaju se kao suma cena na svakoj grani koja pripada ruti. Smanjenje troškova može se postići tako da se uz minimiziranje ukupne cene grana, smanji i broj ruta (odnosno vozila), te tako uštedi na troškovima transporta. Kada se ograničenje kapaciteta zamenjuje ograničenjem maksimalnog puta ili vremenskog trajanja VRP-a dobijamo varijantu koju zovemo problem usmeravanja vozila ograničen udaljenošću (*Distance Constrained VRP*). Udaljenost, odnosno vreme t_{ij} (gdje je $(i,j) \in A$), ne sme biti veće od maksimalnog dozvoljenog pređenog puta na ruti odnosno vremena provedenog na ruti T_r . Kada se daljina grana izražava vremenom putovanja, tada se tom vremenu dodaje i vreme opsluživanja s_i koje je vezano za svakog korisnika i , a predstavlja vreme zadržavanja vozila kod korisnika.

Ovo vreme se definiše izrazom (4.3):

$$t_{ij} = t'_{ij} + \frac{s_i}{2} + \frac{s_j}{2} \quad (4.3)$$

gde je:

t'_{ij} je vreme kretanja na grani bez vremena zadržavanja kod korisnika.

Varijanta problema gde su prisutna dva ograničenja: ograničenje kapaciteta i ograničenje maksimalne dužine rute naziva se problem usmeravanja vozila ograničen udaljenošću i kapacitetom (*eng. Distance-Constrained CVRP*).

4.2.1.1 Matematička formulacija standardnog problema usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta

Problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta (CVRP) za n korisnika i k vozila se matematički može predstaviti na sledeći način.

Rešenje treba da zadovolji sledeće zahteve:

- svaka ruta treba da počne i da se završi na depou,
- svaki korisnik učestvuje u samo jednoj ruti,
- suma zahteva korisnika koji su opsluženi u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila.

Za definisanje matematičke formulacije problema CVRP korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste,

n - broj korisnika koji se opslužuju,

V - skup korisnika, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle vozila polaze,

Q_k - maksimalni kapacitet vozila k ,

q_i - potražnja korisnika i ($i \in V$); potražnja u depou je nula

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

c_{ijk} - transportni troškovi vozila k između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

q_{ijk} - kapacitet vozila k nakon posete korisnika i , a pre posete korisnika j .

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo } k \text{ posle korisnika } i \text{ posećuje korisnika } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V$$

$$z_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo } k \text{ posetilo korisnika } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V$$

Minimizacija funkcije [Teodorović, 2007]:

$$\text{minimizirati } \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ijk} x_{ijk} \quad (4.4)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{i0k} - \sum_{j=0}^n x_{0jk} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.6)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i z_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.7)$$

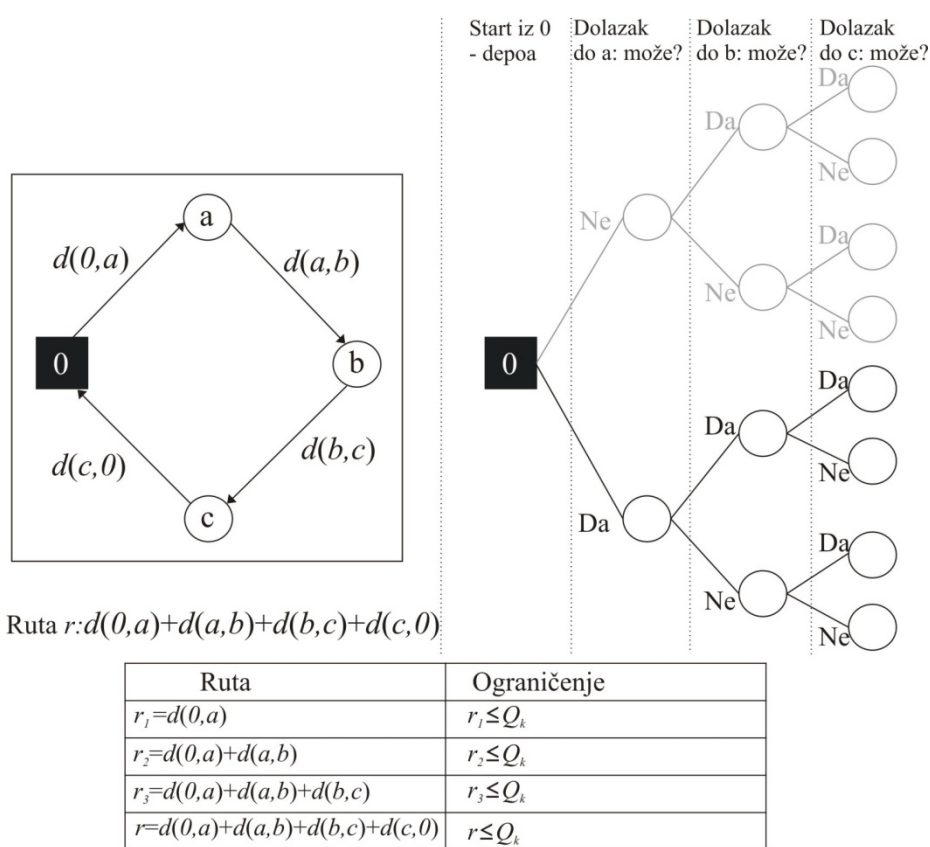
$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = \sum_{i=1}^n x_{jik} = z_{ik} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.8)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.11)$$

Cilj CVRP je da se pronađu rute za zadanu transportnu mrežu sa minimalnim transportnim troškovima pri čemu mora da budu zadovoljeni svi zahtevi korisnika vodeći računa da se ne prekorači ograničenje kapaciteta vozila (sl. 4.4).



Slika 4.4 Primer transportne mreže sa isprojektovanom rutom uz ograničenje kapaciteta vozila

Ograničenje (4.5) podrazumeva da svako vozilo koje krene iz depoa vraća se u taj isti depo. Ograničenje prikazano jednačinom (4.6) pokazuje da svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom od strane tačno jednog vozila. Ograničenje (4.7) podrazumeva da ukupan kapacitet zahteva korisnika koje opslužuje jedno vozilo ne sme preći kapacitet vozila. Ograničenje (4.8) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo k nakon opsluživanja korisnika j mora da napusti korisnika j . Ograničenje (4.9) spečava pojavu ciklusa koji ne predstavljaju potpunu rutu. Ograničenje (4.10) definiše stanje opsluživanja korisnika i

vozilom k i može imati vrednost 0 ili 1. Ograničenje (4.11) definiše prolazak kroz granu između korisnika i i j k -tim vozilom i može imati vrednost 0 ili 1.

4.2.2 Problem usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjima

U poslednje dve dekade istraživači u svojim naučnim radovima uglavnom se baziraju na rešavanje usmeravanja vozila u zadatom vremenskom intervalu (*eng. vehicle routing problem with time windows – VRPTW*). Ovaj problem se može predstaviti kao kombinacija problema rutiranja i problema raspoređivanja, što predstavlja česte situacije u problemima iz realnog života. Neki od njih su usmeravanje školskih autobusa, distribucija štampe, sakupljanje komunalnog otpada, sakupljanje mleka, itd. Problem *VRPTW* predstavlja proširenje CVRP-a gde osim ograničenja u vidu kapaciteta svakog vozila postoje i vremenska ograničenja vezana za zadržavanje vozila kod korisnika [Milić i sar., 2009; Carić, 2004]. Opsluživanje svakog korisnika k -tim vozilom mora započeti u nekom vremenskom intervalu $[a_k, b_k]$. U slučaju da vozilo dođe do nekog korisnika pre vremena a_i , vozilu je po pravilu dozvoljeno da čeka do trenutka b_k , kada može započeti opsluživanje. Osim vremena, potrebno vozilu da opsluži nekog korisnika, dodaje se i vreme kada vozilo odlazi sa depoa, kao i vreme vožnje t_{ij} , za svaku granu $(i,j) \in A$. Uobičajeno je da se matrica troškova i matrica putnih vremena podudaraju, a da su vremenski periodi lokacija tako definisani da se pretpostavlja kako sva vozila napuštaju deponiju u vremenskom trenutku *nula*.

4.2.2.1 Matematička formulacija standardnog problema usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem

Problem usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem (*VRPTW*) za n korisnika i k vozila se matematički može predstaviti na sledeći način. Rešenje *VRPTW*-a sastoji se u pronalaženju r ruta sa minimalnim troškovima i sa zadovoljavanjem sledećih uslova:

- svaka ruta treba da počne i da se završi na depou,
- svaki korisnik se posećuje jednom,
- suma zahteva korisnika koji su opsluženi u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila,
- opsluživanje svakog korisnika započinje u vremenskom intervalu $[a_k, b_k]$ i vozilo je zaustavljeno za vreme opsluživanja s_k .

U literaturi se najčešće za rešavanje realnih problema koriste vremenska ograničenja kao što je problem sakupljanja komunalnog otpada koji je razmatran u ovoj disertaciji.

Za definisanje matematičke formulacije problema VRPTW-a korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste,

n - broj korisnika koji se opslužuju,

V - skup korisnika, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle vozila polaze,

Q_k - maksimalni kapacitet vozila k ,

c_{ijk} - transportni troškovi vozila k između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

t_{ij} - neophodno vreme da se pređe rastojanje između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

q_i - zahtev korisnika i ; $i \in V$,

e_i - najranije vreme dolaska kod korisnika i ($i \in V$),

l_i - najkasnije vreme dolaska kod korisnika i ($i \in V$),

s_i - vreme opsluživanja korisnika i ($i \in V$),

T_{rk} - maksimalno dozvoljeno vreme putovanja za vozilo k na ruti r .

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, & \text{ako vozilo } k \text{ posle korisnika } i \text{ posećuje korisnika } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V$$

t_i - vreme dolaska kod i -tog korisnika ($t_i \in \mathbb{R}$, $t_i \geq 0$),

w_i - vreme čekanja kod i -tog korisnika ($w_i \in \mathbb{R}$, $w_i \geq 0$).

Minimizacija funkcije [Kumar i Panneerselvam, 2012]:

$$\text{minimizirati } \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ijk} x_{ijk} \quad (4.12)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{i0k} - \sum_{j=0}^n x_{0jk} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.13)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.14)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i z_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.15)$$

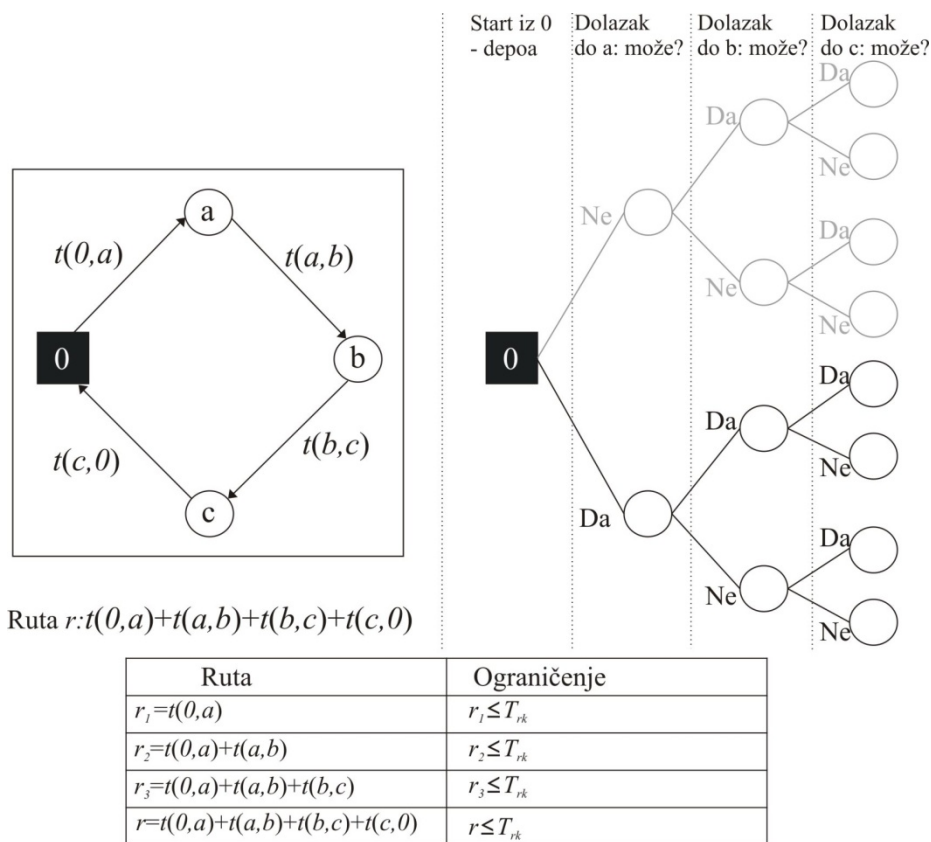
$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} (t_{ij} + w_i + s_i + t_i) \leq T_{rk} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$t_0 = s_0 = w_0 = 0 \quad (4.17)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} (t_{ij} + w_i + s_i + t_i) = t_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.18)$$

$$e_i \leq (t_i + w_i) \leq l_i, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (4.19)$$

Sa (4.12) je označena funkcija cilja problema. Ograničenje (4.13) podrazumeva da svako vozilo koje krene iz depoa vraća se u taj isti depo. Ograničenje prikazano jednačinom (4.14) pokazuje da svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom od strane tačno jednog vozila. Ograničenje (4.15) podrazumeva da ukupan kapacitet zahteva korisnika koje opslužuje jedno vozilo ne sme preći kapacitet vozila. Ograničenje (4.16) predstavlja maksimalno vreme r -te rute, i ako drugačije nije naglašeno za svako k važi $T_{rk}=0$. Ograničenja (4.17) - (4.19) definišu vremenska ograničenja. Ova ograničenja u potpunosti određuju skup dopustivih rešenja za VRPTW. Određivanje ruta transportne mreže za VRPTW, vodeći računa da se ispoštuju predhodno navedena ograničenja, prikazano je na slici (sl. 4.5).



Slika 4.5 Transportna mreža sa isprojektovanom rutom uz poštovanje vremenskog ograničenja

4.2.3 Problem usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom

U osnovi problem usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom (*VRP with Pickup and Delivery - VRPSPD*) predstavlja proširenje standardnog VRP-a. Kod VRPSPD podrazumeva se da je svaki i -ti korisnik povezan sa dve vrednosti d_i i p_i . Ove vrednosti predstavljaju zahteve za dostavu i za prikupljanje robe iste vrste. U nekim slučajevima se može koristiti samo jedna vrednost koja se predstavlja kao razlika između dostave i

prikupljanja za svakog korisnika i , $d_i = d_i - p_i$. Svaki zahtev mora imati tačno definisano mesto prikupljanja, mesto dostave i količinu robe koja će se transportovati. Ovaj problem ima veliku primenu u logistici, a naročito kada se radi o povratnoj logistici odnosno logistici povratnih i otpadnih materijala (*eng. Reverse logistics*). Uobičajno je da se izvor i određište nalaze u depou, tada se radi o *VRP*-u sa simultanom dostavom i prikupljanjem (*eng. Simultaneous Pickup and Delivery - VRPSPD*).

4.2.3.1 Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa prikupljanjem i dostavom

Za definisanje matematičke formulacije problema VRPSPD korišćena je sledeća notacija:

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

q_i - zahtev korisnika i ; $i \in V$,

q_i^p - povratni zahtevi korisnika i ($i \in V$),

m - maksimalan broj vozila koja se koriste,

Q_k - maksimalni kapacitet vozila k ,

c_{ijk} - transportni troškovi vozila k između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

R_{ij} - zahtevi korisnika koji se isporučuju na grani i - j ka korisnicima,

P_{ij} - zahtevi korisnika koji se prikupljaju na grani i - j od korisnika.

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo } k \text{ vrši isporuku od korisnika } i \text{ do korisnika } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V$$

$$z_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo } k \text{ posetilo korisnika } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V$$

Minimizacija funkcije [Martin i Sol, 1995]:

$$\text{minimizirati } \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ijk} x_{ijk} \quad (4.20)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{i0k} - \sum_{j=0}^n x_{0jk} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.21)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.22)$$

$$R_{ij} + P_{ij} \leq Q_k \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.2.3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = \sum_{i=1}^n x_{jik} = z_{ik} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.24)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.25)$$

$$\sum_{i=0}^n P_{0i} = 0 \quad (4.26)$$

$$\sum_{i=0}^n R_{i0} = 0 \quad (4.27)$$

$$R_{ij}, P_{ij} \geq 0 \quad (4.28)$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.29)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.30)$$

Cilj *VRPSPD* je da se pronađu rute za zadatu transportnu mrežu sa minimalnim transportnim troškovima (4.20). Ograničenje (4.21) podrazumeva da svako vozilo koje krene iz depoa vraća se u taj isti depo. Ograničenje prikazano jednačinom (4.22) pokazuje da svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom od strane tačno jednog vozila. Ograničenje (4.23) podrazumeva da ukupan kapacitet zahteva korisnika koje opslužuje jedno vozilo ne sme preći kapacitet vozila. Ograničenje (4.24)) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo k nakon opsluživanja korisnika j mora da napusti korisnika j . Ograničenje (4.25) spečava pojavu ciklusa koji ne predstavljaju potpunu rutu. Ograničenja (4.26) i (4.27) obezbeđuju da vozila iz depoa krenu bez prikupljenih roba (*pick up*), a vraćaju se bez isporučenih roba (*delivery*), dok ograničenje (4.28) obezbeđuje da postoji roba koja se prevozi. Ograničenje (4.29) definiše stanje opsluživanja korisnika i vozilom k i može imati vrednost 0 ili 1. Ograničenje (4.30) definiše prolazak kroz granu između korisnika i i j k -tim vozilom i može imati vrednost 0 ili 1.

4.2.4 Problem usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem

Problem usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem (*eng. VRP with Backhauls - VRPB*) je nadogradnja CVRP gde je skup korisnika V podeljen na dva podskupa. Prvi podskup čine korisnici u nekom podskupu L koji sadrži n korisnika koji zahtevaju određenu količinu robe za isporuku. Drugi podskup B sadži m korisnika koji imaju zahteve za prikupljanje određene količine robe iste ili slične vrste. Korisnici su u ovom slučaju definisani pomoću indeksa tako da je $L = \{1, \dots, n\}$ i $B = \{n+1, \dots, n+m\}$. Ovde se mora napomenuti da postoji ograničenje u vidu da se prvo opslužuju korisnici iz podskupa L pa onda iz podskupa

B. Kod VRPB problema uobičajno je da podskup L nije prazan skup, a pretpostavlja se da svaka ruta sadrži članove iz L i B podskupa.

4.2.4.1 Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa dostavom i povratnim prikupljanjem

Za definisanje matematičke formulacije problema VRPB korišćena je sledeća notacija:

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

l_i - zahtev korisnika i za isporuku ($i = 1, 2, \dots, L$),

b_i - zahtevi korisnika i za prikupljanje ($i = L + 1, L + 2, \dots, L + B$),

m - maksimalan broj vozila koja se koriste,

Q_k - maksimalni kapacitet vozila k ,

c_{ijk} - transportni troškovi vozila k između korisnika i i korisnika j ($i = 1, 2, \dots, L; j = L + 1, L + 2, \dots, L + B$),

L - broj korisnika koji zahtevaju određenu količinu robe za isporuku,

B - broj korisnika koji imaju zahteve za prikupljanje određene količine robe iste ili slične vrste.

Promenljive odlučivanja:

$$y_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako su zahtevi za isporuku korisnika } i \text{ opsluženi vozilom } k \\ i = 0, 1, \dots, L \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases}$$

$$z_{jk} \begin{cases} 1, \text{ ako su zahtevi za prikupljanje korisnika } j \text{ opsluženi vozilom } k \\ j = 0, 1, \dots, B, B + 1, \dots, L + B \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases}$$

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo } k \text{ putuje direktno od korisnika } i \text{ do korisnika } j \\ i = 0, 1, \dots, L; j = 0, 1, \dots, B, B + 1, \dots, L + B \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases}$$

Minimizacija funkcije [Marc i Charlote, 1898]:

$$\text{minimizirati } \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^{L+BL+B} \sum_{j=0}^{L+B} c_{ijk} x_{ijk} \quad (4.31)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{i0k} - \sum_{j=0}^n x_{0jk} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.32)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (4.33)$$

$$\sum_{k=1}^m z_{jk} = 1 \quad j = L+1, L+2, \dots, L+B \quad (4.34)$$

$$\sum_{k=1}^m l_i y_{ik} \leq Q_k \quad i = 0, 1, 2, \dots, L \quad (4.35)$$

$$\sum_{i=L+1}^{L+B} b_i z_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.36)$$

$$\sum_{i=0}^{N+M} x_{ijk} = \begin{cases} y_{jk} & \text{ako je } j = 1, 2, \dots, L \\ z_{jk} & \text{ako je } j = L+1, L+2, \dots, L+B \\ & k = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4.37)$$

$$\sum_{j=0}^{N+M} x_{ijk} = \begin{cases} y_{ik} & \text{ako je } i = 1, 2, \dots, L \\ z_{ik} & \text{ako je } i = L+1, L+2, \dots, L+B \\ & k = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4.38)$$

$$\sum_{i=0}^L \sum_{j=L+1}^{L+B} x_{ijk} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.39)$$

Funkcija cilja odnosno funkcija minimizacije za rešavanje VRPB prikazana je jednačinom (4.31). Ograničenje (4.2.4.1.2) podrazumeva da svako vozilo koje krene iz depoa vraća se u taj isti depo. Ograničenje (4.33) pokazuje da svaki korisnik koji ima zahteve za isporuku mora da bude posećen samo jednom od strane tačno jednog vozila, a ograničenje (4.34) pokazuje da svaki korisnik koji ima zahteve za prikupljanje mora da bude posećen samo jednom od strane tačno jednog vozila. Ograničenja (4.35) i (4.36) podrazumevaju da ukupan kapacitet zahteva korisnika za isporuku i zahteva korisnika za prikupljanje, koje opslužuje jedno vozilo, ne sme preći kapacitet vozila. Ograničenje (4.37) pokazuje da svako vozilo samo jednom može da poseti svakog korisnika i depo, a ograničenje (4.38) pokazuje da svako vozilo mora da napusti svakog korisnika. Ograničenje (4.39) podrazumeva da mora postojati samo jedna veza od korisnika sa zahtevima za isporuku do korisnika sa zahtevima za prikupljanje u toku trajanja jedne rute.

4.3 Problem usmeravanja vozila sa stohastičkim zahtevima

U prethodno izloženim problemima usmeravanja vozila zahtevi za zadatu transportnu mrežu su deterministički tj. unapred poznati. Međutim, u određenim slučajevima zahtevi za zadatu transportnu mrežu mogu da budu slučajne promenljive odnosno zahtevi su stohastička veličina pa se standardni VRP proširuje u problem usmeravanja vozila sa stohastičkim zahtevima (*eng. vehicle routing problem with stochastic demands -VRPSD*). Primeri stohastičkih zahteva moguće je sresti u različitim transportnim aktivnostima. Jedan od

primera stohastičkih zahteva je sakupljanje komunalnog otpada koji je razmatran u ovoj disertaciji. U nastavku ovog poglavlja biće predstavljena matematička formulacija CVRP-a sa stohastičkom potražnjom i matematička formulacija VRPTW-a sa stohastičkim vremenom putovanja i i opsluživanja.

4.3.1 Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom

Problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom (*eng. capacitated vehicle routing problem with stochastic demands - CVRPSD*) za n korisnika i k saobraćajnih sretstava se matematički može predstaviti na sledeći način.

Neka je definisana transportna mreža $G = (V, A)$, gde $V = \{0, \dots, n\}$ - skup korisnika, A - skup grana. Korisnik 0 predstavlja depo a ostali korisnici su definisani $V = \{1, \dots, n\}$. Potražnja svakog korisnika je stohastička promenljiva sa poznatom raspodelom, koja može biti kontinualna ili diskretna. Pretpostavlja se da u depou nema potražnje odnosno potražnja je jednaka nuli. Kapacitet vozila je ograničen. Svako vozilo mora da započne rutu iz depoa, da poseti korisnike definisanom rutom i da završi rutu u depou. Svaki korisnik mora da bude opslužen od strane samo jednog vozila. Cilj CVRPSD-a je da se pronađu rute sa minimalnim transportnim troškovima pri čemu mora da budu zadovoljeni svi zahtevi korisnika vodeći računa da se ne prekorači ograničenje kapaciteta vozila, odnosno treba isprojektovati optimalne rute. Uvedimo sledeće pretpostavke:

- postoji samo jedan depo i svaka ruta počinje i završava se na depou,
- lokacije depoa i korisnika su poznate,
- potražnja korisnika je stohastička promenljiva sa poznatom raspodelom,
- suma zahteva korisnika koji su opsluženi u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila.
- sva vozila su homogena i njihov kapacitet je poznat,
- svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom.

Za definisanje matematičke formulacije problema CVRPSD korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste,

n - broj korisnika koji se opslužuju,

n_k - broj korisnika opsluženih vozilom k ,

V - skup korisnika, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle vozila polaze,

λ - fiksni troškovi upošljenog vozila,

Q_k – maksimalni kapacitet vozila k ,

q_i - potražnja korisnika i ($i \in V$) ; potražnja u depou je nula. Pretpostavimo da je q_i stohastička promenljiva sa poznatom raspodelom,

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

c_{ijk} - transportni troškovi vozila k između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

q_{ijk} - Kapacitet vozila k nakon posete korisnika i , a pre posete korisnika j .

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo } k \text{ posle korisnika } i \text{ posećuje korisnika } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V_0, k \in m$$

$$z_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo } k \text{ posetilo korisnika } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V_0, k \in m$$

Nakon uvedene notacije, kombinovanjem determinističkog VRP-a, matematička formulacija problema CVRPSD-a može se predstaviti na sledeći način:

$$\min F = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ijk} \cdot x_{ijk} + \lambda \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{0,jk} \quad (4.40)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.41)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} - \sum_{i=0}^n x_{jik} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (4.42)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0,jk} + \sum_{j=1}^n x_{j0k} = 2z_{0k}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.43)$$

$$P\left(\sum_{i \in V} q_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q_k\right) \geq \alpha \quad (4.44)$$

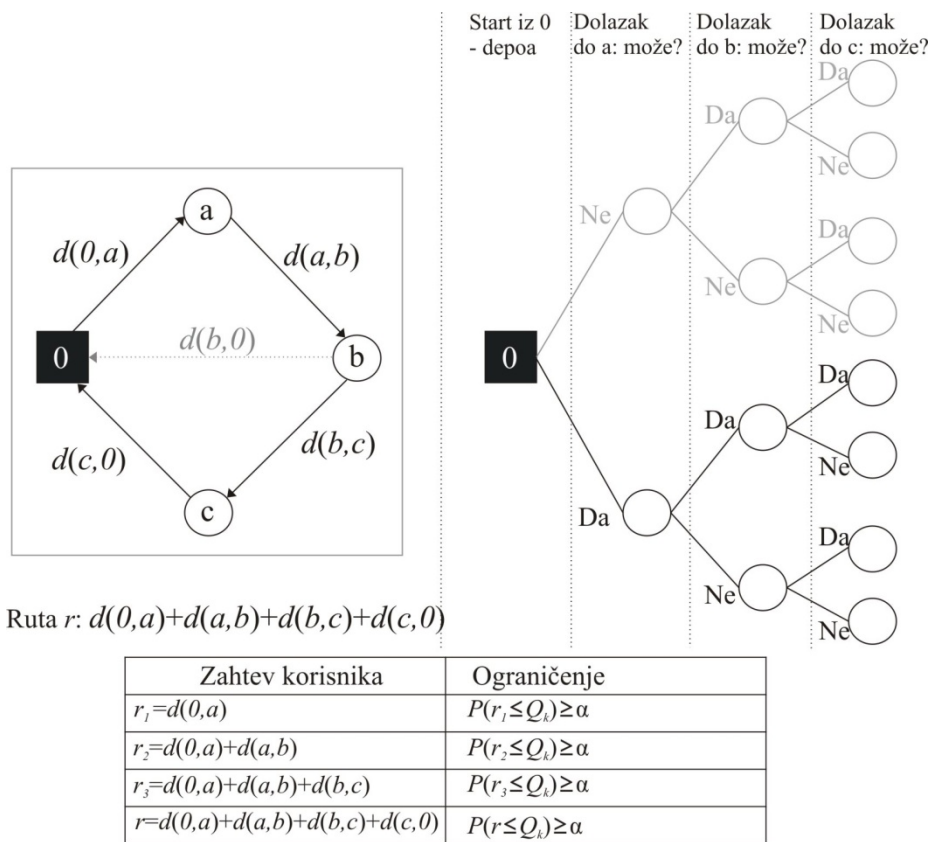
$$0 \leq q_{ijk} \leq Q_k, \quad i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4.45)$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4.46)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4.47)$$

Funkcija minimizacije za CVRPSD je prikazana jednačinom (4.40) i ima za cilj da se pronađu optimalne rute kretanja vozila za zadatu transportnu mrežu (sl. 4.6). Ograničenje prikazano jednačinom (4.41) pokazuje da svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom a ograničenje prikazano jednačinom (4.42) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo k nakon opsluživanja korisnika j mora da napusti korisnika j . Ograničenje prikazano jednačinom (4.43) pokazuje da svako vozilo mora da započne rutu i završi istu u depou. Ograničenje (4.44) predstavlja da je stvarna potražnja na ruti manja od kapaciteta vozila k sa verovatnoćom α . Ograničenje kapaciteta (4.45) pokazuje da opterećenje vozila ni u jednom trenutku ne prelazi kapacitet vozila. Ograničenja (4.46) i (4.47) definišu intervale

promenljivih z_i i x_{ij} . Rešavanje ograničenja (4.46) je moguće korišćenjem Ch-C metoda pomoću nivoa poverenja α . O ovome biće više reči u poglavlju 5.1.



Slika 4.6 Transportna mreža sa isprojektovanom rutom uz poštovanje ograničenje kapaciteta vozila sa verovatnoćom P

4.3.2 Matematička formulacija problema usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem i stohastičkim vremenom putovanja i opsluživanja

Problem usmeravanja vozila sa vremenskim ograničenjem i stohastičkim vremenom putovanja i opsluživanja (*eng. vehicle routing problem with time windows and stochastic travel and servis times - SVRPTW*) za n korisnika i k vozila se matematički može predstaviti na sledeći način.

Neka je definisana transportna mreža $G = (V, A)$, gde $V = \{0, \dots, n\}$ - skup korisnika, A - skup grana. Korisnik "0" predstavlja depo a ostali korisnici definisani su $V = \{1, \dots, n\}$. Vreme putovanja na grani A je stohastička promenljiva sa poznatom raspodelom, koja može biti kontinualna ili diskretna. Cilj SVRPTW-a je da se pronađu rute sa minimalnim transportnim troškovima pri čemu mora da budu zadovoljeni svi zahtevi korisnika vodeći računa da se ne prekorače zadata ograničenja, odnosno treba isprojektovati optimalne rute. Uvedimo sledeće pretpostavke:

- postoji samo jedan depo i svaka ruta počinje i završava se na depou,
- lokacije depoa i korisnika su poznate,
- potražnja korisnika je poznata,
- suma zahteva korisnika koji su opsluženi u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila.
- vreme putovanja za svaku granu je stohastičko promenljivo sa poznatom raspodelom
- sva vozila su homogena i njihov kapacitet je poznat,
- svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom.

Za definisanje matematičke formulacije problema SVRPSD korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste,

n - broj korisnika koji se opslužuju,

n_k - broj korisnika opsluženih vozilom k ,

V - skup korisnika, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle vozila polaze,

λ - fiksni troškovi upošljenog vozila,

Q_k - maksimalni kapacitet vozila k ,

η - skup stohastičkih vektora vremena putovanja na granama,

t_{ijk} - vreme putovanja vozila k na grani (i, j) . Pretpostavimo da je t_{ij} stohastička promenljiva sa poznatom raspodelom,

q_i - potražnja korisnika i , $i \in V$; potražnja u depou je nula,

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

c_{ijk} - transportni troškovi vozila k između korisnika i i korisnika j ($i, j \in V$),

B_k - maksimalno vreme putovanja vozila k za dan ili po ruti,

Q_{ijk} - kapacitet vozila k nakon posete korisnika i , a pre posete korisnika j ,

l_i - najkasnije vreme dolaska kod korisnika i ($i, j \in V$),

s_i - vreme opsluživanja korisnika i ; $i \in V$,

t_i - vreme dolaska kod i -tog korisnika, ($t_i \in \mathbb{R}$, $t_i \geq 0$),

w_i - vreme čekanja kod i -tog korisnika, ($w_i \in \mathbb{R}$, $w_i \geq 0$).

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo } k \text{ posle korisnika } i \text{ posećuje korisnika } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V_0, k \in m$$

$$z_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo } k \text{ posetilo korisnika } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V_0, k \in m$$

Nakon uvedene notacije matematička formulacija problema SVRPTW može se predstaviti na sledeći način [Tao i sar., 2012]:

$$\min F = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ijk} \cdot x_{ijk} + \lambda \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{0,jk} \quad (4.50)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.51)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} - \sum_{i=0}^n x_{jik} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.52)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0,jk} + \sum_{j=1}^n x_{j0k} = 2z_{0k}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.53)$$

$$\sum_{i=0}^n q_i \sum_{j=1}^n x_{ijk} < Q_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.54)$$

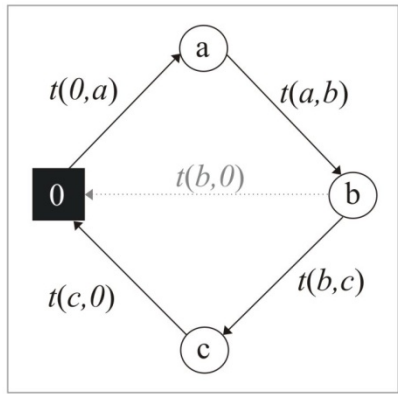
$$P \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=0}^n (s_i + w_i) \sum_{j=0}^n x_{ijk} \leq B_k \right) \geq \alpha \quad (4.55)$$

$$e_i \leq t_{ik} \leq l_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4.56)$$

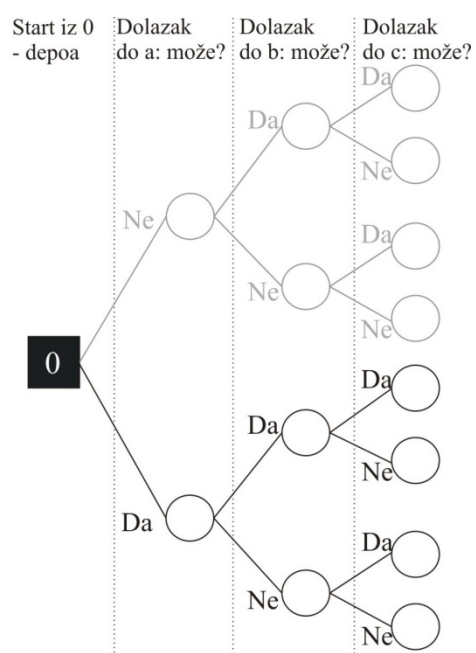
$$z_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4.57)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4.58)$$

Funkcija minimizacije za SVRPTW je prikazana jednačinom (4.50). Cilj SVRPTW-a jeste da se pronađu optimalne rute kretanja vozila uz poštovanje zadatih ograničenja (sl. 4.7). Ograničenje prikazano jednačinom (4.51) pokazuje da svaki korisnik mora da bude posećen samo jednom a ograničenje prikazano jednačinom (4.52) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo k nakon opsluživanja korisnika j mora da napusti korisnika j . Ograničenje prikazano jednačinom (4.53) pokazuje da svako vozilo mora da započne rutu i završi istu u depo. Ograničenje kapaciteta (4.54) pokazuje da opterećenje vozila ni u jednom trenutku ne prelazi kapacitet vozila. Ograničenje (4.55) predstavlja verovatnoću da je vreme putovanja vozila k na grani (i, j) i zbir vremena opsluživanja i čekanja kod i -tog korisnika manje od maksimalnog vremena putovanja vozila k za dan ili po ruti sa verovatnoćom α . Ograničenje (4.56) je vremensko ograničenje dolaska kod i -tog korisnika. Ograničenja (4.57) i (4.58) definišu intervale promenljivih z_i i x_{ij} . Rešavanje ograničenja (4.55) je moguće korišćenjem Ch-C metoda pomoću nivoa poverenja α . O ovome biće više reči u poglavlju 5.1.



Ruta r : $t(0,a)+t(a,b)+t(b,c)+t(c,0)$



Ruta	Ograničenje
$r_1=t(0,a)+s(a)$	$P(r_1 \leq T_{rk}) \geq \alpha$
$r_2=t(0,a)+s(a)+t(a,b)+s(b)$	$P(r_2 \leq T_{rk}) \geq \alpha$
$r_3=t(0,a)+s(a)+t(a,b)+s(b)+t(b,c)+s(c)$	$P(r_3 \leq T_{rk}) \geq \alpha$
$r_4=t(0,a)+s(a)+t(a,b)+s(b)+t(b,c)+s(c)+t(c,0)$	$P(r_4 \leq T_{rk}) \geq \alpha$

Slika 4.7 Transportna mreža sa isprojektovanom rutom uz poštovanje vremenskog ograničenja sa verovatnoćom P

Poglavlje 5

NAUČNI PRISTUP ZA REŠAVANJE PROBLEMA USMERAVANJA VOZILA

U ovom poglavlju biće prikazani opšti pristupi optimizacije i metoda za rešavanje problema usmeravanja vozila. U prvom delu biće dat kratak opis koncepta optimizacije kao i podele optimizacionih problema i metoda. U drugom delu biće opisan heuristički pristup za rešavanje VRP-a. U tom smislu prikazan je opšti opis *Clarke-Wright*-ovog algoritama uštede (eng. *Clarke and Wright Savings Algorithm*), *Sweep*-ov algoritam (eng. *Sweep Algorithm*) kao i metod lokalne pretrage, odnosno 2-OPT algoritam (eng. *2-OPT Search*). U trećem delu ovog poglavlja biće objašnjen metaheuristički pristup optimizacije VRP-a. Iz grupe meta-heurističkih optimizacionih metoda biće prikazan opšti opis algoritma optimizacije pomoću harmonijskog pretraživanja (eng. *Harmony Search Algorithm* - HSA), kao i metod simuliranog kaljenja (eng. *Simulated Annealing* - SA).

5.1 Osnovni koncept optimizacije i podela optimizacionih metoda

Optimizacija je postupak potrage za optimumom i ona je prisutna gotovo svuda. Čovek je u izvesnom smislu optimizovao od najranijih dana naše vrste. Koju životinju loviti, koje useve saditi u koje vreme, na kojoj lokaciji izgraditi naselje tek su neka od pitanja s kojima su se susretali naši preci [Schrijver, 2005]. Čovek uvek teži da nešto maksimizira ili minimizira. Kompanije žele da maksimiziraju svoj profit i efikasnost, a minimiziraju svoje troškove. Čovek pak kada planira svoje putovanje (odmor) nastoji da poveća svoje uživanje uz minimalne troškove. Ovo sve navodi, da je čovek, stalno u potrazi za optimalnim rešenjem za svaki problem na koji naiđe, međutim ponekad ne može naći takvo rešenje. Danas, optimizacija ima široku primenu u nauci, inženjerstvu, poslovnom upravljanju, saobraćaju, industriji, vojnoj i kosmičkoj tehnologiji.

Postoji mnogo načina za nazive i klasifikaciju optimizacionih problema, a obično optimizacione tehnike mogu varirati od problema do problema. Yang [Yang, 2010] u svojoj knjizi navodi da ne postoji jedinstven pristup optimizacije već kompleksnost optimizacionih problema u velikoj meri zavisi od oblika funkcije i ograničenja funkcije.

Opšti pristup u metodama optimizacije polazi od formiranja adekvatnog matematičkog modela za realni problem koji se razmatra. Većina optimizacionih problema se u generalnom smislu matematički može definisati [Yang, 2010]:

$$\min/ \max_{x \in R^n} f_i(x), \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (5.1)$$

ako je:

$$\phi_j(x) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, J), \quad (5.2)$$

$$\psi_k(x) \leq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, K), \quad (5.3)$$

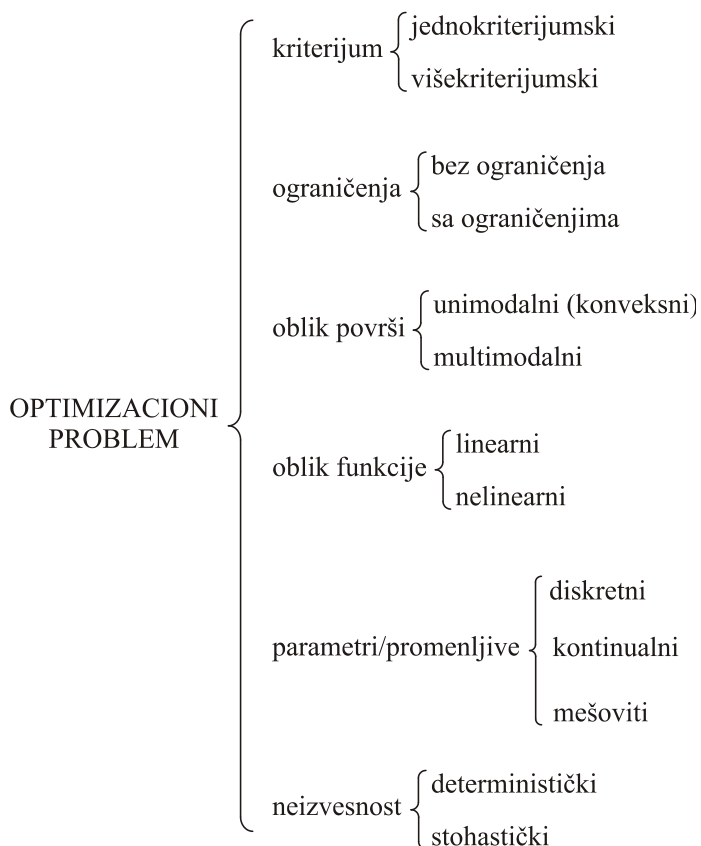
pri čemu su $f_i(x)$, $\phi_j(x)$ i $\psi_k(x)$ funkcije vektora upravljačkih promenljivih:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (5.4)$$

Upravljačke promenljive predstavljaju realne brojeve ($\mathbf{x} \in R^n$) koje po obliku mogu biti diskretnog, kontinualnog ili mešovitog tipa. Funkcije $f_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, M$) se nazivaju funkcijama cilja ili kriterijumima optimalnosti, pri čemu, u slučaju $M = 1$, reč je o jednokriterijumskoj optimizaciji dok u ostalim slučajevima ($N > 1$) optimizacioni proces postaje višekriterijumski. Skup parametara optimizacije \mathbf{x} vrlo često se naziva i prostor pretraživanja R^n dok se skup vrednosti funkcija cilja naziva prostorom rešenja. Funkcije jednakosti $\phi_j(x)$ i nejednakosti $\psi_k(x)$ se nazivaju ograničenjima. Uslovi (5.1) se nazivaju funkcionalnim ograničenjima tipa jednakosti, dok se uslovi (5.3) nazivaju funkcionalnim ograničenjima tipa nejednakosti ili ograničenjima zadatim oblastima. Rešenja koja zadovoljavaju navedeni skup ograničenja (5.2 i 5.3) formiraju tzv. skup dopustivih rešenja $D \subseteq R^n$. Očigledno je da optimalno rešenje optimizacionog problema $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$ mora da se traži u skupu dopustivih rešenja.

Iako optimizacija datira još od prvih problema nalaženja ekstremuma, postaje samostalna nauka tek od 1940.-te godine, kada je G. B. Dantzig [Dantzig, 1949] predstavio dobro poznat algoritam za linearno programiranje. Od tada do danas je razvijen veliki broj metoda optimizacije, pri čemu je svaka od njih primenljiva na određene grupe problema. Izabrana metoda treba da za što kraće vreme i uz što manje napora obezbedi pouzdano nalaženje optimalnog rešenja. U literaturi se mogu naći različiti pristupi za klasifikaciju metoda optimizacije [Petrović, 2013; Yang, 2010]. Kako bi što preciznije definisao termin problema optimizacije, u ovoj disertaciji biće data jedna od najopštijih

klasifikacija prema sledećim kriterijumima (slika 5.1): broj funkcija cilja, broj funkcija ograničenja, karakter funkcija, oblik funkcije cilja, tip promenljivih, i neizvesnost u procesu optimizacije.



Slika 5.1 Klasifikacija optimizacionih problema [Yang, 2010]

Optimizacioni problemi uopšteno se prema broju funkcija cilja mogu klasifikovati na jednokriterijumske optimizacione probleme (eng. *single-objective optimization problems – SOP*) kada je $M = 1$ i višekriterijumske optimizacione probleme $M > 1$ (eng. *multi-objective optimization problems – MOP*). Većina realnih optimizacionih problema (tako i optimizacija problema usmeravanja vozila) ima višekriterijumski karakter. Kriterijumi, pored toga što mogu biti različiti, takođe se mogu izražavati na različite načine u smislu mernih, novčanih ili fizičkih veličina ali se mogu izraziti i subjektivnim procenama.

Na sličan način se može izvršiti i klasifikacija optimizacionih problema prema broju ograničenja $J+K$, ako je $J=K=0$ onda je reč o optimizacionom problemu bez ograničenja a u suprotnom optimizacioni problem je sa ograničenjima.

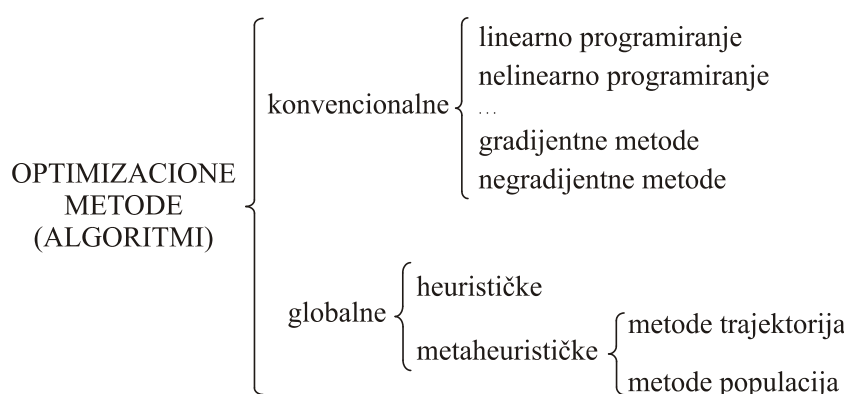
Prema obliku funkcija cilja $f_i(\mathbf{x})$, $\phi_j(\mathbf{x})$ i $\psi_k(\mathbf{x})$ optimizacioni problem može biti linearne ili nelinearne prirode. Kada funkcija cilja ima linearno ograničenje onda se radi o linearnom programiranju (eng. *linear programming-LP*), a ako je bar jedna od funkcija cilja nelinearna, tada se optimizacioni problem naziva nelinearno programiranje (eng. *nonlinear programming - NP*).

Prema obliku površi funkcije cilja optimizacioni problemi se mogu klasifikovati na unimodalne i multimodalne pri čemu se modalnost odnosi na postojanje jednog ili više izraženih ekstrema. Funkcija cilja koja u dozvoljenoj oblasti optimizacionih parametara ima samo jedan ekstremum naziva se unimodalna, a u suprotnom se naziva multimodalna [Petrović, 2013].

Još jedna klasifikacija optimizacionih problema može se izvršiti pomoću tipa parametara. Ukoliko su vrednosti parametara optimizacije diskretnog tipa reč je o diskretnoj optimizaciji, a ako su parametri optimizacije celi brojevi onda je reč o celobrojnoj optimizaciji ili kako se još naziva u literaturi celobrojnom programiranju. U slučaju da su vrednosti parametara optimizacije kontinualne veličine optimizacioni problem dobija karakter neprekidne (kontinualne) optimizacije. Najčešće, pri rešavanju realnih problema parametri optimizacije su mešovitog tipa, odnosno optimizacioni parametri su i diskretni i kontinualni.

Na kraju, klasifikacija optimizacionih problema može se izvršiti prema kriterijumu postojanja ili nepostojanja neizvesnosti u procesu odlučivanja. Ukoliko su optimizacioni parametri, funkcije cilja i funkcije ograničenja egzaktni (ne postoji neizvesnost u smislu konvergencije ka najbližem lokalnom ekstremu) optimizacioni problem je deterministički. Ako postoji bilo kakva neizvesnost u optimizacionim parametrima ili funkcijama cilja i ograničenja govori se o stohastičkoj optimizaciji. U nastavku (poglavlje 5.1.1) biće više reči o problemima stohastičke optimizacije.

U zavisnosti od optimizacionih problema moraju se primenjivati različite optimizacione metode jer su neke metode pogodnije za određene klase optimizacionih problema od drugih. U najopštijem smislu, različite optimizacione metode (algoritmi) se mogu podeliti u dve osnovne grupe: konvencionalne metode i metode globalne optimizacije (slika 5.2).



Slika 5.2 Klasifikacija optimizacionih metoda [Petrović, 2013]

Pregledom literature uviđa se da se iz grupe konvencionalnih optimizacionih metoda najčešće primenjuju determinističke metode. Ove metode imaju jasno definisane procedure u smislu da za istu početnu tačku na identičan način dovode do rešenja. Za razliku od njih globalne metode

po pravilu u sebi sadrže neku slučajnost (npr. korišćenje pseudo slučajnih brojeva ili isti ekstrem funkcije cilja dobijen na različite načine pri ponovnom pokretanju algoritma itd.), te stoga se često nazivaju stohastičkim.

Konvencionalne metode optimizacije (u literaturi poznate i kao tradicionalne ili klasične) za početak uzimaju jednu polaznu tačku i za određivanje pravca kretanja algoritma uzimaju se lokalni podaci. U slučaju da se postigne određeni napredak u traženom pravcu, ponovo se uzima neki lokalni podatak i proces se stalno ponavlja sve dok se na taj način ne mogu dobiti poboljšanja. S obzirom na to da u ovom radu neće biti korišćene metode iz ove grupe, njihov detaljan opis i podela može se naći u literaturi koja je mnogobrojna.

eni napredak u traženom pravcu, ponovo se uzima neki lokalni podatak i proces se stalno ponavlja sve dok se na taj način ne mogu dobiti poboljšanja. S obzirom na to da u ovom radu neće biti korišćene metode iz ove grupe, njihov detaljan opis i podela može se naći u literaturi koja je mnogobrojna.

Za rešavanje problema određivanja najpovoljnijih ruta kretanja vozila, bće primenjeni globali optimizacioni metodi (algoritmi). U nastavku ovog poglavlja biće prikazan detaljan opis najpoznatije globalne optimizacione metode a to su heuristički i meta-heuristički metodi.

5.1.1 Problemi stohastičke optimizacije

U stohastičkoj optimizaciji parametri optimizacije imaju slučajan karakter opisan metodama iz teorije verovatnoće i statistike. U literaturi se sreću dve grupe metoda stohastičke optimizacije: *implicitne* i *eksplicitne* metode. Implicitne metode se uglavnom primenjuju za rešavanje diskretnih stohastičkih problema u kojima je mali broj mogućih rešenja. Eksplicitne metode se primenjuju za rešavanje diskretnih i kontinualnih stohastičkih problema. Kada su parametri u funkciji cilja stohastičke prirode, Vujošević [Vujošević, 1988] predlaže sledeća dva pristupa:

- Potrebno je odrediti x tako da se dobije minimum/maksimum matematičkog očekivanja funkcije cilja, odnosno:

$$\min/\max_{x \in R^n} f_i(x), \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5.5)$$

- Potrebno je odrediti x tako da se dobije minimum/maksimum verovatnoće da je funkcija cilja veća od neke unapred zadate vrednosti, odnosno:

$$\min/\max_{x \in R^n} P[f_i(x)] \geq f_0, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5.6)$$

Kada se posmatraju funkcije ograničenja čiji parametri imaju slučajan karakter onda nije izvesno da će se izborom upravljačkih promenljivih obezbediti da funkcija bude zadovoljena. Zbog toga se definiše novi zadatak optimizacije u kome se zahteva da verovatnoća da će ograničenje biti zadovoljeno bude veća od neke unapred zadate vrednosti. Ako parametri u funkcijama ograničenja imaju slučajan karakter (slučajne veličine) onda oni mogu biti opisani npr. normalnom raspodelom, Poisson-ovom raspodelom ili Gama raspodelom. Vujošević [Vujošević, 1999] u svojoj knjizi

navodi da se neizvesnost može tretirati i drugim metodama a ne samo onim koji počivaju na teoriji verovatnoće. U nastavku ovog dela poglavlja prikazana je primena metode pri uslovima neizvesnosti (eng. *chance-constrained method* - Ch-C) za rešavanje problema usmeravanja vozila sa stohastičkim zahtevima odnosno rešavanje CVRPSD i SVRPTW

Ch-C metod je jedan od glavnih metoda za stohastičku optimizaciju pod različitim uslovima neizvesnosti. Ch-C metod osigurava da je verovatnoća ispunjenja određenog ograničenja iznad određenog nivoa. Drugim rečima, ovaj metod ograničava dopustivu oblast tako da je nivo pouzdanosti rešenja visok. Ch-C metod su prvi razvili *Charnes* i *Cooper* 1959. godine [Charnes i Cooper, 1959]. Godine 1965. *Miller* i *Wagner* [Miller i Wagner, 1965] su preispitali metodu i razmatrali kako povećati efikasnost rešavanja problema optimizacije sa ograničenjima. Poslednjih godina brojni istraživači primenjuju Ch-C metod za rešavanje neke od varijanti VRP-a [Mendoza, 2010; Shen, 2009; Peng i Qian, 2010; Waller i Ziliaskipoulos, 2006].

5.1.1.1 Primena Ch-C metoda za rešavanje CVRPSD

U poglavlju 4.3.1 funkcija minimizacije za CVRPSD definisana je jednačinom (4.40), Ch-C je definisan ograničenjem (4.46) koji predstavlja vrlo jak uslov koji utiče na rešavanje CVRPSD. Korišćenjem Ch-C metoda osigurava se zapravo da stvarna potražnja na ruti bude manja od kapaciteta vozila k sa verovatnoćom P . Ako u ograničenju (4.46) pretpostavimo da je q_i neprekidna slučajna promenljiva sa poznatom raspodelom tada se ograničenje može transformisati u osnovno ograničenje koje se može rešiti tradicionalnim metodama za determinističke probleme. Ova transformacija biće detaljnije objašnjena u nastavku teksta. Ako su zahtevi korisnika q_i slučajna promenljiva opisani normalnom raspodelom, onda q_i možemo predstaviti kao $q_i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i^2)$ gde parametar $\mu_i = E[q_i]$ predstavlja ukupanu očekivanu potražnju (matematičko očekivanje) za i -tog korisnika, a parametar $\sigma_i^2 = Var[q_i]$ predstavlja standardno odstupanje (varianca) od potražnje za i -tog korisnika gde je $i \in V$. Ako se očekivana potražnja korisnika predstavi kao $E[q_i] = \sum_{i=0}^{n_k} [E(q_i)] - Q_k$, a standardno odstupanje kao $Var[q_i] = \sum_{i=0}^{n_k} [Var(q_i)]$, onda se ograničenje

$P(\sum_{i \in V} q_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q_k) \geq \alpha$ (4.46) može se predstaviti na sledeći način [Xiangyong]:

$$P \left(\eta \leq - \frac{\sum_{i=0}^{n_k} [E(q_i)] - Q_k}{\sum_{i=0}^{n_k} [Var(q_i)]} \right) \geq \alpha \quad (5.7)$$

Gde P predstavlja verovatnoću događaja, a α predstavlja nivo poverenja. Parametar α uzima vrednost u intervalu $0 \leq \alpha \leq 1$. Najčeće vrednost koje se sreću u literaturi za rešavanje inženjerskih

problema su u intervalu od 0.8 do 0.99 [Allen i Braswell, 1971; Li i sar., 2008; Pagnoncelli i sar., 2009]. Tako da Ch-C važi ako i samo ako važi izraz (5.8):

$$\Phi^{-1}(\alpha) \leq -\frac{\sum_{i=0}^{n_k} [E(q_i)] - Q_k}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n_k} [Var(q_i)]}} \quad (5.8)$$

odnosno Ch-C ograničenje $P(\sum_{i \in V} q_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q_k) \geq \alpha$ (4.46) se može napisati kao deterministički ekvivalent:

$$\Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\sum_{i=0}^{n_k} [Var(q_i)]} + \sum_{i=0}^{n_k} [E(q_i)] \leq Q_k \quad (5.9)$$

gde je Φ standardna funkcija normalne raspodele a Φ^{-1} inverzna funkcija Φ .

5.1.1.2 Primena Ch-C metoda za rešavanje SVRPTW

Na sličan način može se rešiti funkcija minimizacije za SVRPTW definisana jednačinom (4.50) u poglavlju (4.3.2). Korišćenjem Ch-C koji je definisan ograničenjem (4.55) osigurava se da vreme putovanja vozila k na grani (i, j) i zbir vremena opsluživanja i čekanja kod i -tog korisnika bude manje od maksimalnog vremena putovanja vozila k za dan ili po ruti sa verovatnoćom α . Ako u ograničenju (4.55) pretpostavimo da je t_{ijk} neprekidna slučajna promenljiva sa poznatom raspodelom tada se ovo ograničenje može transformisati u osnovno ograničenje koje se može rešiti tradicionalnim metodama za determinističke probleme. Ako je t_{ijk} tj., vreme putovanja vozila k na grani (i, j) i zbir vremena opsluživanja i čekanja kod i -tog korisnika opisano normalnom raspodelom onda t_{ijk} možemo predstaviti kao $t_{ijk} \sim \mathcal{N}(\mu_{ijk}, \sigma_{ijk}^2)$ gde parametar $\mu_{ijk} = [E(t_{ijk}) + E(s_i)]$ predstavlja ukupno očekivano vreme putovanja i opsluživanja za vozilo k na grani (i, j) , a parametar $\sigma_{ijk}^2 = [Var(t_{ijk}) + V(s_i)]$ predstavlja standardno odstupanje (varianca) od vremena putovanja i opsluživanja za vozilo k na grani (i, j) gde su $(i, j) \in V$. Ako se uvede promenljiva y , onda se ukupno očekivano vreme putovanja i opsluživanja za vozilo k može predstaviti kao

$$E(y) = \sum_{i=0}^{n_k} [E(t_{ijk}) + E(s_i)] - B_k, \text{ a standardno odstupanje (varianca) od vremena putovanja i}$$

opsluživanja za vozilo k $Var(y) = \sum_{i=0}^{n_k} [Var(t_{ijk}) + Var(s_i)]$, onda se ograničenje

$$P\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=0}^n (s_i + w_i) \sum_{j=0}^n x_{ijk} \leq B_k\right) \geq \alpha \text{ (ograničenje 4.55) može se predstaviti na sledeći način}$$

[Xiangyong, 2010]:

$$P \left(\eta \leq - \frac{\sum_{i=0}^{n_k} [E(t_{ijk}) + E(s_i)] - B_k}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n_k} [Var(t_{ijk}) + Var(s_i)]}} \right) \geq \alpha \quad (5.10)$$

Tako da cahnce-constraints važi ako i samo ako važi izraz (5.11):

$$\Phi^{-1}(\alpha) \leq - \frac{\sum_{i=0}^{n_k} [E(t_{ijk}) + E(s_i)] - B_k}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n_k} [Var(t_{ijk}) + Var(s_i)]}} \quad (5.11)$$

onda se Ch-C ograničenje $P \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=0}^n (s_i + w_i) \sum_{j=0}^n x_{ijk} \leq B_k \right) \geq \alpha$ (ograničenje 4.55) može

napisati kao deterministički ekvivalent:

$$\Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\sum_{i=0}^{n_k} [Var(t_{ijk}) + Var(s_i)]} + \sum_{i=0}^{n_k} [E(t_{ijk}) + E(s_i)] \leq B_k \quad (5.12)$$

gde je Φ standardna funkcija normalne raspodele a Φ^{-1} inverzna funkcija Φ .

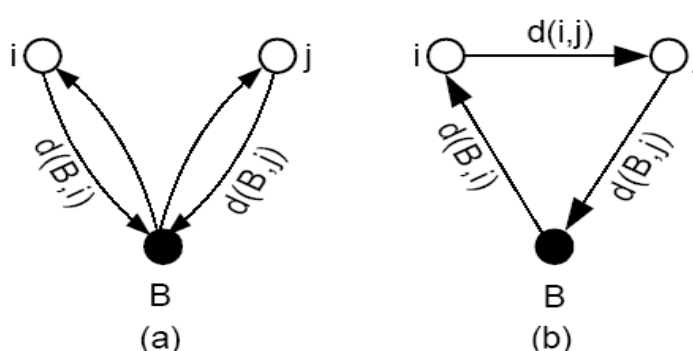
5.2 Heurističke metode za rešavanje problema usmeravanje vozila

Heuristički pristup obuhvata metode i tehnike rešavanja problema, učenja i otkrivanja koji su bazirani na iskustvu, sopstvene procene i intuicije. Heurističke metode obično teže da pronađu *dovoljno dobro* (zadovoljavajuće) rešenje optimizacionog problema u *razumnom* vremenu korišćenjem postupaka „pokušaja i greške“ i predstavljaju pravila izbora, filtriranja i odbacivanja rešenja (služe za smanjivanje broja izvedenih alternativnih puteva u postupku rešavanja problema). Međutim, u nekim slučajevima dobijeno dobro rešenje nije i optimalno rešenje nekog problema. To znači da ne postoji garancija za nalaženje optimalnog rešenja već samo rešenja blizu optimalnog koje je *dovoljno dobro* za postavljeni realni problem.

Pri rešavanju problema usmeravanja vozila heurističke metode se koriste za konstruisanje ruta gde se konstruisanje i poboljšavanje ruta vrši iterativno u odnosu na funkciju cilja. S obzirom na to da se u ovom radu govori o određivanju najpovoljnijih (optimalnih) ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada, kao i imajući u vidu sva razmatrana ograničenja, može se sa velikom sigurnošću pretpostaviti da su *dovoljno dobra* rešenja određena primenom globalnih optimizacionih metoda. Na osnovu istraživanja kao predstavnici pristupa konstruktivnim heurističkim metodama koji su razmatrani u ovoj disertaciji su *Clark – Wright*-ov algoritam uštede, *Sweep*-ov algoritam i algoritam lokalne pretrage 2-OPT.

5.2.1 Clark-Wright-ov algoritam uštede

Tvorci algoritma uštede su G. Clarke i J.W. Wright 1964. godine [Clarke i Wright, 1964]. Osnovna ideja *Clark-Wright*-ovog (C-W) algoritma uštede zasnovana je na uštedi u pređenom putu, vremenu putovanja, utrošku goriva, ukupnim transportnim troškovima, koja se ostvaruje pri opsluživanju čvorova transportne mreže različitim putanjama saobraćajnih sredstava. Ako se sa B označi (baza/depo) čvor iz kojeg transportno vozilo polazi i u koji se vraća na kraju opsluživanja, onda bilo koji par čvorova (i, j) to transportno vozilo može da opsluži na dva načina: da krene iz depoa B , opsluži čvor i (lokaciju kontejnera), vrati se u depo B , opsluži čvor j i ponovo se vrati u depo (sl. 5.3a), ili da krene iz depoa B , opsluži čvor i , opsluži čvor j i vrati se u depo (sl. 5.3b).



Slika 5.3 Izračunavanje "uštede" pomoću Clarke-Wright-ovog algoritma uštede

Veličina d u izrazu 5.13 može predstavljati najkraće rastojanje između para čvorova i i j ili najmanje utrošeno vreme između para čvorova i i j ili najmanju utrošenu količinu goriva za realizaciju puta od čvora i do čvora j , itd., zavisno od problema koji se želi rešiti. U slučaju kada je $d_{(i,j)} \neq d_{(j,i)}$, potrošnja goriva na putu od čvora i do čvora j može da bude različita od potrošnje goriva na putu od čvora j do čvora i kada je u pitanju ulica koja na određenoj deonici ima uspon.

Ako se sa veličinom $d_{(i,j)}$ označe troškovi od čvora i do čvora j , tada, za slučaj sa slike (sl. 5.3a), ukupni transportni troškovi se mogu izračunati na sledeći način:

$$s_{(i,j)} = d_{(B,i)} + d_{(i,B)} + d_{(B,j)} + d_{(j,B)} \quad (5.13)$$

a za slučaj sa slike (sl. 5.3b) ukupni transportni troškovi se mogu izračunati na sledeći način:

$$s'_{(i,j)} = d_{(B,i)} + d_{(i,j)} + d_{(j,B)} \quad (5.14)$$

Nakon sagledavanja izraza 5.13 i 5.14 dolazi se do zaključka da su ukupni transportni troškovi u drugom slučaju (sl. 5.3b) manji za veličinu:

$$s'_{(i,j)} = d_{(i,B)} + d_{(B,j)} - d_{(i,j)} \quad (5.15)$$

Zaključak je da, što je ušteda $s'_{(i,j)}$ veća, to je ekonomičnije čvorove i i j spojiti u jednu rutu. Prilikom spajanja čvorova u jednu rutu mora se uzeti u obzir ograničavajući faktor odnosno kapacitet transportnog vozila. To znači, da bi par čvorova (i, j) predstavljali jednu rutu, kapacitet transportnog vozila mora biti veći od ukupnih zahteva za opslugu, koji se javljaju u pomenute čvorove. C-W-ov algoritam uštede za projektovanje ruta kretanja transportnih vozila se može objasniti kroz četiri algoritamskih koraka [Clarcke i Wright, 1964]:

Korak 1: u ovom koraku potrebno je izračunati sve uštede $s'_{(i,j)} = d_{(B,i)} + d_{(B,j)} - d_{(i,j)}$, za svaki uređeni par čvorova (i, j) transportne mreže koji treba opslužiti.

Korak 2: nakon izračunavanje svih ušteda za posmatranu transportnu mrežu potrebno je izvršiti rangiranje svih ušteda i poređati ih po veličini u nerasućem nizu.

Korak 3: spojiti dva para susednih čvorova (i, j) iz liste ušteda $s'_{(i,j)}$ i formirati delimičnu rutu ako su ispunjena operativna ograničenja :

- a) ako čvor i i čvor j nisu prethodno bili uključeni ni u jednu delimičnu rutu;
- b) ako je bar jedan od čvorova i ili j bio uključen u neku od prethodnih delimičnih ruta, i ako taj uključen čvor predstavlja spoljašni čvor u delimičnoj ruti;
- c) ako su oba čvora i i j uključena u dve različite delimične rute i ako su oba čvora spoljašna u delimičnim rutama, onda je moguće te dve delimične rute spojiti u jednu rutu uz poštovanje operativnih ograničenja.

Korak 4: kada se lista ušteda ispita do kraja treba završiti algoritmom.

Prethodno definisan algoritam se može predstaviti pseudo kodom (alg. 5.1) [Ehmke, 2012].

Algoritam 5.1: Clarke-Wright-ov algoritam uštede

početak

Definisati ulazne parameter $G=(V,E,D)$;

$S_{i,j} = d_{i,B} + d_{B,j} - d_{i,j}$;

Sračunati uštede S' ;

Sortirati S' u nerastućem nizu;

Učitati najveću uštedu $s_{i,j}$ iz S' ;

Spojiti dva para susednih ušteda $(i, i+1)$ i $(j, j+1)$ iz S'

for za sve uštede iz niz;

if ispunjena operativna ograničenja;

 Formirati rutu

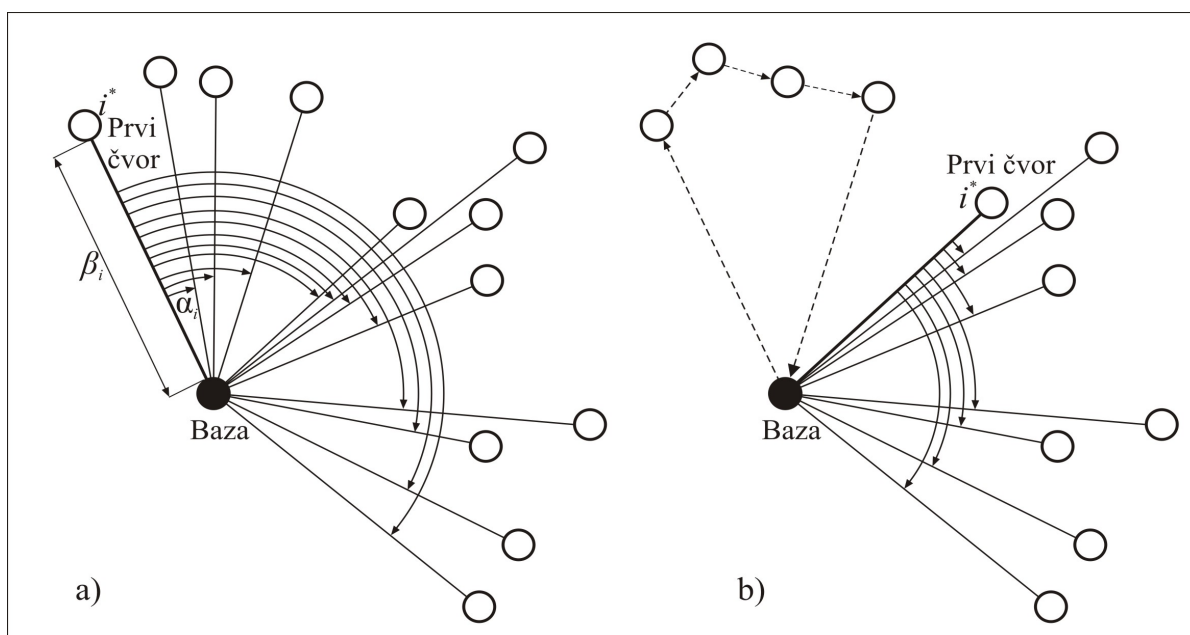
end if

end for

kraj

5.2.2 Sweep-ov algoritam

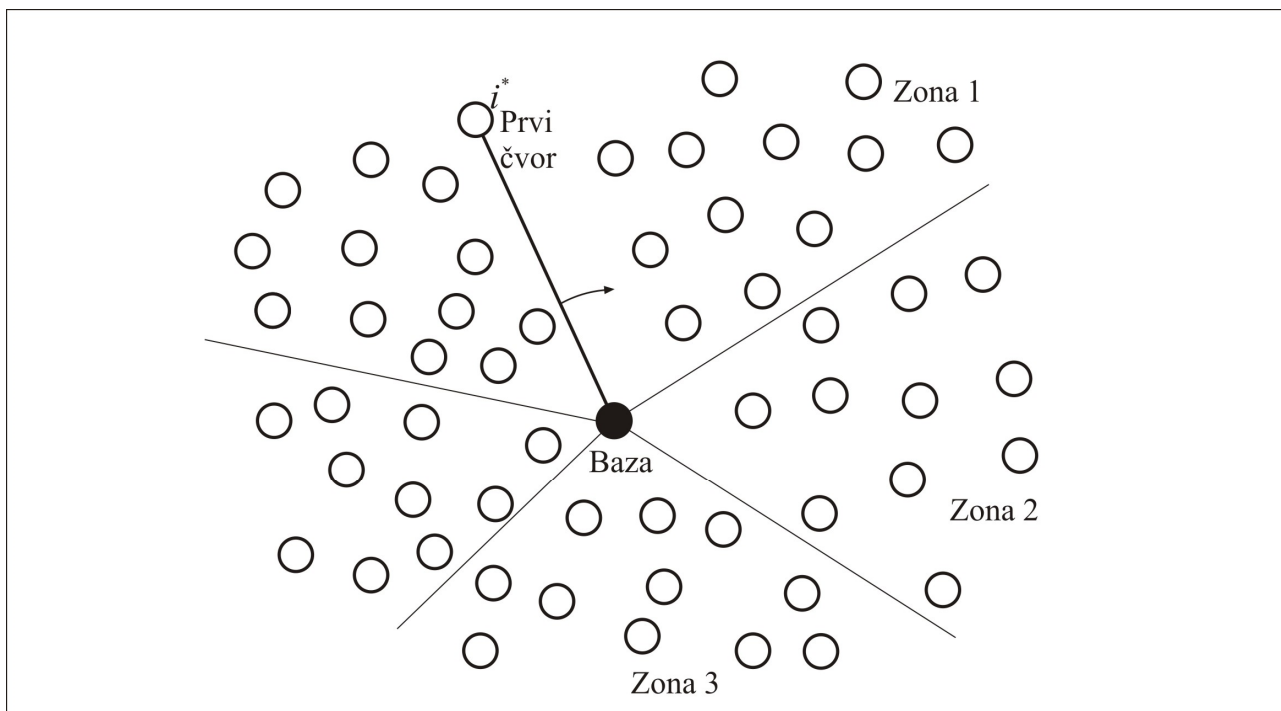
Autori *Sweep*-ovog algoritma su *Gillet* i *Miller* [Gillet i Miller, 1974]. Primena ovog algoritma podrazumeva rad sa polarnim koordinatama, pri čemu se baza/depo tretira kao koordinatni početak. Ovo podrazumeva da su unapred definisane, tj. poznate Dekartove koordinate čvorova. Dakle, svaki čvor (korisnik) predstavljen je polarnim koordinatama (α_i, β_i) gde je α_i ugao između dve grane a β_i rastojanje između dva čvora (sl. 5.4). Prvi korak *Sweep*-ovog algoritma je spajanje baze sa jednim proizvoljno izabranim čvorom i^* , gde je ugao $\alpha^* = 0$. Sledeći korak je spojiti sve čvorove transportne mreže sa bazom i zatim ih poredati po rastućim uglovima koje zaklapaju duži koje povezuju čvorove sa bazom sa duži koja spaja bazu i čvor i^* . Ruta započinje prvim čvorom i^* , zatim se ruti pridružuju čvorovi poredani po rastućim uglovima, pri čemu se vodi računa o poštovanju zadatih ograničenja (npr. kapacitet vozila, vremensko ograničenje, itd.). Kada neki čvor ne može da se uključi u rutu, jer se time krše određena ograničenja, tada taj čvor postaje prvi čvor u novoj ruti i tako sve do poslednjeg čvora u zadatoj transportnoj mreži. Algoritam se završava kada su svi čvorovi uključeni u određene rute.



Slika 5.4 a) Koordinatni početak, prvi čvor i odgovarajući uglovi, **b)** Novi prvi čvor i odgovarajući uglovi

Ako se radi o varijanti sa većim brojem čvorova koje treba opslužiti Sweep-ov algoritam treba koristiti u kontekstu pristupa „dvoprolazni“ ili „zoniranje - rutiranje“ [Teodorović, 2007]. U ovom slučaju koristeći pravilo kretanja kazaljke na satu treba samo proveriti odnos kumulativne potražnje i kapaciteta saobraćajnog sredstava koje vrši opslugu odnosno treba proveriti sva ograničenja koja postoje. Na ovaj način posmatrani region se deli na zone, a nakon toga se problem

usmeravanja vozila rešava u okviru svake zone posebno. Nakon definisanja zona, prva zona počinje prvim čvorom, a zatim se zoni pridružuju čvorovi poređani po rastućim uglovima, pri čemu se vodi računa o definisanim ograničenjima. Kada neki čvor ne može da bude uključen u rutu, jer se time krše određena ograničenja, tada taj čvor postaje prvi čvor u novoj zoni itd. Kada su svi čvorovi uključeni u određene zone, na osnovu definisanih ograničenja, zoniranje se završava (sl. 5.5).



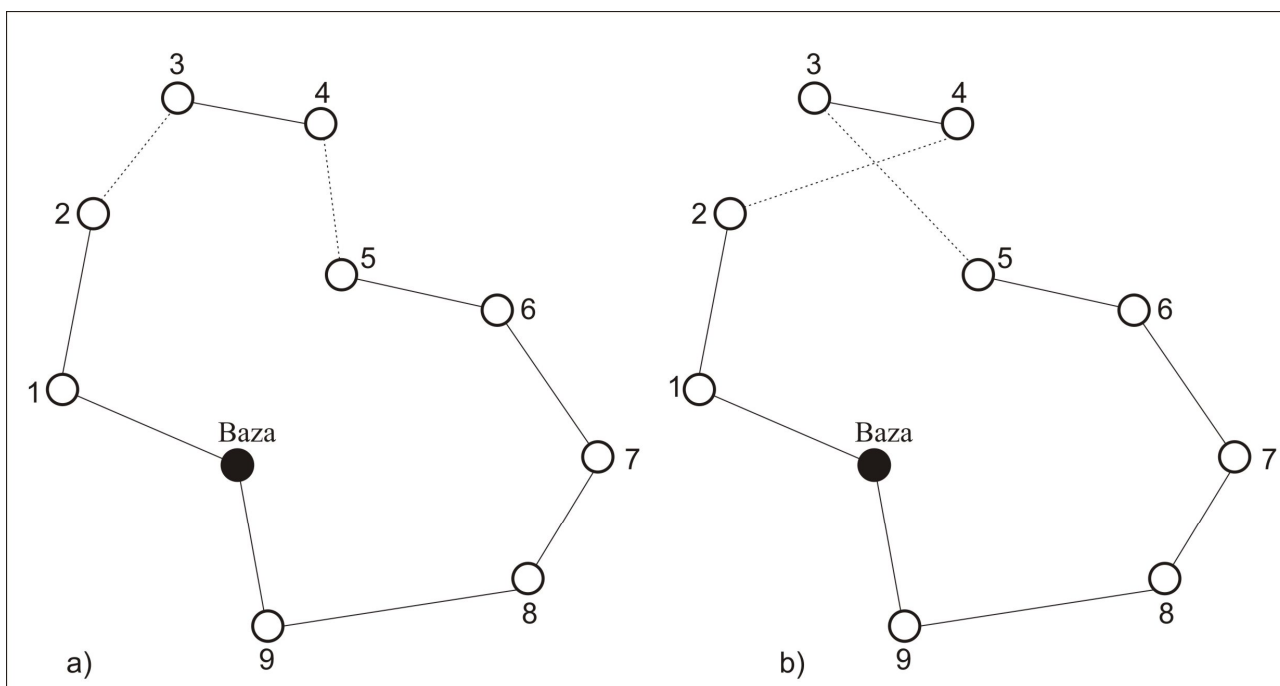
Slika 5.5 Zoniranje primenom Sweep-ovog algoritma u okviru pristupa „zoniranje - rutiranje”

5.2.3 2-OPT algoritam lokalne ptratrage

Lokalno pretraživanje polazi od proizvoljnog dopustivog rešenja i u okviru svake iteracije istražuje okolinu uočenog rešenja.

2-OPT je heuristički algoritam koji spada među najpoznatijim algoritmima za poboljšavanje ruta. Autori ovog algoritma su Lin i Kernigham [Lin i Kernigham, 1973]. Algoritam može započeti sa slučajno odabranom rutom R koju treba poboljšati. Potom iz rute R treba ukloniti dve grane. Na slici (sl. 5.7) isprekidanom linijom predstavljene su grane nad kojima se 2-OPT zamena. Kao što se vidi na slici (sl. 5.6) po uklanjanju grana (2, 3) i (4, 5) čvor 2 treba povezati sa čvorom 4, a čvor 3 sa čvorom 5. Ovako dobijena nova ruta R' se prihvata ako je njena ukupna dužina kraća od predhodne rute. U 2-OPT algoritmu na sistematski način treba uklanjati sledeće dve grane, konstruisati novu rutu R'' i vršiti poređenje dužine nove i prethodne rute. Za rutu se može reći da je

"optimalna" ukoliko uklanjanjem bilo koje dve grane i njenom rekonstrukcijom nije moguće smanjiti njenu dužinu.



Slika 5.6 Primena 2-OPT procedure a) Ruta pre 2-OPT zamene; b) Ruta posle 2-OPT zamene

Algoritam 2-OPT može se generalizovati kao k -OPT procedura gde k predstavlja broj grana koje se poboljšavaju. 2-OPT algoritam se može predstaviti pseudo kodom [Ehmke, 2012] (alg. 5.2) i objasniti kroz pet koraka [Teodorović, 2007]:

Algoritam 5.2: 2-OPT pretraga

Početak

Ruta $R = \{r_b, r_1, \dots, r_i, r_{i+1}, \dots, r_j, r_{j+1}, \dots, r_b\}$

Izabрати dva ne-susedna čvora $(i, i+1)$ i $(j, j+1)$ iz R ;

if $d_{i,i+1} + \sum_{n=i+1}^{j-1} d_{n,n+1} + d_{j,j+1} > d_{i,j} + \sum_{n=i+1}^{j-1} d_{n+1,n} + d_{i+1,j+1}$

$R = \{r_b, r_1, \dots, r_i, r_j, \dots, r_{i+1}, r_{j+1}, \dots, r_b\}$

$S' \leftarrow S$;

end if

kraj

Korak 1: Konstruisati početnu rutu primenom nekog algoritma za usmeravanje vozila.

Korak 2: Neka početna ruta R glasi: $(baza, r_1, r_2, \dots, r_n, baza)$. Označimo sa d dužinu rute.

Neka je $i=1$.

Korak 3: Neka je $j = i + 2$.

Korak 4: Ukloniti grane (r_i, r_{i+1}) i (r_j, r_{j+1}) i konstruisati novu rutu. Nova ruta glasi (*baza*, $r_1, r_2, r_i, r_j, \dots, r_{i+1}, r_{j+1}, r_{j+2}, \dots, \textit{baza}$). Ukoliko nova ruta ima dužinu manju o D , zapamtiti novu rutu i vratiti se na korak 2. U suprotnom preći na korak 5.

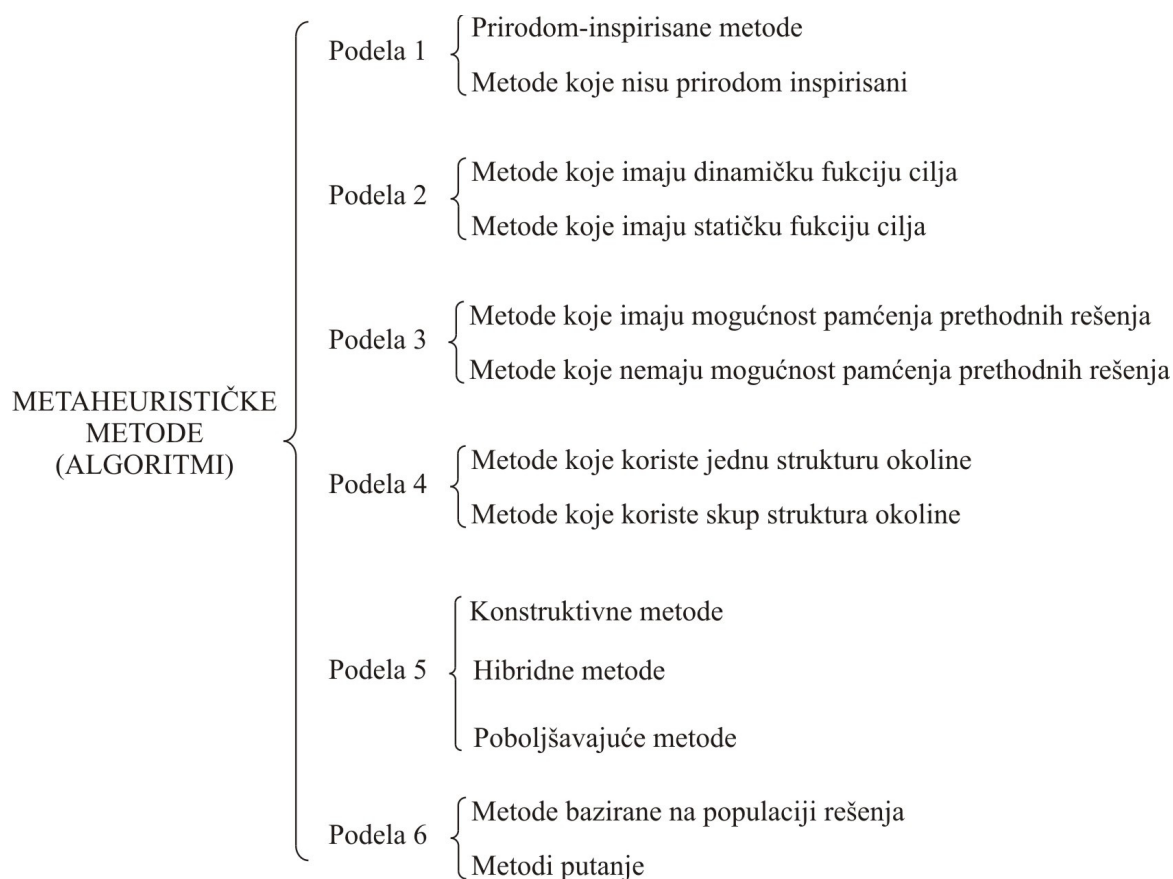
Korak 5: Neka je $j = j+1$. U slučaju kada je $j \leq n$ vrati se na korak 4. U suprotnom slučaju povećati i za ($i = i+1$). Ako je $i \leq n-2$ preći na korak 3. U suprotnom završiti sa algoritmom.

5.3 Meta-heurističke metode za rešavanje problema usmeravanje vozila

Termin meta-heuristika, prvi je predložio Fred Glover još davne 1986., da bi isti autor mnogo godina kasnije i definisao *meta-heuristiku* kao skup algoritamskih koncepata koji se koriste za definisanje heurističkih metoda primenjivih na širok skup problema [Glover i Kochenberger, 2006]. Meta-heuristika je koncipirana za rešavanje kompleksnih optimizacionih problema gde druge optimizacione metode ne uspevaju da efikasno i ekonomično reše optimizacioni problem. Ove metode su danas priznate kao jedne od najpraktičnijih pristupa za rešavanje mnogih kompleksnih problema, a to se posebno odnosi na rešavanje mnogih realnih problema koji su kombinatorni u prirodi kakav je i sam problem usmeravanja vozila. Uopšteno za meta-heuristiku može se reći da je to viši nivo heuristike.

Meta-heurističke metode u osnovi oponašaju prirodne procese kao što su biološka evolucija, potraga mrava za hranom, ponašanje pčela, pronalaženje najbolje harmonije, termodinamički proces kaljenja metala i sl. Neke od meta-heurističkih metoda koje se danas uspešno primenjuju na rešavanju realnih optimizacionih problema su: Genetski algoritam (*eng. Genetic Algorithm - GA*), optimizacija kolonijom mrava (*eng. Ant Colony Optimisation - ACO*), simulirano kaljenje (*eng. Simulated Annealing - SA*), tabu pretraživanje (*eng. Tabu Search - TS*), optimizacija kolonijom pčela (*eng. Artificial Bee Colony - ABC*), optimizacija rojevima čestica (*eng. Particle Swarm Optimization - PSO*), algoritam harmonijskog pretraživanja (*Harmony Search Algorithm - HSA*), algoritam kukavice (*Cuckoo Search Algorithm - CSA*) i mnogi drugi.

Meta-heurističke metode mogu se podeliti po različitim osnovama. Na slici (sl. 5.7) prikazana je podela koju je izvršio Petrović [Petrović, 2013].



Slika 5.7 Podela meta-heurističkih metoda [Petrović, 2013]

Sve meta-heurističke metode uglavnom imaju neke slične karakteristike koje ih čine različitim od heurističkih a naročito od konvencionalnih metoda optimizacije. Neke od njih Petrović navodi u svojoj disertaciji [Petrović, 2013]:

- Zasnivaju se na iterativnom ponavljanju izračunavanja funkcije cilja i određivanju novih pravaca pretraživanja na osnovu heurističkih pravila;
- Meta-heurističke metode oponašaju prirodne procese što ukazuje na intuitivnost njihovog koncepta;
- Meta-heurističke metode mogu sadržati mehanizme kojima se izbegava upadanje u zamke u ograničenom prostoru oblasti pretraživanja.
- Izražena fleksibilnost ovih metoda potiče od nepostojanja uslova karakterističnih za konvencionalne metode optimizacije (npr. diferencijabilnost);
- Obavezna primena kriterijuma za zaustavljanje optimizacionog procesa (maksimalno vreme trajanja, dostizanje cilja optimizacije, minimalno odstupanje vrednosti funkcije cilja u dve uzastopne iteracije itd.).

U nastavku biće predstavljene neke od meta-heurističkih metoda koje su primenjene na rešavanje problema usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada.

5.3.1 Algoritam harmonijskog pretraživanja

Algoritam harmonijskog pretraživanja (*eng. Harmony Search Algorithm -HSA*) je meta-heuristička optimizaciona metoda koju je razvio Z.W. Geem sa saradnicima 2001. godine [Geem i sar., 2001]. Ova metoda u odnosu na mnoge druge meta-heurističke metode koje oponašaju neki prirodni proces HSA oponaša fenomen tj. pojave savršene muzičke harmonije koja je prijatna za sluh. Princip rada HSA zasniva se na težnji muzičara za stvaranjem savršene muzičke harmonije koja najbolje zadovoljava postavljene muzičke standarde baš kao što optimizacioni proces traga za globalnim rešenjem koje najbolje zadovoljava funkciju cilja. Najveći uticaj na stvaranje muzičke harmonije ima visina tona (*eng. peach*) baš kao što vrednost funkcije cilja zavisi od vrednosti parametara optimizacije [Lee i Geem, 2004]. Postignuta melodija (dobijena kombinacijom različitih tonova) predstavlja jedno rešenje optimizacionog problema a savršena melodija (harmonija) odgovara optimalnom rešenju.

Prilikom improvizacije muzike, svaki muzičar proizvodi određeni ton u okviru mogućeg opsega, tako da skup tih tonova čini jednu harmoniju. Ako svi tonovi naprave dobru harmoniju, to iskustvo se čuva u memoriji svakog muzičara i mogućnost za dobru harmoniju se sledeći put povećava. Memorija harmonije (*eng. harmony memory - HM*) predstavlja ključni deo HSA. To je slično kao pri optimizaciji funkcije cilja, svaka promenljiva odlučivanja inicijalno izabere bilo koju vrednost u okviru mogućeg opsega tako da zajedno čine jedno od rešenja. Ako su sve vrednosti promenljivih odlučivanja napravile dobro rešenje, to iskustvo se čuva u memoriji promenljivih tako da se povećava mogućnost za dobrim rešenjem svakog narednog puta.

Kada muzičar improvizuje jedan ton, on obično prati neko od tri pravila:

- svira neki ton iz svoje memorije,
- svira ton sličan susednom tonu iz svoje memorije (mala promena visine),
- svira totalno nasumičan ton iz mogućeg opsega melodije.

Slično tome, kada jedna promenljiva koja učestvuje u odluci odabere jednu vrednost iz HSA, onda ona prati jedno od tri pravila:

- bira jednu vrednost iz HSA memorije (definisana kao memorija odabira),
- bira susednu vrednost od vrednosti iz HSA memorije (definisana kao podesavanje tonova) i
- bira totalno nasumičnu vrednost iz mogućeg opsega vrednosti (definisana kao slučajan izbor).

Opisani proces iskorišćen je kao osnova za definisanje optimizacione metode HSA. Najvažniji parametri HSA su [Fesengari i sar., 2008]:

- veličina harmonijske memorije (*eng. harmony memory size – HMS*),
- verovatnoća odabira iz memorije (*eng. harmony memory considering rate – HMCR*),

- verovatnoća podešavanja visine tona (*eng. pitch adjusting rate PAR*) i
- broj improvizacija – broj pretraživanja (*eng. number of improvisations – number of searches – NI*).
- propusni opseg (*eng – bandwidth bw*)

Algoritam za optimizaciju primenom HS algoritma može se prikazati pseudo kodom [Yang, 2010] (alg. 5.3) i objasniti u 5 iterativnih koraka [Geem i sar., 2001, Fesanghary i sar., 2008].

Algoritam 5.3: Harmonijsko pretraživanje

početak

```

Funkcija cilja  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 
Generisanje inicijalnih harmonika (nizovi realnih brojeva)
Definisanje verovatnoće odabira iz memorije HMCR
Definisanje verovatnoće podešavanja visine tona PAR
Definisanje propusnog opsega bw
while ( $t <$  maksimalni broj iteracija NI)
    if ( $\text{rand} > \text{HMCR}$ ),
        Slučajni izbor postojećeg harmonika iz matrice HM
    else if ( $\text{rand} > \text{PAR}$ ),
        Podešavanje visine tona sa slučajno izabranim bw
    else
        Generisanje novog harmonika slučajnim
    end if
        Prihvatanje novog harmonika (rešenja) ako je bolji
    end while
Nalaženje najboljeg rešenja

```

kraj

Korak 1. Inicijalizacija parametara.

Inicijalizacija podrazumeva postavljanje optimizacionog problema na način definisan na početku glave izrazom (5.1) uz napomenu da su kod ove metode parametri optimizacije $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ realni brojevi diskretnog tipa $x_i \in X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(K)\}$ gde je x_i – i -ti parametar optimizacije ($i = 1, 2, \dots, N$), N – ukupan broj parametara optimizacije (= broj muzičkih instrumenata – muzičara), X_i – diskretna oblast mogućih vrednosti i -tog parametra optimizacije (= broj različitih nota – visina tonova koje može da odsvira jedan instrument – muzičar). U ovom koraku vrši se inicijalizacija i gore definisanih najvažnijih parametara algoritma: *HMS*, *HMCR*, *PAR*, *NI* koji će biti detaljnije razmatrani u narednim koracima.

Korak 2. Inicijalizacija harmonijske memorije – HM.

U ovom koraku matrica HM se popunjava slučajno generisanim vektorima x^1, \dots, x^{HMS} koji predstavljaju inicijalna rešenja (kod evolutivnih algoritama to je bila početna populacija) sortiranim prema njima odgovarajućim vrednostima funkcije cilja $f(x)$ (izraz 5.16).

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Korak 3. Improvizacija nove muzičke harmonije.

U ovom koraku, nov harmonijski vektor $x' = (x_1', x_2', \dots, x_N')$ se generiše na bazi jednog od tri pravila koja su gore objašnjena i to: memorijom odabira, podešavanjem tonova i slučajnim izborom.

Kao što muzičar može odsvirati melodiju koju dobro poznaje tako i nova vrednost optimizacionog parametra može biti izabrana iz matrice HM, $x_i \in (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS})$, sa verovatnoćom $HMCR$ ($0 \leq HMCR \leq 1$). Pri tome $(1 - HMCR)$ je verovatnoća izbora optimizacionog parametra sa vrednostima koje nisu unutar matrice HM a iz oblasti su dopustivih vrednosti za i -ti optimizacioni parametar X_i (izraz 5.17),

$$x_i' \leftarrow \begin{cases} x_i' \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{sa verovatnoćom } HMCR \\ x_i' \in X_i & \text{sa verovatnoćom } (1 - HMCR) \end{cases} \quad (5.17)$$

Ako verovatnoća $HMCR$ ima visoku vrednost (blizu 1) izbor novih harmonika je skoro uvek iz iste HM, pa ostali harmonici (potencijalna rešenja) ostaju neistraženi, što u krajnjem može dovesti do pogrešnog rešenja. Iz tog razloga u literaturi se najčešće mogu naći preporuke da verovatnoću $HMCR$ treba birati u određenim granicama [Marković]. Za svaku novu vrednost (ton) dobijenu izborom iz HM matrice vrši se ispitivanje potrebe podešavanja visine tona (melodija slična poznatoj melodiji). U tu svrhu koristi se parametar PAR koji predstavlja verovatnoću podešavanja visine tona, što se može prikazati i izrazom (5.18) [Mahdavi]:

$$x_i' \leftarrow \begin{cases} DA & \text{sa verovatnoćom } PAR \\ NE & \text{sa verovatnoćom } (1 - PAR) \end{cases} \quad (5.18)$$

Vrednost $(1 - PAR)$ određuje verovatnoću da podešavanje visine tona neće biti

sprovedeno. Ako je ipak potrebno izvršiti podešavanje visine tona (odgovor *DA* u izrazu 5.19), što sa aspekta optimizacije predstavlja fino podešavanje procesa konvergencije ka optimalnom rešenju, vrši se promena veličine x'_i prema izrazu:

$$x'_i \leftarrow x'_i \pm rand() \cdot bw, \quad (5.19)$$

gde bw predstavlja propusni opseg a $rand()$ je slučajni broj u intervalu $[0, 1]$.

Korak 4. Izmena HM.

Ako je novogenerisani vektor $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)^T$ bolji od najgoreg vektora u HM (najgore harmonije), u smislu vrednosti funkcije cilja, on se dodaje u matrici a postojeći najgori vektor se isključuje iz HM matrice izraz (5.20),

$$\mathbf{x}' \in \mathbf{HM} \quad \wedge \quad \mathbf{x}^{Najgori} \notin \mathbf{HM}. \quad (5.20)$$

Na samom kraju ovog koraka matricu **HM** je potrebno ponovo sortirati prema vrednostima funkcije cilja.

Korak 5. Iterativno ponavljanje koraka 3 i 4 do dostizanja kriterijuma zaustavljanja.

Ovo je finalni korak algoritma koji definiše iterativno ponavljanje koraka 3 i 4 do dostizanja unapred zadatog kriterijuma zaustavljanja.

U originalnoj verziji HS algoritma vrednosti veličina PAR i bw se postavljaju u inicijalnom koraku (Korak 1) i njihove vrednosti se ne mogu menjati u toku odvijanja algoritma. Kao najznačajniji nedostatak ovako definisane metode u literaturi se izdvaja broj iteracija do konačnog optimalnog rešenja. Zato su Mahdavi i dr. [Mahdavi i sar., 2007] predstavili poboljšanje originalne verzije metode (*eng. Improved HS- IHS*) gde se kao najznačajnija razlika ističe drugačije podešavanje parametara PAR i bw . Pomenuti autori predložili su poboljšanje metode uvođenjem promenljivih vrednosti parametara PAR i bw u formi:

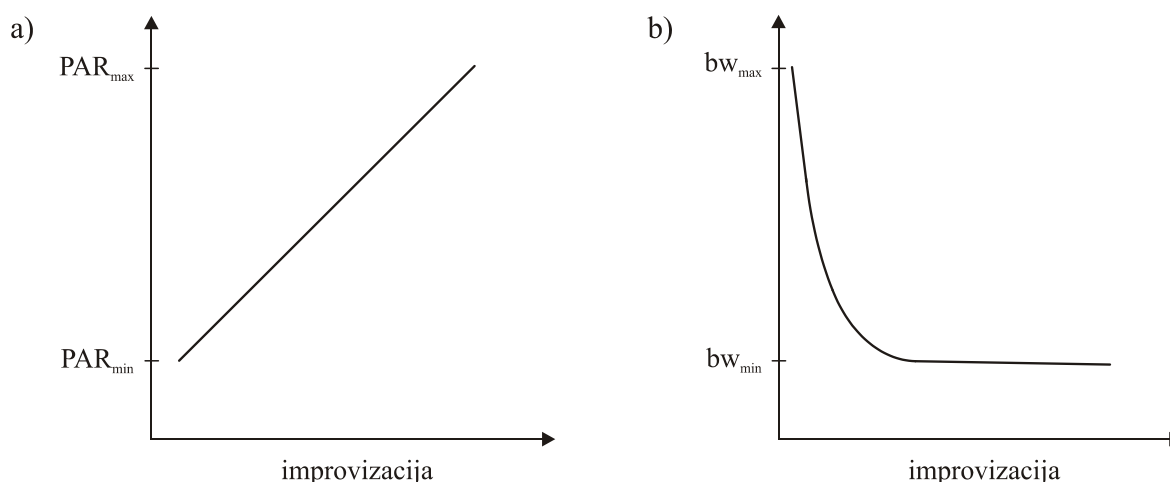
$$PAR(t) = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{NI} \cdot t \quad (5.21)$$

$$bw(t) = bw_{max} \cdot e^{c \cdot t}, \quad c = \frac{\ln\left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}}\right)}{NI} \quad (5.22)$$

gde su: t – trenutna improvizacija ($t = 1, 2, \dots, NI$), NI – ukupan broj improvizacija, $PAR(t)$ – verovatnoća podešavanja visine tona u trenutnoj (t) improvizaciji, PAR_{min} – minimalna verovatnoća podešavanja visine tona, PAR_{max} – maksimalna verovatnoća podešavanja visine tona, $bw(t)$ –

propusni opseg u u trenutnoj (t) improvizaciji, bw_{min} – minimalna vrednost propusnog opsega i bw_{max} – maksimalna vrednost propusnog opsega.

Grafička interpretacija izraza (5.21) i izraza (5.22) prikazana je na slici (sl. 5.8).



Slika 5.8 Promena parametara a) PAR, b) bw [Mahdavi]

5.3.2 Metod Simuliranog kaljenja

Metod simuliranog kaljenja (*Simulated Annealing-SA*) prvi je predložio *Kirkpatrick* sa saradnicima [Kirkpatrick i sar., 1983]. Ovaj metod je jedan od meta-heurističkih metoda koji se poslednjih godina sve češće primenjuje za rešavanje složenih inženjerskih problema. SA algoritam kao i mnogi drugi meta-heuristički algoritmi oponaša neki process, u ovom slučaju to je process kaljenja materijala. Pojam kaljenje podrazumeva da se temperature materijala smanjuju do nekog stanja kome odgovara najniža temperatura. Proces kaljenja obuhvata unapred definisanje temperatura na kojima će materijal da se nalazi neko izvesno vreme.

Primena SA algoritma za rešavanje različitih inženjerskih problema nudi široki spektar prednosti u odnosu na druge meta-heurističke metode. Neke od karakteristika ove meta-heurističke metode je naveo Madić, a to su [Madić, 2014]: (1) kvalitet rešenja ne zavisi od početnog rešenja, ali ako se ne definiše dobro početno rešenje vreme potrebno za dobijanje konačnog rešenja se povećava, (2) zadate promenljive mogu biti i negativne, (3) može se primeniti za rešavanje različitih diskretnih i kontinualnih optimizacionih problema. Primena SA algoritma u rešavanju raznih kombinatornih problema optimizacije podstakla je razvoj mnogih meta-heurističkih algoritama koji oponašaju neki prirodni proces.

SA algoritam se najbolje može objasniti kroz šest algoritamskih koraka, a ovakav algoritam su predložili Teodorović i Petković [Teodorović i Petković, 1992]:

Korak 1: u ovom koraku potrebno je definisati niz temperatura $\{t_1, t_1, \dots, t_n\}$, gde n predstavlja ukupan broj različitih temperatura, pri čemu važi $t_1 > t_1 > \dots > t_n$.

Korak 2: generisati početno rešenje na slučajan način. Indeksu temperatura i dodeliti vrednost 1 ($i = 1$).

Korak 3: nakon generisanja početnog rešenja u koraku 2 potrebno je generisati novo rešenje iz okoline tekućih rešenja. Izračunati razliku ΔE između novog i starog rešenja. Ukoliko je vrednost $\Delta E < 0$ započeti korak 5, a u suprotnom započeti korak 4.

Korak 4: koristeći normalnu raspodelu generisati slučajan broj α iz intervala $[0, 1]$. Parametar α predstavlja faktor smanjenja temperature. Ovaj parametar treba izabrati na takav način da ima dovoljno veliku vrednost i potrebno je da temperatura pri samom kraju procesa bude dovoljno niska što dovodi do stabilizacije rešenja u jednom lokalnom području. Nakon toga potrebno je izračunati verovatnoću P povećanja energije za vrednost ΔE primenom izraza:

$$P = e^{-\frac{\Delta E}{t_i}} \quad (5.23)$$

Ako je $\alpha < P$ započeti korak 5. Ako je $\alpha > P$ upamtiti staro rešenje i vratiti se na korak 3.

Korak 5: u ovom koraku neophodno je memorisati novo rešenje.

Korak 6: u slučaju postizanja termalnog ekvilibrijuma potrebno je uvećati indeks temperature za 1 ($i = i+1$). Termalni ekvilibrijum u vezi je sa pojmom epohe (ε). Epoha podrazumeva m generisanja skupova rešenja, pri čemu je vrednost za parameter m unapred definisana. Termalni ekvilibrijum je dostignut ukoliko je:

a) $\frac{|N - N_p|}{n} < \varepsilon$

gde je:

N – rešenje poslednje epohe

$N_{1,2,\dots}$ – rešenja prethodnih epoha

ε – unapred definisana konstanta

b) ukoliko nejednakost definisana uslovom a) ne može biti zadovoljena, smatra se da je termalni ekvilibrijum zadovoljen ukoliko je generisano s epoha (s – unapred zadata vrednost).

Ako je $i > n$ završiti algoritam, a u suprotnom vratiti se na korak 3.

Algoritam za optimizaciju primenom SA algoritma može se prikazati pseudo kodom (alg. 6.4) [Yang, 2010].

Algoritam 6.4: Simulirano kaljenje

početak

Funkcija cilja $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$

Generisanje inicijalne temperature T_0 i inicijalne promenljive x^0

Definisanje grupe temperatura T_f i maksimalni broj iteracija N

Definisanje faktora smanjenje temperature $T \rightarrow \alpha T$, ($0 < \alpha < 1$)

while ($T > T_f$ i $n < N$)

 premeštanje na novu slučajnu lokaciju: $x_{n+1} = x_n + rand$

 Sračunati $\Delta f = f_{n+1}(x_{n+1}) - f_n(x_n)$

 Prihvati novo rešenje ako je bolje

if nije poboljšano

 generisanje slučajnog broj r

 prihvati ako je $p = \exp[-\Delta f/T] > r$

end if

 Dodati najbolje x^* i f^*

$n = n + 1$

end while

kraj

Poglavlje 6

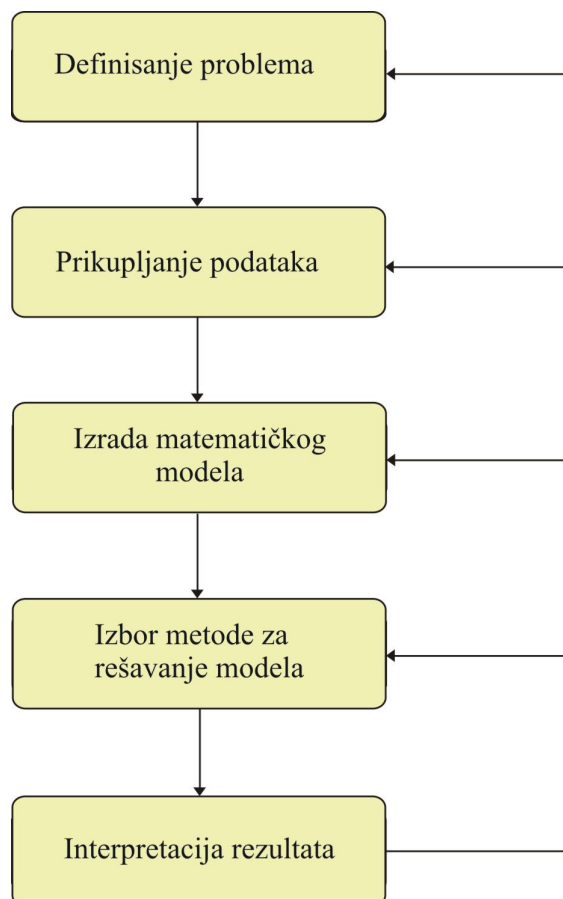
LOGISTIKA SAKUPLJANJA KOMUNALNOG OTPADA U URBANIM SREDINAMA

U poslednjih nekoliko dekada upravljanje komunalnim otpadom (eng. *Solid Waste Management*) postaje predmet obimnih istraživanja. Uglavnom kada se spomene upravljanje komunalnim otpadom mnogi pomisle na reciklažu. Reciklaža jeste bitan aspekt upravljanja otpadom ali to nije aspekt kojim se bitno smanjuju operativni troškovi upravljanja otpadom i nije aspekt koji ima uticaj na urbanu sredinu i javno zdravlje stanovništva. Sakupljanje otpada jeste bitan aspekt koji utiče na operativne troškove upravljanja otpadom, zaštitu životne sredine i javnog zdravlja. Termin sakupljanje komunalnog otpada (eng. *collecting municipal waste*) uključuje inicijalno skladištenje otpada u odgovarajućim posudama/kontejnerima, utovar i istovar posuda sa otpadom, sve faze transporta otpada dok ne stigne na krajnje odredište – postrojenje za preradu ili deponiju.

Kako je već rečeno u poglavlju 2.3 da bi se postigla optimizacija sakupljanja komunalnog otpada, način upravljanja otpadom podeljen je na tri vrlo jasna nivoa upravljanja (slika 2.3.1), odnosno optimizacije i to: strateški, taktički i operativni. U ovom poglavlju akcenat je stavljen na operativni nivo. Operativni nivo predstavlja optimizaciju sistema upravljanja otpadom izborom optimalnih ruta sakupljanja i transporta otpada. Sistem sakupljanja komunalnog otpada ima visoke operativne troškove i iz tog razloga mnogi istraživači pokušavaju da smanje te troškove kroz poboljšavanje putanja (ruta) kojima se kreću vozila, pronalaženje najpovoljnijih lokacija kontejnera za komunalni otpad, kao i smanjivanje broja vozila koje se koriste za sakupljanje komunalnog otpada. Tako na primer Simonetto i Borenstein u svojoj studiji [Simonetto i Borenstein, 2005] su predstavili model i koncept sistema za podršku pri odlučivanju primenjen na operativno planiranje sistema za sakupljanje komunalnog otpada, koga su nazvali „SCOLDSS“. Oni su testirali svoj model „SCOLDSS“ na realni problem u Porto Alegre u Brazilu. U svojoj studiji su pokazali da

primenom modela „SCOLDSS“ moguće je za 17,89% smanjiti nedeljni broj putanja koja pređu vozila za SKO. Postoje još brojne studije (videti Poglavlje 2) koje pokazuju da je moguća velika ušteda ukoliko se pravilno isprojektuju rute kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada.

Na slici (sl. 6.1) prikazana je šema faza za rešavanje problema usmeravanje vozila za sakupljanje otpada.



Slika 6.1 Šematski prikaz faza rešavanja problema usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada

U početnoj fazi definiše se problem koji se rešava. U fazi prikupljanja podataka potrebno je definisati potrebne podatke i prikupiti ih na ispravan način. Neispravni ulazni podaci kao rezultat ne daju optimalno rešenje samog problema.

Pri formiranju modela, za rešavanje problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada, potrebno je postaviti model u matematičkom obliku koji može najvernije predstaviti problem koji se rešava. Model mora biti takav da reaguje na sve promene parametara, kako bi reagovao i na stvarni problem pod uticajem promene odgovarajućih faktora. Rešenja modela predstavljaju pravilno isprojektovane rute kretanja vozila za sakupljanje komunalnog

otpada, tj. optimalne rute. Definisane modela odnosno postupka planiranja ruta kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada se može podeliti u dve etape.

- *Prva etapa* postupka projektovanja ruta podrazumeva definisanje elemenata transportne mreže (sl. 6.2a), kao i definisanje količine komunalnog otpada u transportnoj mreži. Količina komunalnog otpada u čvorovima se definiše pomoću matrica potražnje u čvorovima (sl. 6.2b).

- *Druga etapa* postupka projektovanja ruta obuhvata: a) Definisane matrice rastojanja ili matrice vremena putovanja vozila između parova čvorova u transportnoj mreži i b) Definisane korigovane matrice rastojanja ili matrice vremena putovanja vozila između parova čvorova u transportnoj mreži.

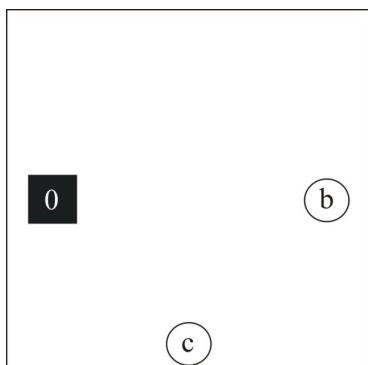
Matrica rastojanja (sl. 6.2c) predstavlja u stvari matricu troškova sa pretpostavkom da su ukupni troškovi puta proporcionalni udaljenosti čvorova. Međutim, ovakav pristup zahteva transportnu mrežu čije su deonice puteva ravne (bez nagiba), što pri rešavanju realnih problema nije slučaj. Uslovi transportne mreže se odnose na kvalitet sloja puteva, gustinu i tok saobraćaja i idealno stanje je kada su ovi uslovi ujednačeni. Da bi rešenje problema bilo zadovoljavajuće poželjniji su idealni uslovi transportne mreže, a posebno su važni ovakvi uslovi kada se radi o transportnoj mreži u kojoj su velika rastojanja između parova čvorova.

Kako bi se matrica rastojanja/troškova približila realnom problemu, neophodno je izvršiti njenu korekciju uvođenjem korekcionih faktora za svaku od deonica transportne mreže. Korekcionni faktori mogu podrazumevati: ukupne transportne troškove, konfiguraciju i stanje infrastrukture kao i uslove saobraćaja na transportnoj mreži. Ukupni transportni troškovi podrazumevaju: troškove potrošnje energenata i troškove amortizacije transportnih vozila. Konfiguraciju i stanje infrastrukture transportne mreže određuju konfiguracije grana mreže (ravna, pod nagibom, pod usponom, raskrnica, kružni tok, broj i tip saobraćajne signalizacije). Uslovi saobraćaja na transportnoj mreži zavise od gustine saobraćaja i saobraćajne signalizacije. Najveći udeo na povećanje troškova energenata ima konfiguracija deonica (uspon) jer se na ovakvim deonicama znatno povećava potrošnja goriva (sl.6.2d). Korekcionni faktori k_u za konfiguraciju daju se kao postotno povećanje potrošnje goriva u odnosu na potrošnju na ravnom putu, zavisno od stepena uspona/pada deonice i brzine kretanja vozila (sl. 6.2e). Pomoću korekcionog faktora za konfiguraciju k_u određuju se korigovana rastojanja između parova čvorova transportne mreže pomoću obrasca:

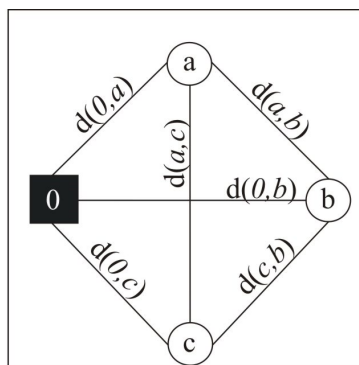
$$d(i,j)_k = \Sigma d(i,j)_r + \Sigma k_u d(i,j)_u \quad (6.1)$$

gde je: $d(i,j)_r$ - ravna dužina dela deonica (grane) transportne mreže (deonica bez uspona ili pada); $d(i,j)_u$ - dužina dela deonice (grane) transportne mreže na usponu ili padu; $d(i,j)_k$ - Ukupna dužina korigovane deonice (grane) transportne mreže; k_u - popravni faktor konfiguracije terena.

Nakon definisanja modela pristupa se izboru metode za rešavanje samog modela. U fazi interpretacije rezultata iznose se zaključci o realnom sistemu na temelju rezultata dobijenih rešavanjem definisanog modela.



a)



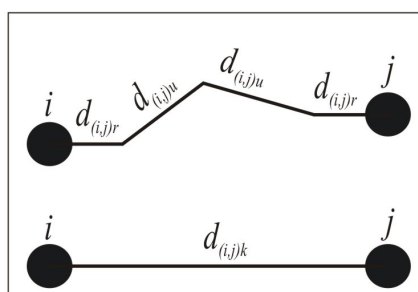
Čvor	i_1	i_2	i_3	...	$i_{(n-1)}$	n
Količina otpada po čvoru [m]	q_{i-1}	q_{i-2}	q_{i-3}	...	$q_{i-(n-1)}$	q_n

b)

$i \backslash j$	1	2	3	...	n
1	-	d_{12}	d_{13}	...	d_{1n}
2	d_{21}	-	d_{23}	...	d_{2n}
3	d_{31}	d_{32}	-	...	d_{3n}
...
n	d_{n1}	d_{n2}	d_{n3}	...	-

c)

Nagib uspo/pad [%]	Brzina kret. voz. [km/h]	Popravni faktor k_u
1	96	1.002
2	80	1.010
3	72	1.022
4	56	1.036
5	56	1.062
6	56	1.086
7	48	1.110
8	32	1.122
9	32	1.151
10	24	1.163
11	24	1.196
12	24	1.230
13	24	1.260
14	24	1.292
15	24	1.324



d)

e)

Slika 6.2 Etape projektovanja ruta: a) transportna mreža; b) količina otpada u čvorovima; c) matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova; d) grane (deonice puta) bez i sa usponom; e) popravni faktor konfiguracije terena

Nakon ovih faza jasno se može zaključiti da dobrim definisanjem modela može se doći do rešenja koja su prihvatljiva za realan problem sa kojima se susreću kompanije za sakupljanje komunalnog otpada.

Na osnovu prethodno navedenog, u okviru ovog poglavlja, biće predstavljena četiri problema usmeravanja vozila (četiri modela) za planiranje ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. Prva dva modela predstavljaju problem usmeravanja vozila sa determinističkim količinama komunalnog otpada u čvorovima transportne mreže. Druga dva modela predstavljaju problem usmeravanja vozila sa stohastičkim količinama komunalnog otpada po čvorovima i stohastičkim vremenom putovanja između parova čvorova transportne mreže.

Za rešavanje prva dva modela transportna mreža se sastoji od depoa i dvadeset čvorova. Ova transportna mreža predstavlja deo teritorije "rejon" 103 opština Medijana-Niš prema podeli teritorije grada Niša od strane Javnog komunalnog preduzeća "Mediana - Niš" (JKP "Mediana-Niš"). Inače prema toj podeli, od strane JKP "Mediana - Niš", grad Niš sa ruralnim područjem podeljen je na petnaest "rejona" za korisnike koji svoj komunalni otpad odlažu u posudama/kantama (zapremine 80-120l). Teritorija grada Niša za korisnike koji za odlaganje komunalnog otpada koriste kontejnere (zapremine 1.1 m³) podeljena je na devet "rejona". Ovi reoni su označeni brojevima od 101 do 109. Komunalni otpad sa "rejona" koji su označeni brojevima 101, 103, 105 i 108 se sakuplja tri puta nedeljno (ponedeljak, sreda i petak), a sa reona koji su označeni brojevima 102, 104, 106 i 109 se sakuplja takođe tri puta nedeljno (utorak, četvrtak i subota). Poseban je "rejon" 107 sa koga se otpad sakuplja šest dana u nedelji [JKP Mediana, 2017]. Transportna mreža za treći i četvrti model predstavlja teritoriju "rejona" 103. Ova transportna mreža se sastoji od depoa i dvadeset devet čvorova. Detaljnije pojašnjenje ovih modela sledi u nastavku ovog poglavlja.

6.1 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta

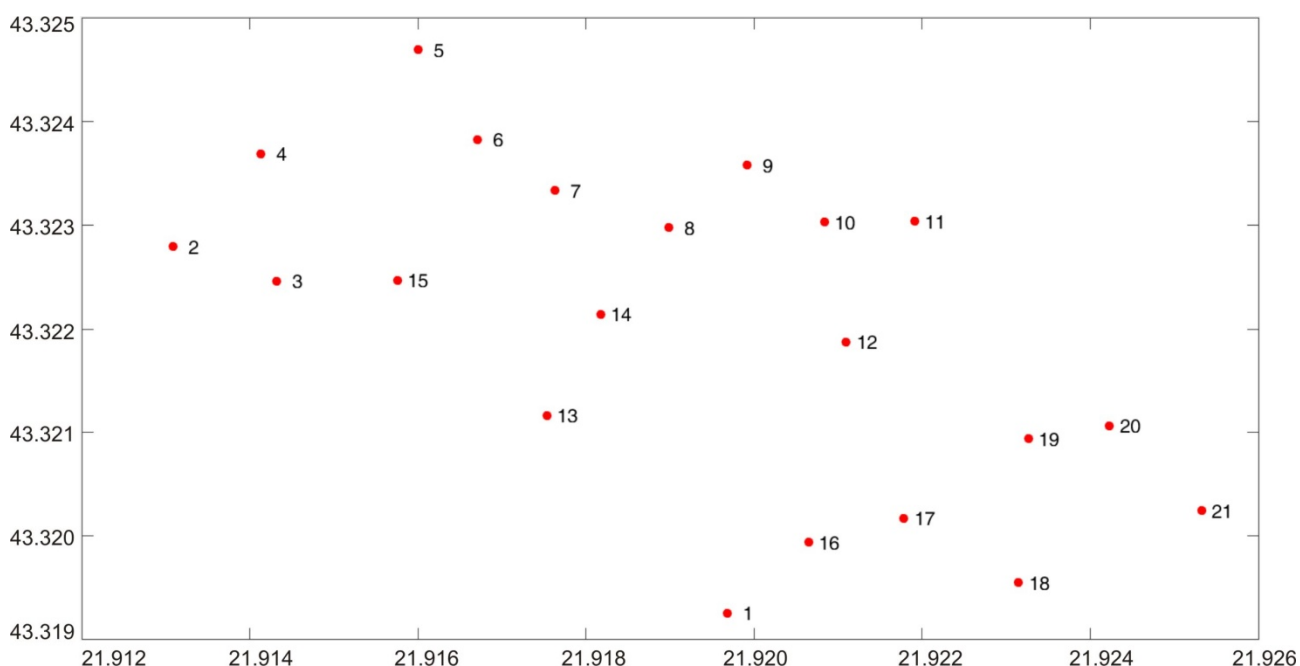
U ovom poglavlju biće razmatrano rešavanje (optimizacija) problema usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta (u nastavku teksta *model I*). Glavni cilj optimizacije *modela I* jeste određivanje optimalnih ruta kojim će se kretati vozilo za sakupljanje komunalnog otpada za zadatu transportnu mrežu. U ovom modelu rute se određuju primenom heurističkih algoritama: *Clarke-Wright*-ov algoritam uštede (C-W) i *Sweep*-ov algoritam, a poboljšanje je izvršeno lokalnom pretragom 2-OPT algoritmom. Takođe za određivanje ruta u *modelu I* primenjeni su i metaheuristički algoritmi: simulirano kaljenje (SA) i poboljšani algoritam harmonijskog pretraživanja (IHSA). Detaljan opis usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta dat je u poglavlju 4.2.1, detaljan opis C-W-ovog, *Sweep*-ovog algoritma i algoritma lokalne

pretrage 2-OPT dat je u poglavlju 5.2.1, 5.2.2 i 5.2.3, a detaljan opis algoritma SA i IHS može se videti u poglavlju 5.3.1 i 5.3.2.

6.1.1 Opis modela I

Model I definisan je transportnom mrežom koja se sastoji od depoa i 20 čvorova (sl. 6.3) Čvorovi transportne mreže predstavljaju lokacije kontejnera za odlaganje komunalnog otpada koji su smešteni na teritoriji opštine Medijana grada Niša. Ova transportna mreža predstavlja "rejon" 103 prema podeli teritorije grada Niša od strane JKP "Mediana-Niš" [JKP Mediana, 2017]. Čvorovi su definisani koordinatama odnosno geografskom širinom i geografskom dužinom (tab. 6.1). Pored koordinata tabelom (tab. 6.1) je prikazan broj kontejnera po svakom čvoru za posmatranu transportnu mrežu. Na lokacijama gde ima dva i više kontejnera njihova pozicija je definisana jednim čvorom odnosno jednom koordinatom. Kontejneri za sakupljanje otpada su zapremine $1,1m^3$.

U transportnoj mreži početni i krajnji čvor (depo) označen je sa "1". Ostali čvorovi su na transportnoj mreži označeni brojevima od 2 do 21. Vozilo za sakupljanje komunalnog otpada polazi iz depoa obilazi čvorove transportne mreže tako da svaki čvor sme da poseti samo jednom. Nakon posete prvog čvora proverava se kapacitet vozila. Ukoliko kapacitet nije ispunjen posećuje se drugi čvor ukoliko jeste ispunjen vraća se u depo na pražnjenje. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se ne posete svi čvorovi za posmatranu transportnu mrežu. Pri opsluživanju nije moguća parcijalna opsluga koja podrazumeva da se u čvoru zadovolji samo deo potražnje. Ovakav problem usmeravanja vozila u literaturi je poznat pod nazivom zatvoren sistem usmeravanja vozila, tj. vozilo polazi iz istog čvora i rutu završava u isti taj čvor.



Slika 6.3 Transportna mreža *modela I* za sakupljanje komunalnog otpada

Tabela 6.1 Koordinate i broj kontejnera za posmatranu transportnu mrežu *modela I*

Redni broj lokacije	Geografska širina	Geografska dužina	Broj kontejnera po lokaciji
Depo	43.319256	21.919682	
2.	43.322794	21.913082	18
3.	43.322464	21.914317	17
4.	43.324196	21.914412	11
5.	43.324696	21.916001	8
6.	43.323830	21.916709	14
7.	43.323338	21.917632	21
8.	43.322615	21.918220	4
9.	43.323829	21.921069	9
10.	43.322712	21.920759	8
11.	43.322109	21.922545	4
12.	43.321878	21.921097	4
13.	43.321168	21.917535	15
14.	43.322144	21.918179	11
15.	43.322471	21.915755	12
16.	43.319104	21.920206	5
17.	43.319854	21.920548	8
18.	43.320413	21.921150	7
19.	43.320076	21.922198	11
20.	43.320751	21.921739	8
21.	43.320552	21.923959	8

U *modelu I* količina otpada po čvoru je uzeta kao broj kontejnera pomnožen sa zapreminom kontejnera. To znači da se radi sa pretpostavkom da su svi kontejneri maksimalno ispunjeni otpadom, odnosno rešava se deterministički problem. Matrica potražnje po čvorovima je prikazana tabelom (tab. 6.2).

Tabela 6.2 Pretpostavljena količina otpada po čvorovima

Čvor	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Potražnja [m^3]	19.8	18.7	12.1	8.8	15.4	23.1	4.4	9.9	8.8	4.4
Čvor	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Potražnja [m^3]	4.4	16.5	12.1	13.2	5.5	8.8	7.7	12.1	8.8	8.8

Sakupljanje otpada za datu transportnu mrežu predviđeno je jednim vozilom čiji je kapacitet $60m^3$. Vozilo (sl. 3.9a) ima nadogradnju za sakupljanje otpada sa utovarom sa zadnje strane. Sabijanje otpada se vrši pomoću sistema potisne ploče. Stepenn sabijanja otpada je 4. To znači da se u vozilu može maksimalno sakupiti $60m^3$ komunalnog otpada odnosno oko 55 kontejnera.

Matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova za posmatranu transportnu mrežu prikazana je u Prilogu 1. Matrica najkraćih rastojanja predstavlja realno rastojanje između svih parova čvorova unutar transportne mreže. Rastojanje između parova čvorova prikazano je u

metrima. Matrica je simetrična odnosno rastojanje od čvora i do čvora j je jednako rastojanju od čvora j do čvora i .

6.1.2 Matematička formulacija modela I

Problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta za sakupljanje komunalnog otpada sa unapred poznatom količinom otpada po svakom čvoru transportne mreže matematički se može predstaviti na sledeći način.

Rešenje treba da zadovolji sledeće zahteve:

- svaka ruta treba da počne i da se završi na depou,
- vozilo kada polazi sa depoa uvek je prazno,
- svaki čvor učestvuje u samo jednoj ruti,
- količina otpada po svakom čvoru je poznata,
- ukupna količina otpada koja je sakupljena u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila na toj ruti.

Za definisanje matematičke formulacije *modela I* korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste, za *model I* $m = 1$

n - broj čvorova iz kojih se odvozi otpad,

V - skup čvorova, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle polazi vozilo

Q - maksimalni kapacitet vozila,

q_i - količina otpada u čvoru i ($i \in V$); količina otpada u depou je nula,

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između čvora i i čvora j ($i, j \in V$),

c_{ij} - transportni troškovi između čvora i i čvora j ($i, j \in V$), pretpostavlja se da je $c_{ij} = d_{ij}$

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo posle čvora } i \text{ posećuje čvor } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V$$

$$z_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo posetilo čvor } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V$$

Minimizacija funkcije:

$$\min F = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} \quad (6.2)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{i0} - \sum_{j=0}^n x_{0j} = 0 \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (6.3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.4)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i z_i \leq Q \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = \sum_{i=1}^n x_{ji} = z_i \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.6)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\} \quad (6.7)$$

$$z_i = \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.8)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6.9)$$

Sa (6.2) je označena funkcija cilja *modela I*. Ograničenje (6.3) podrazumeva da vozilo kada krene iz depoa vraća se u taj isti depo. Ograničenje prikazano jednačinom (6.4) pokazuje da svaki čvor transportne mreže mora da bude posećen samo jednom od strane vozila. Ograničenje (6.5) podrazumeva da ukupna količina otpada u čvoru nesme preći maksimalni kapacitet vozila. Ograničenje (6.6) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo nakon opsluživanja čvora j mora da napusti čvor j . Ograničenje (6.7) spečava pojavu ciklusa koji ne predstavljaju potpunu rutu. Ograničenje (6.8) definiše stanje opsluživanja čvora i i može imati vrednost 0 ili 1. Ograničenje (6.9) definiše prolazak kroz luk između čvora i i čvora j i može imati vrednost 0 ili 1.

6.1.3 Rezultati optimizacije ruta za model I primenom C-W-ovog algoritma uštede i Sweep-ovog algoritma

Glavni cilj rešavanja *modela I* jeste da se dobiju optimalne rute kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada odnosno da transportni troškovi budu minimalni. U *modelu I* transportni troškovi sakupljanja otpada jednaki su ukupnoj dužini rute ($c_{ij} = d_{ij}$).

Prva optimizacija ruta za *model I* za datu transportnu mrežu izvršena je primenom heurističkog *Sweep-ovog* algoritma. Ovom optimizacijom ruta za *model I* dobijene su četiri rute. Rezultati dobijeni primenom *Sweep-ovog* algoritma prikazani su u tabeli (tab. 6.3).

Druga optimizacija ruta za *model I* izvršena je primenom C-W-ovog algoritma uštede. Takođe i ovom optimizacijom su dobijene četiri rute a dobijeni rezultai su prikazani u tabeli (tab. 6.3). Iz prikazane tabele (tab.6.3) vidi se da C-W-ov algoritam uštede daje bolje rešenje. Pseudo kod C-W-ovog algoritma uštede za rešavanje *modela I* prikan je algoritmom (alg. 6.1). Notacija koja je korišćena za opisivanje ovog pseudo koda je:

s' - uštede između svih parova čvorova transportne mreže,

Algoritam 6.1 C-W algoritma uštede za rešavanje modela I

početak

Definisanje matrice rastojanja;
Definisanje Q ;
Definirati matricu potražnje po čvorovima;
Sračunati s' ;
Sortirati s' u nerastućem nizu;
Formirati delimičnu rutu;
Ispunjenost vozila = q_i ;
for za sve uštede iz niza
 if ispunjena operativna ograničenja
 if Ispunjenost vozila + $q_i \leq Q$
 Ispunjenost vozila = q_j + Ispunjenost vozila
 Formiraj rutu
 end if
 end if
end for
Štampaj rute;
Štampaj ispunjenost vozila;

kraj

Tabela 6.3 Ukupna dužina ruta *modela I* dobijena primenom C-W-ovog algoritma uštede i Sweep-ovog algoritma

Heuristički algoritmi	Ukupna dužina ruta [km]	Odstupanje u odnosu na C-W [%]
Sweep	10.14	5.23
C-W	9.61	-

S obzirom da se C-W-ovim algoritmom uštede dobilo bolje rešenje u odnosu na rešenje dobijeno Sweep-ovim algoritmom ovo rešenje je izabrano za početno rešenje. Za izabrano početno rešenje izvršeno je njegovo poboljšanje. Poboljšanje je izvršeno primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT. Pri poboljšanju početnog rešenja vršeno je variranje broja iteracija (7e2 i 12e2). Pseudo kod za 2-OPT algoritam za poboljšanje početnog rešenja prikazan je algoritmom (alg. 6.2). Notacija koja je korišćena za opisivanje pseudo koda je:

U_0 - početna dužina ruta dobijena primenom C-W-ovog algoritma uštede,

U' - poboljšana dužina rute u odnosu na početno rešenje,

Algoritam 6.2 2-OPT algoritam za poboljšavanje početnog rešenja

početak

Učitati početnu rutu;

 $U_0 =$ početna dužina rute;**for** ($i = 1; i \leq n - 2; i = i + 1$)**for** ($j = i + 2; j \leq n; j = j + 1$) $U' = d(i, j) + d(i+1, j+1) - d(i, i+1) - d(j, j+1);$ **if** ($U' < U$) $U' = U;$ **end if****end for****end for****kraj**

Poboljšanja postignuta primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT u odnosu na početno rešenje dobijeno C-W-ovim algoritmom prikazano je u tabeli (tab. 6.4). Iz tabele (tab. 6.4) može se videti da rute dobijene C-W algoritmom uštede predstavljaju dobro početno rešenje odnosno da je poboljšanje oko tri procenta.

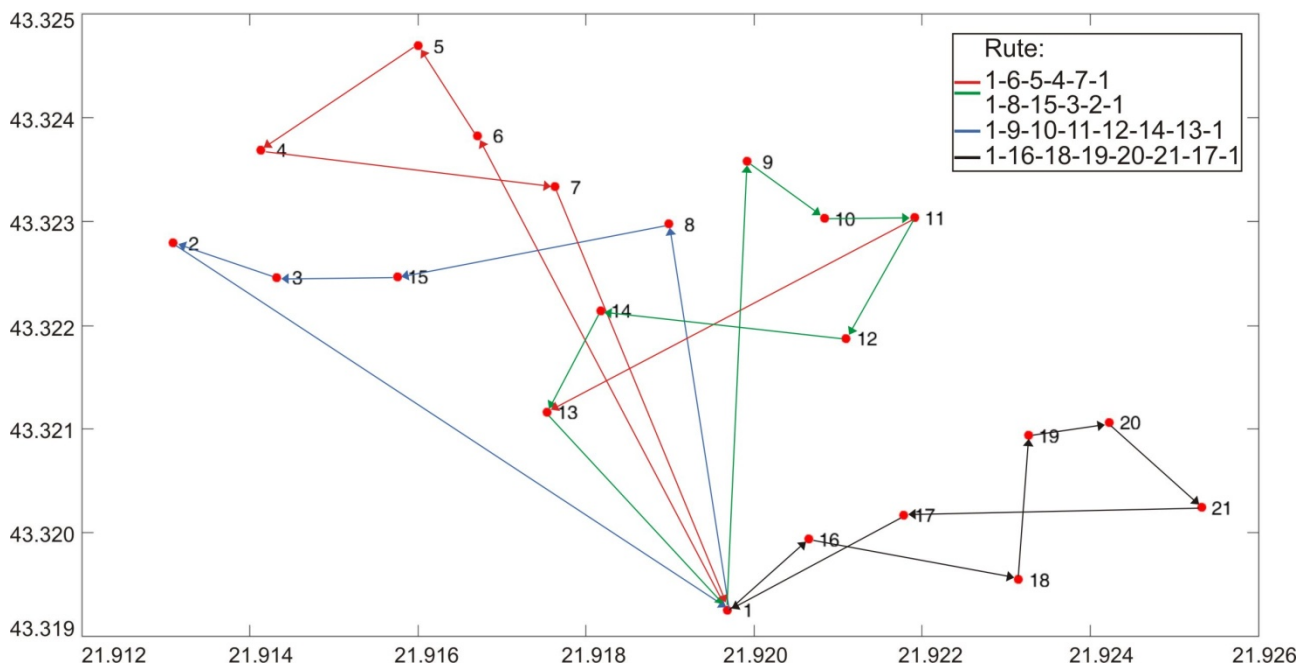
Tabela 6.4 Rezultati lokalne pretrage u odnosu na početno rešenje

Lokalna pretraga	Ukupna dužina rute	Poboljšanje u odnosu na C-W [%]
2-OPT	9.61	-
2-OPT 7e2	9.38	3.018
2-OPT 12e2	9.38	3.018

Dužine pojedinačnih ruta, dobijenih C-W-ovim algoritmom uštede sa poboljšanjem algoritma lokalne pretrage 2-OPT, kao i ispunjenost vozila po ruti, prikazane su na slici (sl. 6.4). Izgled ruta na transportnoj mreži prikazan je na slici (sl. 6.5). Sa slike (sl. 6.4) vidi se da je stepen ispunjenost vozila velik. U praksi pri rešavanju problema sakupljanja komunalnog otpada može se definisati pored minimizacije dužine ruta i maksimizacija kapaciteta vozila. Da bi se rešavao takav problem potrebno bi bilo pored optimizacije ruta izvršiti i optimizaciju zona (reona) za posmatrani region odnosno pristupiti rešavanju problema zoniranje-rutiranje [Teodorović, 2007].

Рута 1	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 6 5 4 7 Укупна дужина руте = 2.72 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.40
Рута 2	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 8 15 3 2 Укупна дужина руте = 2.93 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 56.10
Рута 3	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 9 10 11 12 14 13 Укупна дужина руте = 2.38 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 56.10
Рута 4	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 16 18 19 20 21 17 Укупна дужина руте = 1.35 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 51.70

Slika 6.4 Isprojektovane rute *modela I* primenom algoritma 2-OPT pretrage



Slika 6.5 Grafički prikaz ruta *modela I* dobijenih C-W-ovim algoritmom uštede sa poboljšanjem lokalne pretrage 2-OPT

6.1.4. Rezultati optimizacije ruta za model I primenom SA algoritma

Optimizacija ruta za *model I* za datu transportnu mrežu izvršena je primenom meta-heurističkog algoritma SA. Parametri SA za koje je vršena optimizacija ruta za *model I* su [Kirkpatrick i sar., 1983, Marković i sar., 2013]: Početna temperatura $T_0 = 100$, faktor smanjenja

temperatura $\alpha = 0.8$. Takođe je vršeno variranje ograničenja brojom iteracija. Ograničenje broja iteracije izvedeno je sa 7e2 i 12e2. Kao početno rešenje koje je rešavano primenom SA algoritma uzeto je rešenje koje je dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede. Pseudo kod SA algoritma za rešavanje *modela I* prikazan je algoritmom (alg. 6.3). Notacija koja je korišćena u definisanju SA pseudo koda je:

it - broj iteracija,

maxIt - maksimalni broj iteracija,

r - slučajan broj iz intervala [0,1],

p - verovatnoća prihvatanja novog rešenja.

Algoritam 6.3 SA algoritma za rešavanje modela I

početak

Definisanje modela;

Učitati početno rešenje *U* dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede;

Definirati parametre SA algoritma;

Najbolje rešenje = *U*;

$T = T_0$;

for $it_1 = 1; it_1 < maxIt_1; it_1 = it_1 + 1$;

for $it_2 = 1; it_2 < maxIt_2; it_2 = it_2 + 1$;

Kreiraj slučajno susedni čvor;

Računaj novu dužinu rute *U'*;

if ($U' \leq U$);

$U = U'$;

else $\Delta f = U' - U$;

$p = \exp(-\Delta f / T)$;

if $p \geq r$, *r* je slučajan broj iz intervala [0,1];

$U = U'$;

end if

end if

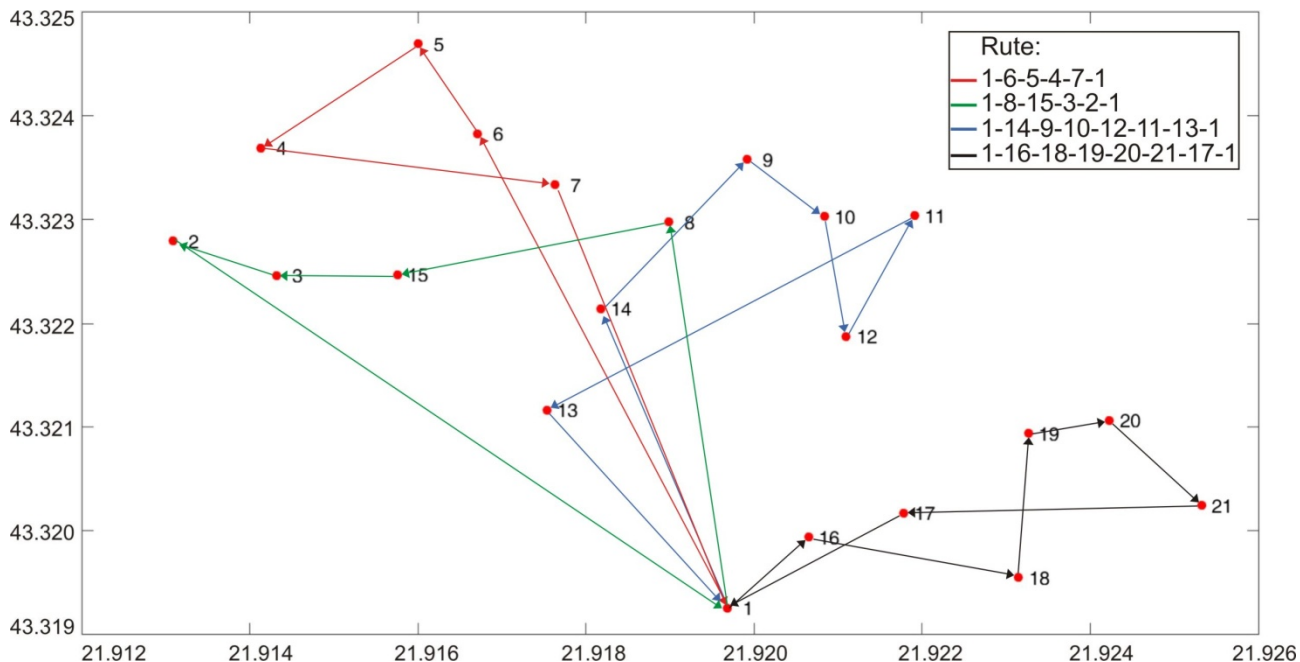
end for

$T = \alpha \cdot T$;

end for

kraj

Primenom SA algoritma sa navedenim parametrima za *model I* dobijene su četiri rute. Ukupna dužina, nakon optimizacije, svih ruta *modela I* primenom SA algoritma iznosi 9.32 km. Ovim se potvrđuje da je pronađeno bolje rešenje od početnog rešenja dobijenog primenom C-W-ovog algoritma uštede. Na slici (sl. 6.6) je prikazan izgled ruta na transportnoj mreži, a dužine ruta dobijenih pomoću SA algoritma kao i ispunjenost vozila po ruti prikazane su na slici (sl. 6.7).

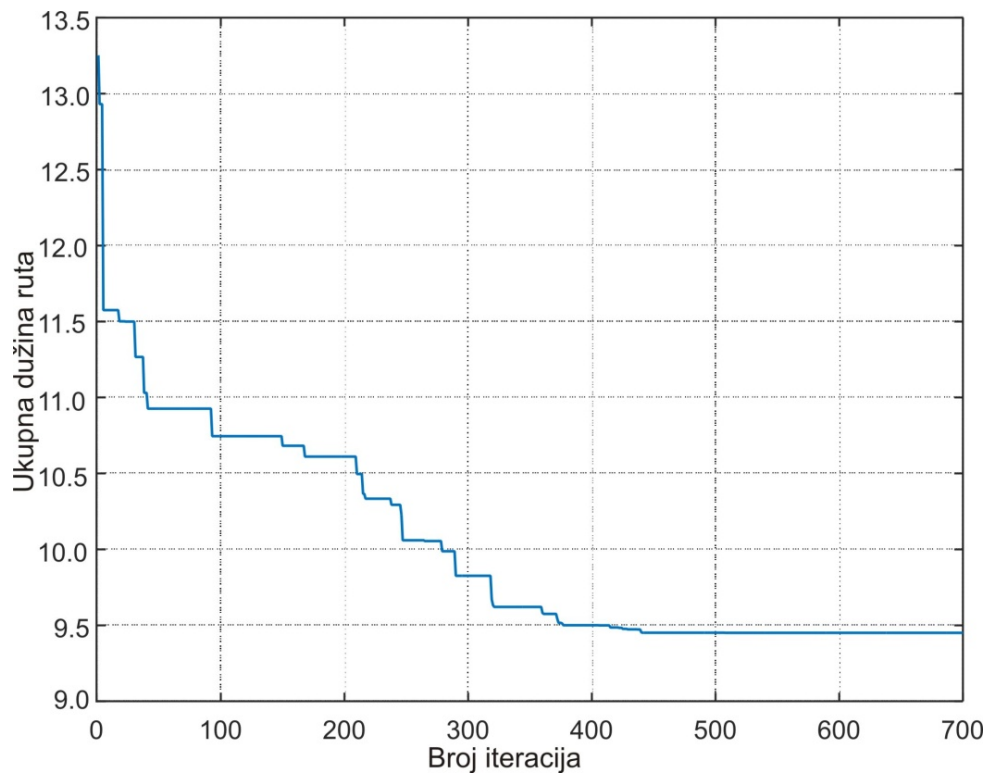


Slika 6.6 Grafički prikaz ruta *modela I* dobijenih SA algoritmom

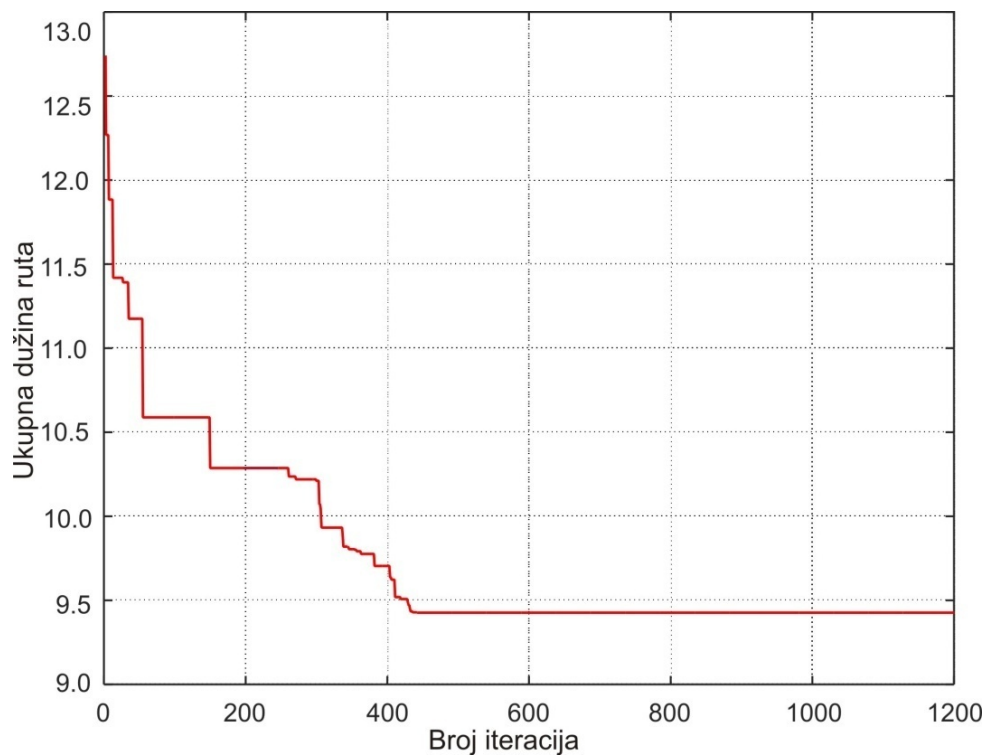
Рута 1	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 6 5 4 7 Укупна дужина руте = 2.72 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.40
Рута 2	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 8 15 3 2 Укупна дужина руте = 2.93 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 56.10
Рута 3	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 14 9 10 12 11 13 Укупна дужина руте = 2.32 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 56.10
Рута 4	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 16 18 19 20 21 17 Укупна дужина руте = 1.35 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 51.70

Slika 6.7 Isprojektovane rute *modela I* primenom SA algoritma

Na slikama (sl.6.8 i sl. 6.9) je prikazano kako utiče variranje ograničenja broja iteracija na ukupnu dužinu ruta. Na apcisi je prikazana promena dužina ruta a na ordinati je prikazan broj iteracija. SA ovih slika može se videti da se najbolje rešenje postiže sa oko 450 iteracija.



Slika 6.8 Promena ukupne dužine ruta u odnosu na broj iteracija 7e2



Slika 6.9 Promena ukupne dužine ruta u odnosu na broj iteracija 12e2

6.1.5 Rezultati optimizacije ruta za model I primenom IHS algoritma

Kao druga meta-heuristička metoda koja je korišćena za optimizaciju ruta za *model I* je IHSA. Detaljno objašnjenje IHS algoritma dato je u poglavlju 5.3.1. Pseudo kod za rešavanje *modela I* prikazan je algoritmom (alg. 6.4)

Algoritam 6.4 Pseudo kod IHS algoritma za rešavanje modela I

početak

```
Definisanje modela;  
Učitati početno rešenje  $U$  dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede;  
Definisati parametre IHS algoritma;  
Najbolje rešenje =  $U$ ;  
Inicilizacija harmonijske memorije;  
Ažurirati najbolje rešenje;  
Najbolje rešenje =  $U$ ;  
  for  $j = 1; j < NI; j = j + 1$ ;  
    for  $i = 1; i < NI; i = i + 1$ ;  
      if (rand < HMCR)  
         $U_1 = \text{int}(\text{rand} * \text{HMS}) + 1$ ;  
         $U_2 = \text{HM}(U_1, i)$ ;  
        novo rešenje( $i$ ) =  $U_2$ ;  
        if (rand < PAR)  
          if (rand < 0.5)  
             $U_3 = \text{novo rešenje}(i) + \text{rand} * \text{bw}$ ;  
            if ( $\text{PVB}_{\text{lower}}(i) \leq U_3$ )  
              novo rešenje( $i$ ) =  $U_3$ ;  
            end if  
          else  
             $U_3 = \text{novo rešenje}(i) + \text{rand} * \text{bw}$ ;  
            if ( $\text{PVB}_{\text{lower}}(i) \geq U_3$ );  
              novo rešenje( $i$ ) =  $U_3$ ;  
            end if  
          end if  
        else  
          novo rešenje( $i$ ) = randval( $\text{PVB}_{\text{lower}}(i), \text{PVB}_{\text{upper}}(i)$ );  
        end if  
      end for  
    Ažurirati harmonijsku memoriju;  
  end for
```

kraj

Za implementaciju ovog algoritma korišćeni su preporučeni parametri. Parametri IHSA za koje je vršena optimizacija ruta za *model I* su [Marković i sar., 2012]: veličina harmonijske memorije - $HMS = 10$; verovatnoća odabira iz memorije - $HMCR = 0.95$; verovatnoća podešavanja visine tona $PAR_{min} = 0.1$; $PAR_{max} = 0.85$; propusni opseg - $bw_{min} = 0.001$; $bw_{max} = 0.8$; broj improvizacija (broj iteracija) $NI = 1e3$ i $1e6$. Notacija koja je korišćena u definisanju SA pseudo koda je:

U - početno rešenje dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede,

$rand$ - slučajan broj iz intervala $[0,1]$,

PVB_{lower} - donja granica moguće vrednosti za rutu,

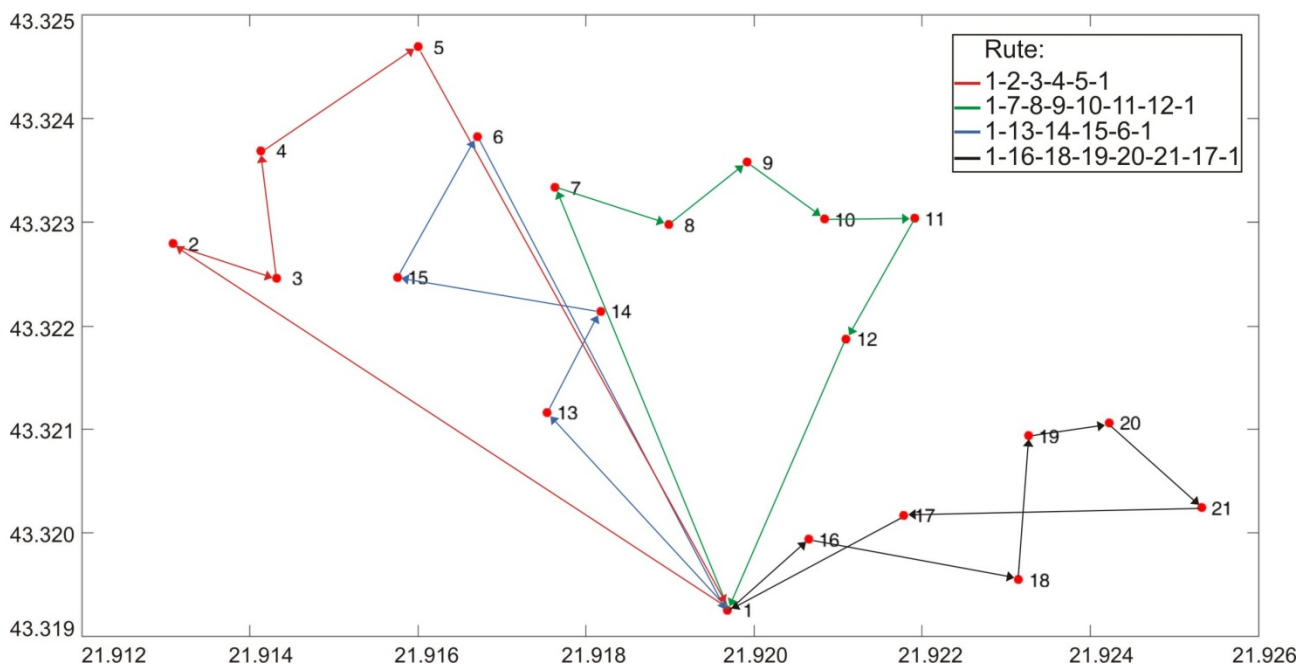
PVB_{upper} - gornja granica moguće vrednosti za rutu,

$randval$ - slučajni realni broj,

Kao početno rešenje *modela I* za primenu IHS algoritma korišćeno je rešenje koje je dobijeno primenom C-W-ovog algoritma uštede. Primenom IHSA sa prethodno navedenim parametrima za *model I* dobijene su četiri rute. Ukupna dužina svih ruta rešavanjem *modela I* primenom IHSA iznosi 9.41 km. Primenom ovog algoritma, sa preporučenim parametrima, dobija se rešenje koje je lošije od rešenja dobijenih primenom SA algoritma i algoritma 2-OPT pretrage. Pojedinačna dužina ruta i ispunjenost vozila prikazane su na slici (sl. 6.10), a izgled ruta na transportnoj mreži prikazan je na slici (sl. 6.11).

Рута 1	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 2 3 4 5 Укупна дужина руте = 3.45 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.40
Рута 2	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 7 8 9 10 11 12 Укупна дужина руте = 2.39 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 55.00
Рута 3	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 13 14 15 6 Укупна дужина руте = 2.22 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 57.20
Рута 4	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 16 18 19 20 21 17 Укупна дужина руте = 1.35 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 51.70

Slika 6.10 Isprojektovane rute *modela I* primenom IHS algoritma



Slika 6.11 Grafički prikaz ruta *modela I* dobijenih IHS algoritmom

6.2 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta i udaljenošću

U ovom poglavlju biće razmatrano rešavanje problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta i udaljenošću (u nastavku teksta *model II*). Kao i kod *modela I* glavni cilj rešavanja problema *modela II* jeste određivanje optimalnih ruta kojim će se kretati vozilo za sakupljanje komunalnog otpada. U ovom modelu rute se određuju primenom heurističkog algoritama uštede *Clarke-Wright* (C-W) a poboljšanje je izvršeno 2-OPT algoritmom kao i meta-heurističkim algoritmima Simulirano kaljenje (SA) i poboljšani algoritam harmonijskog pretraživanja (IHSA).

6.2.1 Opis *modela II*

Model II definisan je istom transportnom mrežom kao i *model I*. U transportnoj mreži (sl. 6.2) početni i krajnji čvor (depo) označen je sa "1". Ostali čvorovi su na transportnoj mreži označeni brojevima od 2 do 21 (tab. 6.1). Depo u ovom slučaju ne predstavlja deponiju, već predstavlja čvor koji se nalazi na 9 km od deponije.

Vozilo koje polazi iz depoa pretpostavlja se da je uvek prazno. Pre polaska vozila iz depoa pored kapaciteta vozila (Q) definisano je i vremensko ograničenje trajanja rute (T_{rij}). Nakon opsluge prvog čvora proverava se kapacitet vozila i vrši se provera vremena trajanja rute. Ukoliko kapacitet nije ispunjen i vreme trajanja rute nije prekoračeno opslužuje se drugi čvor, ukoliko je jedno od ograničenja prekoračeno vozilo se vraća u depo na pražnjenje. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se

ne opsluže svi čvorovi za posmatranu transportnu mrežu. Pri opsluživanju nije moguća parcijalna opsluga koja podrazumeva da se u čvoru zadovolji samo deo potražnje. U ovom modelu daljina od čvor i do čvora j izražena je vremenom trajanja rute. Kao i kod *modela I* i ovde se radi o zatvorenom sistemu usmeravanja vozila. Kontejneri za sakupljanje otpada su zapremine $1,1m^3$. Na lokacijama gde ima dva i više kontejnera njihova pozicija je definisana jednim čvorom odnosno jednom koordinatom.

U ovom modelu količina otpada po lokaciji je uzeta kao broj kontejnera pomnožen sa zapreminom kontejnera (isto kao i kod *modela I*). Matrica količina komunalnog otpada po čvorovima je prikazana tabelom (tab. 6.2). I ovde se radi sa pretpostavkom da su svi kontejneri maksimalno ispunjeni otpadom odnosno da je potražnja (količina otpada) unapred poznata.

Matrica vremena putovanja koja predstavlja vreme putovanja od čvora i do čvora j i od čvora j do čvora i prikazana je u Prilogu 2. U *modelu II* sakupljanje otpada predviđeno je jednim vozilom čiji je sistem praznjenja kontejnera i karakteristika isti kao kod *modela I*.

6.2.2 Matematička formulacija modela II

Rešenje *modela II* sastoji se u pronalaženju r ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa minimalnim troškovima i sa zadovoljavanjem sledećih uslova:

- svaka ruta treba da počne i da se završi na depou,
- količina otpada u depou je nula,
- svaki čvor se posećuje samo jednom,
- količina otpada po svakom čvoru je poznata,
- ukupna količina otpada koja je sakupljena u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila,
- vreme putovanja od čvora i do čvora j ne sme biti veće od vremena trjanja rute,
- vreme trajanja rute ne sme biti veće od unapred zadatog vremena trajanja rute za vozilo.

Za definisanje matematičke formulacije *modela II* korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste, za *model II* $m = 1$

n - broj čvorova iz kojih se odvozi otpad,

V - skup čvorova, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle polazi vozilo,

Q - maksimalni kapacitet vozila,

N_{ki} - broj kontejnera u čvoru i ($i \in V$),

q_i - količina otpada u čvoru i ($i \in V$); količina otpada u depou je nula,

t_{ij} - vreme potrebno da se pređe rastojanje između čvora i i čvora j ($i, j \in V$),

t'_{ij} - vreme potrebno da se pređe rastojanje između čvora i i čvora j bez vremena zadržavanja u čvorovima ($i, j \in V$),

c_{ij} - transportni troškovi između čvora i i čvora j ($i, j \in V$), pretpostavlja se da je $c_{ij} = t_{ij}$,

N_k - broj kontejnera po čvoru,

w_i - vreme čekanja kod i -tog čvora,

s_i - vreme opsluživanja čvora i ($i \in V$), odnosno vreme pražnjenja kontejnera čvora i ,

T_r - maksimalno dozvoljeno vreme putovanja za vozilo na ruti r .

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo posle čvora } i \text{ posećuje čvor } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V$$

$$z_{ik} \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo posetilo čvor } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V$$

Minimizacija funkcije:

$$\min F = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} \quad (6.10)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{i0} - \sum_{j=0}^n x_{0j} = 0 \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (6.11)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.12)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i z_i \leq Q \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.13)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} t_{ij} \leq T_r, \quad (6.14)$$

$$t_0 = s_0 = w_0 = 0 \quad (6.15)$$

Sa (6.10) je označena funkcija cilja *modela II*. Ograničenje (6.11) podrazumeva da svako vozilo koje krene iz depoa vraća se u taj isti depo. Ograničenje prikazano jednačinom (6.12) pokazuje da svaki čvor mora da bude posećen samo jednom od strane tačno jednog vozila. Ograničenje (6.13) podrazumeva da ukupna količina otpada u čvoru ne sme preći maksimalni kapacitet vozila. Ograničenje (6.14) predstavlja maksimalno vreme r -te rute, i to vreme ako drugačije nije naglašeno u depou je $T_r=0$. Ograničenje (6.15) definiše da su sva vremena u depou jednaka 0.

Kada se daljina grane odnosno udaljenost čvora i od čvora j izražava vremenom putovanja, tada se tom vremenu dodaje i vreme opsluživanja koje je vezano za svaki čvor, a predstavlja vreme

zadržavanja vozila u čvoru. U ovom modelu, vreme zadržavanja u čvorovima (w_i) za posmatranu transportnu mrežu se računa tako što se broj kontejnera (N_{ki}) pomnoži sa vremenom pražnjenja kontejnera (s_i) odnosno pomoću obrasca (6.16). Vreme pražnjenja kontejnera je uzeto da traje 1 min po kontejneru [JKP Mediana, 2017].

$$w_i = N_{ki} \cdot s_i \quad (6.16)$$

Primenom obrasca (6.15) dobijena su vremena pražnjenja kontejnera po čvorovima i prikazana su u tabeli (tab. 6.5).

Kada su sračunata vremena zadržavanja u čvorovima onda primenom obrasca (6.17) dobijamo vremena putovanja (t_{ij}):

$$t_{ij} = t'_{ij} + \frac{w_i}{2} + \frac{w_j}{2} \quad (6.17)$$

gde je t'_{ij} vreme putovanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada od čvora i do čvora j bez vremena zadržavanja u čvorovima transportne mreže.

Primenom obrasca (6.16) dobija se matrica vremena putovanja između svih parova čvorova za datu transportnu mrežu (Prilog 2). U matrici vremena putovanja od čvora i do čvora j i od čvora j do čvora i predstavljena su u minutima.

Za rešavanje *modela II* korišćena su dakle dva ograničenja: prvo ograničenje je kapacitet vozila $Q = 60 m^3$ a drugo ograničenje je vreme trajanja rute koje je za potrebe optimizacije ruta za *model II* uzeto $T_r = 60 min$.

Tabela 6.5 Vreme pražnjenja kontejnera po čvorovima

Čvor	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vreme pražnjenja [min]	18	17	11	8	14	21	4	9	8	4
Čvor	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Vreme pražnjenja [min]	4	15	11	12	5	8	7	11	8	8

6.2.3 Rezultati optimizacije ruta za model II primenom C-W-ovog algoritma uštede

Za dobijanje početnog rešenja *modela II* korišćen je C-W-ov algoritam uštede. Ovaj algoritam je izabran iz razloga što je kod *modela I* dao bolje početno rešenje u odnosu na Sweep-ov algoritam. U *modelu II* C-W-ov algoritam uštede pri određivanju ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada pored ograničenja kapaciteta ima i ograničenje vremena trajanja rute. Pseudo kod C-W-ovog algoritma uštede za rešavanje *modela II* prikazan je algoritmom (alg. 6.5). Pri projektovanju ruta nije dozvoljeno parcijalno ispunjavanje ograničenja, tj. moraju biti ispoštovana oba ograničenja.

Optimizacijom ruta za *model II* dobijene su četiri rute. Ukupno vreme trajanja ruta *modela II* iznosi 227,34 minuta (tab.6.7). Za ovako dobijene rute izvršeno je njihovo poboljšanje primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT, a variranjem ograničenja broja iteracija (1e3 i 1e5). Poboljšanja postignuta primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT u odnosu na početno rešenje dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede prikazano je u tabeli (tab. 6.6).

Tabela 6.6 Rezultati lokalne pretrage u odnosu na početno rešenje

Lokalna pretraga	Ukupno vreme trajanja rute	Poboljšanje u odnosu na C-W [%]
C-W	227.34	-
2-OPT 1e3	222.74	2.02
2-OPT 1e5	222.74	2.02

Algoritam 6.5: C-W algoritma uštede za rešavanje modela II

početak

Definisanje matrice rastojanja;

Definisanje Q ;

Definirati matricu potražnje po čvorovima;

Sračunati s' ;

Sortirati s' u nerastućem nizu;

Formirati delimičnu rutu;

Ispunjenost vozila = q_i ;

Vreme putovanja = t_{ij}

for za sve uštede iz niza

if ispunjena operativna ograničenja

if Ispunjenost vozila + $q_i \leq Q$

Vreme putovanja + $t_{ij} \leq T_r$

Ispunjenost vozila = q_i + Ispunjenost vozila

Vreme putovanja = t_{ij} + Vreme putovanja

Formiraj rutu

end if

end if

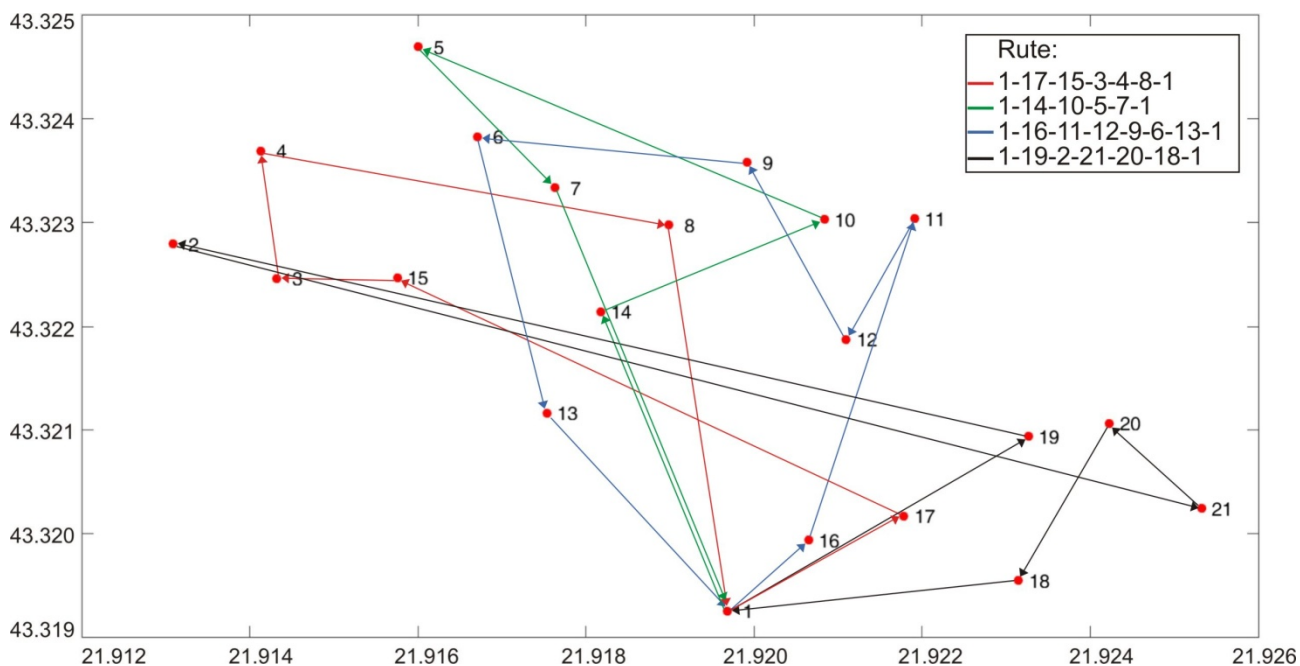
end for

Štampaj rute;

Štampaj ispunjenost vozila;

kraj

Rute dobijene C-W-ovim algoritmom uštede koje su poboljšane primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT pretrage prikazane su na slici (sl. 6.12), a pojedinačno vreme trajanja ruta i ispunjenost vozila prikazane su na slici (sl. 6.13).



Slika 6.12 Grafički prikaz ruta *modela II* dobijenih algoritmom 2-OPT pretrage

Рута 1	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 17 15 3 4 8 Укупно време трајања руте = 59.90 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 57.20
Рута 2	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 16 11 12 9 6 13 Укупно време трајања руте = 47.40 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 56.10
Рута 3	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 14 10 5 7 Укупно време трајања руте = 58.50 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 52.80
Рута 4	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 19 2 21 20 18 Укупно време трајања руте = 56.940 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 57.20

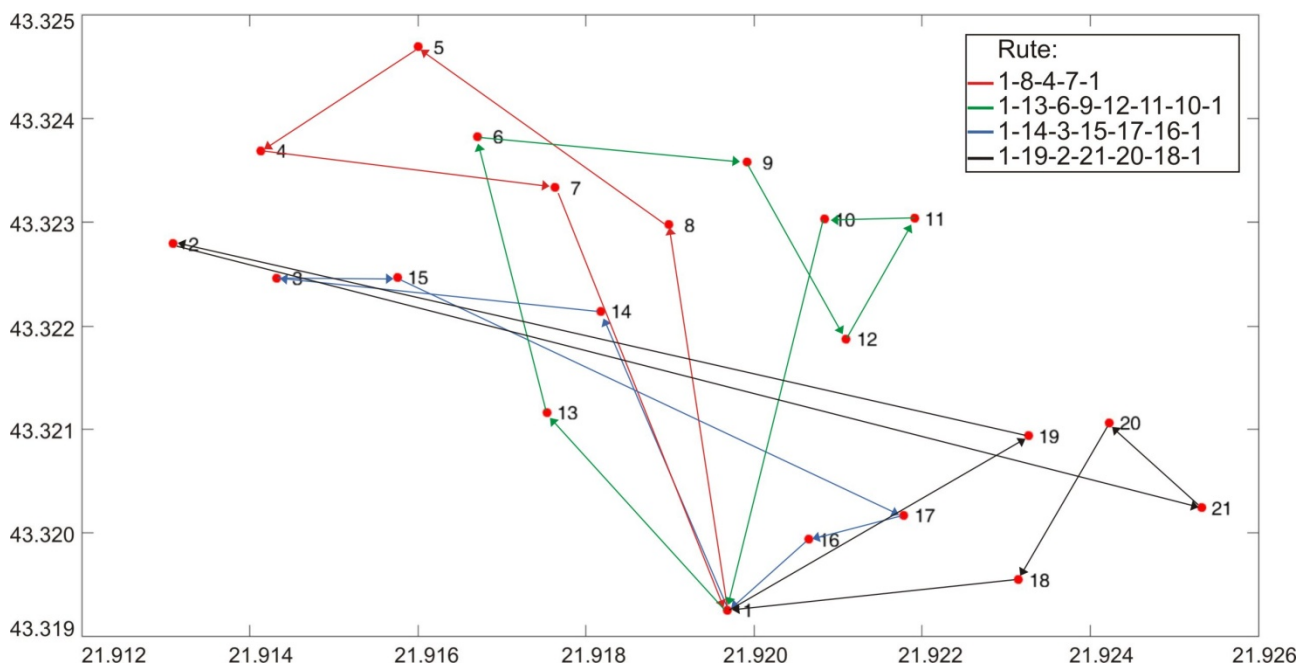
Slika 6.13 Isprojektovane rute *modela II* primenom algoritma 2-OPT pretrage

6.2.4 Rezultati optimizacije ruta za model II primenom SA algoritma

Optimizacija ruta za *model II* za datu transportnu mrežu (sl.6.3) izvršena je primenom meta-heurističkog algoritma SA. Parametri SA algoritma za koje je vršena optimizacija ruta za *model II* su [Kirkpatrick i sar., 1983]: početna temperatura $T_0 = 100$, faktor smanjenja temperatura $\alpha = 0.8$. Takođe je vršeno variranje ograničenja brojem iteracija. Pseudo kod SA algoritma prikazan je sa algoritmom (alg. 6.3). Ograničenje broja iteracija izvedeno je sa $7e2$ i $12e3$. Kao početno rešenje za rešavanje *modela II* primenom SA algoritma uzeto je rešenje koje je dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede. Primenom SA algoritma za *model II* dobijene su četiri rute. Ukupno vreme trajanja ruta optimizacijom ruta za *model II* primenom SA algoritma iznosi 222.01 minuta. Rute dobijene pomoću SA algoritma kao i pojedinačno vreme trajanja ruta i ispunjenost vozila prikazane su na slici (6.14) a izgled ruta na transportnoj mreži prikazan je na slici (sl. 6.15).

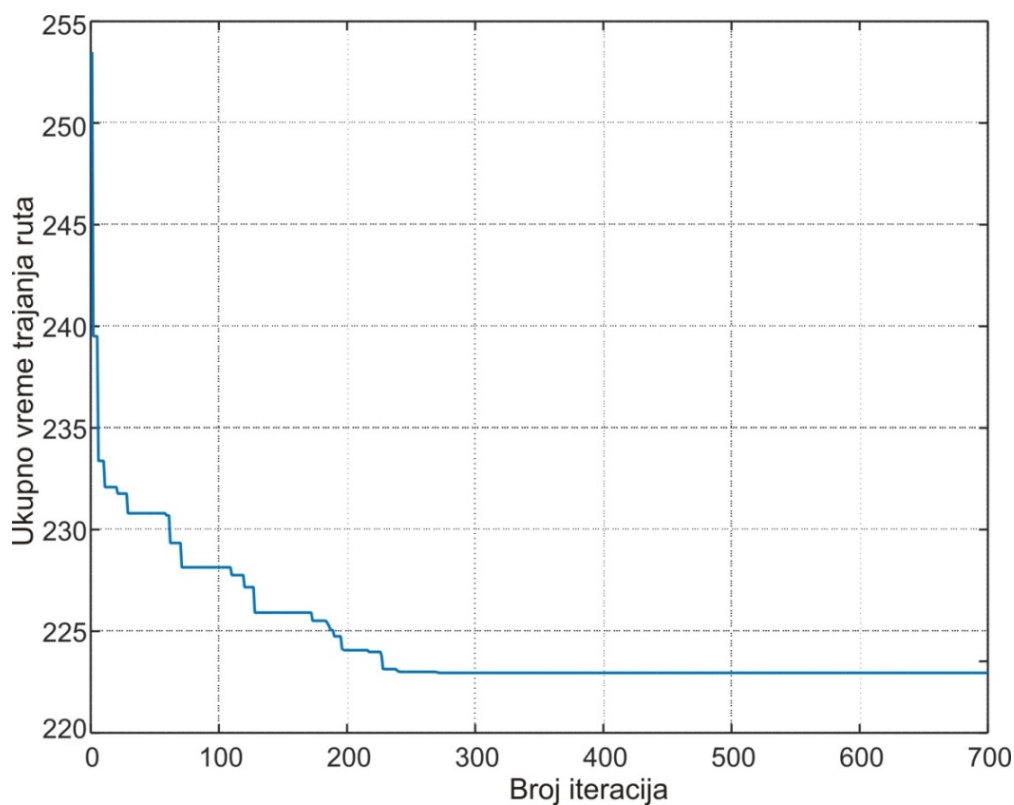
Рута 1
Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 8 5 4 7
Укупно време трајања руте = 53.5
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 48.40
Рута 2
Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 14 3 15 17 16
Укупно време трајања руте = 60.00
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 58.30
Рута 3
Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 13 6 9 12 11 10
Укупно време трајања руте = 51.57
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.4
Рута 4
Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 19 2 21 20 18
Укупно време трајања руте = 56.94
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 57.20

Slika 6.14 Isprojektovane rute *modela II* primenom SA algoritma

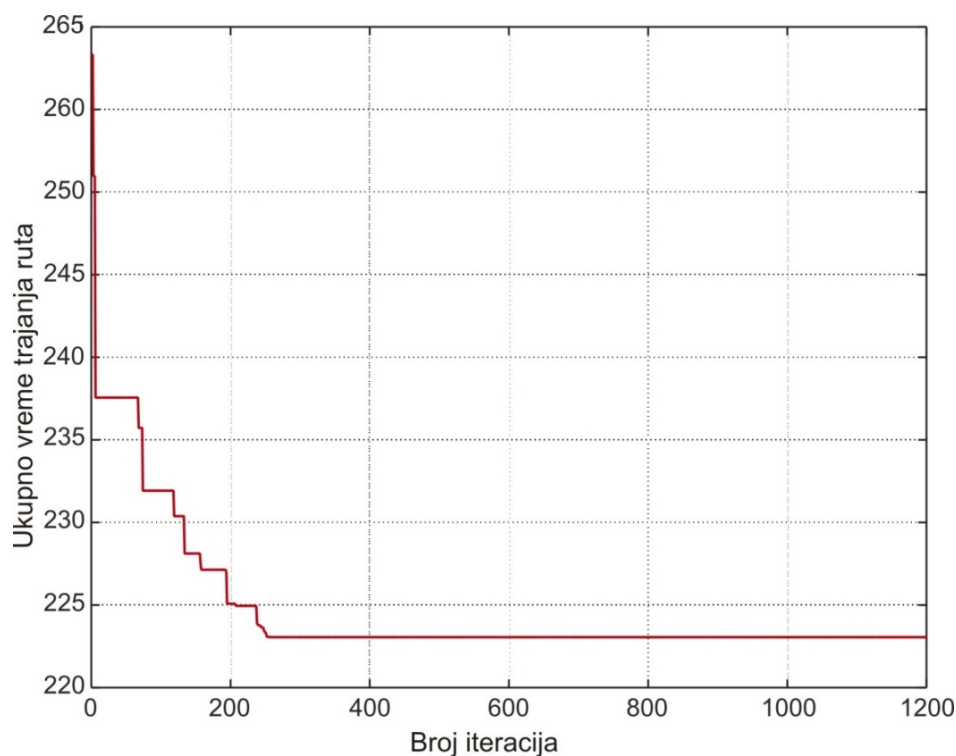


Slika 6.15 Grafički prikaz ruta *modela II* dobijenih primenom SA algoritma

Na slikama (sl. 16 i sl. 6.17) prikazano je kako utiče variranje ograničenja broja iteracija na ukupno vreme trajanja ruta. Na apcisi je prikazana promena ukupnog vremena trajanja ruta a na ordinati je prikazan broj iteracija. Za optimizaciju ruta za *model II* primenom SA algoritma sa predloženim parametrima može se videti da se dovoljno dobro rešenje dobija pri 270 iteracija.



Slika 6.16 Promena ukupnog vremena trajanja ruta u odnosu na broj iteracija $7e2$



Slika 6.17 Promena ukupnog vremena trajanja ruta u odnosu na broj iteracija $12e2$

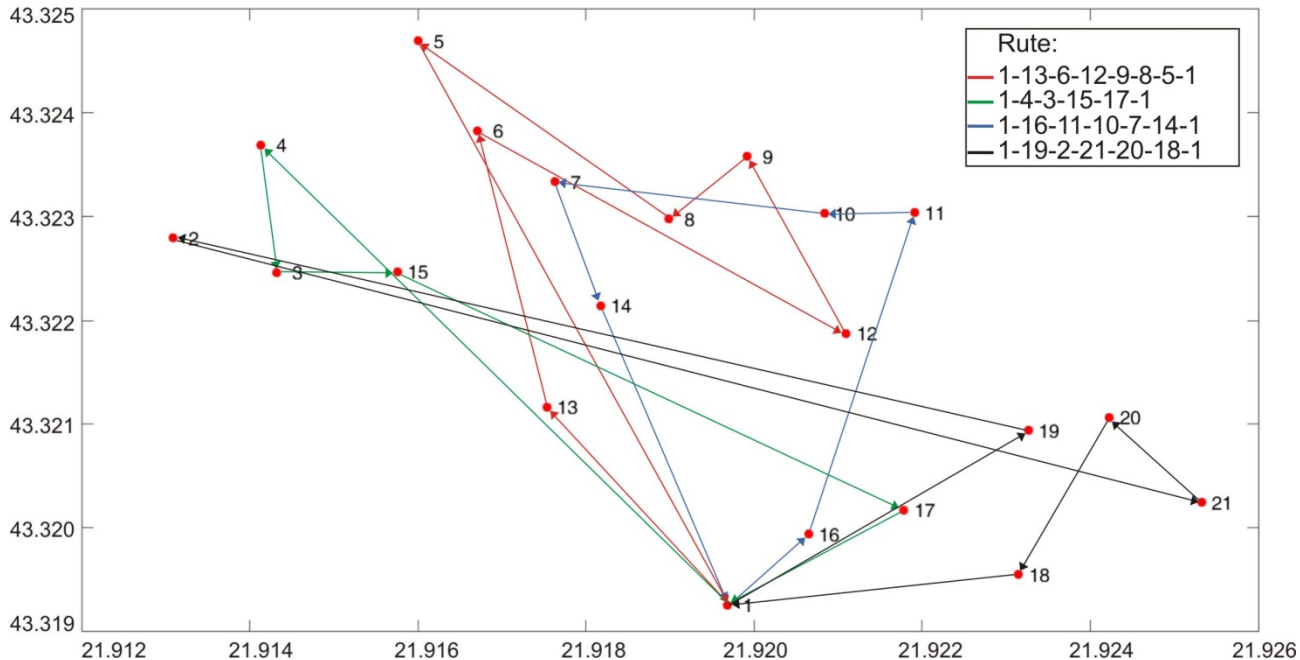
6.2.5 Rezultati optimizacije ruta za model II primenom IHS algoritma

Druga meta-heuristička metoda koja je korišćena za optimizaciju ruta za *model II* je IHSA. Parametri IHSA za koje je vršena optimizacija ruta za *model II* su [Marković i sar., 2012]: veličina harmonijske memorije - $HMS = 10$; verovatnoća odabira iz memorije - $HMCR = 0.95$; verovatnoća podešavanja visine tona $PAR_{min} = 0.1$; $PAR_{max} = 0.85$; propusni opseg - $bw_{min} = 0.001$; $bw_{max} = 0.8$; broj improvizacija (broj iteracija) $NI = 1e3$ i $1e6$. Pseudo kod IHS algoritma prikazan je algoritmom (alg. 6.4).

Primenom IHSA sa navedenim parametrima za *model II* dobijene su četiri rute. Ukupno vreme trajanja svih ruta *modela I* primenom IHS algoritma iznosi 223.206 min . Pojedinačno vreme trajanja ruta i ispunjenost vozila prikazane su na slici (sl. 6.18) a izgled ruta na transportnoj mreži prikazan je na slici (sl. 6.19).

<p>Рута 1 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 13 6 12 9 8 5 Укупно време трајања руте = 53.467 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.40</p>
<p>Рута 2 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 4 3 15 17 Укупно време трајања руте = 55.899 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 52.80</p>
<p>Рута 3 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 16 11 10 7 14 Укупно време трајања руте = 56.900 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 53.90</p>
<p>Рута 4 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 19 2 21 20 18 Укупно време трајања руте = 56.940 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 57.20</p>

Slika 6.18 Isprojektovane rute *modela II* primenom IHS algoritma



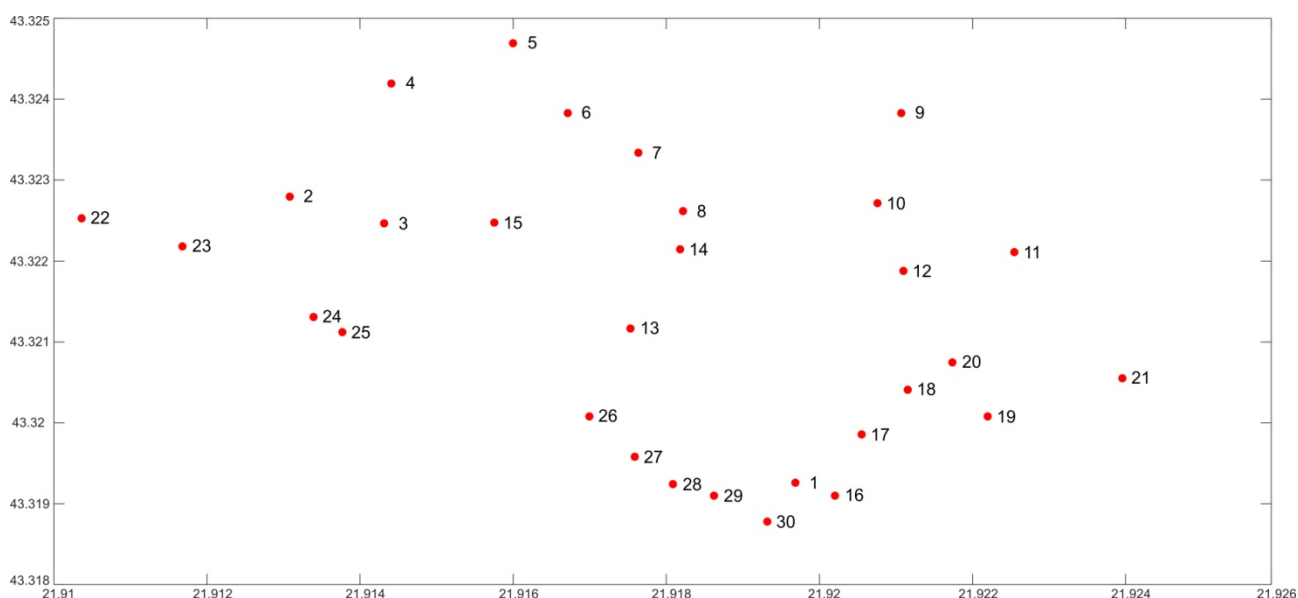
Slika 6.19 Grafički prikaz ruta *modela II* dobijenih primenom IHS algoritma

6.3 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom

U ovom poglavlju biće razmatrano rešavanje problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom količinom komunalnog otpada u čvorovima transportne mreže (u daljem tekstu *model III*). Kao i kod prethodna dva modela glavni cilj rešavanja *modela III* jeste određivanje optimalnih ruta kojim će se kretati vozilo za sakupljanje komunalnog otpada kada je količina komunalnog otpada u čvorovima stohastička, tj. slučajno promenljiva. U ovom modelu rute se određuju primenom heurističkih i meta-heurističkih algoritama. Algoritmi koji su primenjeni za rešavanje *modela III* su: C-W-ov algoritam uštede, algoritam lokalne pretrage 2-OPT i SA algoritam. Detaljan opis usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom potražnjom dat je u poglavlju 4.3.1.

6.3.1 Opis modela III

Model III definisan je transportnom mrežom koja se sastoji od depoa i 29 čvorova (sl. 6.20). Transportna mreža predstavlja "rejon" 103 prema podeli teritorije grada Niša od strane JKP "Mediana-Niš". Čvorovi na transportnoj mreži predstavljaju lokacije kontejnera koji su definisani koordinatama odnosno geografskom širinom i geografskom dužinom (tab. 6.7). Pored koordinata tabelom (tab. 6.7) je prikazan i broj kontejnera po svakom čvoru za posmatranu transportnu mrežu. U transportnoj mreži početni i krajnji čvor (depo) označen je sa "1". Ostali čvorovi su na transportnoj mreži označeni brojevima od 2 do 30.



Slika 6.20 Transportna mreža čvorova kontejnera za sakupljanje komunalnog otpada

Tabela 6.7 Koordinate i broj kontejnera za posmatranu transportnu mrežu *modela III*

Redni broj lokacije	Geografska širina	Geografska dužina	Broj kontejnera po lokaciji
Depo	43.319256	21.919682	
2.	43.322794	21.913082	4
3.	43.322464	21.914317	4
4.	43.324196	21.914412	2
5.	43.324696	21.916001	2
6.	43.323830	21.916709	3
7.	43.323338	21.917632	5
8.	43.322615	21.918220	1
9.	43.323829	21.921069	2
10.	43.322712	21.920759	2
11.	43.322109	21.922545	1
12.	43.321878	21.921097	1
13.	43.321168	21.917535	4
14.	43.322144	21.918179	2
15.	43.322471	21.915755	3
16.	43.319104	21.920206	1
17.	43.319854	21.920548	2
18.	43.320413	21.921150	2
19.	43.320076	21.922198	3
20.	43.320751	21.921739	2
21.	43.320552	21.923959	2
22.	43.322529	21.910364	1
23.	43.322181	21.911683	1
24.	43.321311	21.913388	1
25.	43.321119	21.913767	1
26.	43.320082	21.916993	1
27.	43.319579	21.917587	1
28.	43.319241	21.918091	1
29.	43.319097	21.918627	1
30.	43.318779	21.919317	1

U *modelu III* kontejneri za sakupljanje komunalnog otpada su tzv. podzemni kontejneri zapremine $3 m^3$ (sl. 6.21).

Na teritoriji "rejona" 103 u trenutku formiranja podataka o procenjenoj količini komunalnog otpada, uglavnom su već postavljeni podzemni kontejneri, osim na četiri lokacije ali za potrebe optimizacije ruta za *model III* pretpostavlja se da se na svim čvorovima transportne mreže nalaze podzemni kontejneri. U ovom modelu se ne razmatraju optimalne lokacije i broj kontejnera. Broj i lokacije kontejnera su izabrane na osnovu prethodnog rasporeda kontejnera od strane JKP "Mediana-Niš". Na lokacijama gde ima dva i više kontejnera njihova pozicija je definisana jednim

čvorom odnosno jednom koordinatom. Vozilo za sakupljanje komunalnog otpada polazi iz depoa i pretpostavlja se da je uvek prazno.



Slika 6.21 Podzemni kontejneri za sakupljanje komunalnog otpada – “rejon”103

Kao i kod prethodna dva modela i ovde važi pravilo da vozilo na transportnoj mreži sme da poseti svaki čvor, u toku jedne rute, samo jednom. Za razliku od prethodna dva modela, kod kojih je količina komunalnog otpada u svakom čvoru bila deterministička, tj. unapred poznata, u *modelu III* količina komunalnog otpada u svakom čvoru je stohastička, tj. slučajno promenljiva. Za potrebe optimizacije ruta za model *III* količina otpada je praćena u određenim vremenskim intervalima. Praćenje je vršeno u deset navrata za svaki čvor i to u različitim godišnjim dobima. Na svakom čvoru transportne mreže vršena je procena ispunjenosti kontejnera i to je beleženo u tabeli (tab. 6.10). Popunjavanje ove tabele vršeno je na osnovu kartona rutiranja koji je prikazan u Prilogu 4. Karton rutiranja sadrži sledeće informacije: numeričku oznaku čvora kontejnera; naziv mesta na kome se nalaze kontejneri; vreme dolaska, utovara i odlaska; broj kontejnera po čvoru i procena ispunjenosti kontejnera; pristupačnost kontejnerima; napomenu.

U *modelu III* sakupljanje otpada predviđeno je jednim vozilom. Ovo vozilo ima nadogradnju sa teleskopskom dizalicom koja je prilagođena podzemnim kontejnerima (sl. 3.8). Sakupljanje otpada sa “rejon” 103 predviđeno je tri puta nedeljno (ponedeljakom, sredom i petkom). Matrica najkraćih rastojanja za sve parove čvorova za zadatu transportnu mrežu je poznata i data je u Prilogu 3. Matrica najkraćih rastojanja je simetrična, a njeni elementi predstavljaju realno najkraće moguće rastojanje.

Tabela 6.8 Intervali praćenja procene količine otpada po čvoru transportne mreže

Čvor	Interval procene količine otpada									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	12.8	13.6	12.5	13.8	13.0	12.6	14.2	13.9	14.4	13.3
2.	13.3	14.4	13.9	12.6	14.2	13.0	13.8	12.5	13.6	12.8
3.	6.9	6.2	6.8	6.4	6.6	7.2	7.0	7.1	6.3	6.5
4.	6.4	6.8	6.2	6.9	6.5	6.3	7.1	7.0	7.2	6.6
5.	10.3	9.4	10.2	9.6	10.0	10.8	10.4	10.7	9.5	9.7
6.	16.6	18.0	17.4	15.8	17.8	16.2	17.2	15.6	17.0	16.0
7.	3.2	3.4	3.1	3.4	3.2	3.2	3.6	3.5	3.6	3.3
8.	6.9	6.2	6.8	6.4	6.6	7.2	7.0	7.1	6.3	6.5
9.	6.6	7.2	7.0	6.3	7.1	6.5	6.9	6.2	6.8	6.4
10.	3.1	3.4	3.6	3.7	3.1	3.0	3.4	3.4	3.5	3.2
11.	3.4	3.1	3.4	3.2	3.3	3.6	3.5	3.6	3.2	3.2
12.	13.3	14.4	13.9	12.6	14.2	13.0	13.8	12.5	13.6	12.8
13.	6.2	6.7	7.2	7.4	6.2	6.0	6.8	6.9	7.0	6.3
14.	9.6	10.2	9.4	10.3	9.7	9.5	10.7	10.4	10.8	10.0
15.	3.3	3.6	3.5	3.2	3.6	3.2	3.4	3.1	3.4	3.2
16.	6.9	6.2	6.8	6.4	6.6	7.2	7.0	7.1	6.3	6.5
17.	6.4	6.8	6.2	6.9	6.5	6.3	7.1	7.0	7.2	6.6
18.	10.3	9.4	10.2	9.6	10.0	10.8	10.4	10.7	9.5	9.7
19.	6.6	7.2	7.0	6.3	7.1	6.5	6.9	6.2	6.8	6.4
20.	6.4	6.8	6.2	6.9	6.5	6.3	7.1	7.0	7.2	6.6
21.	3.3	3.6	3.5	3.2	3.6	3.2	3.4	3.1	3.4	3.2
22.	3.1	3.4	3.6	3.7	3.1	3.0	3.4	3.4	3.5	3.2
23.	3.4	3.4	3.1	3.4	3.2	3.2	3.6	3.5	3.6	3.3
24.	3.3	3.6	3.5	3.2	3.6	3.2	3.4	3.1	3.4	3.2
25.	3.4	3.1	3.4	3.2	3.3	3.6	3.5	3.6	3.2	3.2
26.	3.2	3.4	3.1	3.4	3.2	3.2	3.6	3.5	3.6	3.3
27.	3.4	3.1	3.4	3.2	3.3	3.6	3.5	3.6	3.2	3.2
28.	3.3	3.6	3.5	3.2	3.6	3.2	3.4	3.1	3.4	3.2
29.	3.4	3.1	3.5	3.4	3.2	3.2	3.6	3.5	3.6	3.3
30.	12.8	13.6	12.5	13.8	13.0	12.6	14.2	13.9	14.4	13.3

6.3.2 Matematička formulacija modela III

Rešenje *modela II* sastoji se u pronalaženju r ruta za zadanu transportnu mrežu sa minimalnim troškovima i sa zadovoljavanjem sledećih uslova:

- postoji samo jedan depo i svaka ruta počinje i završava se na depou,
- lokacije depoa i čvorova su poznate,
- količina otpada u svakom čvoru je stohastička promenljiva sa normalnom raspodelom,
- kapacitet vozila za sakupljanje otpada je poznat,

- suma količine komunalnog otpada u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila.
- svaki čvor mora da bude posećen samo jednom.

Za definisanje matematičke formulacije *modela III* korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste, za *model III* $m = 1$,

n - broj čvorova iz kojih se odvozi otpad,

n_{uk} - broj čvorova na transportnoj mreži,

V - skup čvorova, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle polazi vozilo,

Q – maksimalni kapacitet vozila,

q_i - potražnja u i -tom čvoru, $i \in V$; potražnja u depou je nula. Pretpostavimo da je q_i stohastička promenljiva sa normalnom raspodelom,

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između čvora i i čvora j ; $i, j \in V$,

c_{ij} - transportni troškovi vozila između čvora i i čvora j ; $i, j \in V$, pretpostavlja se da je $c_{ij} = d_{ij}$,

q_{ij} - Kapacitet vozila nakon posete čvora i , a pre posete čvora j ,

N_k - broj kontejnera po čvoru.

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ij} \begin{cases} 1, & \text{ako vozilo posle čvora } i \text{ posećuje čvor } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V_0$$

$$z_i \begin{cases} 1, & \text{ako je vozilo posetilo čvor } i \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V_0, k \in m$$

Minimizacija funkcije:

$$\min F = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (6.18)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.19)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} - \sum_{i=0}^n x_{ji} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (6.20)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} + \sum_{j=1}^n x_{j0} = 2z_0 \quad (6.21)$$

$$P\left(\sum_{i \in V} q_i \sum_{j \in V} x_{ij} \leq Q\right) \geq \alpha \quad (6.22)$$

$$0 \leq q_{ij} \leq Q, \quad i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, n \quad (6.23)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (6.24)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, n \quad (6.25)$$

Funkcija minimizacije za *model III* je prikazana jednačinom (6.18). Ograničenje prikazano jednačinom (6.19) pokazuje da svaki čvor mora da bude posećen samo jednom a ograničenje prikazano jednačinom (6.20) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo nakon opsluživanja čvora j mora da napusti taj isti čvor. Ograničenje prikazano jednačinom (6.21) pokazuje da svako vozilo mora da započne rutu i završi istu u depou. Korišćenjem Ch-C uslova obezbeđuje se da je količina sakupljenog otpada na ruti manja od kapacitet vozila sa poznatom verovatnoćom što je predstavljeno ograničenjem (6.22). Ograničenje kapaciteta (6.23) pokazuje da opterećenje vozila ni u jednom trenutku ne prelazi kapacitet vozila. Ograničenja (6.24) i (6.25) definišu intervale promenljivih z_i i x_{ij} . Rešavanje ograničenja (6.22) je moguće korišćenjem Ch-C uslova.

Pretpostavlja se da je količina otpada po svakom čvoru u *modelu III* slučajna promenljiva sa normalnom raspodelom, koja se može predstaviti kao:

$$q_i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i^2) \quad (6.26)$$

gde je μ_i ukupna očekivana količina otpada za i -ti čvor, σ_i^2 standardno odstupanje (varianca) od količine otpada za i -ti čvor. Parametri μ_i i σ_i^2 mogu se napisati pomoću izraza

$$\mu_i = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n [E(q_i x_{ij})] \quad (6.27)$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n [Var(q_i x_{ij})] \quad (6.28)$$

gde je $E(q_i x_{ij})$ matematičko očekivanje normalne raspodele a $Var(q_i x_{ij})$ je varijanca odnosno parametar skaliranja normalne raspodele.

Ako se očekivana potražnja korisnika predstavi na sledeći način:

$$E(q_i x_{ij}) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [E(q_i x_{ij})] - Q \quad (6.29)$$

a standardno odstupanje kao:

$$Var(q_i x_{ij}) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [Var(q_i x_{ij})] \quad (6.30)$$

Korišćenjem izraza (6.29 i 6.30) može se preraditi Ch-C uslov uz ograničenja (6.22) u izraz (6.31).

$$P \left(\eta \leq - \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [E(q_i x_{ij})] - Q}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [Var(q_i x_{ij})]}} \right) \geq \alpha \quad (6.31)$$

Važno je naglasiti da izraz (6.31) važi ako i samo ako važi izraz (6.32):

$$\Phi^{-1}(\alpha) \leq -\frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [E(q_i x_{ij})] - Q}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [Var(q_i x_{ij})]}} \quad (6.32)$$

Izraz (6.32) se može napisati kao deterministički ekvivalent:

$$\Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [Var(q_i x_{ij})]} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n [E(q_i x_{ij})] \leq Q \quad (6.33)$$

gde je Φ standardna funkcija normalne raspodele a Φ^{-1} inverzna funkcija funkcije Φ .

Kako se pretpostavilo da je količina otpada slučajna promenljiva sa normalnom raspodelom to znači da rute kretanja vozila za sakupljanje otpada treba da se isprojektuju u uslovima neizvesnosti vezanim za količinu otpada, tj. vrednosti potražnje u čvorovima. U nastavku ovog poglavlja prikazani su rezultati optimizacije ruta za *model III*. Za optimizaciju ruta za *model III* parameter α uzima vrednost 0.8 [Liu i Iwamura, 1998].

6.3.3 Rezultati optimizacije ruta za *model III*

Na osnovu prethodno definisane matematičke formulacije i za analiziranu transportnu mrežu vršena je optimizacija ruta za *model III*. Prvi korak za rešavanje *modela III* jeste izračunavanje očekivane vrednosti količine komunalnog otpada (μ_i) i proveru verovatnoće (α). Ovaj korak je neophodan zbog stohastičkog karaktera količine komunalnog otpada po čvorovima transportne mreže. Na osnovu tabele (tab. 6.10) mogu se izračunati očekivane vrednosti količine komunalnog otpada (μ_i) za svaki čvor transportne mreže s obzirom da se radi o poznatoj raspodeli, tj. normalnoj raspodeli. Nakon sračunavanja očekivane vrednosti količine komunalnog otpada računa se varijanca (σ_i^2). Za računanje matematičkog očekivanja i varijance korišćena je Procedura 1 čiji je pseudo kod prikazan na slici (sl.27). Kada se sračunaju ova dva parametra onda se vrši provera verovatnoće (α). Algoritam (alg.6.6) predstavlja procedure za proveru verovatnoće. Poslednji korak ove procedure predstavlja proveru Ch-C uslova i ukoliko je ispoštovan onda se procedura nastavlja (TRUE) dok se u suprotnom prekida (FALSE). Notacija koja je korišćena za definisanje pseudo koda procedure 1 je:

sum - zbir količine otpada po čvorovima transportne mreže,

i - broj intervala praćenja procene količine otpada po čvorovima transportne mreže,

q_{ni} - procenjena količina otpada u čvoru,

P - verovatnoća

Algoritam 6.6: Procedura 1

Definisanje procenjene količine otpada po čvoru transportne mreže;

Definisanje Q ;

for $n = 1; n \leq n_{uk}; n = n + 1$;

$sum_n = 0$;

for $i = 1; i \leq 10; i = i + 1$;

$sum_n = sum_n + q_{ni}$;

$p_i = q_{ni} / sum_n$;

end for

end for

for $n = 1; n \leq n_{uk}; n = n + 1$;

 računati E_n ;

 računati σ_n ;

 računati $\Phi_{(\alpha)}$;

if $\left(\Phi_{(\alpha)} \leq \frac{E_n - Q}{\sqrt{\sigma_n}} \right)$

 uslov verovatnoće = TRUE;

else

 uslov verovatnoće = FALSE;

end if

end for

kraj

Sledeći korak pri rešavanju *modela III* jeste formiranje početnog rešenja. S obzirom da se radi o stohastičkom problemu, shodno prethodnom objašnjenju, problem se svodi na rešavanje determinističkog problema primenom izraza (6.32 i 6.33). Pri rešavanju prva dva modela videlo se da C-W-ov algoritam daje dobro početno rešenje. Iz tog razloga i u *modelu III* početno rešenje se dobija primenom C-W-ovog algoritma uštede. Za primenu C-W-ovog algoritma uštede parametar q_i zamenjen je parametrom μ_i . Na slici (sl. 28) prikazana je procedura odnosno pseudo kod za C-W-ov algoritam uštede. Primenom C-W-ovog algoritma uštede na rešavanje *modela III* dobijene su četiri rute čije je ukupna dužina 11.34 km i to rešenje predstavlja početno rešenje. Poboljšanje ovog rešenja vršeno je primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT i primenom SA algoritma.

Algoritam 6.7: Clarke-Wright-ov algoritam uštede za rešavanje modela III

početak

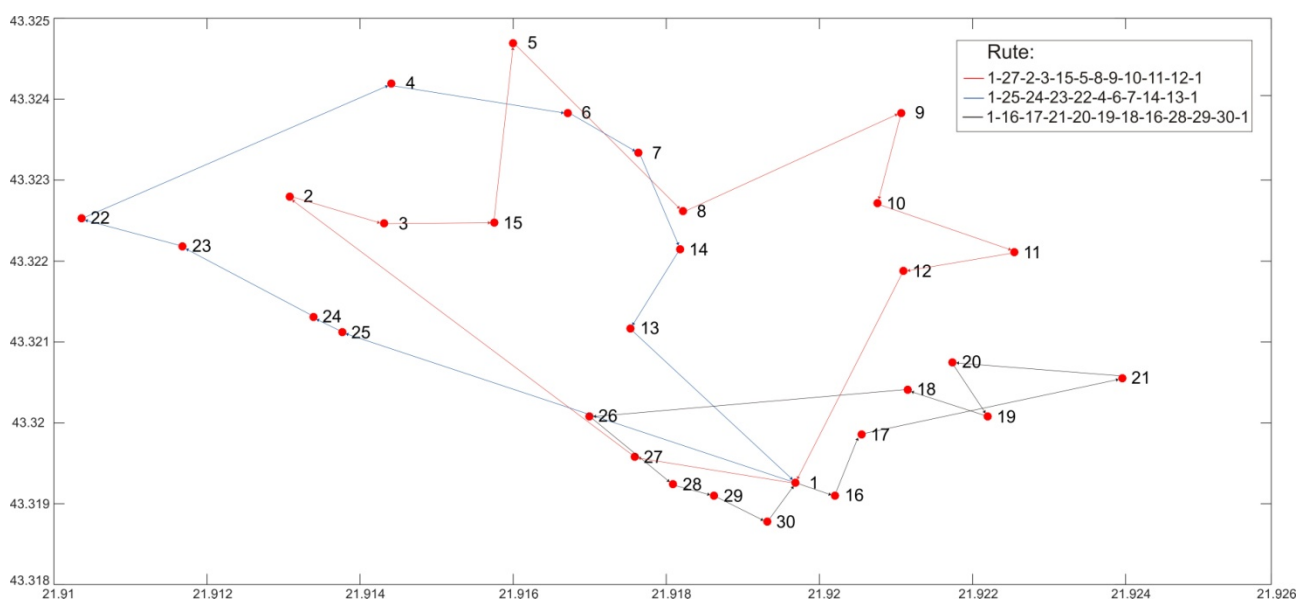
```
Definisanje matrice rastojanja;
Definisanje  $Q$ ;
Pozovi Proceduru 1;
Sračunati  $s'$ ;
Sortirati  $s'$  u nerastućem nizu;
Formirati delimičnu rutu;
Očekivana potražnja =  $\mu_i$ ;
  for za sve uštede iz niza
    if (uslov verovatnoće == TRUE)
      if ispunjena operativna ograničenja
        if Očekivana potražnja +  $\mu_i \leq Q$ 
          Očekivana potražnja =  $\mu_i$  + Očekivana
potražnja
          Formiraj rutu
        end if
      end if
    end if
  end for
Ispunjenost vozila = Očekivana potražnja;
Štampaj rute;
Štampaj ispunjenost vozila;
kraj
```

Primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT vršeno je prvo poboljšanje početnog rešenja *modela III*. Pri poboljšanju početnog rešenja vršeno je variranje broja iteracija (1e3 i 1e6). Primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT izvršeno je poboljšanje početnog rešenja. Primenom ovog algoritma dobijene su tri rute sa ukupnom dužinom 9.92 km. Na slici (sl.6.22) prikazana je pojedinačna dužina dobijenih ruta i ispunjenost vozila za svaku rutu, a na slici (sl. 6.23) prikazan je izgled ruta na transportnoj mreži.

Sledeći algoritam koji je primenjen za optimizaciju ruta za *model III* je SA algoritam. SA algoritam je primenjen za rešavanje *modela III* iz razloga što je pri rešavanju prva dva modela nudio bolja rešenja u odnosu na IHSA. To ne znači da je SA algoritam bolji od IHS algoritma za rešavanje ovakvih problema. Izbor parametra može uticati na konačno rešenje. Međutim u ovoj disertaciji se ne razmatra izbor optimalnih parametara za dati problem već su korišćeni preporučeni parametri.

<p>Рута 1 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 27 2 3 15 5 8 9 10 11 12 Укупно дужина руте = 3.82 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.71</p>
<p>Рута 2 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 25 24 23 22 4 6 7 14 13 Укупно дужина руте = 4.37 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 58.76</p>
<p>Рута 3 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 16 17 21 20 19 18 26 28 29 30 Укупно дужина руте = 1.73 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 50.34</p>

Слика 6.22 Испројектоване руте *modela III* применом алгоритма 2-OPT претраге



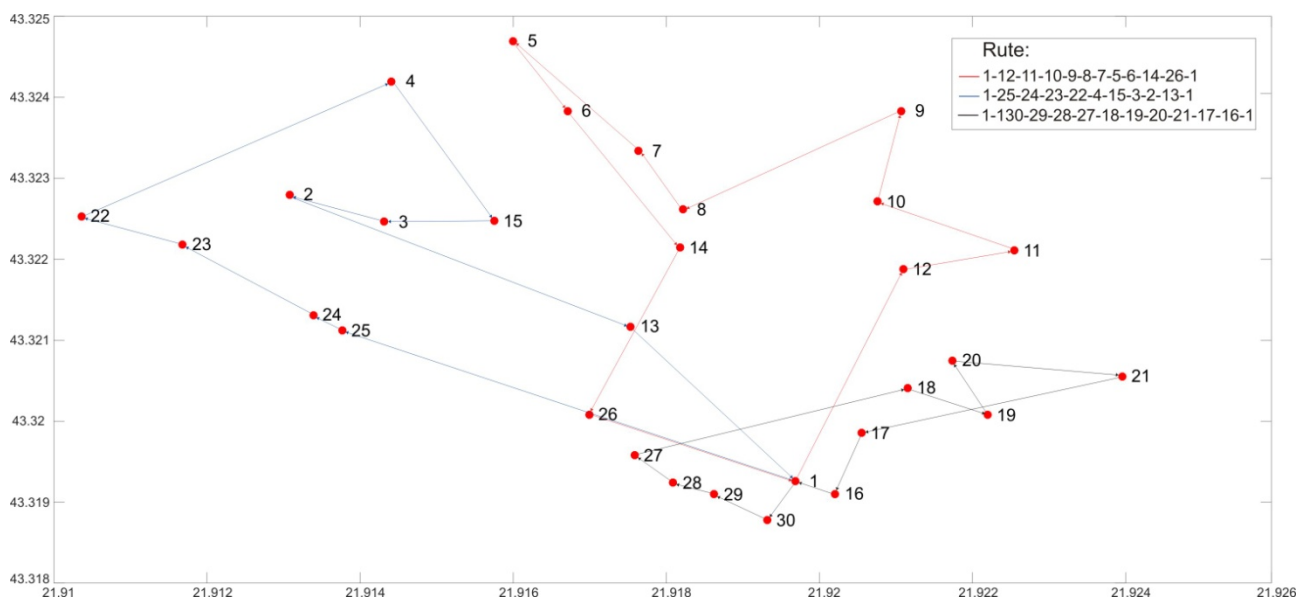
Слика 6.23 Графички приказ рута *modela III* добијених алгоритмом 2-OPT претраге

Parametri SA algoritma koji su korišćeni za rešavanje *modela III* su [Kirkpatrick i sar., 1983]: početna temperatura $T_0 = 100$, faktor smanjenja temperatura $\alpha = 0.8$. Takođe je vršeno variranje ograničenja brojem iteracija. Ograničenje broja iteracije izvedeno je sa $1e3$ i $1e6$. Primenom SA algoritma dobijene su tri rute čija je ukupna dužina 9.72 km .

Na slici (sl.6.24) prikazana je pojedinačna dužina dobijenih ruta i ispunjenost vozila za svaku rutu, a na slici (sl. 6.25) prikazan je izgled ruta na transportnoj mreži.

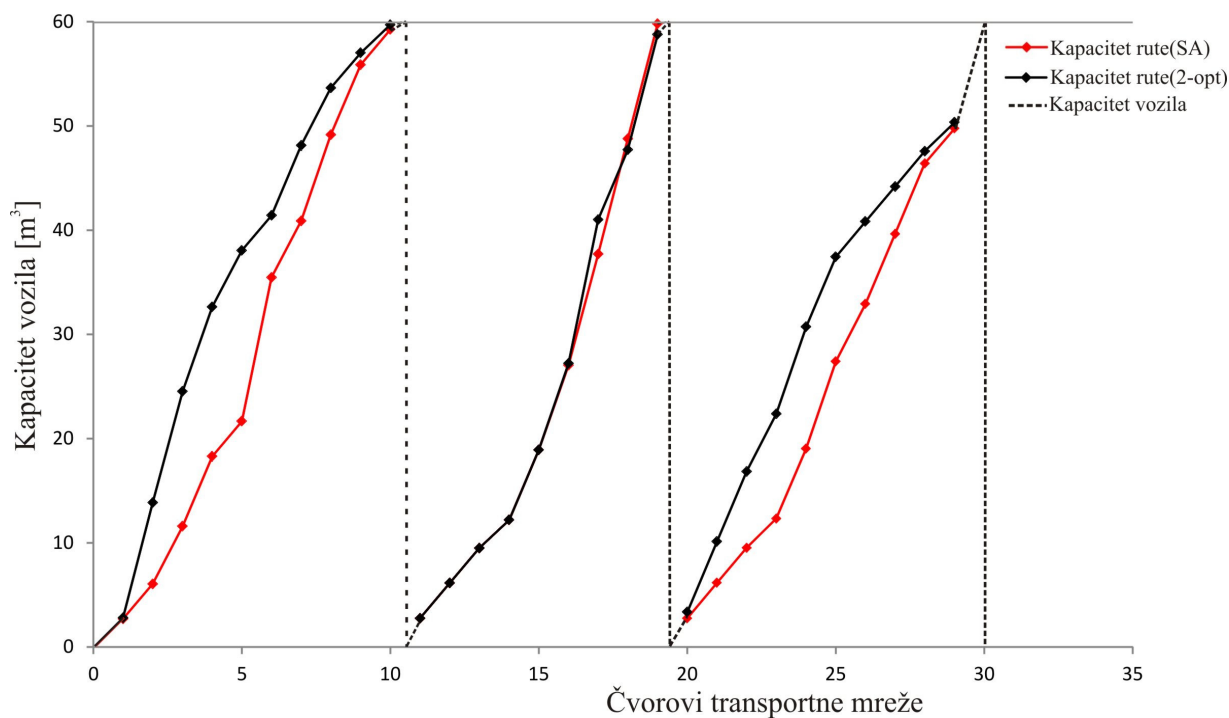
<p>Рута 1 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 12 11 10 9 8 7 5 6 14 26 Укупно дужина руте = 3.04 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.25</p>
<p>Рута 2 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 25 24 23 22 4 15 3 2 13 Укупно дужина руте = 4.95 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.80</p>
<p>Рута 3 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1. 1 30 29 28 27 18 19 20 21 17 16 Укупно дужина руте = 1.73 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 49.76</p>

Слика 6.24 Испројектоване руте *modela III* применом SA алгоритма



Слика 6.25 Графички приказ рута *modela III* добијених SA алгоритмом

Слика (сл. 6.26) илуструје упоредни графикон оптерећења возила по рутима добијених са алгоритмом локалне претраге 2-OPT и SA алгоритмом за *model III*. Са слике се види да је возило без оптерећења када полazi из депоа и може се посматрати промена оптерећења возила дуж руте. Како је већ наглашено максимални капацитет возила је $60m^3$. Такође, са слике се види да решење добијено применом алгоритма локалне претраге 2-OPT даје оптерећење возила у опсегу $59.71m^3$, $58.76m^3$ и $50.34m^3$ што представља око 93.8% искоришћености возила. Решење добијено применом SA алгоритма даје оптерећење возила у опсегу $59.25m^3$, $59.80m^3$ и $49.76m^3$ што такође представља око 93.8% искоришћености возила. Ово показује да је оправдана примена оба наведена алгоритма за решавање оваквих проблема.



Slika 6.26 Grafički prikaz očekivanog opterećenja vozila

6.4 Problem usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa vremenskim ograničenjem sa stohastičkom potražnjom i stohastičkim vremenom putovanja

U ovom poglavlju biće razmatrano rešavanje problema usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada sa ograničenjem kapaciteta sa stohastičkom količinom komunalnog otpada i vremenskim ograničenjem sa stohastičkim vremenom putovanja između parova čvorova transportne mreže (u daljem tekstu *model IV*). Glavni cilj rešavanja *modela IV* jeste određivanje optimalnih ruta kojim će se kretati vozilo za sakupljanje komunalnog otpada. Ovakav model predstavlja realan problem sa kojim se susreću kompanije koje se bave sakupljanjem komunalnog otpada. Za potrebe rešavanja *modela IV* korišćena je ista transportna mreža kao za rešavanje *modela III*. Razlika se ogleda samo u matrici najkraćih rastojanja. U *modelu IV* matrica najkraćih rastojanja predstavlja vreme putovanja između svih parova čvorova na transportnoj mreži. Ova vremena putovanja su stohastička. Detaljnije o stohastičkim vremenima putovanja biće predstavljeno u matematičkoj formulaciji *modela IV*.

6.4.1 Matematička formulacija modela IV

Za definisanu transportnu mrežu (sl. 6.25) $G = (V, A)$, gde je $V = \{0, \dots, n\}$ skup čvorova, A skup najkraćih rastojanja između svih parova čvorova, čvor "1" predstavlja depo a ostali čvorovi definisani su $V = \{2, \dots, n\}$. Vreme putovanja između svih parova čvorova transportne mreže je

stohastička promenljiva sa poznatom raspodelom, tj. sa normalnom raspodelom. Pri određivanju optimalnih ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada za definisanu transportnu mrežu moraju da se ispoštuju zadata ograničenja. Uvedimo sledeće pretpostavke:

- postoji samo jedan depo i svaka ruta počinje i završava se na depou,
- lokacije depoa i čvorova su poznate,
- količina otpada u svakom čvoru je stohastička promenljiva sa normalnom raspodelom,
- suma količine komunalnog otpada u jednoj ruti ne sme biti veća od kapaciteta vozila,
- vreme putovanja za svaku granu je stohastičko promenljivo sa normalnom raspodelom,
- vreme putovanja od čvora i do čvora j ne sme biti veće od vremena trajanja rute,
- kapacitet vozila za sakupljanje komunalnog otpada je poznat,
- vreme trajanja rute ne sme biti veće od zadatog vremena trajanja rute,
- svaki čvor mora da bude posećen samo jednom.

Za definisanje matematičke formulacije *modela IV* korišćena je sledeća notacija:

m - maksimalan broj vozila koja se koriste (za *model IV* $m = 1$),

n - broj korisnika koji se opslužuju,

V - skup čvorova, $V = \{1, 2, \dots, n\}$,

V_0 - depo, mesto odakle vozilo polazi,

Q - maksimalni kapacitet vozila,

t_{ij} - vreme putovanja vozila između čvora i i j . Pretpostavimo da je t_{ij} stohastička promenljiva sa normalnom raspodelom,

q_i - količina otpada u i -tom čvoru, $i \in V$. Pretpostavimo da je q_i stohastička promenljiva sa normalnom raspodelom,

d_{ij} - najkraće moguće rastojanje između čvora i i čvora j ($i, j \in V$),

c_{ij} - transportni troškovi vozila između čvora i i čvora j ; ($i, j \in V$), pretpostavlja se da je $c_{ij} = d_{ij}$,

v_{ij} - brzina kretanja vozila između čvora i i čvora j ,

T - maksimalno dozvoljeno vreme putovanja vozila na ruti r .

Q_{ij} - kapacitet vozila nakon posete čvora i , a pre posete čvora j ,

N_{ki} - broj kontejnera za i -ti čvor,

s_i - vreme opsluživanja čvora i ; ($i \in V$), tj. vreme praznjenja kontejnera za čvor i ,

w_i - vreme čekanja kod i -tog čvora.

Promenljive odlučivanja:

$$x_{ij} \begin{cases} 1, \text{ ako vozilo posle čvora } i \text{ posećuje čvor } j \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad \forall i, j \in V_0$$

$$z_i \begin{cases} 1, \text{ ako je vozilo posetilo čvor } i \\ 0, \text{ u suprotnom} \end{cases} \quad i \in V_0$$

Nakon uvedene notacije matematička formulacija *model IV* može se predstaviti na sledeći način [Tao i sar., 2012]:

$$\min F = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (6.34)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.35)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} - \sum_{i=0}^n x_{ji} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (6.36)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} + \sum_{j=1}^n x_{j0} = 2z_0 \quad (6.37)$$

$$P\left(\sum_{i \in V} q_i \sum_{j \in V} x_{ij} \leq Q\right) \geq \alpha \quad (6.38)$$

$$P\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T\right) \geq \alpha \quad (6.39)$$

$$\sum_{i=0}^n w_i \sum_{j=0}^n x_{ij} \leq T \quad (6.40)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (6.41)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, n \quad (6.42)$$

Funkcija minimizacije za *model IV* je prikazana jednačinom (6.34). Ograničenje prikazano jednačinom (6.35) pokazuje da svaki čvor transportne mreže mora da bude posećen samo jednom a ograničenje prikazano jednačinom (6.36) predstavlja očuvanje protoka vozila, odnosno vozilo nakon opsluživanja čvora j mora da napusti čvor j . Ograničenje prikazano jednačinom (6.37) pokazuje da svako vozilo mora da započne rutu i završi istu u depou. Korišćenjem Ch-C uslova obezbeđuje se da je količina sakupljenog otpada na ruti manja od kapaciteta vozila sa verovatnoćom α što je predstavljeno ograničenjem (6.38). Takođe korišćenjem Ch-C uslova obezbeđuje se da ukupno vreme putovanja vozila na ruti bude manje od maksimalnog dozvoljenog vremena na ruti što je predstavljeno jednačinom (6.39). Ograničenje (6.40) predstavlja da vreme čekanja kod i -tog čvora bude manje od vremena trajanja rute. Ograničenja (6.41 i 6.42) definišu intervale promenljivih z_i i x_{ij} . Rešavanje ograničenja (6.38 i 6.39) je moguće korišćenjem Ch-C uslova. U *modelu IV* količina komunalnog otpada po svakom čvoru transportne mreže je stohastička sa normalnom raspodelom. Ograničenje (6.30) je identično ograničenju (6.22) koje je korišćeno za

rešavanje *modela III*. Primena Ch-C uslova za rešavanje ovog ograničena može se videti u poglavlju 6.3.2 gde je prikazano i detaljno objašnjenje.

Vremena zadržavanja u čvorovima (w_i) transportne mreže se računaju primenom jednačine (6.16). Pretpostavlja se da je vreme pražnjenja kontejnera (s_i) 4 min po kontejneru. Ovo vreme je uzeto kao prosečno vreme trajanja pražnjenja podzemnih kontejnera sa vozilom koje ima nadogradnju sa teleskopskom dizalicom. Broj kontejnera na svakom čvoru transportne mreže prikazan je u tabeli (tab. 6.7). Vremena zadržavanja u čvorovima (w_i) za datu transportnu mrežu prikazana su u tabeli (tab. 6.9).

Tabela 6.9 Vremena pražnjenja kontejnera po čvorovima transportne mreže

Čvor	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vreme pražnjenja [min]	16	16	8	8	12	16	4	8	8	4
Čvor	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Vreme pražnjenja [min]	4	16	8	12	4	8	8	12	8	8
Čvor	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Vreme pražnjenja [min]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	

Za rešavanje *modela IV* pretpostavlja se da je vreme putovanja između čvorova transportne mreže stohastičko sa normalnom raspodelom, što se može napisati kao:

$$t_{ij} \sim \mathcal{N}(\mu_{ij}, \sigma_{ij}^2) \quad (6.43)$$

Parametar μ_{ij} definiše vreme putovanja od čvora i do čvora j koji se može predstaviti kao količnik rastojanja od čvora i do čvora j i brzine kretanja vozila između čvora i i čvora j odnosno $\mu_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_{ij}}$, a parametar σ_{ij}^2 predstavlja standardno odstupanja vremena putovanja od čvora i do čvora j . Nakon definisanja parametra μ_{ij} izraz normalne raspodele se može napisati kao:

$$t_{ij} \sim \mathcal{N}\left(\frac{d_{ij}}{v_{ij}}, \sigma_{ij}^2\right) \quad (6.44)$$

Ako se vreme putovanja vozila na ruti napiše kao:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij} x_{ij} - T$$

(6.45)

a standardno odstupanje vremena putovanja na ruti:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \quad (6.46)$$

onda izraz za normalnu raspodelu može se predstaviti kao:

$$\mathcal{N}\left(\frac{d_{ij}x_{ij}}{v_{ij}} - T, \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2\right) \quad (6.47)$$

Korišćenjem izraza (6.47) može se preraditi Ch-C uslov iz ograničenja (6.39) u izraz (6.48) [Tao i sar., 2012].

$$P \left(\eta \leq - \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{d_{ij} x_{ij}}{v_{ij}} - T}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2}} \right) \geq \alpha \quad (6.48)$$

Veoma je važno naglasiti da izraz (6.48) važi ako i samo ako važi izraz (6.49):

$$\Phi^{-1}(\alpha) \leq - \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{d_{ij} x_{ij}}{v_{ij}} - T}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2}} \quad (6.49)$$

Izraz (6.49) može se napisati kao deterministički ekvivalent:

$$\Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{d_{ij} x_{ij}}{v_{ij}} \leq T \quad (6.50)$$

gde je Φ standardna funkcija normalne raspodele a Φ^{-1} inverzna funkcija funkcije Φ .

6.4.2 Rezultati optimizacije ruta za model IV

Na osnovu prethodno definisane matematičke formulacije i za analiziranu transportnu mrežu vršena je optimizacija ruta za *model IV*. Prvi korak za rešavanje *modela IV* jeste definisanje matrice vremena putovanja između svih parova čvorova transportne mreže (t_{ij}). Kao prvi korak za definisanje ove matrice koristi se matrica najkraćih rastojanja koja je data u Prilogu 3. Matrica iz Priloga 3 predstavlja najkraća rastojanja između svih parova čvorova (d_{ij}) za posmatranu transportnu mrežu. Sledeći korak pri definisanju matrice t_{ij} jeste da se svi članovi matrice d_{ij} podele sa prosečnom brzinom kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada na transportnoj mreži (v_{ij}). Vrednost prosečne brzine kretanja vozila za rešavanje *modela IV* iznosi $0.48 \frac{km}{min}$. Ovaj podatak je dobijen od JKP "Mediana - Niš". Matrica vremena putovanja između svih parova čvorova transportne mreže prikazana je u Prilogu 5.

Za optimizaciju ruta za *model IV* maksimalni kapacitet vozila je $60 m^3$. Maksimalno dozvoljeno vreme trajanja rute je $100 min$. Pored ograničenja trajanja svih ruta postoji i vreme koje je potrebno da vozilo sa depoa ode do deponije, izvrši pražnjenje i vrati se u depo. Okvirno vreme koje je potrebno vozilu da od depoa ode do deponije, izvrši pražnjenje sakupljenog otpada i vrati se do depoa je oko $50 min$ [JKP Mediana, 2017]. Tako da kada se sumiraju sva ova vremena ne sme se prekoračiti vreme trajanja jedne smene odnosno $480 min$. Sledeći korak pri rešavanju *modela IV* jeste formiranje početnog rešenja. S obzirom da se radi o problemu sa stohastičkom količinom

komunalnog otpada po čvorovima i stohastičkom vremenu putovanja između čvorova transportne mreže, shodno prethodnom objašnjenju, problem se svodi na rešavanje determinističkog problema primenom izraza (6.32, 6.33, 6.49 i 6.50). Početno rešenje se dobija primenom C-W-ovog algoritma uštede. Algoritmom (alg.6.8) prikazana je procedura odnosno pseudo kod za C-W-ov algoritam uštede. Primenom C-W-ovog algoritma uštede na rešavanje *modela III* dobijene su četiri rute i to rešenje predstavlja početno rešenje *modela IV*. Poboljšanje ovog rešenja, kao i kod *modela III*, izvršeno je primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT i SA algoritmom.

Algoritam 6.8: Clarke-Wright-ov algoritam uštede za rešavanje modela IV

početak

Definisati matricu vremena putovanja;

Definisanje Q ;

Definisati T ;

Pozovi Proceduru 1;

Sračunati s' ;

Sortirati s' u nerastućem nizu;

Formirati delimičnu rutu;

Očekivana potražnja = μ_i ;

Očekivano vreme na grani = $t_{ij} + w_i$;

for za sve uštede iz niza

if (uslov verovatnoće == TRUE)

if ispunjena operativna ograničenja

if Očekivana potražnja + $\mu_i \leq Q$

if Očekivano vreme na grani + $(t_{ij} + w_i) \leq T$

Očekivana potražnja = μ_i + Očekivana potražnja;

Očekivano vreme na grani = $(t_{ij} + w_i)$ + Očekivano vreme na grani;

Formiraj rutu;

end if

end if

end if

end if

end for

Ispunjenost vozila = Očekivana potražnja;

Štampaj rute;

Štampaj ispunjenost vozila;

kraj

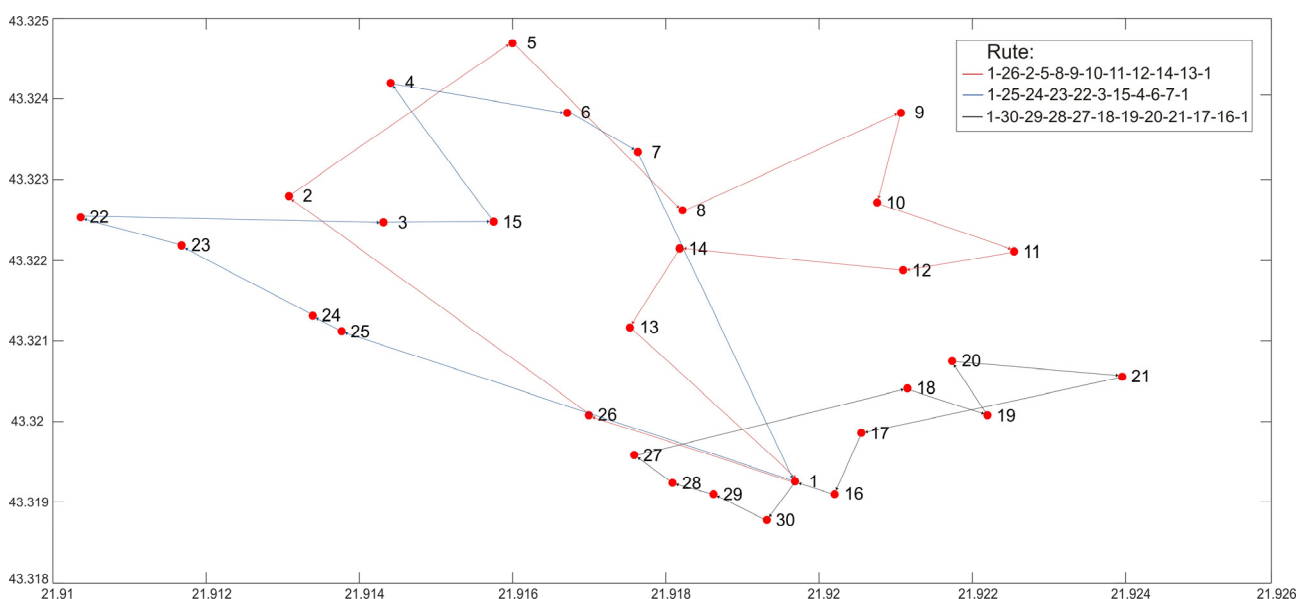
Kada je dobijeno početno rešenje onda se vrši njegovo poboljšanje. Prvo poboljšanje je izvedeno primenom algoritma 2-OPT pretrage. Za dobijanje optimalnog rešenja vršeno je variranje broja iteracija ($1e3$ i $1e6$). Primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT izvršeno je poboljšanje početnog rešenja u vidu smanjenja broja ruta a samim tim i smanjenje ukupnog vremena trajanja ruta. Primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT dobijene su tri rute sa ukupnim vremenom trajanja ruta 244.48 min . Na slici (sl.6.27) prikazana je pojedinačna dužina dobijenih ruta i ispunjenost vozila za svaku rutu, a na slici (sl. 6.28) prikazan je izgled ruta na transportnoj mreži.

Рута 1
 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 25 24 23 22 3 15 4 6 7
 Укупно време трајања руте = 89.88
 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.80

Рута 2
 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 26 2 5 8 9 10 11 12 14 13
 Укупно време трајања руте = 87.00
 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.25

Рута 3
 Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 30 29 28 27 18 19 20 21 17 16
 Укупно време трајања руте = 67.60
 Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 49.76

Slika 6.27 Isplanirane rute *modela IV* primenom algoritma 2-OPT pretrage



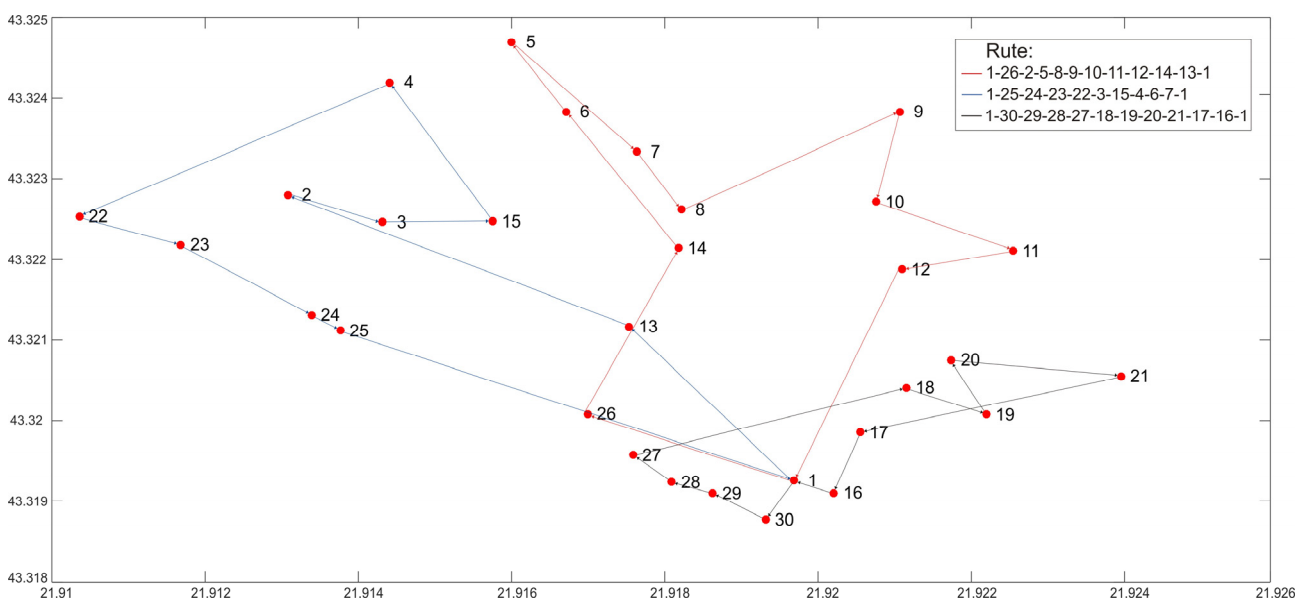
Slika 6.28 Grafički prikaz ruta *modela IV* dobijenih algoritmom 2-OPT pretrage

Sledeći algoritam koji je primenjen za optimizaciju ruta za *model IV* je SA algoritam. Parametri SA algoritma koji su korišćeni za rešavanje *modela III* su [Kirkpatrick i sar., 1983]: početna temperatura $T_0 = 100$, faktor smanjenja temperatura $\alpha = 0.8$. Takođe je vršeno variranje ograničenja brojem iteracija. Ograničenje broja iteracija izvedeno je sa $1e3$ i $1e6$. Primenom SA algoritma za dobijeno rešenje izvršeno je poboljšanje u odnosu na početno rešenje. Dobijene su tri rute čija je ukupno vreme vožnje $244.24min$.

Na slici (sl.6.29) prikazana je pojedinačna dužina dobijenih ruta i ispunjenost vozila za svaku rutu, a na slici (sl. 6.30) prikazan je izgled ruta na transportnoj mreži.

Рута 1	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 26 14 6 5 7 8 9 10 11 12	
Укупно време трајања руте = 82.33	
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.25	
Рута 2	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 13 2 3 15 4 22 23 24 25	
Укупно време трајања руте = 94.31	
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 59.80	
Рута 3	Рута се формира од чворова. Након последњег чвора враћа се на базни чвор 1.
1 30 29 28 27 18 19 20 21 17 16	
Укупно време трајања руте = 67.60	
Укупна количина сакупљеног отпада у возилу = 49.76	

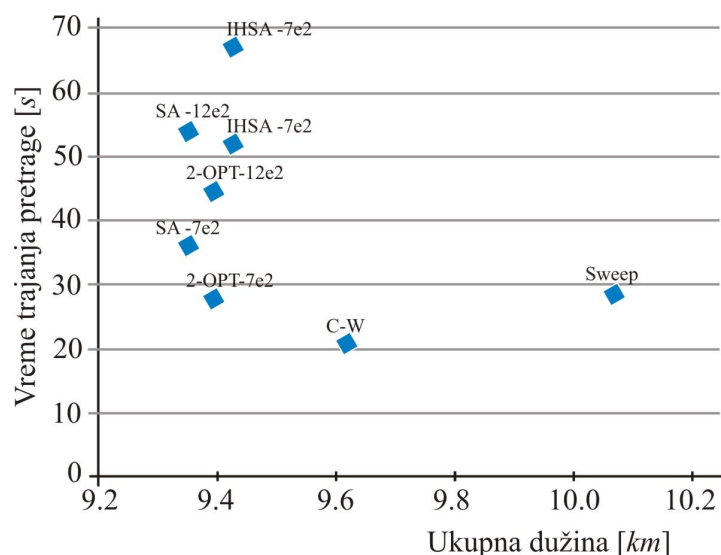
Slika 6.29 Isplanirane rute *modela IV* primenom SA algoritma



Slika 6.30 Grafički prikaz ruta dobijenih SA algoritmom

6.5 Analiza rezultata

Optimizacijom ruta za *model I* a primenom svih algoritama, Sweep, C-W, 2-OPT, SA i IHSA dobije ne su četiri rute za sakupljanje komunalnog otpada za zadatu transportnu mrežu. Primenom heurističkog algoritma uštede C-W dobijeno je najbolje početno rešenje. Da je ovaj algoritam pogodan za dobijanje dobrog početnog rešenja Marković i saradnici potvrđuju u svom radu [Marković i sar., 2010]. Za tako dobijeno početno rešenje izvršeno je poboljšanje primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT, SA algoritma i IHS algoritma. Primenom ovih algoritama dobijena su dovoljno dobra rešenja. Slika (sl. 6.31) pokazuje ukupnu dužinu ruta u odnosu na vreme trajanja pretrage. Sa slike se vidi da kod primene meta-heurističkih algoritama, sa povećanjem broja iteracija, vreme trajanja pretrage je nešto duže. To znači da za *model I* dobra rešenja se postižu pri $7e2$ iteracija. U tabeli (tab. 6.5) prikazane su ukupne dužine ruta dobijene primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT, SA algoritma i IHS algoritma.



Slika 6.31 Odnos ukupnih dužina ruta i vremena potrebna za izvođenje algoritma rutiranja

Tabela 6.10 Rezultati optimizacije ruta za *model I* u odnosu na početno rešenje

Lokalna pretraga	Ukupna dužina rute [km]	Poboljšanje u odnosu na C-W [%]
SA 7e2	9.32	3.017
SA 12e2	9.32	3.017
2-OPT 7e2	9.38	2.393
2-OPT 12e2	9.38	2.393
IHSA 1e3	9.41	2.081
IHSA 1e6	9.41	2.081

Optimizacijom ruta za *model II* a primenom C-W-ovog algoritma uštede, algoritma lokalne pretrage 2-OPT, SA algoritam i IHS algoritam dobijene su četiri rute za sakupljanje komunalnog otpada za zadataku transportnu mrežu. Primenom heurističkog algoritma uštede C-W-a dobijeno je početno rešenje. Za tako dobijeno početno rešenje izvršeno je poboljšanje primenom algoritma lokalne pretrage 2-OPT, SA algoritma, IHS algoritma. Primenom ovih algoritama, sa preporučenim parametrima, dobijena su dovoljno dobra rešenja. U tabeli (tab. 6.8) prikazano je ukupno vreme trajanja ruta dobijeno primenom svih algoritama kao i dobijeno poboljšanje nad početnim rešenjem koje je dobijeno C-W-ovim algoritmom uštede. Neki od zaključaka za rezultate dobijenih optimizacijom ruta za *model II* za razmatranu transportnu mrežu su: C-W-ov algoritam uštede daje dovoljno dobro početno rešenje; svi primenjeni algoritmi daju dovoljno dobra rešenja u prihvatljivom vremenskom intervalu; odstupanje od dobijenog minimalnog rešenja je malo (oko jedan procenat). Za razliku od *modela I* gde je ograničenje samo kapacitet vozila, kod *modela II* ograničenje je i vremensko trajanje rute što ga čini približnijim realnom stanju na terenu. Međutim, da bi model bio što približniji realnom stanju na terenu potrebno je uvesti stohastičke zahteve u pogledu količine komunalnog otpada po čvorovima kao i stohastičko vreme trajanja rute.

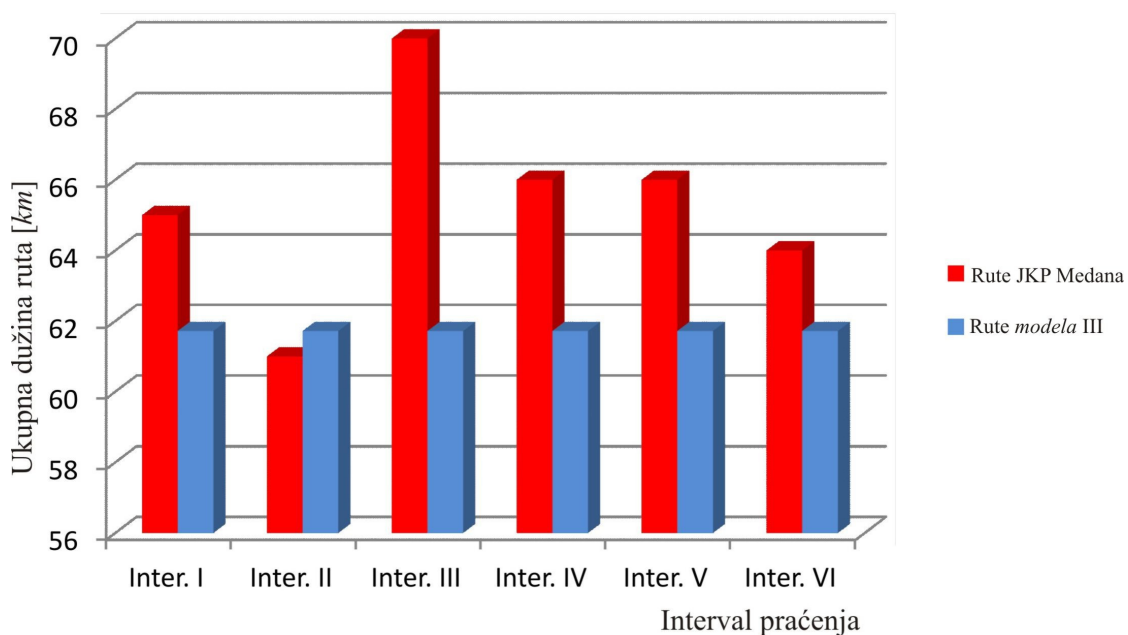
Tabela 6.11 Rezultati optimizacije ruta za *model II* u odnosu na početno rešenje

Lokalna pretraga	Ukupno vreme trajanja rute [min]	Poboljšanje u odnosu na C-W [%]
C-W	226.95	-
2-OPT 1e3	223	1.74
2-OPT 1e5	223	1.74
SA 7e2	222.01	2.18
SA 12e3	222.01	2.18
IHSA	223.205	1.65

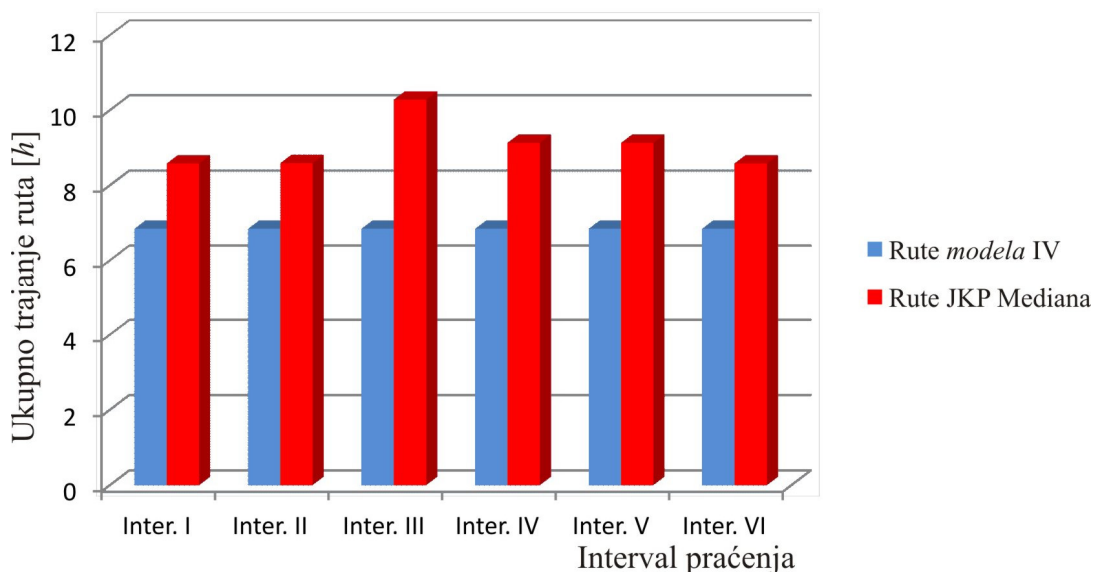
Optimizacijom ruta za *model III* i *model IV* primenom heurističkih i meta-heurističkih algoritama dobijene su rute kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada na "rejonu" 103 opština Medijana, grad Niš. Poboljšanja koja donose ovako isprojektovane rute u odnosu na postojeće rute kretanja vozila JKP "Mediana-Niš" odnose se na smanjenje ukupne dužine puta i smanjenje ukupnog vremena rada vozila koja sakupljaju komunalni otpad. Na slici (sl. 6.32) prikazan je odnos ukupne dužine ruta po danu koje su dobijene rešavanjem *modela III* i ruta kretanjem vozila za sakupljanje komunalnog otpada JKP "Mediana-Niš". Ovaj odnos je prikazan za šest intervala gde jedan interval uzima u obzir dva meseca. Sa navedene slike vidi se da su rute

modela III kraće za pet intervala, a da je u drugom intervalu nešto kraća ruta kojom se kreću vozila JKP “Mediana-Niš”. Prosečna dužina ruta kretanja vozila JKP “Mediana”-Niš za sakupljanje komunalnog otpada na “rejonu” 103 iznosi 65.33 *km/dan*, a dužina ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada, za isti “rejon”, dobijena rešavanjem *modela III* iznosi 59.82 *km/dan*. U Prilogu 6 je prikazan mesečni izveštaj JKP “Mediana”-Niš za sakupljanje komunalnog otpada na “rejonu” 103.

Na slici (sl. 6.32) prikazan je odnos utrošenog vremena po danu za rute koje su dobijene rešavanjem *modela IV* i rute koje koriste vozila za sakupljanje komunalnog otpada JKP “Mediana-Niš”. Sa ovog grafikona vidi se da rute *modela IV* traju kraće u odnosu na rute koje koriste vozila JKP “Mediana”-Niš.



Slika 6.32 Grafički prikaz ukupne dužine ruta *modela III* i postojećih ruta JKP “Mediana” Niš



Slika 6.33 Grafički prikaz trajanja ruta *modela IV* i postojećih ruta JKP “Mediana” Niš

Prosečno vreme trajanje ruta dobijeno rešavanjem *modela IV* iznosi 6.84 *h/dan*, a prosečno vreme ruta kretanja vozila JKP "Mediana-Niš", za "rejon" 103 je 9.05 *h/dan*. Sa slika (sl. 6.31 i sl. 6.32) jasno se vidi da je postiguta optimizacija ruta kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada na teritoriji "rejon" 103. Razvijeni *modeli III* i *IV* predstavljaju realne modele, odnosno sagledani su svi parametri koji mogu da utiču na rad vozila za sakupljanje komunalnog otpada u jednom urbanom području.

U nastavku disertacije biće predstavljen dinamički model usmeravanja vozila sa stohastičkim količinama komunalnog otpada i stohastičkim vremenom kretanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada. Dinamički model biće zasnovan na razvijenim *modelima III* i *IV*.

Poglavlje 7

RAZVOJ KONCEPTUALNOG MODELA EKSPERTNOG SISTEMA ZA DINAMIČKO USMERAVANJE VOZILA ZA SAKUPLJANJE KOMUNALNOG OTPADA

Rešenja koja se odnose na poboljšanje usmeravanja vozila za sakupljanje komunalnog otpada (*eng. vehicle routing problem for waste collection - VRPWC*) prave razliku između operativnog planiranja rute kretanja vozila pre početka vožnje i dinamičkih uslova u toku realizuje vožnje, odnosno u toku sakupljanja komunalnog otpada. Vrlo često, usled zagušenja saobraćaja, unapred isprojektovane rute je nemoguće realizovati. Iz tog razloga ako se uzmu u obzir realna stanja u planiranje ruta moguće je smanjiti pređeni put vozila, kao i vreme za sakupljanje komunalnog otpada. Izlazni rezultati bili bi pozitivnii i na troškove kompanije i na zaštitu životnee okoline. U poslednjih decenija postignut je veliki pomak u implementaciji informaciono-komunikacionih tehnologija na vozilima za sakupljanje komunalnog otpada. Primena informaciono-komunikacionih tehnologija u usmeravnaju vozila, raspoređivanja i praćenja vozila doprinosi kompanijama povećanje efikasnosti poslovanja [Hubbard, 2003].

Osim poboljšanja operativnog planiranja ruta kretanja vozila, efikasnost celokupnog sistema je moguće unaprediti i poboljšanjem transportne mreže. Rešenja koja se odnose na poboljšanje transportnih mreža sve češće se primenjuju u praksi. Rešenja koja se bave VRP-om vrše poređenja između planiranih ruta kretanja vozila sa i bez uzimanja u obzir mogućih događaja tokom same realizacije (npr., obustava saobraćaja na nekoj deonici transportne mreže). Svakako, kada se uzimaju u obzir mogući događaji pri projektovanju ruta dobijaju se bolje performance konačnog rešenja, a rezultati su povećanje efikasnosti i smanjenje negativnih uticaja po životnoj sredini. Rešenja koja uzimaju u obzir podatke iz realnog vremena [Pillac i sar., 2013] nemaju za cilj samo da unaprede

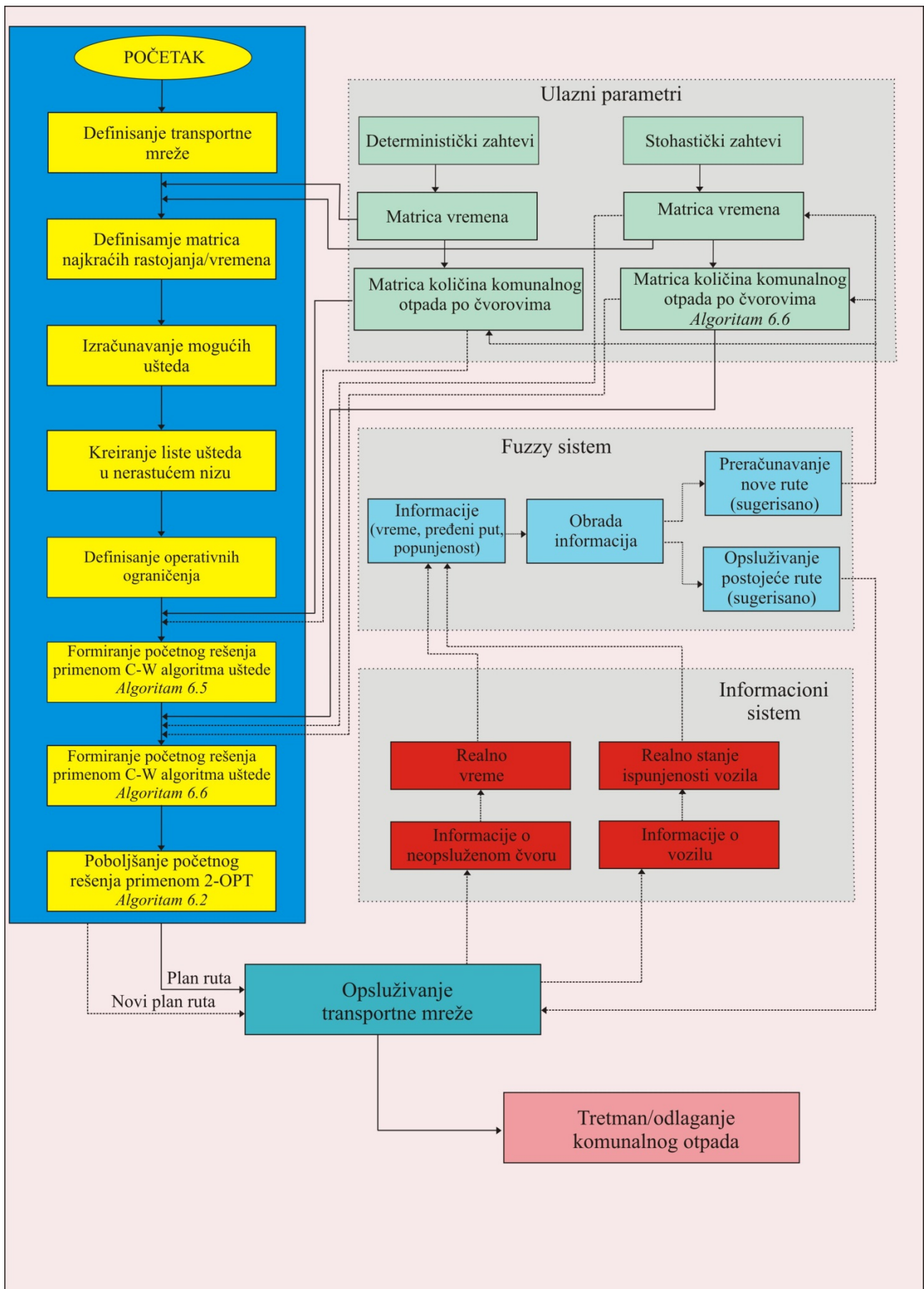
VRP na bazi verovatnoće događaja, već da daju što efikasnija rešenje u realnom vremenu, u uslovima realizacije događaja.

U praksi se često dešava da kada vozila krenu da izvršavaju zadate naloge (rute) naiđu na neki problem usled čega ne mogu da ispoštuju isplanirane rute. Najčešći problemi sa kojima se susreću operateri vozila za sakupljanje komunalnog otpada jesu: saobraćajne nezgode na ulicama zbog čega se na neko određeno vreme blokira ta ulica; nepropisno parkirana vozila pa je onemogućen pristup kontejnerima; neadekvatno odložen otpad zbog čega se prekoračuje isplanirano vreme, radovi na određenim deonicama ulica itd. Svi ovi problemi zahtevaju intervenciju u realnom vremenu kako bi se sakupio komunalni otpad u predviđenom vremenskom intervalu, tj. kako bi se ispoštovala operativna ograničenja.

Kako bi se razvio logistički model za optimalno sakupljanje komunalnog otpada u disertaciji prvo su razmatrani deterministički modeli VRP-a sa ograničenjem kapaciteta vozila i ograničenjem vremena trajanja ruta (*model I* i *model II* šesto poglavlje). Ovi modeli su poslužili za testiranje heurističkih metoda, odnosno da se vidi koja metoda daje dovoljno dobro rešenje. Iz tog razloga za razvoj konceptualnog modela izabran je C-W-ov algoritam uštede iz grupe heurističkih algoritama za dobijanje početnog rešenja, a 2-OPT pretraga za poboljšanje početnog rešenja. Nakon testiranja determinističkih modela razvijeni su VRP modeli sa stohastičkim zahtevima (*model III* i *model IV* šesto poglavlje). Ovi modeli predstavljaju realan logistički model sakupljanja komunalnog otpada iz razloga što su razmatrana dodatna ograničenja koja se javljaju u praksi pri sakupljanju komunalnog otpada. Takođe u ovim modelima količina otpada i vremena kretanja vozila je slučajne promenljive veličine. Ovako definisani logistički modeli za optimizaciju ruta kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada predstavljaju univerzalnu metodologiju koju je moguće primeniti i bilo kom urbanom području gde postoji sistemsko sakupljanje otpada.

U ovom poglavlju disertacije biće predstavljen i detaljno opisan razvoj konceptualnog modela ekspertnog sistema za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada na bazi prethodnih modela. Na slici (sl. 7.1) prikazana je šema pomenutog konceptualnog modela.

Prvi korak pri razvoju konceptualnog modela za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada - KMDUVSKO jeste definisanje ulaznih parametara. Transportna mreža, kao bazni ulazni parameter, sadrži podatke o koordinatama čvorova (geografska širina i dužina), podatke o saobraćajnoj infrastrukturi kao i podatke o geografskom području. S obzirom na napredak informaciono-komunikacionih tehnologija u oblasti sakupljanja komunalnog otpada transportna mreža se može modelirati pomoću geografsko informacionog sistema – GIS. Primena GIS-a u definisanju transportne mreže omogućava optimizaciju pri raspoređivanju čvorova kao i uvid u saobraćajnu infrastrukturu u realnom vremenu [Ghose i sar., 2006].



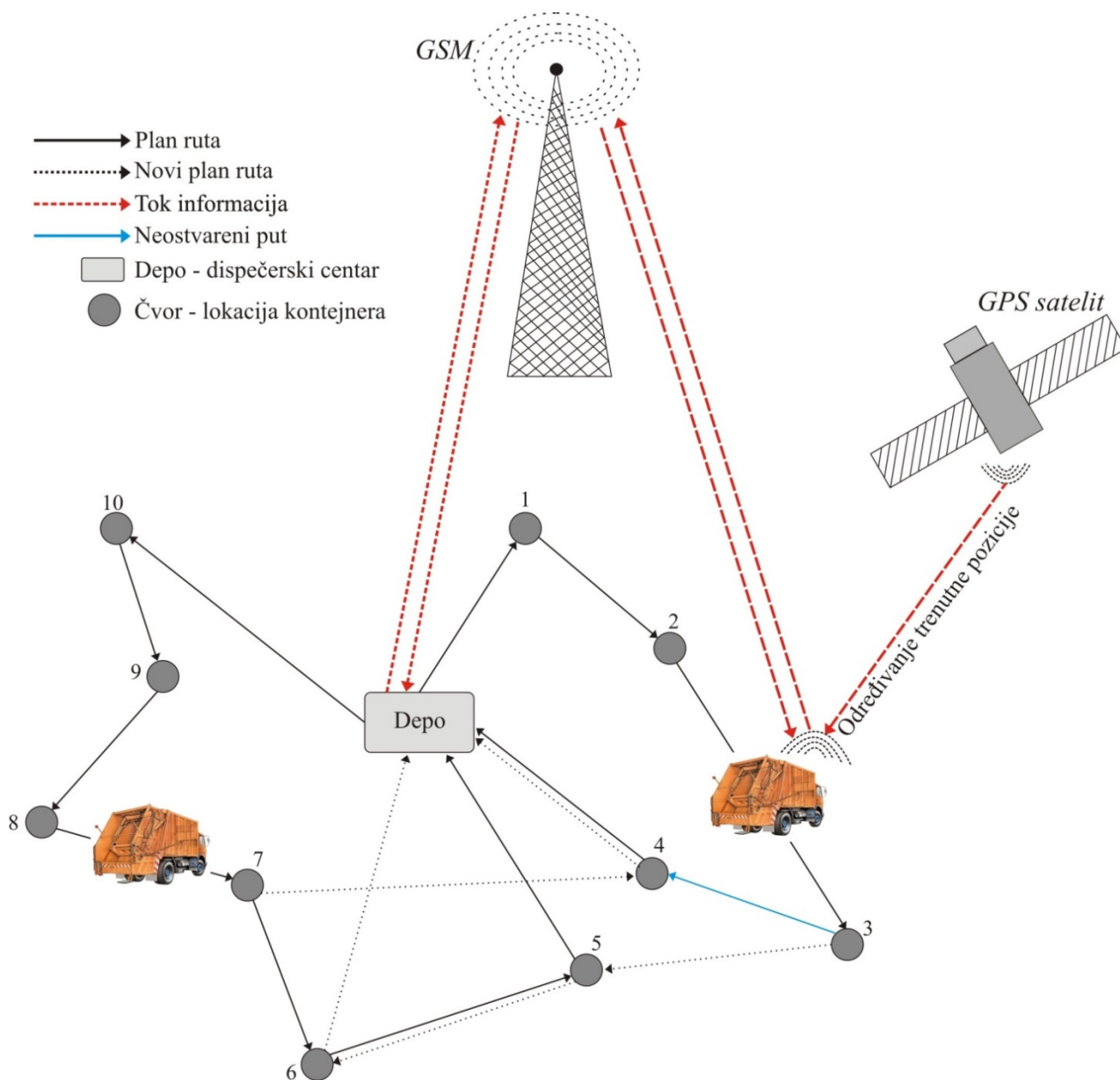
Slika 7.1 Konceptualni model za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada

Takođe primenom GIS-a moguće je uvesti sve dodatne parametre koji su vezani za saobraćajnu infrastrukturu. Tako pri formiranju transportne mreže moguće je u GIS okruženju definisati o kakvom geografskom području je reč kao i informacije o tipu ulica kojima treba da se kreću vozila za sakupljanje komunalnog otpada (jednosmerne ulice, zabranjeno kretanje u određenom vremenskom intervalu, broj semafora, itd). Ovi parametri su vrlo značajni pri optimizaciji VRP-a. Za definisanje transportne mreže pri razvoju KMDUVSKO uveden je korekcionii factor (sl. 6.2e) za ulice koje su pod nagibom. Ovakvo definisanje ulica je od velikog značaja pri formiranju matrice vremena za kretanje vozila. Broj semafora na posmatranoj saobraćajnoj infrastrukturi je još jedan parameter koji je razmatran pri definisanju transportne mreže. Broj semafora takođe utiče na matricu vremena. Za razvoj KMDUVSKO uzeto je da se vozilo na svakom semaforu zadržava jedan minut. Broj semafora utiče i na definisanje matrice najkraćih rastojanja između čvorova transportne mreže. To znači da ukoliko između čvora i i čvora j ima semafora a dužinski gledano je najkraće rastojanje, zbog korekcionog faktora (broj semafora) može se uzeti drugo rastojanje između čvora i i čvora j koje je dužinski gledano duže. Još jedan parameter koji je razmatran pri definisanju transportne mreže, a utiče na matrice rastojanja i vremena, jeste broj raskrsnica. Ovako modelirana transportna mreža, uzimajući prethodne parametre, u GIS-u predstavlja optimalnu mrežu. Sledeći korak ka razvoju KMDUVSKO jeste definisanje matrica najkraćih rastojanja, matrica najkraćih vremena, matrica količina komunalnog otpada po čvorovima za izabranu transportnu mrežu. Kako smo već napomenuli primenom GIS-a moguće je sve ove matrice definisati u realnom vremenu. Definisanje matrica kako nudi KMDUVSKO moguće je za determinističke zahteve i za stohastičke zahteve. Ukoliko se radi o determinističkim zahtevima matrice najkraćih rastojanja i vremena moguće je formirati primenom nekih od algoritama kao npr. Floyd–Warshall algoritam [Hougardy, 2010]. Međutim, u praksi vremena između svih parova čvorova transportne mreže, kao i količina otpada po čvorovima je stohastička veličina. Za rešavanje ovih veličina razvijen je algoritam (alg. 6.6). U modelu *III* (šesto poglavlje) data je matematička formulacija o stohastičkim zahtevima po čvorovima.

Nakon definisanja ulaznih parametara sledeći korak pri razvoju KMDUVSKO jeste sračunavanje ušteta primenom C-W-ovog algoritma uštete, formiranje liste ušteta, definisanje operativnih ograničenja i formiranje početnog rešenja. Za dobijanje početnog rešenja, ukoliko se radi o determinističkim zahtevima, pokreće se algoritam (alg. 6.5), a ako se radi o stohastičkim zahtevima onda se pokreće algoritam (alg. 6.6). Nakon formiranja početnog rešenja pokreće se algoritam (alg. 6.2) za poboljšanje početnog rešenja. Pri simuliranju *modela III* i *modela IV* došlo se do zaključka da algoritam 2-OPT pretraga i SA algoritam daju jednako dobra rešenja. Zbog jednostavnije primene za razvoj KMDUVSKO za poboljšanje početnog rešenja koristi se algoritam

2-OPT pretraga. Nakon sprovedene optimizacije kao izlaz dobija se plan isprojektovanih ruta za opsluživanje zadate transportne mreže. Ovakav plan ruta dobijaju operateri vozila za sakupljanje komunalnog otpada da postupaju po njemu.

Pri razvoju KMDUVSKO razmatrani su problemi koji se često javljaju u praksi i predloženo je rešenje koje se bazira na informaciono-komunikacionim tehnologijama. KMDUVSKO nudi mogućnost da se u realnom vremenu izvrši reorganizacija zadatog plana ruta kretanja vozila kako bi se ispoštovala operativna ograničenja, odnosno vreme trajanja rute i kapacitet vozila. Informaciono-komunikacioni sistem KMDUVSKO funkcioniše na sledeći način. Ako vozilo, koje je dobilo plan ruta za zadatak transportnu mrežu, u nekom trenutku zbog neke prepreke (zatvorena ulica) nije u mogućnosti da izvrši zadati plan ruta, operater vozila šalje tu informaciju depou (dispečeru koji radi u depou).



Slika 7.2 Primer dinamičkog VRP-a primenom informacionog sistema

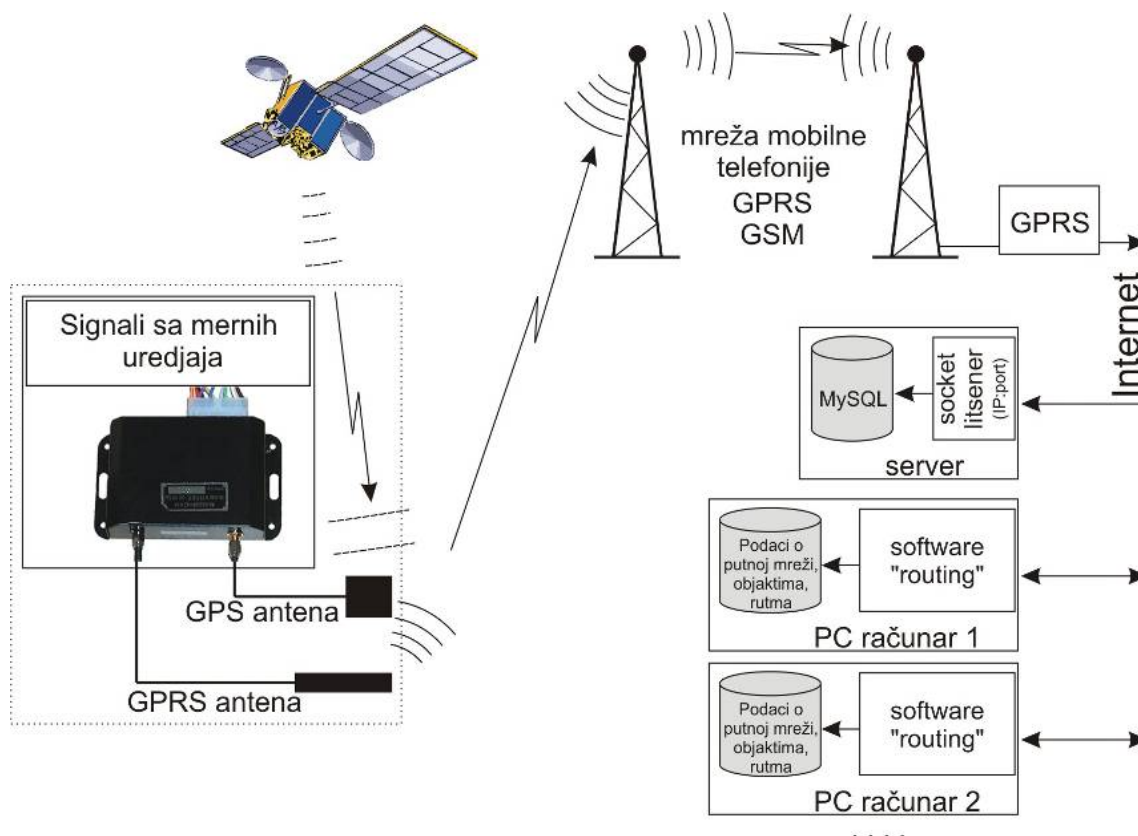
Informacija koju dispečer dobija jeste geografska pozicija vozila i podatak o tačnom vremenu. Sa slike (sl. 7.2) se vidi da vozilo treba da opsluži transportnu mrežu po zadatom planu sa dve rute i to prva ruta: depo-1-2-3-4-depo i druga ruta: depo-10-9-8-7-6-5-depo. Međutim, u prvoj ruti, vozilo nakon opsluge čvora 3 je naišlo na problem (put između čvora 3 i čvora 4 je u blokadi), što znači da treba napraviti novi plan ruta u realnom vremenu kako bi vozilo nastavilo optimalnom rutom da opslužuje transportnu mrežu.

Tok informacija se realizuje prema semi koja je prikazana na slici (sl. 7.3) a ovakvo tehničko rešenje razvila je grupa saradnika uključujući i autora disertacije [Jovanović i sar., 2010]. Modem koji je smešten u samom vozilu poseduje GPS i GSM module (GPS - globalni pozicioni sistem i GSM – globalni sistem mobilne telefonije). GPS sateliti koji se nalaze u zemljinoj orbiti (sl. 7.2) šalju radio signale koje prima GPS modul u vozilu i preko GSM šalje dalje podatke dispečeru o trenutnoj poziciji. Podatke koje dobija dispečer mogu biti različiti i zavise od toga šta je od uređaja GPS/GSM povezano na instalaciju samog vozila (nivo goriva, nivo ulja, pritisak u pneumaticima itd.)

Dispečer koristi podatak koji je dobio u realnom vremenu kako bi napravio novi plan optimalnih ruta. Prilikom odlučivanja da li je potrebno napraviti novi plan ruta kretanja vozila ili nastaviti postojećim planom, dispečeru pomaže segment KMDUSKO koji se zove fazi sistem za procenu ispunjenosti uslova za promenu rute. Fazi sistemi obezbeđuju formalnu metodologiju za manipulaciju i implementaciju ljudskog heurističkog predznanja i zaključivanja o tome da li je potrebno projektovati novi plan ruta kretanja vozila. Cilj fazi pristupa je da, umesto da jezikom matematike pokuša da što bolje reši problem upravljanja optimizacijom ruta kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada, omogući implementaciju inženjerskog iskustva o procesu zaključivanja pod kojim uslovima treba dinamički primeniti sam algoritam optimizacije. U ovom modelu fazi sistem nudi mogućnost da se na osnovu prethodnog znanja i inženjerskog iskustva sugeriše da li postoje uslovi da se pristupi projektovanju nove rute kretanja vozila ili se sugeriše da se nastavi postupanje po postojećim rutama kretanja vozila. Na taj način predloženi fazi sistem pomaže dispečeru u donošenju ove važne odluke.

Ukoliko fazi sistem sugeriše da je potrebno projektovati nove rute kretanja vozila, to znači da se u GIS okruženju mora napraviti nova matrica najkraćih rastojanja i matrica vremena na osnovu trenutne pozicije u kojoj je došlo do zastoja vozila. S obzirom da dispečer može imati uvid u realnu zapreminsku ispunjenost vozila to je od velikog značaja za planiranje nove matriče količina otpada po čvorovima odnosno za novi plan ruta kretanja vozila. Merenje zapreminske količine otpada moguće je izvršiti pomoću pomenutog tehničkog rešenja [Jovanović i sar., 2010]. Grupa saradnika je predvidela da se stepen ispunjenosti vozila meri davačem položaja ugla

cilindra potisne ploče same nadgradnje. Komponente ovog sistema su: otporni senzor ugaonog pomeranja, elektrosnki konvertor, indikator, uređaj ORIS sa GPS/GPRS.



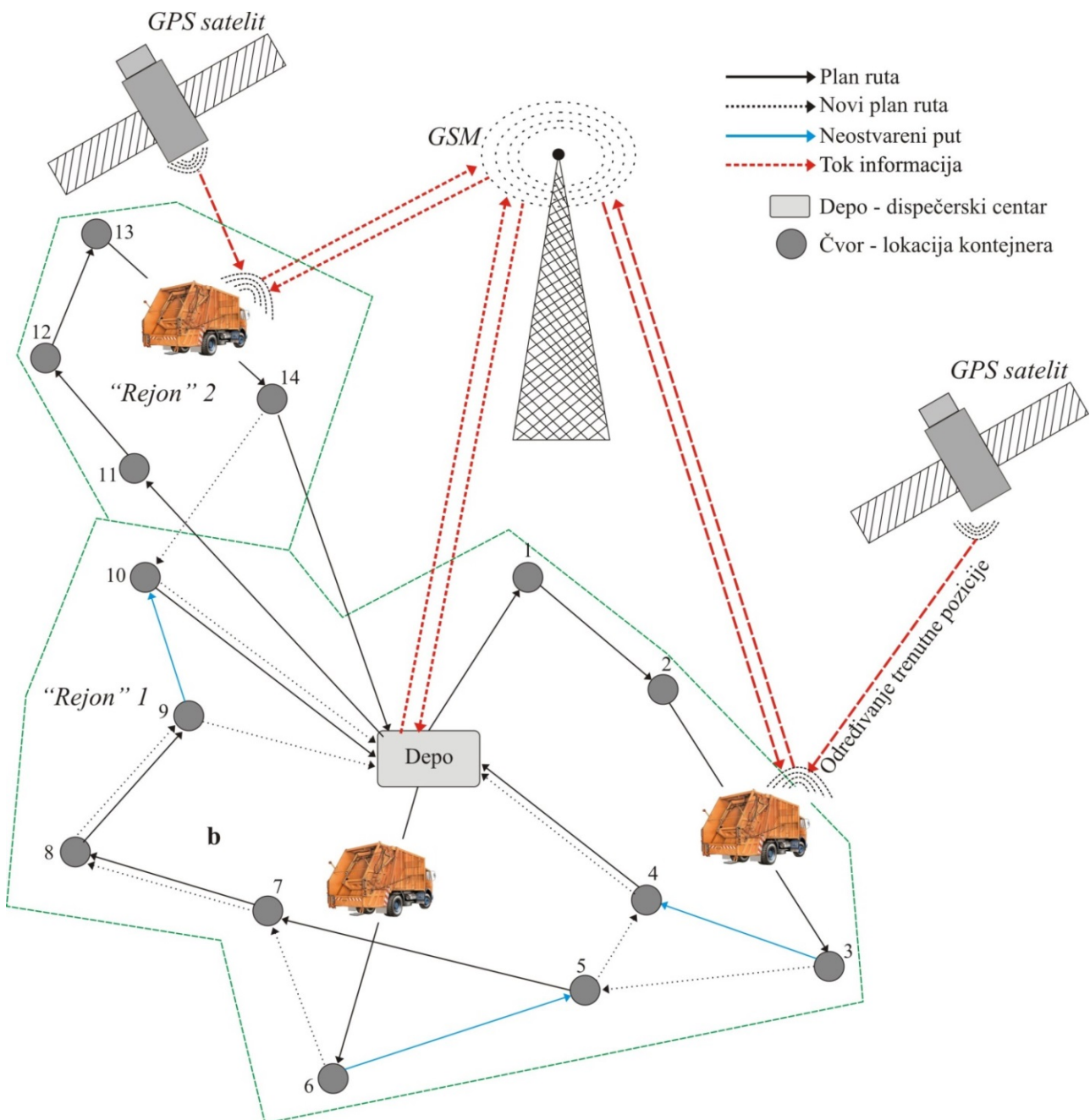
Slika 7.3 Principijalna šema informacionog sistema pri sakupljanju komunalnog otpada

Kada dispečer sagleda ove informacije odnosno formira nove matrice onda se procedura u KMDUVSKO ponavlja odnosno formiraju se uštede, lista ušteta, početno rešenje i optimizacija početnog rešenja (sl. 7.1). Kada se dobije novi plan ruta dispečer šalje novi plan (reorganizovani plan ruta) operateru putem GSM signala i operater vozila postupa po novom planu. Da bi operater primio ove podatke podrazumeva se da u vozilu poseduje neki od PDA uređaja na kome će dobijati planove ruta kretanja. Novi plan ruta, prema primeru sa slike (sl. 7.3), ima sledeći izgled: prva ruta je depo -1-2-3-5-6-depo a druga ruta je depo-10-9-8-7-4-depo.

Još jednu mogućnost koju nudi KMDUVSKO jeste mogućnost opsluživanja određenog "rejon" vozilom koje nije predviđeno za taj "rejon" već za neki susedni "rejon" usled iznenadnog otkaza određene rute. Ovakav problem prikazan je na slici (sl. 7.4).

Tok informacija je sličan kao i kod problema sa slike (sl. 7.2) s tim što ovde dispečer sagledava sva vozila koja su na terenu. Sistem uključivanja više vozila u sistem opsluživanja transportne mreže je dosta složeniji. U ovom slučaju transportna mreža je podeljena na zone ili kako je već korišćen izraz "rejon". Svaki "rejon" ima isplanirane rute kretanja vozila a opsluga u

okviru “rejon” se može vršiti jednim vozilom ili sa više vozila. Ukoliko je predviđeno da svaki “rejon” opslužuje jedno vozilo KMDUVSKO bi funkcionisao na sledeći način.



Slika 7.4 Primer dinamičkog VRP-a primenom informacionog sistema sa dva “rejona”

Ako imamo transportnu mrežu sa dva “rejona” (sl. 7.4) gde “rejon” 1 ima dve isprojektovane rute (prva ruta: depo -1-2-3-4-depo i druga ruta: depo-6-5-7-8-9-10-depo) a “rejon” 2 ima jednu rutu (depo-11-12-13-14-depo), operater vozila u “rejon” 1 (sl. 7.4) prijavljuje da je na putu između čvora 3 i čvora 4 došlo do zagušenja (radovi na putu), i tada se realizuje isti prenos informacija kao kod prethodnog problema sa slike (sl. 7.2). Međutim, u ovom slučaju dispečer je sagledao, prilikom projektovanja novih ruta, i susedni “rejon” 2. To znači da KMDUVSKO nudi

mogućnost optimizacije transportne mreže kada se koriste više vozila. Ovakva optimizacija u realnom vremenu je dosta slična praktičnim problemima i nudi optimalno opterećenje svih vozila i iz tog razloga u “rejonu” 2 je izvršena nova organizacija ruta. Nakon projektovanja novih ruta sa slike (sl. 7.4) vidi se da je čvor 10 iz “rejona” 1 pripojen ruti u “rejonu” 2 odnosno da bi sva angažovana vozila na transportnoj mreži bila ravnomerno opterećena.

Ovakav jedan logistički model nudi kompanijama koje se bave sakupljanjem i transportom otpada u urbanim sredinama velike mogućnosti. Smanjenje troškova, kroz smanjenje vozilo-kilometar, je od velikog značaja za kompanije naročito za kompanije koje imaju vozila starijeg datuma. Ovakva vozila imaju veliku potrošnju goriva sobzirom na njihov rad (tzv. kreni-stani-kreni) što pored ekonomskih ima i ekoloških posledica i iz tog razloga je opravdana primena KMDUVSKO.

Poglavlje 8

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Ubrzani rast svetske populacije, a posebno ubrzani razvoj gradova i porast broja stanovnika u njima, uzrokuje rast potrošnje, a samim tim i rast količine otpada. Održivo upravljanje komunalnim otpadom postaje jedan od primarnih ciljeva, ali ujedno, i najsloženijih problema u celokupnom sistemu očuvanja čovekove okoline.

Istraživanja spovedena u ovoj disertaciji pokazuju da neadekvatno sakupljanje i transport, kao funkcije upravljanja komunalnim otpadom, za rezultat imaju velike ekonomske i ekološke gubitke i predstavljaju značajan podsticaj velikom broju istraživača ka pronalaženju odgovarajućih sistemskih rešenja. Vrlo često razvoj novih metodologija za sakupljanje i transport otpada ne prati trend pomenutog rasta populacije u urbanim sredinama.

Prazni hodovi u mnogim komunalnim preduzećima koja se bave upravljanjem otpada, prouzrokuju povećane troškove pružanja usluga. Za razliku od drugih sistema, kod transporta komunalnog otpada, u skoro 90% slučajeva, vlasnik procesa se opredeljuje za transportni model koji sadrži prazan hod. To direktno uzrokuje smanjenje vrednosti tehnologije. Proces sakupljanja i transporta komunalnog otpada iz domaćinstava jedan je od njih. U urbanim sredinama ovaj proces zauzima jedno od vodećih mesta na skali najznačajnijih transportnih procesa od opšteg interesa.

Skup transportnih sredstava koja podržavaju proces sakupljanja i transporta komunalnog otpada, najčešće čine većinu voznog parka komunalnih preduzeća, a to je obično 50-70% transportnih jedinica, naravno, onih preduzeća čija je sfera interesovanja javna higijena. Ovaj proces je dominantan i u onim poslovnim sistemima koji integrišu više komunalnih delatnosti. U njima se nalazi 15-40% transportnih jedinica koje podržavaju proces sakupljanja komunalnog

otpada. Prema prikupljenim istraživanjima i statističkim podacima, u velikim gradovima u Srbiji, prosečno transportno vozilo koje se koristi, na godišnjem nivou, ima troškove pogonskog goriva između 400.000 ÷ 650.000 dinara. Ako jedan sistem (veliki grad) sadrži 30 transportnih jedinica namenjenih realizaciji funkcije cilja, troškovi pogonskog goriva, u postojećim uslovima, iznosiće 12.000.000 ÷ 19.500.000 dinara godišnje.

Optimizacijom i primenom kombinacije heurističkih i meta-heurističkih metoda samo na jednom ovakvom sistemu, moguće je smanjiti troškove energenata za mehanizaciju za 10 ÷ 25%.

Razvijeni logistički model za optimalno sakupljanje i transport komunalnog otpada u urbanim sredinama primenom heurističkih i meta-heurističkih algoritama sa posebnim akcentom na definisanje modela za projektovane optimalnih ruta kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada predstavlja, prema mišljenju autora, najznačajniji doprinos ove disertacije. Kao jedan od najuticajnijih ulaznih elemenata, u okviru razvoja logističkog modela, označeno je dinamičko usmeravanje vozila sa stohastičkim zahtevima u urbanim sredinama. S obzirom da količina komunalnog otpada varira u zavisnosti od perioda, odnosno predstavlja stohastičku veličinu, izvršena je procena količine otpada u različitim godišnjim intervalima a zatim je izvršena obrada prikupljenih podataka i formirani su modeli.

Razvoj logističkog modela za sakupljanje i transport komunalnog otpada u urbanim sredinama podrazumeva sagledavanje velikog broja ograničenja. Veliki broj ograničenja za definisanje modela, nametnuo je potrebu za primenu raznovrsnih algoritama za dobijanje optimalnog rešenja. Pregled literaturnih referenci doveo je do izbora C-W-ovog algoritma uštede i Sweep-ovog algoritma za dobijanje početnog rešenja a algoritma 2-OPT pretrage, SA algoritma i IHS algoritma za poboljšanje početnog rešenja.

Simulacija početnih modela poslužila je za odabir algoritma koji daje najbolje početno rešenje i algoritama koji daju najbolja poboljšanja početnog rešenja. Kao operativna ograničenja, za simulaciju početnih modela, uzeta su literaturna ograničenja koja definišu problem usmeravanja vozila sa ograničenjem kapaciteta vozila i vremena trajanja ruta. Kao ulazni parametri za simulaciju početnih modela (matrice najkraćih rastojanja, vremena i količina otpada) uzete su determinističke veličine.

Uvođenjem većeg broja ograničenja pri rešavanju problema sakupljanja i transporta komunalnog otpada definisani su novi modeli. Ovi modeli su uzeli u razmatranje stohastičke zahteve, odnosno da su količina otpada po čvorovima i vreme putovanja unutar transportne mreže slučajne promenljive. Simulacijom ovako definisanih modela došlo se do rešenja koja predstavljaju dovoljno dobar model za sakupljanje i transport komunalnog otpada u urbanim sredinama.

Na osnovu dobijenih rezultata sprovedenih optimizacijom ruta, može se zaključiti da, u kontekstu sakupljanja i transporta komunalnog otpada u urbanim sredinama, najpovoljniji model

predstavlja *model IV*. Dobijeni rezultati optimizacijom ruta za *model IV* upoređeni su sa realnim podacima koje poseduje JKP “Mediana”-Niš odnosno izvršena je verifikacija optimalnog modela. Ovi rezultati pokazuju da se primenom predloženog optimalnog modela mogu smanjiti troškovi energenata za mehanizaciju za 10%. Verifikacijom se potvrđuje da primenjena metodologija za optimizaciju ruta kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada u urbanim sredinama predstavlja originalni naučni doprinos.

Ovakav razvijen logistički model poslužio je za razvoj konceptualnog modela ekspertnog sistema za dinamičko usmeravanje vozila za sakupljanje komunalnog otpada u urbanim sredinama što, prema mišljenju autora, predstavlja značajan naučni doprinos disertacije. Ovaj model predviđa upotrebu informaciono-komunikacionih tehnologija za projektovanje optimalnih ruta u realnom vremenu. Ovakav jedan model može kompanijama koje se bave sakupljanjem i transportom otpada da donese još veće uštede u pogledu energenata kao i smanjenje troškova operatera.

Na kraju, potrebno je još jednom napomenuti da razvijeni konceptualni model izbora optimalnih ruta kretanja vozila za sakupljanje i transport komunalnog otpada poseduje veliku fleksibilnost u pogledu primene na bilo koju urbanu sredinu. Takođe, potrebno je naglasiti da rezultati naučno – istraživačkog rada doktorske disertacije predstavljaju originalni rad sa širokim aplikativnim karakterom.

Svakako da u okviru zaključnih razmatranja treba pomenuti i neke od mogućnosti daljih istraživanja u ovoj oblasti:

- Primenu najnovijih informaciono-komunikacionih tehnologija u procesu sakupljanja i transporta komunalnog otpada,
- Razmatranje novih VRP modela sa više istovremeno angažovanih vozila i više depoa,
- Primena savremene merne opreme na vozilima za sakupljanje komunalnog otpada,
- Primena novih univerzalnih softverskih alata,
- Integrisanje novih metoda u strukturu konceptualnog modela,
- Unapređenje procedure izbora parametara i samih algoritama uz primenu metoda veštačke inteligencije,
- Stalno ažuriranje savremenih rešenja i dobre prakse sakupljanja i transporta komunalnog otpada.

Literatura

- Agha, S. R. (2016). *Optimizing Routing of Municipal Solid Waste Collection Vehicles in Deir El-Balah–Gaza Strip*. IUG Journal of Natural Studies, Vol.14, No(2), pp. 75-89.
- Arribas, C. A., Blazquez, C. A., Lamas, A. (2010). *Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems*. Waste Management & Research, Vol. 28, No(4), pp. 355-363.
- Allen, F. M., & Braswell, R. N. (1971). *Chance-Constrained Linear Programming with Distribution-Free Constraints* (Project No. TR-59). Florida Universities Gainesville department of industrial and systems engineering.
- Baker, B. M., & Ayechev, M.A. (2003). *A genetic algorithm for the vehicle routing problem*. Computers & Operations Research, Vol. 30, No(5), pp. 787-800, 2003.
- Bautista, J., Fernandez, E., Pereira, J. (2008) *Solving an urban waste collection problem using ants heuristics*. Computers & Operations Research, Vol. 35, No(9), pp. 3020- 3033.
- Benjamin, A.M. (2011). *Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows*, *PhD thesis*, Department of Mathematical Sciences, Brunel University, London, United Kingdom.
- Carić, T. (2004). *Unapređenje organizacije transporta primjenom heurističkih metoda*, *Doktorska disertacija*, Sveučilište u Zagrebu fakultet Prometnih znanosti, Zagreb, Hrvatska.
- Clarke, G., Wright, J. W. (1964). *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*. Operations Research, Vol. 12, No(4), pp. 568-581.
- Chalkias, C., Lasaridi, K. (2009). *A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: the case study of Nikea, Athens, Greece*. WSEAS Transactions on Environment and development Vol.10, No(5), pp. 6-14.
- Charnes, A., Cooper, W.W. (1959). *Chance-Constrained Programming*. Management Science, Vol. 6, No (1), pp. 73-79.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). *The truck dispatching problem*. Management science, Vol. 6, No(1), pp. 80-91.
- Dantzig, G.B. (1949). *Programming of Interdependent Activities: II Mathematical Model*. Econometrica, Vol. 17, No(3), pp. 200–211.

- DIR99 (1999). Council Directive (1999/31/EC) on the landfill of waste. Official journal of the European Communities No L182/1.
- DIR75 (1975). Council Directive (75/442/EEC) on waste. Official journal of the European Communities No L194/39.
- DIR91 (1991). Council Directive (91/689/EEC) on hazardous waste. Official journal of the European Communities No L377/20.
- Erdelez, A., Margeta, J., Kneziü S. (2007) *Integralni pristup upravljanju sustavom prikupljanja komunalnog otpada*, Građevinar, Vol.59, No(6), pp. 505-516.
- Ehmke J.F. (2012). *Integration of information and optimiyation models for routing in city logistics*. International series in Operations Research & Management Science. Vol. 177, Springer.
- EUV (2002). Environmental protection agency. European waste catalogue and hazardous waste list, Europion Union.
- ECBP (2003). Metodološki pristup pripremi i implementaciji Nacionalne ekološke politike i Nacionalnog ekološkog akcionog plana Republike Srbije, Projekta: Environmental Capacity Building Programme, An EU-funded project managed by the European Agency for Reconstruction, Beograd.
- Fesanghary, M., Mahdavi, M., Minary-Jolandan, M., Alizadeh, Y. (2008). *Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 197, No(33-40), pp. 3080–3091.
- Geem, Z.W., Kang, S.L., Yongjin, P. (2005). *Application of Harmony Search to Vehicle Routing*. American Journal of Applied Sciences, Vol. 2, No(12), pp. 1552-1557.
- Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V. (2001). *A new heuristic optimization algorithm: harmony search*, Simulation, Vol. 76, No(2), pp. 60–68.
- Gilbert, L., Michel, G., Jean-Yves, Potvin., Frederik, S. (2000). *Clasical and modern heuristic for the vehicle routing problem*. International Transactions in Operational Research, Vol. 7, pp. 285-300.
- Gillett B., Miller L. (1974). *A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem*. Operations Research, Vol. 22, pp. 340-349.
- Ghose, M. K., Dikshit, A. K., & Sharma, S. K. (2006). *A GIS based transportation model for solid waste disposal—A case study on Asansol municipality*. Waste management, Vol. 26, No(11), pp. 1287-1293.
- Glover, F. W., & Kochenberger, G. A. (Eds.) (2006). Handbook of metaheuristics Vol. 57. Springer Science & Business Media.

- Hassall, K. (2004). *Dispelling the e-commerce and urban transport environmental doomsday forecasts: A counter intuitive Australian case study*, The postal transport network restructure, 1995 – 2000. In: Taniguchi, E. & Thompson, R. (eds.), *Logistics Systems for Sustainable Cities*. Elsevier, Amsterdam, pp. 397-404.
- Hougardy, S. (2010). *The Floyd–Warshall algorithm on graphs with negative cycles*. *Information Processing Letters*, Vol. 110, No(8-9), pp. 279-281.
- Hubbard, T.N. (2003). *Information, decisions, and productivity: on-board computers and capacity utilization in trucking*. *The American Economic Review*, Vol. 93, pp. 1328 –1353.
- Janošević D., Marinković Z., Petrović G., Marković D. (2010). *Logistika upravljanja otpadom, Studija urađena u okviru projekta Razvoj modela i tehnologija logistike transporta komunalnog otpada (14068) finansiran o strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, Niš*.
- Jovanović S. (2015). *Modeliranje ekološko-energetskih i ekonomskih performansi održivih tehnologija upravljanja čvrstim otpadom, Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet Inženjerskih nauka, Kragujevac*.
- Jovanović, M., Milić, P., Petrović G. (2010). *Softverski paket za monitoring vozila za sakupljanje otpada. Tehničko rešenje*, razvijeno u okviru projekta tehnološkog razvoja - Razvoj modela i tehnologije logistike transporta komunalnog otpada TR-14068.
- JKP (2017). *Javno komunalno preduzeće „Mediana – Niš“*, Niš.
- Kim, B. I., Kim, S., Sahoo, S. (2006). *Waste collection vehicle routing problem with time windows*. *Computers & Operations Research*, Vol. 33, No(12), pp. 3624-3642.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M. (1983). *Optimization by simulated annealing*. *Science*, Vol. 220, No(4598), pp. 671–680.
- Kumar, S.N., and Panneerselvam, R. (2012). *A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants*, *Intelligent Information Management*, Vol. 4, pp. 66-74.
- Li, J., Borenstein, D., Mirchandania P.B. (2008). *Truck scheduling for solid waste collection in the city of Porto Alegre, Brazil*. *Omega-International Journal of Management Science*, Vol. 36, No(6), pp. 1133-1149.
- Li, P., Arellano-Garcia, H., Wozny, G. (2008). *Chance constrained programming approach to process optimization under uncertainty*. *Computers & chemical engineering*, Vol. 32, No(1-2), pp.25-45.
- Lin, S., Kernighan, B.W. (1973). *An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem*. *Operations research*, Vol. 21, pp. 498-516.
- Liu, B. and Iwamura, K. (1998). *Chance constrained programming with fuzzy parameters*. *Fuzzy sets and systems*, Vol. 94, No(2), pp.227-237.

- Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2004). *A new structural optimization method based on the harmony search algorithm*. Computers & structures, Vol.82, No(9-10), pp. 781-798.
- Madić, M. (2014). Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije, *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš.
- Marc, G., and Charlotte J.B. (1898). *The vehicle routing problem with backhauls: Theory and Methodology*. European Journal of Operational Research, Vol. 42, pp. 39-51.
- Savelsbergh, M. W., Sol, M. (1995). *The general pickup and delivery problem*. Transportation science, Vol.29, No(1), pp. 17-29.
- Marković, D., Madić, M., Petrović, G. (2012). *Assessing the performance of improved harmony search algorithm (IHSA) for the optimization of unconstrained functions using Taguchi experimental*. Scientific Research and Essays Vol. 7, No(12), pp. 1312-1318.
- Marković, D., Janošević, D., Jovanović, M., Nikolic, V. (2010). *Application method for optimization in solid waste management system in the city of Nis*. Facta universitatis. Series: Mechanical Engineering, Vol.8, No(1), pp 63-76.
- Marković, D., Petrović, G., Čojbašić, Ž., & Marinković, D. (2013). *A comparative analysis of metaheuristic maintenance optimization of refuse collection vehicles using the Taguchi experimental design*. Transactions of FAMENA, Vol.36, No(4), pp. 25-38.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M., Damangir, E. (2007). *An improved harmony search algorithm for solving optimization problems*. Applied Mathematics and Computation, Vol.188, No(2), pp. 1567–1579.
- Miller, B. L., Wagner, H. M. (1965). *Chance constrained programming with joint constraints*. Operations Research, Vol.13, No(6), pp. 930-945.
- Mendoza, J. E., Castanier, B., Guéret, C., Medaglia, A. L., Velasco, N. (2010). *A memetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with stochastic demands*. Computers & Operations Research, Vol.37, No(11), pp. 1886-1898.
- McLeod, F. and Cherrett, T. (2008). *Quantifying the transport impacts of domestic waste collection strategies*. Waste Management, Vol.28, No(11), pp.2271-2278.
- Michel. G., Gilbert, L., Rene S. (1996). *Stochastic vehicle routing*. European Journal of Operational Research, Vol. 88, pp. 9-16.
- Milić, P., Petrović, G., Jovanović, M., Marinković, Z. (2009). *Logistički model optimalnog rutiranja sistema za sakupljanje otpada*. XIX International Conference, MHCL 09, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Material Handling and Design Engineering, Proceedings, ISBN 978-86-7083-672-3, pp. 223 - 228.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., Bräysy, O. (2006). *Improved route planning and scheduling of waste collection and transpor*. Expert systems with applications, Vol.30, No(2), pp. 223-232.

- NSUO (2003). Nacionalna strategija upravljanja otpadom - sa programom približavanja EU. *Vlada Republike Srbije.*
- Pagnoncelli, B. K., Shapiro A., Alexander S. (2009). *Sample average approximation method for chance constrained programming: theory and applications.* Journal of optimization theory and applications Vol. 142, No(2), pp. 399-416.
- Peng, Y., Qian, Y. M. (2010). *A particle swarm optimization to vehicle routing problem with fuzzy demands.* Journal of Convergence Information Technology, Vol.5, No(6), pp. 112-119.
- Petrović, G. (2013). Višekriterijumska optimizacija procesa održavanja tehničkih sistema primenom verovatnosnih metoda i veštačke inteligencije”. *Doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Nišu, Univerzitet u Niš.*
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéreta, C., Medaglia, A.L. (2013). *A review of dynamic vehicle routing problems.* European Journal of Operational Research, Vol. 225, pp. 1–11.
- Pires, A., Martinho, G., Chang, N. B. (2011). *Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques.* Journal of Environmental Management Vol.92, pp. 1033-1050.
- Priručnik (2004). Priručnik za izradu lokalnih ekoloških akcionih planova. Regionalni centar za životnu sredinu za Centralnu i Istočnu Evropu kancelarija u Srbiji i Crnoj Gori. Beograd.
- Rao, S.S. (1996). Engineering Optimization: Theory and Practice. *Books,* John Wiley and Sons.
- REG91 (1991). Council Regulation (91/689/EEC) on the supervision and control of shipments of waste within, into and out of the European Community, Official journal of the European Communities No L 30/1.
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B. I., Kraas, B., Popov Jr, A. (2005). *Routing optimization for waste management.* Interfaces, Vol. 35, No(1), pp. 24-36.
- Schrijver, A. (2005). On the History of Combinatorial Optimization (till 1960), ser. Handbooks in Operations Research and Management Science. Elsevier Science, pp. 1–68.
- SEPA (2013). Otpad i upravljanje otpadom . Agencija za zaštitu životne sredine, Ministarstvo za zaštitu životne sredine, Republika Srbija.
- Shen, Z., Dessouky, M. M., Ordóñez, F. (2009). *A two-stage vehicle routing model for large-scale bioterrorism emergencies.* Networks, Vol.54, No(4), pp. 255-269.
- Simonetto, E.D.O., Borenstein, D. (2006). *A decision support system for the operational planning of solid waste collection.* Waste Management., Vol. 27, No(10), pp. 1286-1297.
- SUO (2010). Strategiji upravljanja otpadom za period 2010 - 2019. godine, Službeni glasnik Republike Srboje, br. 29/10.
- SLGRS (2016). Zakon o upravljanju otpadom, Službeni glasnik RS, br. 36/2009, 88/2010 i 14/2016.

- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., Carvalho, M. D. G. (2009). *Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling*. Waste Management, Vol. 29, No(3), pp. 1176-1185.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., Kah, M. M. O., Rabbani, M. (2007). *A new capacitated vehicle routing problem with split service for minimizing fleet cost by simulated annealing*. Journal of the Franklin Institute, Vol. 344, No(5), pp. 406-425.
- Tao, Z., Chaovalitwongse, W.A., Yuejie, Y. (2012). *Scater search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and delivers*. Computers & Operations Research, Vol. 39, pp. 2277-2290.
- Teixeira, J., Antunes, A. P., de Sousa, J. P. (2004). *Recyclable waste collection planning—a case study*. European Journal of Operational Research, Vol. 158, No(3), pp. 543-554.
- Teodorović, D., & Pavković, G. (1992). *A simulated annealing technique approach to the vehicle routing problem in the case of stochastic demand*. Transportation Planning and Technology, Vol. 16, No(4), pp. 261-273.
- Teodorović, D. (2007). Transportne mreže, Univerzitetski udžbenik, Saobraćajni fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Toth, P., Vigo, D. (Eds). (2002) *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tung, D. V., & Pinnoi, A. (2000) *Vehicle routing–scheduling for waste collection in Hano*. European Journal of Operational Research, Vol. 125, No(3), pp. 449-468.
- Uredba (2012). Uredba o vrstama otpada za koje se vrši termički tretman, uslovima i kriterijumima za određivanje lokacije, tehničkim i tehnološkim uslovima za projektovanje, izgradnju, opremanje i rad postrojenja za termički tretman otpada, postupanju sa ostatkom nakon spaljivanja. Službeni glasnik Republike Srbije", br. 102/2010 i 50/2012.
- USEPA (2002). United States Enviromental Protection Agency, Waste Transfer Stations. A Manual for Decision-Making, EPA530-R-02-002, United States.
- Vera, H., Karl F, D., Richard F, R., Stefan, R. (2013). *A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems*. Journal of Heuristics, Vol. 19, No(2), pp. 129-156.
- Vujić G., i saradnici (2009). Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije, Fakultet tehničkih nauka, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine, Novi Sad.
- Vujošević, M. (1988). Metode optimizacije, *Naučna knjiga*, Fakulteta Organizacionih nauka, Beograd.

- Vujošević, M. (1999). Operaciona istraživanja – Izabrana poglavlja, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, Srbija.
- Waller, S. T., Ziliaskopoulos, A. K. (2006). *A chance-constrained based stochastic dynamic traffic assignment model: Analysis, formulation and solution algorithms*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.14, No(6), pp. 418-427.
- Xiangyong, L., Peng, T., Stephen, C.H.L. (2010). *Vehicle routing problem with time windows and stochastic travel and service times*. International Journal Production Economics, Vol.125, pp. 137-145.
- Yang, X.S. (2010). Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications, *Books*, John Wiley & Sons.

Biografija autora

Danijel Marković, diplomirani inženjer mašinstva, rođen je 27. 11. 1983. godine u Surdulici. Oženjen je i otac jednog maloletnog deteta. Služi se engleskim jezikom.

Diplomirao je 29.01.2008. godine na Mašinskom fakultetu u Nišu, na obrazovnom profilu Transportna tehnika i logistika sa prosečnom ocenom 9.08 u toku studija i ocenom 10 na diplomskom radu. Tokom studija bio je stipendista Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije. Nakon diplomiranja upisao je doktorske akademske studije na Mašinskom fakultetu u Nišu na smeru Transportna tehnika i logistika i položio sve ispite sa prosečnom ocenom 9.83.

U periodu od januara 2012. godine do juna 2014. godine radio je kao istraživač - saradnik na Mašinskom fakultetu u Nišu u okviru projekta TR35049. Od juna 2014. godine radi kao asistent na Mašinskom fakultetu u Nišu za užu naučnu oblast Transportna tehnika i logistika. Od februara 2013. godine radi i na poslovima Centra za motore i motorna vozila kao član Komisije za ispitivanje vozila na motorni pogon i priključnih vozila koja se serijski ili pojedinačno proizvode ili popravljaju. Angažovan je na izvođenju vežbi iz predmeta: Urbani transport i logistika, Operaciona istraživanja, Transportni tokovi, Logistika preduzeća, Upravljanje održavanjem, Održavanje transportnih sredstava i Održavanje mašinskih sistema i transportnih sredstava.

Učestvovao je u realizaciji međunarodnih i nacionalnih, naučnih i stručnih projekta. Autor ili koautor je više naučnih i stručnih radova.

Prilog 1: Matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova – model I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	1.1	1.6	1.25	1.15	0.85	0.8	0.75	0.9	1	1.1	0.95	0.5	0.8	1.15	0.11	0.28	0.4	0.5	0.6	0.79
2	1.1	0	0.35	0.8	0.5	0.6	0.7	0.79	1	1.05	1.1	1	0.6	0.7	0.4	0.82	0.9	0.95	1.02	1.04	1.06
3	1.6	0.35	0	0.4	1.1	0.9	0.8	0.75	0.9	1	1.05	1	0.5	0.6	0.28	1	1.05	1.15	1.2	1.25	1.44
4	1.25	0.8	0.4	0	0.45	0.28	0.4	0.5	0.65	0.75	0.75	0.8	0.9	1	0.23	1.3	1.32	1.4	1.43	1.55	1.74
5	1.15	0.5	1.1	0.45	0	0.22	0.35	0.45	0.6	0.65	0.7	0.72	0.95	0.7	0.4	1.3	1.33	1.5	1.54	1.6	1.8
6	0.85	0.6	0.9	0.28	0.22	0	0.11	0.23	0.4	0.45	0.5	0.45	0.65	0.35	0.23	1	1	1.1	1.2	1.25	1.44
7	0.8	0.7	0.8	0.4	0.35	0.11	0	0.15	0.3	0.35	0.4	0.4	0.55	0.35	0.35	0.95	0.95	1.1	1.1	1.2	1.38
8	0.75	0.79	0.75	0.5	0.45	0.23	0.15	0	0.15	0.22	0.26	0.23	0.5	0.4	0.45	0.85	0.87	1	1.05	1.1	1.3
9	0.9	1	0.9	0.65	0.6	0.4	0.3	0.15	0	0.11	0.23	0.24	0.65	0.45	0.6	1	1.02	1.1	1.2	1.25	1.45
10	1	1.05	1	0.75	0.65	0.45	0.35	0.22	0.11	0	0.11	0.17	0.7	0.55	0.65	1.1	1.12	1.2	1.25	1.35	1.54
11	1.1	1.1	1.05	0.75	0.7	0.5	0.4	0.26	0.23	0.11	0	0.12	0.17	0.7	0.55	0.65	1.08	1.1	1.18	0.85	1
12	0.95	1	1	0.8	0.72	0.45	0.4	0.23	0.24	0.17	0.12	0	0.7	0.5	0.72	1.1	1.12	1.2	1.22	1.35	1.5
13	0.5	0.6	0.5	0.9	0.95	0.65	0.55	0.5	0.65	0.7	0.17	0.7	0	0.14	0.65	1	1.02	1.2	1.22	1.25	1.44
14	0.8	0.7	0.6	1	0.7	0.35	0.35	0.4	0.45	0.55	0.7	0.5	0.14	0	0.5	0.9	0.93	1	1.03	1.15	1.34
15	1.15	0.4	0.28	0.23	0.4	0.23	0.35	0.45	0.6	0.65	0.55	0.72	0.65	0.5	0	1.2	1.21	1.4	1.42	1.45	1.64
16	0.11	0.82	1	1.3	1.3	1	0.95	0.85	1	1.1	0.65	1.1	1	0.9	1.2	0	0.15	0.21	0.45	1.2	1.41
17	0.28	0.9	1.05	1.32	1.33	1	0.95	0.87	1.02	1.12	1.08	1.12	1.02	0.93	1.21	0.15	0	0.09	0.19	0.16	0.33
18	0.4	0.95	1.15	1.4	1.5	1.1	1.1	1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1	1.4	0.21	0.09	0	0.09	0.07	0.25
19	0.5	1.02	1.2	1.43	1.54	1.2	1.1	1.05	1.2	1.25	1.18	1.22	1.22	1.03	1.42	0.45	0.19	0.09	0	0.13	0.34
20	0.6	1.04	1.25	1.55	1.6	1.25	1.2	1.1	1.25	1.35	0.85	1.35	1.25	1.15	1.45	1.2	0.16	0.07	0.13	0	0.2
21	0.79	1.06	1.44	1.74	1.8	1.44	1.38	1.3	1.45	1.54	1	1.5	1.44	1.34	1.64	1.41	0.33	0.25	0.34	0.2	0

Prilog 2: Matrica najkraćih vremena putovanja između svih parova čvorova- model II

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	12.67	13.83	9.667	7.833	9.833	13.17	4.5	7.5	7.333	5.667	5.167	9.167	8.167	9.833	2.867	4.933	4.833	7.167	6	6.633
2	12.67	0	17.68	14.9	13.25	16.3	19.85	11.4	14	13.53	11.55	11.5	16.8	14.85	15.2	11.91	13.45	12.98	15.01	13.52	13.53
3	13.83	17.68	0	15.33	16.17	18.5	21.67	13	16	15.83	14	13.83	17.67	16	15.43	14.33	16	15.83	18	16.67	17.3
4	9.667	14.9	15.33	0	11	13.43	17.33	9.167	12.17	12	10	10.17	16	14.33	12.27	12.33	13.9	13.67	15.77	14.67	15.3
5	7.833	13.25	16.17	11	0	11.73	15.67	7.5	10.5	10.17	8.333	8.4	14.67	11.83	11.33	10.83	12.43	12.5	14.63	13.33	14
6	9.833	16.3	18.5	13.43	11.73	0	17.87	13.27	7.833	10	7.667	5.5	11.67	14.17	12.27	11.83	9.833	11.17	13	13.67	12.8
7	13.17	19.85	21.67	17.33	15.67	17.87	0	13	16	15.67	13.83	13.83	19.83	17.17	17.67	16.17	17.67	17.67	19.67	18.5	19.1
8	4.5	11.4	13	9.167	7.5	13.27	13	0	7	6.733	4.867	4.767	11.17	8.833	9.5	7.333	8.9	8.833	11	9.667	10.33
9	7.5	14	16	12.17	10.5	7.833	16	7	0	8.867	6.767	4.8	11.67	14.5	13.5	11.83	9.9	11.17	13	13.67	12.83
10	7.333	13.53	15.83	12	10.17	10	15.67	6.733	8.867	0	6.367	6.567	13.83	11.33	12.17	10.17	11.73	11.5	13.67	12.5	13.13
11	5.667	11.55	14	10	8.333	7.667	13.83	4.867	6.767	6.367	0	4.4	10.07	9.833	9.833	6.667	9.6	9.167	11.43	8.833	9.333
12	5.167	11.5	13.83	10.17	8.4	5.5	13.83	4.767	4.8	6.567	4.4	0	11.83	9.167	10.4	8.167	9.733	9.5	11.57	10.5	11
13	9.167	16.8	17.67	16	14.67	11.67	19.83	11.17	11.67	13.83	10.07	11.83	0	13.47	15.67	13.33	14.9	15	17.07	15.67	16.3
14	8.167	14.85	16	14.33	11.83	14.17	17.17	8.833	14.5	11.33	9.833	9.167	13.47	0	13.17	11	12.6	12.33	14.43	13.33	13.97
15	9.833	15.2	15.43	12.27	11.33	12.27	17.67	9.5	13.5	12.17	9.833	10.4	15.67	13.17	0	12.5	10.53	12.17	13.73	14.33	13.47
16	2.867	11.91	14.33	12.33	10.83	11.83	16.17	7.333	11.83	10.17	6.667	8.167	13.33	11	12.5	0	7	6.7	9.5	10.5	11.2
17	4.933	13.45	16	13.9	12.43	9.833	17.67	8.9	9.9	11.73	9.6	9.733	14.9	12.6	10.53	7	0	7.8	10.13	8.533	9.1
18	4.833	12.98	15.83	13.67	12.5	11.17	17.67	8.833	11.17	11.5	9.167	9.5	15	12.33	12.17	6.7	7.8	0	9.3	7.733	8.333
19	7.167	15.01	18	15.77	14.63	13	19.67	11	13	13.67	11.43	11.57	17.07	14.43	13.73	9.5	10.13	9.3	0	9.933	10.63
20	6	13.52	16.67	14.67	13.33	13.67	18.5	9.667	13.67	12.5	8.833	10.5	15.67	13.33	14.33	10.5	8.533	7.733	9.933	0	8.667

Prilog 3: Matrica najkraćih rastojanja između svih parova čvorova - model III

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	12.67	13.83	9.667	7.833	9.833	13.17	4.5	7.5	7.333	5.667	5.167	9.167	8.167	9.833	2.867	4.933	4.833	7.167	6	6.633
2	12.67	0	17.68	14.9	13.25	16.3	19.85	11.4	14	13.53	11.55	11.5	16.8	14.85	15.2	11.91	13.45	12.98	15.01	13.52	13.53
3	13.83	17.68	0	15.33	16.17	18.5	21.67	13	16	15.83	14	13.83	17.67	16	15.43	14.33	16	15.83	18	16.67	17.3
4	9.667	14.9	15.33	0	11	13.43	17.33	9.167	12.17	12	10	10.17	16	14.33	12.27	12.33	13.9	13.67	15.77	14.67	15.3
5	7.833	13.25	16.17	11	0	11.73	15.67	7.5	10.5	10.17	8.333	8.4	14.67	11.83	11.33	10.83	12.43	12.5	14.63	13.33	14
6	9.833	16.3	18.5	13.43	11.73	0	17.87	13.27	7.833	10	7.667	5.5	11.67	14.17	12.27	11.83	9.833	11.17	13	13.67	12.8
7	13.17	19.85	21.67	17.33	15.67	17.87	0	13	16	15.67	13.83	13.83	19.83	17.17	17.67	16.17	17.67	17.67	19.67	18.5	19.1
8	4.5	11.4	13	9.167	7.5	13.27	13	0	7	6.733	4.867	4.767	11.17	8.833	9.5	7.333	8.9	8.833	11	9.667	10.33
9	7.5	14	16	12.17	10.5	7.833	16	7	0	8.867	6.767	4.8	11.67	14.5	13.5	11.83	9.9	11.17	13	13.67	12.83
10	7.333	13.53	15.83	12	10.17	10	15.67	6.733	8.867	0	6.367	6.567	13.83	11.33	12.17	10.17	11.73	11.5	13.67	12.5	13.13
11	5.667	11.55	14	10	8.333	7.667	13.83	4.867	6.767	6.367	0	4.4	10.07	9.833	9.833	6.667	9.6	9.167	11.43	8.833	9.333
12	5.167	11.5	13.83	10.17	8.4	5.5	13.83	4.767	4.8	6.567	4.4	0	11.83	9.167	10.4	8.167	9.733	9.5	11.57	10.5	11
13	9.167	16.8	17.67	16	14.67	11.67	19.83	11.17	11.67	13.83	10.07	11.83	0	13.47	15.67	13.33	14.9	15	17.07	15.67	16.3
14	8.167	14.85	16	14.33	11.83	14.17	17.17	8.833	14.5	11.33	9.833	9.167	13.47	0	13.17	11	12.6	12.33	14.43	13.33	13.97
15	9.833	15.2	15.43	12.27	11.33	12.27	17.67	9.5	13.5	12.17	9.833	10.4	15.67	13.17	0	12.5	10.53	12.17	13.73	14.33	13.47
16	2.867	11.91	14.33	12.33	10.83	11.83	16.17	7.333	11.83	10.17	6.667	8.167	13.33	11	12.5	0	7	6.7	9.5	10.5	11.2
17	4.933	13.45	16	13.9	12.43	9.833	17.67	8.9	9.9	11.73	9.6	9.733	14.9	12.6	10.53	7	0	7.8	10.13	8.533	9.1
18	4.833	12.98	15.83	13.67	12.5	11.17	17.67	8.833	11.17	11.5	9.167	9.5	15	12.33	12.17	6.7	7.8	0	9.3	7.733	8.333
19	7.167	15.01	18	15.77	14.63	13	19.67	11	13	13.67	11.43	11.57	17.07	14.43	13.73	9.5	10.13	9.3	0	9.933	10.63
20	6	13.52	16.67	14.67	13.33	13.67	18.5	9.667	13.67	12.5	8.833	10.5	15.67	13.33	14.33	10.5	8.533	7.733	9.933	0	8.667

Prilog 4: Karton rutiranja

Datum	Mesto čvora/lokacije	Vreme	Kontejneri		Pristupačnost kontejnerima	Napomena
			Zapremina [l]	broj		
	Ulica:	Dolaska:	1100		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	
	Bliži naziv lokacije:	Utovara:.....			Delimično pristupačno..... <input type="checkbox"/>	
		Polaska:.....	3000		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	

Datum	Mesto čvora/lokacije	Vreme	Kontejneri		Pristupačnost kontejnerima	Napomena
			Zapremina [l]	broj		
	Ulica:	Dolaska:	1100		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	
	Bliži naziv lokacije:	Utovara:.....			Delimično pristupačno..... <input type="checkbox"/>	
		Polaska:.....	3000		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	

Datum	Mesto čvora/lokacije	Vreme	Kontejneri		Pristupačnost kontejnerima	Napomena
			Zapremina [l]	broj		
	Ulica:	Dolaska:	1100		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	
	Bliži naziv lokacije:	Utovara:.....			Delimično pristupačno..... <input type="checkbox"/>	
		Polaska:.....	3000		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	

Datum	Mesto čvora/lokacije	Vreme	Kontejneri		Pristupačnost kontejnerima	Napomena
			Zapremina [l]	broj		
	Ulica:	Dolaska:	1100		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	
	Bliži naziv lokacije:	Utovara:.....			Delimično pristupačno..... <input type="checkbox"/>	
		Polaska:.....	3000		Nepristupačno..... <input type="checkbox"/>	

Prilog 5: Mesečni izveštaj JKP „Mediana – Niš“ za „rejon“ 103



JKP "МЕДИАНА" НИШ

МЕСЕЧНИ ИЗВЕШТАЈ СЛУЖБЕ ЗА РАЗВОЈ ГИС/ГПС
КОЛЕКТИВНИ ТИП

QF-C-045

Страна 5

Извештај за период од 01.10.2017 до 31.10.2017

Рејон: 103

Датум	Возач	Конто	Почетак рада	Крај рада	Време рада	Мотор ради (h)	Утрошено гориво (l)	Одвоз (р. листе)	Извршеност (ГПС)	Неправилност	Број тура	Километража (km)
02.10.2017 Понедељак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:56	18:12	10:16	09.50	33	311	287	0	3	67.17
04.10.2017 Среда	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:06	16:27	09:21	09.01	31	175	128	6	2	64.38
06.10.2017 Петак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	202	07:20	19:00	11:40	11.14	40	310	279	0	3	64.83
09.10.2017 Понедељак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	06:58	17:11	10:13	09.39	42	311	268	0	3	67.76
11.10.2017 Среда	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:02	15:33	08:31	07.50	30	174	129	0	2	57.24
13.10.2017 Петак	СТАНОЈЕВИЋ СРЂАН	218	07:17	19:21	12:04	11.49	34	310	310	0	3	67.94
16.10.2017 Понедељак	НОВИТОВИЋ СЛОБОДАН	218	07:09	18:41	11:32	11.07	48	311	272	15	4	80.46
18.10.2017 Среда	СТОЈКОВИЋ ЗОРАН	224	07:39	16:30	08:51	08.58	50	175	109	0	2	49.49
20.10.2017 Петак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:02	18:14	11:12	10.58	35	310	268	0	3	79.56
23.10.2017 Понедељак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:31	18:56	11:25	10.59	47	311	274	0	3	74.07
25.10.2017 Среда	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:03	15:11	08:08	07.54	29	175	139	2	2	57.15
27.10.2017 Петак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:02	17:22	10:20	10.11	43	310	238	14	3	71.04
27.10.2017 Петак	СТЕВИЋ ДРАГАН	200	07:22	13:51	06:29	06.00	21	310	73	0	1	36.22
30.10.2017 Понедељак	СТАНКОВИЋ БОЈАН	218	07:39	18:16	10:37	10.38	42	311	270	0	3	73.24
УКУПНО:		14	/		140.39	136.08	525	3804	3044	37	37	910.55
ПРОСЕЧНО:		/	7.18	17.20	10.49	10.28	40.38	293	234	3	3	70

*НАПОМЕНА: Укупно и просечно време је изражено у сатима и минутима

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода“

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 12.07.2018.

Потпис аутора дисертације:

Марковић Данијел

Изјава 2.

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов дисертације:

**„Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом
хеуристичких метода“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 12.07.2018.

Потпис аутора дисертације:

Марковић Данијел

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода“

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)⁴

У Нишу, 12.07.2018.

Потпис аутора дисертације:

Марковић Данијел

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља и име	Марковић Слађан Данијел
Датум и место рођења	27.11.1983. Сурдулица, Србија

Основне студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет у Нишу
Студијски програм	Транспортна техника и логистика
Звање	дипломирани инжењер машинства, образовни профил Транспортна техника и логистика
Година уписа	2002.
Година завршетка	2008.
Просечна оцена	9.08 (девет и 08/100)

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет	-
Факултет	-
Студијски програм	-
Звање	-
Година уписа	-
Година завршетка	-
Просечна оцена	-
Научна област	-
Наслов завршног рада	-

Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет у Нишу
Студијски програм	Транспорт, логистика, мотори и моторна возила
Година уписа	2008.
Остварен број ЕСПБ бодова	460 (Члан 20, Правилник о докторским студијама Машинског факултета у Нишу)
Просечна оцена	9.83 (девет и 83/100)

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода
Име и презиме ментора, звање	Др Горан Петровић, доцент
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	НСБ број 8/20-01-008/12-007 од 17.12.2012.

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	162 (нумерисано: 146, нунумерисано 16)
Број поглавља	8
Број слика (шема, графикона)	61
Број табела	11
Број прилога	6

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Marković Danijel, Petrović Goran, Џојбашић Ђарко, Marinković Dragan, A comparative analysis of metaheuristic maintenance optimization of refuse collection vehicles using the taguchi experimental design, Transactions of Famena, Vol. 36, No. 4, 2013, pp. 25-38, ISSN 1333-1124.</p> <p>У овом раду су приказане различите мета-хеуристичке методе за решавање реалних оптимизационих проблема. Поред описа анализирани су параметри поменутих метода у циљу добијања оптималних параметара који конвергирају ка оптималним решењима. Подешавање параметара мета-хеуристичких метода вршено је помоћу Тагучијеве методе. Неки од метода који су коришћени за решавање проблема су: Реално кодирани генетски алгоритам, Симулирано каљење, Побољшани алгоритам хармонијског претраживања и Метод кукавице. Показано је да са раличитим параметрима метахеуристичке методе различито конвергирају ка локалном оптимуму. За одређене класе проблема потребно је било извршити фино подешавање параметара како би сензитивност метода била што мања.</p>	M23
2	<p>Marković Danijel, Madić Miloš, Petrović Goran, Assessing the performance of improved harmony search algorithm (IHSA) for the optimization of unconstrained functions using Taguchi experimental design, Scientific Research and Essays, Vol. 7, No. 12, 2012, pp. 1312-1318, ISSN 1992-2248.</p> <p>У овом раду представљен је побољшани алгоритам хармонијског претраживања из групе мета-хеуристичких метода за решавање математичких проблема. Поред описа анализирани су параметри поменутог алгоритма у циљу добијања оптималних параметара који конвергирају ка оптималним решењима. Подешавање параметара алгоритма вршено је помоћу Тагучијеве методе. Показано је да са раличитим параметрима поменути алгоритам различито конвергира ка локалном оптимуму.</p>	M23
3	<p>Milutinović Biljana, Stefanović Gordana, Dassisti Michele, Marković Danijel, Vučković Goran, Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model, Energy, Vol. 74, 2014, pp. 190-201, ISSN 0360-5442.</p> <p>У раду приказана је примена вишекритеријумске анализе за избор оптималног модела за процену одрживости при управљању отпадом са аспекта искоришћење енергије. Метод који је у овом раду примењен је Аналитички хијерархијски процес - АХП. Уочено је да је при анализи најважније одређивање индикатора који јасно и потпуно сублимирају најважније утицајне факторе. Верификација модела је извршена за студију случаја града Ниша. У раду је утврђено да је најбољи одрживи сценарио компостирање органског отпада и рециклирање неорганског отпада.</p>	M21
4	<p>Petrović Goran, Madić Miloš, Marković Danijel, Milić Predrag, Stefanović Gordana, Multiple criteria decision making of alternative fuels for waste collection vehicles in southeast region of Serbia, Thermal Science, Vol. 20 No. 5, 2016, pp. S1585-S1598, ISSN 0354-9836.</p> <p>У овом раду представљен је метод више-критеријумског одлучивања алтернативних горива за возила за превоз отпада у југоисточној Србији. У раду су разматране осам алтернативе горива и напредне технологије возила које су рангиране према тринаест критеријума. Анализа је показала да су биодизел горива (направљена од отпадног јестивог уља и из биљног уља) најбоља алтернативна горива за возила за превоз отпада у југоисточној Србији. Возила на компримовани природни гас- су високо ранжирани у овој анализи, али због недостатка финансијске способности за њихову куповину предложено је њихово постепено увођење у флоту возила за прикупљање отпада.</p>	M23
5	<p>Marković Danijel, Janošević Dragoslav, Jovanović Miodir, Nikolić Vesna, Application method for optimization in solid waste management system in the city of Niš, Facta Universitatis series Mechanical Engineering, Vol. 8, No. 1, 2010, pp. 63- 76, ISSN 0354-2025.</p> <p>У овом раду је дат поступак и методе избора оптималног система управљања чврстим отпадом у градском језгру града Ниша. При оптимизацији система постављени су следећи циљеви: максимална ефикасност система и максимално задовољење корисника услуга система. За избор система управљања отпадом, због његове сложености и могућности варијантног извођења, коришћен је вишекритеријумски метод оптимизације и одлучивања АНП (Analitic Hierarchy Process). Поступком оптимизације прво је извршено детаљно мерење и анализа параметара постојећег система управљања отпада на терену. Затим су дефинисане три могуће варијанте система. Спроведеним поступком оптимизације, изабрано је оптимално решење са новим параметрима којима се постојећи систем управљања чврстим отпадом у градском језгру града Ниша може кориговати у циљу веће ефикасности.</p>	M51
6	<p>Marković Danijel, Madić Miloš, Marinković Zoran, Tomić Vojislav, Petrović Goran, Harmony search and genetic algorithms for engineering optimization, theory and practice, 7th International Scientific Conference Heavy Machinery - HM 2011, (ISBN 978-86-82631-58-3), Vrnjačka Banja, 29.6.-2.7.2011., Serbia, pp. 43-48.</p>	M33

	<p>У првом делу овог рада је дат детаљан опис побољшаног алгоритма хармонијског претраживања из групе мета-хеуристичких алгоритама. У другом делу рада представљена је примена наведеног алгоритма на решавање тест функција варирањем параметара алгоритма. Тестиран је алгоритам са различитим параметрима у циљу добијања оптималних решења тест функција. Циљ је био одређивање оптималних параметра алгоритма како би се алгоритам успешно примењивао за решавање разних инжењерских проблема.</p>	
7	<p>Marković Danijel, Petrović Goran, Milošević Miloš, Milić Predrag, Madić Miloš, Metaheuristics for solving Vehicle Routing Problems with Stochastic Demands for waste collection, 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Proceedings, ISBN 978-86-6055-076-9, Sokobanja, 20.-23. Oktober, 2015, pp. 1123-1128</p> <p>У овом раду решаван је проблем усмеравања возила применом мета-хеуристичких методама. Разматран је проблема усмеравања возила са временским ограничењима где је потражња стохастичког карактера. У овом раду решаван је реални проблеми тј. проблем сакупљања и транспорт комуналног отпада. За решавање овог проблема, на бази хеуристичких метода и географских информационих система, развијен је софтвер који успешно доводи до оптималних решења.</p>	M33
8	<p>Marković Danijel, Petrović Goran, Marković Saša, Distance-constrained capacitated vehicle routing problems: case study and simulated data set, Sixth International conference, Transport and logistics TIL-2017, Faculty of mechanical engineering, University of Niš, pp. 308 - 313, ISBN: 978-86-6055-088-2, Niš, 25. Jun - 26. May, 2017</p> <p>У овом раду разматран је реални проблем усмеравања возила за сакупљање комуналног отпада када је ограничен капацитет возила и дужина трајања руте. За решавање овог проблема примењен је Clark-Wright-ов алгоритам а побољшање решења је изведено применом алгоритма Симулирано каљење. Оптималне руте су добијене применом софтвера <i>MatLab</i>.</p>	M33
9	<p>Marković Danijel, Madić Miloš, Tomić Vojislav, Stojković Sonja, Solving travelling salesman problem by use of Kohonen self-organizing maps, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS - Bulletin of Engineering, Vol. 5, No. 4, 2012 pp. 21-24, ISSN 2067-3809</p> <p>У овом раду разматран је основни проблем усмеравања возила, тј. проблем трговачког путника. За решавање овог проблема примењене су неуронске мреже. Описан је начин рада вештачких неуронских мрежа и објашњено је ненадгледано учење. У програмском пакету MATLAB развијен је модел на бази Кохоненових самоорганизујућих мапа. Симулацијом модела утврђени су параметри мрежа са којима је модел успешно тестиран на реалном проблему.</p>	M52

НАПОМЕНА: уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.	ДА
Данијел С. Марковић је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских академских студија на Машинском факултету у Нишу, студијски програм Машинско инжењерство, и стекао право на израду докторске дисертације.	
Данијел С. Марковић поднео је 24.09.2012. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу захтев за одобрење теме докторске дисертације (број 612-564-1/2012) под радним насловом „Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода“.	
Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу, на седници одржаној 08.10.2012. године одлуком број 612-596-7/2012, именовало је комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: др Миомир Јовановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Драгослав Јаношевић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Миомир Станковић, редовни професор Факултета заштите на раду у Нишу, др Вук Богдановић, ванредни професор Факултета техничких наука у Новом Саду, др Зоран Маринковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу.	
Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 09.11.2012. године на основу Извештаја (број 612-666/2012) Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Данијела С. Марковића, под насловом „Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода“ донело Одлуку (број 612-686-3/2012 став 1) о усвајању предложене теме докторске дисертације. На истој седници Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу донета је Одлука (број 612686-3/2012 став 2) о именовању др Зорана Маринковића, редовног професора Машинског факултета у Нишу за ментора израде дисертације Данијела С. Марковића.	
Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, на седници која је одржана 17.12.2012. године донело Одлуку (број 8/20-01-008/12-007) о давању сагласности на Одлуку о усвајању теме докторске	

дисертације Данијела С. Марковића под називом „Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода“ на Машинском факултету у Нишу.

Због одласка др Зорана Маринковића, редовног професора Машинског факултета, у пензију, Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 17.12.2015. године прихватило предлог Катедре за транспортну технику и логистику и донело Одлуку (број 612-779-6/2015) о именовану др Горана Петровића, доцента Машинског факултета у Нишу за новог ментора израде докторске дисертације кандидата Данијела С. Марковића.

Данијел С. Марковић поднео је 23.04.2018. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу Захтев (број 612-80-79-1/2018) за одређивање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу, на седници одржаној 10.05.2018. године донело Одлуку (број 612-253-4/2018) о именовану комисије за оцену и одбрау докторске дисертације Данијела С. Марковића под називом „Развој логистичког модела за управљање комуналним отпадом применом хеуристичких метода“ у саставу: др Драгослав Јаношевић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Жарко Ђојбашић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Гордана Стефановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Миомир Станковић, редовни професор у пензији Факултета заштите на раду у Нишу, др Горан Петровић, доцент Машинског факултета у Нишу-ментор. Истом Одлуком је за председника Комисије именован др Драгослав Јаношевић, редовни професор Машинског факултета у Нишу.

Данијел С. Марковић је првописани аутор рада који је објављен у часопису са импакт фактором из области којој припада тема докторске дисертације, првописани је аутор рада објављеног у часопису који издаје Универзитет у Нишу, из области теме докторске дисертације.

На основу свега наведеног, Данијел С. Марковић, дипл. инж. маш., испуњава све услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су прописани Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета у Нишу.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације *(до 500 речи)*

Докторска дисертација се састоји од осам поглавља: увод, преглед досадашњих истраживања проблема усмеравања возила за сакупљање комуналног отпада, управљање комуналним отпадом, дефинисање проблема усмеравања возила, научни приступ за решавање проблема усмеравања возила, логистика сакупљања комуналног отпада у урбаним срединама, развој концептуалног модела експертног система за динамичко усмеравање возила за сакупљање комуналног отпада и закључна разматрања. Претходе им: резиме на српском и енглеском језику, садржај, спискови слика и табела док се на крају налазе прилози, списак коришћене литературе и кратка биографија аутора.

У уводном поглављу је објашњена мотивација за бављење проблемом управљања отпадом и проблемом усмеравања возила за сакупљање отпада. Такође, у уводном делу је дата структура докторске дисертације.

У другом поглављу дат је систематичан приказ најзначајнијих литературних референци из области комбинаторне оптимизације и оптимизације система сакупљања и транспорта комуналног отпада уз посебан осврт на примену најбољих метода за оптимизацију рута кретања возила за сакупљање комуналног отпада.

У оквиру трећег поглавља представљено је управљање комуналним отпадом. Овај део дисертације, започет је правним оквирима управљања отпадом. Ту су представљене европске правне основе као смернице за развој националног и локалних еколошких акционих планова у области управљања отпадом. У наставку овог поглавља дате су основне карактеристике отпада које су важне за даља разматрања. За успешно имплементирање стратегије управљања отпадом морају се узети у обзир бројни кључни принципи управљања отпадом, којима је посвећен један део овог поглавља. У другом делу поглавља анализирани су и објашњене функције управљања отпадом са посебним освртом на кључне тачке сакупљања и транспорта комуналног отпада као важним деловима у логистици сакупљања и транспорта комуналног отпада у урбаним срединама.

Основни појмови и дефинисање проблема усмеравања возила дати су у четвртном поглављу. У овом поглављу дато је објашњење појмова проблема усмеравања возила и транспортних мрежа, као и појмова који се користе за дефинисање транспортне мреже. У наставку овог поглавља представљене су варијанте ВРП-а када су захтеви детерминистичке и стохастичке величине.

У петом поглављу представљен је научни приступ за решавање проблема усмеравања возила. У уводном делу овог поглавља објашњен је сам појам оптимизације као и подела оптимизационих метода. У наставку поглавља дато је објашњење проблема стохастичке оптимизације применом методе условне неизвесности (eng. chance-constrained method). Затим, у наставку поглавља представљен је хеуристички и мета-хеуристички приступ за

решавање ВРП-а. Из групе хеуристичких метода представљене су и објашњене следеће методе: Clark-Wright-ов алгоритам уштеде, Sweep-ов алгоритам и алгоритам 2-ОПТ локалне претраге. За мета-хеуристичке методе је прво дата подела према различитим основама а у наставку су детаљно објашњене две методе: алгоритам хармонијског претраживања и алгоритам симулираног каљења. Ове наведене хеуристичке и мета-хеуристичке методе су примењене у шестом поглављу за решавање дефинисаних модела.

У уводном делу шестог поглавља описана је логистика сакупљања и транспорта комуналног отпада у урбаним срединама. Након тога, узимајући у обзир високе транспортне трошкове, варијације у количини отпада, број ангажованих возила, број оператера и других ограничења, дефинисана су четири математичка модела за добијање оптималног ВРП-а за сакупљање комуналног отпада у урбаним срединама. Након дефинисања модела примењене су оптимизационе методе за одређивање рута кретања возила за сакупљање комуналног отпада.

У седмом поглављу представљен је развој концептуалног модела експертног система за динамичко усмеравање возила за сакупљање комуналног отпада. У овом делу дисертације детаљно је дато објашњење модела употребом информационо-комуникационих технологија. Такође је представљено како функционише модел услед пројектовања нових рута због отказа првобитно испројектованих рута.

У последњем, осмом поглављу представљена су закључна разматрања везана за оптимизацију модела за динамичко усмеравање возила за сакупљање комуналног отпада када су захтеви стохастичке величине. Посебна пажња је посвећена анализи економских перформанси дефинисаног модела за сакупљање и транспорт комуналног отпада. Истакнута је флексибилност дефинисане методологије, као и могућност њене примене у избору оптималних система сакупљања и транспорта комуналног отпада за било коју урбану средину. Поред тога, указано је, у смислу будућих истраживања, и на могућа унапређења концепта саме методологије и њених појединачних сегмената.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Радам на докторској дисертацији у потпуности су остварени циљеви постављени у пријави докторске дисертације.

У оквиру докторске дисертације развијен је логистички модел за пројектовање рута кретања возила за сакупљање и транспорт комуналног отпада у урбаним срединама. До развоја логистичког модела дошло се етапно, односно кроз развој четири модела. Оптимизација модела је вршена применом одређених хеуристичких и мета-хеуристичких метода као и њиховом комбинацијом.

Такође, извршена је практична провера развијеног модела и резултати показују да развијени модел даје одређена побољшања.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Истраживање показано у докторској дисертацији је веома значајно, како са научног тако и са стручног аспекта, због актуелности теме оптимизације рута кретања возила за сакупљање и транспорт комуналног отпада у урбаним срединама. Додатни научни значај представља могућност даље надоградње развијене методологије применом вештачке интелигенције и других оптимизационих метода. Практични значај ове дисертације се огледа у могућности примене развијеног логистичког модела у било ком урбаном подручју.

Дисертација представља оригиналан и вредан научни допринос кандидата. Научни допринос дисертације се огледа у следећем:

- Дефинисана је оригинална методологија израде модела за пројектовање рута сакупљања и транспорта комуналног отпада у урбаним срединама.
- Развијени су логистички модели за пројектовање рута кретања возила за сакупљање комуналног отпада када су количина и време сакупљања отпада детерминистички.
- Развијени су логистички модели за пројектовање рута кретања возила за сакупљање комуналног отпада када су количина и време сакупљања отпада стохастички.
- Развијен је концептуални модел експертног система за динамичко усмеравање возила за сакупљање и транспорт комуналног отпада.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидат Данијел С. Марковић је показао значајно теоријско и практично знање, а у истраживању је испољио висок ниво самосталности, оригиналности и креативности. Кандидат је показао систематичност и аналитичност при свеобухватној анализи постојеће стручне и научне литературе из области теме докторске дисертације. Кандидат поседује потребна знања из више области које је успешно применио у овом истраживању као и способност за анализу и уочавање значајних показатеља добијених резултата истраживања и смисао за њихово јасно формулисање и изражавање.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу прегледа рукописа докторске дисертације и увидом у објављене научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације закључују:

- Поднета докторска дисертација одговара теми докторске дисертације одобреној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу и Научно-стручног већа Универзитета у Нишу.
- Докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни допринос истраживању и развоју логистичког модела за сакупљање и транспорт комуналног отпада у урбаним срединама.
- Кандидат је показао висок степен самосталности и систематичности у бављењу научно-истраживачким радом.

Имајући у виду све наведено, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Нишу и Научно-стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу да се поднесу рукопис кандидата **Данијела С. Марковића**, дипломираног инжењера машинства под називом:


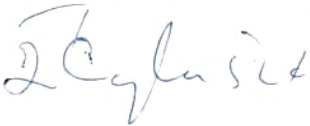
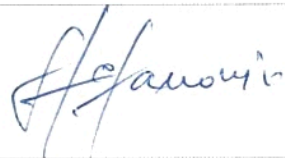
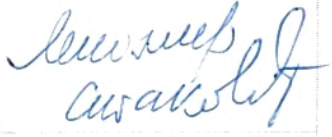

„РАЗВОЈ ЛОГИСТИЧКОГ МОДЕЛА ЗА УПРАВЉАЊЕ КОМУНАЛНИМ ОТПАДОМ ПРИМЕНОМ ХЕУРИСТИЧКИХ МЕТОДА“

прихвати као докторска дисертација и да се кандидат позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовану Комисије

Датум именовања Комисије

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	др Драгослав Јаношевић, редовни професор	председник	
	Транспортна техника и логистика (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
2.	др Жарко Ђојбашић, редовни професор	члан	
	Аутоматско управљање и роботика (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
3.	др Гордана Стефановић, редовни професор	члан	
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
4.	др Миомир Станковић, редовни професор (у пензији)	члан	
	Математика и информатика (Научна област)	Универзитет у Нишу, Факултет заштите на раду у Нишу (Установа у којој је запослен)	
5.	др Горан Петровић, доцент	ментор-члан	
	Транспортна техника и логистика (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	

Датум и место:

Мај, 2018. године,

У Нишу.