

Univerzitet u Beogradu

Saobraćajni fakultet

Branislava V. Ratković

MODELI ZA REŠAVANJE PROBLEMA
LOCIRANJA RESURSA U SISTEMIMA
POVRATNE LOGISTIKE

DOKTORSKA DISERTACIJA

BEOGRAD, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC
ENGINEERING

Branislava V. Ratković

MODELS FOR LOCATING RESOURCES
IN REVERSE LOGISTICS SYSTEMS

Doctoral Dissertation

BELGRADE, 2016

MODELI ZA REŠAVANJE PROBLEMA LOCIRANJA RESURSA U SISTEMIMA POVRATNE LOGISTIKE

Rezime

Problem sa kojim se suočava današnje društvo je iznalaženje načina za tretman proizvoda koji su odbačeni od strane krajnjih korisnika (povratni tokovi proizvoda) u cilju redukcije otpada i očuvanja prirodnih resursa, a time i povećanja udela otpada koji se može ponovo koristiti, uz istovremeno smanjenje opterećenja deponijskog prostora. Rešenje problema upravljanja povratnim tokovima proizvoda, materijala i roba, pruža povratna logistika (*eng. reverse logistics*) jer ponovno korišćenje proizvoda, u bilo kom obliku donosi korist, kako u ekološkom, tako i u socioekonomskom pogledu. Podupiranje ove tvrdnje naučnim metodama je jedan od glavnih ciljeva povratne logistike.

Efikasno i efektivno upravljanje povratnim tokovima proizvoda može doneti direktnu korist kompanijama kroz smanjenje sirovina u proizvodnji, stvaranje novih vrednosti kroz oporavak i obnavljanje vraćenih proizvoda, ili kroz smanjenje troškova odlaganja otpada na način koji je ekološki, društveno i zakonski prihvatljiv. Jasno je da finansijski uspeh sprovođenja aktivnosti povratne logistike određen, odnosno zavisi od operativne profitabilnosti uspostavljene logističke mreže. Kako bi maksimizirale vrednost korišćenih i vraćenih proizvoda, kompanije moraju da uspostave logističke strukture koje će upravljati povratnim tokovima robe na optimalan način.

Iz tog razloga predmet ovog istraživanja je projektovanje mreža povratne logistike, istovremeno modelirajući probleme rutiranja vozila i lokacije objekata, odnosno jednovremeno posmatrajući i strateški i taktički/operativni nivo odlučivanja, koji kao takav donosi uštede na duži vremenski period, za razliku od nezavisnog rešavanja problema lokacije objekata i rutiranja vozila. U istraživanju je predstavljen matematički model mešovitog celobrojnog linearnog programiranja za definisanje optimalne mreže za reciklažu ambalažnog otpada, formulisan kao

lokacijski-ruting model (*eng. Location Routing Problem, LRP*) i heuristički algoritam za njegovo rešavanje.

Rešenja dobijena predloženim heurističkim algoritmom su blizu optimalnih ili čak optimalna. Predloženi model je testiran za različite parametre sistema kako bi dobili bolji uvid u performanse sistema. Predloženi pristup u istraživanju može biti veoma koristan za vladine institucije, lokalnu samoupravu, kao i druge organizacije koje se bave pitanjima zaštite životne sredine, naročito kada reciklažna infrastruktura ne postoji ili ju je potrebno razviti. Štaviše, čak i u slučajevima kada odgovarajuća infrastruktura za reciklažu postoji, ovo istraživanje može doprineti poboljšanju i reorganizaciji postojećeg sistema.

Ključne reči: povratna logistika, lokacijski-ruting problem, linearno programiranje, heuristika

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Rukovanje materijalom i eko-logistika

UDK brojevi: 628.477:519.8(043.3)
502.131.1:005.3(043.3)

MODELS FOR LOCATING RESOURCES IN REVERSE LOGISTICS SYSTEMS

Abstract

The problem facing society today, is finding ways to treat products discarded by the end users (i.g. reverse flows of products), in order to reduce waste and preserve natural resources, thereby increasing the proportion of waste that can be reduced, while reducing the amount of waste sent to landfills. Solution to this problem gives reverse logistics, since the re-use of the products, in any form, provides benefits both in the environmental and socio-economic terms. Supporting this statement with scientific methods is one of the main goals of reverse logistics.

Efficient and effective management of reverse flows of products can bring direct benefits to companies through reduction in raw materials, creating new value through recovery and recovery of returned products, or by reducing the cost of waste disposal in a way that is environmentally, socially and legally acceptable. It is clear that the financial success of the reverse logistics activities implementation depends on the operating profitability of established logistics network. To maximize the value of used and returned products, companies need to establish a logistics structure that will manage the return flow of goods in an optimal way.

Hence, the subject of this research is to propose one way to design reverse logistics network, by simultaneously modeling problems of vehicle routing and facility locations. That is, simultaneously defining strategic and tactical / operational level decisions, which, as such, brings savings for a longer period of time, as opposed to independent solving problems of facility location and vehicle routing.

This research presents a mathematical model of mixed integer linear programming to define an optimal network for the recycling of packaging waste, defined as the location-routing model (eng. Location Routing Problem, LRP) and a heuristic algorithm to solve it. Solutions obtained by the proposed heuristic algorithm are close to optimal or even optimal. The proposed model is tested for a different system parameters in order to gain more insight into system performance. The

approach proposed in the study, can be very useful for government institutions, local authorities, and other organizations dealing with environmental issues, especially when recycling infrastructure does not exist or need to be developed. Moreover, even in cases where adequate infrastructure for recycling exist, this study points to the need for improvement and reorganization of the existing system.

Keywords: reverse logistics, location routing problem, linear programming, heuristics

Scientific field: Transport and traffic engineering

Field of academic expertise: Material handling and eco-logistics

UDK numbers: 628.477:519.8(043.3)
502.131.1:005.3(043.3)

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije

Mentor:

Dr Milorad Vidović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.

Drugi član komisije:

Dr Branka Dimitrijević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.

Treći član (spoljni) komisije:

Dr Nebojša Gvozdenović, vanredni profesor, Univerzitet u Novom Sadu, Ekonomski fakultet.

Datum odbrane: _____._____._____

Izjava zahvalnosti

Posvećeno mojoj majci, Mirjani.

Sadržaj

1	UVOD	1
1.1	Obrazloženje motiva za izbor teme istraživanja	1
1.2	Predmet i cilj disertacije	5
2	POVRATNA LOGISTIKA.....	10
2.1	Povratna logistika – definisanje pojma	10
2.2	Razlike između povratne logistike i drugih grana logistike	13
2.2.1	<i>Povratna logistika i zelena logistika</i>	13
2.2.2	<i>Povratna logistika i upravljanje otpadom</i>	13
2.2.3	<i>Povratna logistika i (direktna) logistika</i>	14
2.3	Faktori nastanka i razvoja povratne logistike	16
2.4	Aktivnosti povratne logistike.....	24
2.4.1	<i>Sakupljanje</i>	25
2.4.2	<i>Sortiranje, testiranje, inspekcija</i>	29
2.4.3	<i>Opcije tretmana</i>	29
2.4.4	<i>Karakteristike vraćenih proizvoda i učesnici u sistemu povratne logistike</i>	31
3	MREŽE POVRATNE LOGISTIKE.....	34
3.1.	Karakteristike i klasifikacija mreža povratne logistike.....	34
3.2	Pregled literature o lokacijskim problemima u povratnoj logistici	43
4	LOKACIJSKI-RUTING PROBLEMI.....	53
4.1	Osnovne karakteristike lokacijskih ruting problema	53
4.2	Klasifikacija LR problema i pregled literature	58
5	OPTIMALNI I HEURISTIČKI PRISTUP ZA REŠAVANJE LRP ZA OPTIMIZACIJU RECIKLAŽNE MREŽE.....	63
5.1	Opis problema	63
5.2	Matematička formulacija problema	69
5.3	Heuristički pristup rešavanju problema	74
5.4	Numerički primer	80
6	ZAKLJUČAK.....	91
7	LITERATURA.....	94
	BIOGRAFIJA AUTORA.....	113
	PRILOZI.....	114

Spisak slika

Slika 1.1	Mreža direktne i povratne logistike (preuzeto od Bostel i ostali 2005)	6	
Slika 1.2	Metodologija rada	9	
Slika 2.1	Tokovi proizvoda u direktnoj i povratnoj logistici (preuzeto od Agrawal i ostali 2015)	15	
Slika 2.2	Zakonodavni okvir upravljanja otpadom u EU (http://www.eurometrec.org/html/waste-laws.php)	19	
Slika 2.3	Faze razvoja povratne logistike u poslovanjima kompanija (prilagođeno sa http://cerasis.com/2015/07/08/reverse-logistics/)	21	
Slika 2.4	Razlozi vraćanja proizvoda (preuzeto i prilagođeno od BearingPoint Inc. (2008)	22	
Slika 2.5.	Aktivnosti povratne logistike (http://www.arasche.com/page7/assets/Rasche_SfE_October2009.pdf)	25	
Slika 2.6	Primer reciklažnog sistema (preuzeto i prilagođeno od http://www.slideshare.net/ECO-invest/stiglitz-christian-packaging-waste-management-following-the-extended-producer-responsibility-epr-principle-1995-2012-in-europe-and-the-austrian-experience)	26	
Slika 2.7.	Kontejneri za sakupljanje ambalažnog otpada (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trash_Recycling_with_Disposal_Containers.jpg)	27	
Slika 2.8	Curbside sistem sakupljanja (http://www.leegov.com/solidwaste/residential/curbside)	27	
Slika 2.9	Povraćaj automatom	(http://cuckoostuff.blogspot.rs/2012/01/vending-machine-for-cash.html http://www.nyctransitforums.com/forums/topic/36078-the-official-reverse-vending-machine-thread/page-2)	28
Slika 2.10	Osnovni okvir sistema povratne logistike (preuzeto i prilagođeno od de Brito 2004)	33	
Slika 3.1	Logistički sistem sa direktnim i povratnim tokovima proizvoda (prilagođeno od Melo i ostali 2007)	35	
Slika 3.2.	Mreže za direktnu upotrebu proizvoda (prilagođeno od Bloemhof-Ruwaard, 1999)	38	
Slika 3.3	Mreža za ponovnu proizvodnju (Bloemhof-Ruwaard 2001)	39	
Slika 3.4	Primer reciklažne mreže (Bloemhof-Ruwaard 1999)	39	
Slika 3.5	Primer mreže za komercijalne povraćaje (Bloemhof-Ruwaard, 1999)	40	
Slika 3.6	Kanal povratne logistike (preuzeto i prilagođeno od El korch i Millet 2011)	42	
Slika 3.7	Moguće kombinacije strukture povratne logistike (El korch i Millet 2011)	43	
Slika 3.8	Topologija mreža za obnavljanje proizvoda (preuzeto od Fleischmann i ostali 2000)	44	

Slika 3.9	Klasifikacija radova o oblastima istraživanja u povratnoj logistici (preuzeto od Sasikumar i Kannan 2009).....	49
Slika 3.10	Klasifikacija korišćenih pristupa modeliranja sistema povratne logistike preuzeto od Sasikumar i Kannan (2009).....	50
Slika 4.1.	Vrste LRP-a (preuzeto i prilagođeno od (Lopes i ostali 2013).....	55
Slika 4.2	LRP sa jednim nivoom u strukturi mreže (preuzeto i prilagođeno od Lopes i ostali. 2013).....	59
Slika 4.3	Primer LRP-a sa više ešalona (preuzeto od Drexl i Schneider 2015).....	59
Slika 5.1	2E-LRP reciklažna mreža.....	64
Slika 5.2	Funkcija pokrivanja	66
Slika 5.3	Reciklažna mreža.....	67
Slika 5.4	Grafički prikaz heurističkog algoritma	80
Slika 5.5	Prosečna vrednost funkcije cilja za različite parametre sistema (male instance).....	84
Slika 5.6	Prosečna iskorišćenost vozila (%) za različite vrednosti Q_k i Q_v (male instance).....	85
slika 5.7	Prosečna vrednost funkcije cilja za različite parametre sistema (srednje instance).....	86
Slika 5.8	Prosečna iskorišćenost vozila (%) za različite vrednosti Q_k i Q_v (srednje instance).....	87
Slika 5.9	Prosečna vrednost funkcije cilja za različite parametre sistema (velike instance).....	88
Slika 5.10	Prosečna iskorišćenost vozila (%) za različite vrednosti Q_k i Q_v (velike instance).....	89

Spisak tabela

Tabela 1.1	Opšti i specifični ciljevi upravljanja ambalažnim otpadom u republici Srbiji (Uredba o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada za period od 2010. do 2014. godine)	5
Tabela 2.1	Karakteristike preglednih radova u povratnoj logistici do 2015.god. (prilagođeno i dopunjeno od Govindan i ostali 2014b)	11
Tabela 2.2	Pregled definicija povratne logistike	11
Tabela 2.3.	Poređenje troškova povratne sa troškovima direktne logistike (preuzeto od Tibben-Lembke i Rogers 2002).....	16
Tabela 2.4	Poređenje tržišnih cena sirovina i recikliranih materijala (Mudgal i ostali 2014)	19
Tabela 2.5	Obrt prihoda u reciklažnom sektoru za period 2004.-2009*. god.....	20
Tabela 2.6	Količine recikliranih otpadnih materijala za pakovanje (1000 t) u EU (Fischer i ostali 2011).....	20
Tabela 2.7	Barijere pri implementaciji programa povratne logistike (prilagođeno i preuzeto od Agrawal i ostali 2015).....	21
Tabela 3.1.	Predloženi okvir za donošenja odluka prilikom projektovanja povratno logističke mreže (prilagođeno od Barker i Zabinsky 2008)	42
Tabela 3.2.	Legenda (za tabele 3.3 i 3.4)(preuzeto od Akçali i ostali 2009).....	45
Tabela 3.3	Karakteristike modela koji analiziraju isključivo povratne tokove proizvoda (Akçalii i ostali 2009).....	46
Tabela 3.4	Karakteristike modela koji analiziraju integraciju direktnih i povratnih tokova (Akçalii i ostali 2009)	48
Tabela 3.5	Raspodela radova po časopisima u periodu 1967-2008 (preuzeto od Sasikumar i Kannan 2009)	51
Tabela 4.1.	Neke od karakteristika LRP (prilagođeno i dopunjeno od Lopes i ostali 2013)	58
Tabela 5.1.	Ulazni parametri za test instance malih dimenzija.....	81
Tabela 5.2	Poređenje rešenja optimalnog i heurističkog pristupa rešavanju modela	82
Tabela 5.3	Ulazni parametri modela ua utvrđivanje performansi sistema.....	83
Tabela 5.4	Performanse reciklažnog sistema za probleme malih dimenzija	84
Tabela 5.5	Performanse reciklažnog sistema za probleme srednjih dimenzija.....	86
Tabela 5.6	Performanse reciklažnog sistema za probleme velikih dimenzija.....	88

Spisak skraćenica

UN – Ujedinjene Nacije

OEBS – Organizacija za bezbednost i saradnju (*eng. the Organisation for Economic Co-operation i Development - OECD*)

EU – Evropska Unija

ERP – produžena odgovornost proizvođača (*eng. extended producer responsibility – ERP*)

EOL – kraj životnog veka proizvoda (*eng. End-of-life – EOL*)

LRP – lokacijski ruting problem (*eng. location routing problem – LRP*)

MILP - mešovito celobrojno linearno programiranje (*eng. Mixed integer linear program - MILP*)

NP – (eng. Non-deterministic Polynomial time – NP)

1 UVOD

U ovom poglavlju su obrazloženi motivi izbora teme disertacije. Prvenstveno se misli na značaj i aktuelnost povratnih tokova proizvoda u logističkim sistemima. Nakon definisanja predmeta i ciljeva istraživanja disertacije, na kraju poglavlja je predstavljena metodologija izrade doktorske disertacije.

1.1 Obrazloženje motiva za izbor teme istraživanja

Integracija povratnih tokova proizvoda u postojeće ili planirane logističke sisteme postala je veoma značajno pitanje u poslednjoj dekadi XX veka, kako sa teoretskog, tako i praktičnog stanovišta. Problem sa kojim se suočava današnje društvo je iznalaženje načina za tretman proizvoda koji su odbačeni od strane krajnjih korisnika, u cilju redukcije otpada i očuvanja prirodnih resursa, a time i povećanja udela otpada koji se može ponovo koristiti, uz istovremeno smanjenje opterećenja deponijskog prostora. Od perioda industrijske revolucije, svetska privreda i ekonomija se razvijala po sledećem obrascu rasta "uzeti-proizvesti-potrošiti i baciti" (*eng. 'take- make-consume i dispose'*). Naime, zapadna društva koja su prednjačila u razvoju i primenama novih tehnologija proisteklih iz industrijske revolucije, karakterisala je masovna proizvodnja i potrošnja dobara, bez ikakvih ili vrlo malo obzira prema životnoj sredini i prirodnim resursima. Ovaj linerani obrazac rasta, iako još uvek u primeni, zasnovan je na pretpostavci da resursa (sirovina) ima u izobilju, da su dostupni svima, kao i da prostora za odlaganje nusproizvoda i samih proizvoda nakon upotrebe ima neograničeno (EU Commission 2014). Negativni efekti ovakve prakse se relativno dug period vremena nisu pojavljivali, odnosno nisu bili očigledni sve do kraja XX veka.

Procenjeno je da ako postojeći obrasci proizvodnje, korišćenja resursa i potrošnje ostanu nepromenjeni, do 2050. god. biće nam potreban ekvivalent od više od dve planete Zemlje da nas održi, a težnje mnogih za boljim kvalitetom života nikada neće biti ostvarene (European Commission 2011).

Navedeni razlozi su postepeno doveli do promena u načinu pristupa korišćenja prirodnih resursa i do pojave koncepta održivog razvoja i cirkularne (kružne) ekonomije. Tokom 70-ih godina XX veka održan je niz konferencija i samita pod pokroviteljstvom Ujedinjenih Nacija (UN) koje su rezultirale brojnim izveštajima od kojih je najpoznatiji izveštaj Svetske komisije za životnu sredinu i razvoj. U ovom izveštaju je navedeno da se ekonomski razvoj država ne može zaustaviti ali da ga je neophodno uklopiti u ekološke limite planete. U izveštaju je upotrebljen izraz održivi razvoj koji je definisan kao "razvoj u pravcu zadovoljavanja potreba sadašnjih generacija ne ugrožavajući mogućnost budućim da zadovolje njihove potrebe".

Masovna proizvodnja i potrošnja dobara, zajedno sa porastom broja stanovništva, na globalnom nivou je doprinela, između ostalog, i generisanju količina otpada koje su najviše ikada u istoriji čovečanstva. Trenutni globalni nivo generisanja otpada je oko 1.3 milijardi tona godišnje, a očekuje se porast na približno 2.2 milijardi tona godišnje do 2025. god. (Hoornweg i ostali 2012). Prema projekcijama Organizacije za Bezbednost i Saradnju (OEBS), očekuje se porast u generisanju komunalnog otpada za 38% do 2030 godine, u zemljama članicama OEBS-a, dok se u zemljama koje nisu članice očekuje da taj porast bude i do 70%, usled tehnoeconomskog razvoja i urbanizacije (Oecd 2008). Količina otpada koja se generiše ne samo da beleži porast, već se i sastav otpada menja. Razlog se nalazi u dramatičnom porastu upotrebe električnih i elektronskih aparata, koji imaju kratak upotrební vek. Planirano zastarevanje, neophodna nadogradnja ili prosto kupovina novog aparata, iako je stari uređaj potpuno funkcionalan su doprineli povećanju količina generisanog otpada. Sa druge strane ove količine otpada su promenile sastav otpada tako da danas otpad sadrži kompleksnu mešavinu materijala, uključujući plastiku, plemenite metale i opasne materije. Generisanje trenutnih količina otpada ima veliki uticaj na životnu sredinu, izazivajući zagađenja i emisije gasova staklene

bašte koji su uzrok klimatskih promena, sa jedne strane kao i veoma značajnog gubitka materijala i sirovina, sa druge strane. Procenjuje se da u Evropskoj uniji (EU) materijali koji završe na deponijama mogu imati godišnju komercijalnu vrednost od oko 5,25 milijardi € (European Commission 2010). Takođe, svake godine oko 80% od 3.2 biliona dolara vrednosti materijala koji se koriste za proizvodnju proizvoda se ni na koji način ne obnovi (Vaughn 2014).

Uviđajući problem pred kojim se našlo društvo, razvijene zemlje su kao prvi korak u rešavanju očuvanja prirodnih resursa i zaštite životne sredine usvojile određenu zakonsku regulativu. Istorijski gledano, principi održivog razvoja su uticali na donošenje brojnih "zelenih zakona", prvobitno u zapadnoj Evropi. Princip uključenja održivog razvoja u zakonodavni okvir je imao svoj koren u Nemačkoj donošenjem zakona o prevenciji i odlaganju otpada krajem 80-ih godina XX veka. Glavni princip ovog zakona je bio uvođenje produžene odgovornosti proizvođača (*eng. extended producers responsibility - ERP*) i delimična reorganizacija poslova vezanih za sakupljanje, tretman i odlaganje otpada. Ovaj zakon je postao jedan od glavnih kamena temeljaca razvoja povratne logistike (*eng. reverse logistics*) u Evropi sa fokusom na reciklažu i obnavljanje proizvoda na kraju životnog veka (*eng. End-of-Life - EOL*). ERP princip obavezuje proizvođača, uvoznika i/ili prodavca proizvoda da bude finansijski, organizaciono i pravno odgovoran za sakupljanje i tretman proizvoda nakon isteka njihovog upotrebnog veka. Uvođenje ERP principa je primoralo kompanije da aktivno upravljaju povratnim tokovima proizvoda kako bi ispunile zakonske obaveze i najčešće profitirale od efikasnog upravljanja povratnim tokova proizvoda. Povratak proizvoda, postupanje i rukovanje sa vraćenim proizvodima, testiranje i sortiranje vraćenih proizvoda za neku od opcija obnavljanja su postavili nove izazove i zadatke, kako proizvođačima, tako i svim učesnicima u tradicionalnom lancu snabdevanja sa kojima nisu bili suočeni u prošlosti.

Početak XXI veka, sa porastom konkurencije na globalnom tržištu i stupanjem na snagu brojne zakonske regulative u oblasti zaštite životne sredine, kompanije su bile primorane da počnu da aktivno rešavaju probleme vezane za povratne tokove proizvoda. Međutim, upravljanje povratnim tokovima je mnogo skuplje i rizičnije u

poređenju sa distribucijom robe, usled kompleksnosti i neizvesnosti povratnih tokova, velikih investicionih troškova, i potencijalne neprofitabilnosti poslovnih aktivnosti. Troškovi povratne logistike su postali veoma važna komponenta u troškovnoj strukturi kompanija i čine približno 5% do 6% ukupnih logističkih troškova u maloprodaji i sektoru proizvodnje (Daugherty i ostali 2001) a direktno utiču na profitabilnost kompanije u rasponu od 1.4-2% ukupnih troškova (UK Department of Transport 2004). Efektivno upravljanje povratnim tokovima može uštedeti kompanijama do 10% u ukupnim logističkim troškovima, dok se unapređenjem upravljanja procesima povratne logistike prihod može povećati do 5% (Minahan 1998).

Navedeni razlozi su doprineli da oblast logistike i operacija vezanih za povratak i upravljanje EOL proizvoda veoma brzo postane predmet interesovanja, kako naučne tako i privredne javnosti. Pojam povratne logistike se u Evropi ustalio tokom sredine 90-ih godina XX veka, kada ona počinje veoma brzo kao naučna disciplina da se razvija, ali i primenjuje u kompanijama. Iako sami procesi povratne logistike poput reciklaže i popravke proizvoda nisu novi, upravljanje vraćenim proizvodima sa fokusom na ERP princip predstavlja potpuno novi koncept kako u praksi, tako i u nauci.

Prethodno navedeni argumenti predstavljaju i motive za odabir teme koja je u poslednjih desetak godina postala izuzetno aktuelna, i sa dovoljno prostora za dalja istraživanja imajući u vidu karakteristike povratnih tokova proizvoda. Tema je veoma aktuelna u Republici Srbiji u kojoj potrebna logistička infrastruktura za upravljanje povratnim tokovima nije dovoljno razvijena (skoro da ni ne postoji). U Republici Srbiji u 2009. God. doneta dva ključna zakona u oblasti zaštite životne sredine (Zakon o upravljanju otpadom i Zakon o ambalaži i ambalažnom otpadu). Strategija upravljanja otpadom za period 2010–2019. predstavlja osnovni dokument koji obezbeđuje uslove za racionalno i održivo upravljanje otpadom na nivou Republike Srbije. U tom dokumentu se navodi da *”u Republici Srbiji ne postoji sistemski organizovano odvojeno sakupljanje, sortiranje i reciklaža otpada. Postojeći stepen reciklaže, odnosno iskorišćenja otpada je nedovoljan. Mada je primarna reciklaža u Srbiji propisana zakonom (tabela 1.1) i predviđa odvajanje papira, stakla*

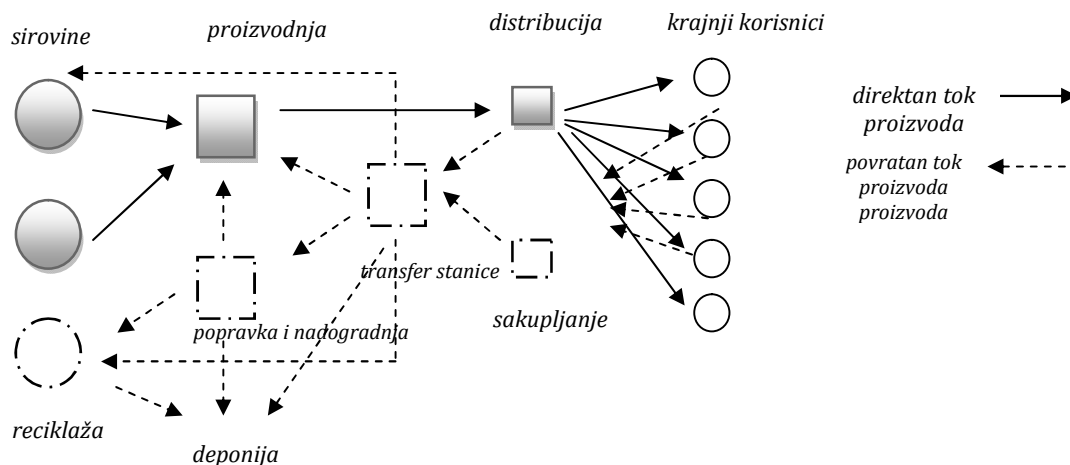
i metala u posebno označene kontejnere, reciklaža ne funkcioniše u praksi”, a jedan od razloga je svakako nedostatak potrebne infrastrukture.

Tabela 1.1 Opšti i specifični ciljevi upravljanja ambalažnim otpadom u republici Srbiji (Uredba o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada za period od 2010. do 2014. godine)

Opšti ciljevi upravljanja ambalažnim otpadom u Republici Srbiji					
Opcija tretmana/godina	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.
Ponovno iskorišćenje (%)	5	10	16	23	30
Reciklaža (%)	4	8	13	19	25
Specifični ciljevi za reciklažu					
Vrsta materijala/godina	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.
Papir/karton (%)	0	0	14	23	28
Plastika(%)	0	0	7.5	9	10.5
Staklo (%)	0	0	7	10	15
Metal (%)	0	0	9.5	13.5	18.5
Drvo (%)	0	0	2	4.5	7

1.2 Predmet i cilj disertacije

Većina postojećih logističkih sistema nije uobličena na način da podrži aktivnosti povratne logistike, jer samo prisustvo opcija obnavljanja u povratnoj logistici uvodi i neke nove zahteve. To znači da se u logistički sistem moraju uključiti nove funkcije ili novi učesnici, kao na primer objekti za sakupljanje, testiranje, sortiranje i tretman vraćenih proizvoda. Kako bi maksimizirale vrednost korišćenih i vraćenih proizvoda, kompanije moraju da uspostave logističke strukture koje će upravljati povratnim tokovima robe na optimalan način. U tom smislu, potrebno je doneti odluke o lokacijama različitih procesa povratne logistike i načinu njihove povezanosti koje se tiču procesa transporta i skladištenja. Zatim, potrebno je izabrati odgovarajuću strategiju sakupljanja odbačenih proizvoda, odlučiti o lokaciji na kojoj će se vršiti inspekcija, testiranje, sortiranje i tretman vraćenih proizvoda, i na kraju doneti odluku o načinu distribucije obnovljenih proizvoda budućim korisnicima. U tom smislu potrebno je ili redizajnirati postojeću logističku mrežu ili uspostaviti potpuno novu mrežu povratne logistike kako bi bili u mogućnosti da na efikasan način upravljamo povratnim tokovima proizvoda (slika 1.1).



Slika 1.1 Mreža direktne i povratne logistike (preuzeto od Bostel i ostali 2005)

Određivanje broja i lokacija objekata u sistemima povratne logistike predstavlja ključni zadatak prilikom projektovanja mreže povratne logistike. Međutim, projektovanje mreže povratne logistike značajno se razlikuje od projektovanja tradicionalnih logističkih mreža iz nekoliko razloga (Fleischmann i ostali 1997). Kao prvo, osnovna karakteristika mreže povratne logistike je konvergentna struktura mreže (struktura od više-ka-jednom, eng. *many-to-one*), za razliku od tradicionalnih distributivnih mreža koje karakteriše divergentna struktura (struktura jedan-ka-više, eng. *one-to-many*). Druga karakteristika mreže povratnih tokova je veliki stepen stohastičnosti kako u kvantitetu, tako i u kvalitetu vraćenih proizvoda ali i trenutku vremena kada se proizvodi vraćaju (Fleischmann i ostali 1997). To dalje otežava projektovanje mreže povratne logistike, jer iako se količina može približno oceniti (primenom metoda prognoziranja), kvalitet je nepoznat do trenutka pristizanja proizvoda. Naime, tek kada proizvodi stignu, procenjuje se njihovo trenutno stanje i određuje dalje postupanje sa njima, odnosno odabira se opcija obnavljanja koja je najbolja za svaki proizvod pojedinačno. To utiče na donošenje odluke o lokaciji na koju će se proizvod dalje uputiti, jer vrednost proizvoda direktno zavisi od kvaliteta i kvantiteta povraćaja. Treba naglasiti da ovako široka oblast koju obuhvata mreža povratne logistike ne podrazumeva da svim procesima koji se odvijaju unutar nje upravlja samo jedna kompanija, jer kao i u kontekstu tradicionalnog lanca snabdevanja odgovornosti mogu biti alocirane na

različite učesnike (Fleischmann i ostali 1997). Nadalje, krajnja tržišta za obnovljene proizvode možda nisu poznata, ističući još veću stohastičnost kada je u pitanju planiranje mreže u ovom kontekstu. Kada se ovi zadaci uporede sa projektovanjem konvencionalne proizvodno-distributivne mreže očigledno je ovde reč o kompleksnijem problemu, i u tom kontekstu su modifikacije i proširenja tradicionalnih lokacijskih modela neophodna, pogotovo ako se direktni i povratni tokovi proizvoda modeliraju istovremeno (Fleischmann i ostali 1997).

U poslednjih desetak godina, publikovan je značajan broj radova koji rešavaju probleme lokacije objekata u sistemima povratne logistike. Većina predloženih lokacijskih modela za projektovanje mreža povratne logistike su jednokriterijumski modeli sa ciljem maksimizacije profita ili minimizacije troškova, a pristup je baziran na celobrojnom linearnom programiranju (Fleischmann i ostali 1997; Barros i ostali 1998; Jayaraman i Srivastava 1999; Jayaraman i ostali 2003; Shih 2001; Min i ostali 2006; Salema i ostali 2006; Zhou i Wang 2008; Lee i Dong 2008; Yang i Wang 2007; Aksen i ostali 2009; Sasikumar i ostali 2010).

Međutim, kako je naglašeno, pored određivanja lokacije objekata u sistemu povratne logistike, potrebno je doneti odluke i o transportnim vezama između različitih objekata u sistemu povratne logistike, odnosno rutama vozila koja sakupljaju povratne tokove proizvoda. To se generalno može uraditi na dva načina, definisanjem lokacije objekata, a zatim definisanjem ruta vozila (nezavisno rešavanje problema lokacije objekata i rutiranja vozila) ili istovremenim određivanjem lokacije objekata i ruta vozila. Realni problemi sa kojima se susrećemo često zahtevaju da se oba problema modeliraju istovremeno, a ne nezavisno jedan od drugog.

Ideja da se problemi lokacije objekata i rutiranja vozila tzv. lokacijski ruting problemi (*eng. Location routing problem - LRP*) posmatraju istovremeno se javila pre skoro 50 godina. Lokacijski ruting problemi kako im i samo ime kaže spajaju dva problema, problem lociranja objekata i određivanja ruta vozila u jedan model gde se strateške i taktičke/operativne odluke istovremeno posmatraju i optimizuju. Međutim, iako je naglašena međusobna povezanost i uticaj lokacijskih i

odluka rutiranja, nedovoljno razvijena tehnologija, kao i nepostojanje odgovarajućih tehnika optimizacije, su uslovile da se ovi problemi veoma dug vremenski period posmatraju nezavisno jedan od drugog (Prodhon i Prins 2014). Salhi i Ri (1989) su bili prvi autori koji su dokazali da strategija do tada konzistentnog rešavanja lokacijskih i ruting problema nezavisno jedan od drugog dovodi do suboptimalnih rešenja. Ova ključna činjenica je inspirisala istraživanje u oblasti LRP od tada do danas. Objavljeno je nekoliko preglednih radova o LRP (Min i ostali 1998; Nagy i Salhi 2006; Prodhon i Prins 2014; Lopes i ostali 2013; Drexel i Schneider 2015), ali ono što se može videti iz dostupne literature je da ne postoji veliki broj radova koji probleme u sistemu povratne logistike formulišu kao LRP. Naime, u kontekstu povratne logistike većina objavljenih radova koji formulišu probleme kao LRP se fokusira na opasan otpad ili opasne materije (Samanlioglu 2013; Alumur i Kara 2007; Zhao i Verter 2015). Ali u kontekstu proizvoda koji nisu opasni, recimo ambalaže, u literaturi je pronađeno samo nekoliko radova koji formulišu problem kao LRP u sistemu povratne logistike (Liu i ostali 2012; Sheriff i ostali 2014; Caballero i ostali 2007). Ovakav pristup pri projektovanju mreža povratne logistike nije značajnije korišćen u literaturi i jedan od ciljeva u doktorskoj disertaciji je razvoj metodologije za projektovanje mreža povratne logistike istovremeno modelirajući probleme rutiranja vozila i lokacije objekata.

Shodno tome predmet istraživanja u disertaciji je projektovanje mreža povratne logistike, jednovremeno posmatrajući i strateški i taktički/operativni nivo odlučivanja, koji kao takav donosi uštede na duži vremenski period, za razliku od nezavisnog rešavanja problema lokacije i rutiranja.

Cilj istraživanja u disertaciji je razvoj matematičkog modela mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (*eng. Mixed integer linear program - MILP*) za projektovanje mreža povratne logistike formulisanog kao LRP, kao i heurističkog modela za rešavanje LRP-a. Kako LRP-i spadaju u NP teške probleme (*eng. Non-deterministic Polynomial time - NP*), optimalno rešavanje MILP modela je moguće samo za probleme manjih dimenzija, dok je za probleme većih dimenzija kakvi su i realni problemi neophodan razvoj heurističkih modela.

Imajući u vidu motive za izbor teme, kao i predmet i naučni cilj, disertacija je organizovana na sledeći način (slika 1.2). U drugom poglavlju je definisan pojam povratne logistike, motivi nastanka i razvoja povratne logistike. U trećem poglavlju su detaljnije objašnjene karakteristike mreža povratne logistike, a dat je i pregled relevantne literature u kontekstu projektovanja mreža povratne logistike. U četvrtom poglavlju date su osnovne karakteristike LRP-a, kao i pregled relevantne literature u kontekstu povratne logistike. U petom poglavlju je opisan problem koji predstavlja predmet istraživanja u disertaciji, kao i matematička formulacija, heuristički pristup rešavanju formulisanog modela i rezultati dobijeni testiranjem. U poslednjem poglavlju data su zaključna razmatranja i pravci daljeg istraživanja.



Slika 1.2 Metodologija rada

2 POVRATNA LOGISTIKA

U ovom poglavlju date su osnovne teoretske osnove sistema povratne logistike. Nakon definisanja samog pojma predstavljeni su razlozi nastanka povratne logistike, odnosno obrazloženi faktori koji su usloveli povratne tokove proizvoda. Na kraju poglavlja, u cilju detaljnijeg razjašnjenja sistema povratne logistike, opisani su elementi koji ga karakterišu.

2.1 Povratna logistika – definisanje pojma

Tokom poslednjih petnaestak godina, povratna logistika definisana je od strane brojnih autora. Ono što se može primetiti iz literature je da je broj objavljenih radova koji se bave problemima u povratnoj logistici, u poslednjih desetak godina, veoma veliki, o čemu svedoči i broj objavljenih preglednih radova (tabela 2.1). Međutim, gotovo svi autori se slažu u jednom a to je da radova koji se tiču formiranja teoretske osnove povratne logistike, odnosno njenog definisanja kao naučne discipline nedostaje, i do dan danas ima izuzetno malo. Usled veoma brzog razvoja aktivnosti i operacija povratne logistike, kako u praksi tako i akademskoj sferi, sam pojam povratne logistike se često poistovećivao sa terminima i konceptima koji su bliski povratnoj logistici. Naime, usled nepostojanja jasno i precizno definisanih pojmova povratne logistike u literaturi se pod terminom povratne logistike i danas mogu pronaći sledeći pojmovi (na engleskom jeziku): "*reversed logistics*", "*reverse distribution*", "*return logistics*", "*reverse flow logistics*", "*reverse supply chain*", "*closed loop supply chain systems*" i "*supply loops*". Iz tog razloga se povratna logistika često poistovećivala sa drugim granama logistike,

poput zelene logistike (*eng. green logistics*), upravljanja otpadom, kao i samom logistikom. Razlog ove neusaglašenosti leži svakako u procesu definisanja povratne logistike kao posebne naučne discipline, što je u nastavku detaljnije objašnjeno.

Tabela 2.1 Karakteristike preglednih radova u povratnoj logistici do 2015.god. (prilagođeno i dopunjeno od Govindan i ostali 2014b)

Autori	Oblast istraživanja	Vremenski period analiziranih radova
Fleischmann i ostali (1997)	Kvantitativne metode u povratnoj logistici	
Fleischmann i ostali (2000)	Karakteristike mreža povratne logistike	
Prahinski i Kocabasoglu (2006)	Mogućnosti istraživanja u povratnoj logistici	
Sasikumar i Kannan (2009)	Upravljanje zalihama i obnavljanje proizvoda na kraju životnog ciklusa	do 2008
Sasikumar i Kannan (2008)	Povratna distribucija	do 2009
Rubio i ostali (2008)	Upravljanje proizvodnjom i operacijama	1995-2005
Pokharel i Mutha (2009)	Celokupna oblast povratne logistike	1971-2008
Akcali i ostali (2009)	Projektovanje mreža	do 2008
Chanintrakul i ostali(2009)	Projektovanje mreža	2000-2008
Ilgin i Gupta (2010)	Obnavljanje proizvoda u povratnoj logistici	1998-2009
Chan i ostali (2010)	Just in time i povratna logistika	Do 2009
Jayant (2012)	Celokupna oblast povratne logistike	1990-2009
Carrasco-Gallego i ostali (2012)	Studije slučaja u povratnoj logistici	Do 2010
Govindan i ostali (2014b)	Celokupna oblast povratne logistike	2007-2013
Agrawal i ostali (2015)	Prognoziranje i outsourcing u povratnoj logistici	1986-2015

Iako praksa ponovnog korišćenja materijala i proizvoda postoji odavno, veoma je teško utvrditi kada se pojam povratne logistike pojavio kako u naučnoj, tako i u poslovnoj literaturi. Termini poput "povratni tok" (*eng. reverse flow*) ili "povratni kanali" (*eng. reverse chanel*s) se pojavljuju u naučnoj literaturi tokom sedamdesetih godina XX veka, ali su usko povezani sa pojmom reciklaže (de Brito 2004). U tabeli 2.2 je dat pregled definicija povratne logistike koje se mogu pronaći u literaturi, dok su u nastavku detaljnije analizirane neke od njih.

Tabela 2.2 Pregled definicija povratne logistike

Autor/i	Definicija povratne logistike
Murphy i Poist (1989)	„Kretanje robe od korisnika do proizvođača u distributivnom kanalu“
Stock (1992)	„Termin korišćen da opiše ulogu logistike u procesu reciklaže, odlaganja otpada, kao i upravljanja opasnim otpadom. U širem kontekstu, odnosi se na sve logističke aktivnosti vezane za redukciju otpada, reciklažu, ponovnu upotrebu i zamenu materijala i sirovina i finalno odlaganje“.
Giuntini i Iel (1995)	„Organizovano upravljanje materijalnim resursima dobijenim od krajnjih korisnika“

Autor/i	Definicija povratne logistike
Thierry i ostali (1995)	<i>„Sve one aktivnosti koje potpadaju pod upravljanje svim korišćenim i odbačenim proizvodima, materijalima i komponentama koje predstavljaju odgovornost kompanije koja ih proizvodi“</i>
Kroon i Vrijens (1995)	<i>„Logistički menadžment veština i aktivnosti povezanih sa smanjenjem, upravljanjem i odlaganjem opasnog ili neopasnog otpada koji potiče od ambalaže ili proizvoda“</i>
Carter i Ellram (1998)	<i>„Povratna logistika je proces kroz koji kompanije mogu da budu efikasne u pogledu životne sredine kroz recikliranje, ponovno korišćenje i smanjenje korišćenih materijala. Usko gledano, to se može posmatrati kao povratna distribucija proizvoda između učesnika u lancu snabdevanja. Holistički pogled na povratnu logistiku uključuje redukciju materijala u direktnom lancu snabdevanja na način da se što manje materijala vraća nazad, da je moguća ponovna upotreba materijala, kao i da je recikliranje olakšano.“</i>
Rogers i Tibben-Lembke (1998)	<i>„Proces planiranja, implementacije i kontrole efikasnog i isplativog toka sirovina, poluproizvoda, finalnih proizvoda i informacija, od tačke korišćenja do tačke nastanka u cilju obnavljanja ili pravilnog odlaganja“</i>
Dowlatsahi (2000)	<i>„Povratna logistika je proces u kome proizvođač sistematično prikuplja prethodno korišćene proizvode ili delove proizvoda, sa mesta korišćenja, zbog mogućeg recikliranja, ponovne proizvodnje ili odlaganja“.</i>
Fleischmann (2001)	<i>„Povratna logistika je proces planiranja, implementacije i kontrole efikasnog i efektivnog toka i skladištenja sekundarne robe i proizvoda kao i informacija vezanih za njih a koje su suprotne tradicionalnom lancu snabdevanja u cilju obnavljanja vrednosti ili pravilnog odlaganja“</i>
REVLOG (2004)	<i>„Povratna logistika je proces planiranja, implementacije i kontrole povratnih tokova sirovina, poluproizvoda, ambalaže i finalnih proizvoda, od tačke proizvodnje, distribucije ili tačke korišćenja, do tačke obnavljanja ili pravilnog odlaganja“.</i>
Guide i ostali (2000)	<i>„Povratna logistika predstavlja proces obnavljanja odbačenih proizvoda, koji mogu uključiti materijale za pakovanje i ukрупnjavanje robe, a zatim njihovo ukрупnjavanje na centralnom mestu sakupljanja u svrhu recikliranja ili ponovne proizvodnje</i>

Murphy i Poist (1989) su bili prvi autori koji su koristili pojam povratna distribucija (*eng. reversed distribution*) kao ekvivalent današnjem pojmu povratne logistike (Quesada 2003). Oni su povratnu logistiku definisali kao *„kretanje robe od korisnika do proizvođača u distributivnom kanalu“*. U radu nije naglašeno da li je to postojeći ili novi distributivni kanal. Thierry i ostali (1995) su uveli pojam *"Product recovery Management-PRM"* kako bi opisali *„sve one aktivnosti koje potpadaju pod upravljanje svim korišćenim i odbačenim proizvodima, materijalima i komponentama koje predstavljaju odgovornost kompanije koja ih proizvodi“*. Cilj PRM-a je što je moguće veće obnavljanja ekonomske i ekološke vrednosti proizvoda, čime se smanjuju količine proizvoda koji završavaju kao otpad. Fleischmann (2001) je bio jedan autora koji je bio svestan konfuzije koja vlada u definisanju pojma povratne logistike i na osnovu analize do tada objavljenih definicija predložio je sledeću *„povratna logistika je proces planiranja,*

implementacije i kontrole efikasnog i efektivnog toka i skladištenja sekundarne robe i proizvoda kao i informacija vezanih za njih, a koje su suprotne tradicionalnom lancu snabdevanja, u cilju obnavljanja vrednosti ili pravilnog odlaganja". I do sada najsveobuhvatniju definiciju je predložila Evropska Radna Grupa za Povratnu Logistiku (REVLOG):

„Povratna logistika je proces planiranja, implementacije i kontrole povratnih tokova sirovina, poluproizvoda, ambalaže i finalnih proizvoda, od tačke proizvodnje, distribucije ili tačke korišćenja, do tačke obnavljanja ili pravilnog odlaganja“ (de Brito 2004).

2.2 Razlike između povratne logistike i drugih grana logistike

2.2.1 Povratna logistika i zelena logistika

Kako je u povratnoj logistici fokus na pitanju zaštite životne sredine i očuvanja prirodnih resursa, pojam povratna logistika se često poistovećuje sa pojmom zelene logistike. Međutim suštinska razlika između ovih pojmova leži u definisanju aktivnosti. Zelena logistika se fokusira na ekološke aspekte svih logističkih aktivnosti u lancu snabdevanja, kao na primer smanjenje uticaja pojedinih vidova transporta na životnu sredinu, primena standarda ISO 14000, itd. U aktivnosti povratne logistike spadaju sakupljanje, transport, skladištenje, sortiranje i testiranje, popravke, ponovna upotreba, reciklaža, itd. Dakle, aktivnosti zelene logistike se fokusiraju na direktnu ili tradicionalnu logistiku dok su, kako je već kroz brojne definicije povratne logistike rečeno, aktivnosti povratne logistike usmerene ka efikasnom iskorišćenju resursa koji se kreću unazad u lancu snabdevanja. Ukoliko se neki proizvod ili materijal ne kreće unazad u lancu snabdevanja onda operacije vezane za ove proizvode i materijale ne spadaju u aktivnosti povratne logistike. Međutim, činjenica da su određene aktivnosti zajedničke i za zelenu logistiku i za povratnu logistiku, kao na primer ponovna upotreba materijala, proizvoda ili transportno manipulativnih jedinica, doprinela je poistovećivanju ova dva pojma.

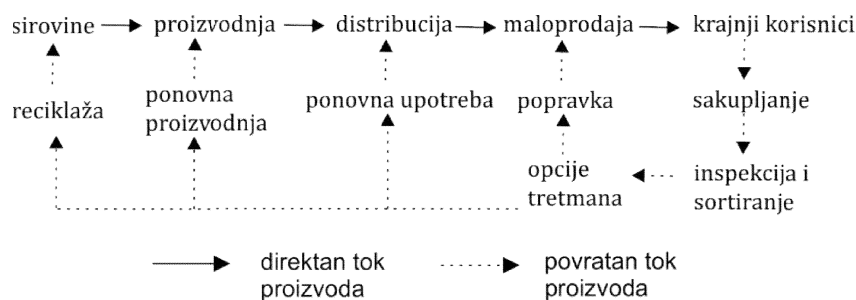
2.2.2 Povratna logistika i upravljanje otpadom

Još je značajnije razdvojiti pojam povratne logistike od pojma upravljanja otpadom. Upravljanje otpadom se odnosi na prikupljanje i dalju obradu otpada od proizvoda koji se ni na koji način ne mogu upotrebiti efektivno i efikasno. Može se čak otići i korak dalje u poređenju, prikazavši upravljanje otpadom kao jedan deo povratne logistike, koji se bavi samo krajnjom opcijom odlaganja neupotrebljivih proizvoda ili delova proizvoda na deponije. Kao detaljnije razgraničenje ova dva pojma, Fleischmann i ostali (2000) navode i razlike u strukturi mreža povratne logistike i sistema upravljanja otpadom, što je u nastavku detaljnije objašnjeno. Takođe navode da sistemi upravljanja otpadom kao i mreže povratne logistike, za razliku od tradicionalnih distributivnih mreža, u svojoj strukturi imaju objekte za sakupljanje, obradu i odlaganje odbačenih proizvoda u formi insineracije ili odlaganja na deponije. I u ovom smislu postoji analogija između sistema upravljanja otpadom i mreža povratne logistike. Međutim, glavna razlika između ove dve strukture je u krajnjoj destinaciji vraćenih proizvoda. Dok je tok vraćenih proizvoda u sistemu povratne logistike usmeren ka novim tržištima, u sistemima upravljanja otpadom generalno postoje dve opcije: insineracija ili odlaganje na deponije. Broj lokacija za insineraciju ili deponije je svakako manji od broja potencijalnih korisnika u kontekstu povratnih tokova. Zatim, izbor opcije za dalje postupanje sa vraćenim proizvodima u sistemima upravljanja otpadom je manje osetljiv u odnosu na kvalitet tih istih proizvoda. Naime, iako i u sistemima upravljanja otpadom postoje opcije sortiranja i testiranja (na primer izdvajanje opasnih materija) u zavisnosti od opcije tretiranja otpada (kontrolisana ili nekontrolisana insineracija, otvorene deponije ili zaštićene), na ove aktivnosti ne utiče kvalitet vraćenih proizvoda. Ovo za posledicu ima znatno manju stohastičnost u pogledu kvaliteta vraćenih proizvoda u sistemima upravljanja otpadom i to je može se reći jedna od glavnih razlika između ova dva sistema.

2.2.3 Povratna logistika i (direktna) logistika

Suštinska razlika između povratne i direktne (tradicionalne) logistike je u mehanizmu generisanja zahteva. Dok su tokovi direktne logistike vučeni tokovi, tokovi povratne logistike su gurani, a najočiglednija razlika između direktne i povratne logistike je u smeru kretanja proizvoda (Slika 2.1). Direktna logistika se,

kako je već rečeno, bavi divergentnim kretanjem proizvoda od jedne ka više destinacija (na primer, od proizvodnje do distributera, a zatim do krajnjih korisnika), dok su tokovi povratne logistike konvergentni (od više izvora ka jednoj destinaciji).



Slika 2.1 Tokovi proizvoda u direktnoj i povratnoj logistici (preuzeto od Agrawal i ostali 2015)

Povratna logistika se sastoji od procesa i aktivnosti kao što su sakupljanje, sortiranje, testiranje, tretman proizvoda, itd., dok direktna logistika uključuje tri glavna bazična procesa: nabavku, proizvodnju i distribuciju. Problem koji se javlja u sistemu povratne logistike jeste taj što je vrlo teško ili gotovo nemoguće odrediti količinu i kvalitet proizvoda koji će biti vraćeni od korisnika, sve do trenutka kada pošiljka stigne. Nepoznavanje parametara koji govore o količini i kvalitetu proizvoda koji se vraćaju predstavlja problem za organizaciju transporta vraćenih proizvoda. Kada se tome pridruži i činjenica da se proizvodi prikupljaju sa različitih mesta prilikom povratne distribucije, jasno je koliko je teško organizovati mrežu povratnih tokova. Brzina je faktor koji je veoma važan u direktnoj logistici. Naime, dostaviti pravi proizvod, na pravo mesto i u pravo vreme samo su neki od postulata distributivne logistike. U povratnoj logistici pak brzina ima manji značaj. Neophodno je prikupiti sve proizvode koji su odbačeni i dostaviti ih do centra za oporavak bez daljeg oštećenja prilikom manipulisanja i transporta. Brzina je manje važna od korektnog izvršenja svih neophodnih aktivnosti. Može se reći da je to jedna od prednosti povratne nad direktnom logistikom.

Što se tiče troškova, priroda i uočljivost troškova u povratnoj logistici nisu toliko transparentni, ali bitno je napomenuti da su prisutni troškovi kojih nema u

direktnoj logistici, npr. troškovi čišćenja (Tibben-Lembke i Rogers 2002) (tabela 2.2.).

Tabela 2.3. Poređenje troškova povratne sa troškovima direktne logistike (preuzeto od Tibben-Lembke i Rogers 2002)

<i>Trošak</i>	<i>Poređenje troškova povratne sa direktnom logistikom</i>
Transport	Viši: manje obimni transportni kanali
Držanje zaliha	Niži: proizvodi manje vrednosti
Krađa proizvoda tokom distribucije	Mnogo manja: ograničena upotreba bez popravke
Prikupljanje	Znatno veći: veći broj tačaka koje je potrebno obići
Sortiranje, procena kvaliteta	Zahtevnije : proizvod po proizvod
Rukovanje (manipulisanje)	Mnogo veće: nestandardizovane veličine i količine; različite ambalaže
Čišćenje / ponovno pakovanje	Tipično za povratnu logistiku, ne postoji u direktnoj logistici
Promena vrednosti	Tipično za povratnu logistiku, ne postoji u direktnoj logistici

2.3 Faktori nastanka i razvoja povratne logistike

De Brito (2004) u svojoj doktorskoj disertaciji navodi pet osnovnih pitanja koja definišu oblast povratne logistike:

- **Zašto** se proizvodi vraćaju, odnosno koji su to razlozi povratka proizvoda?
- **Zašto** se vraćeni proizvodi primaju, odnosno koji su to razlozi koji primoravaju kompanije i institucije da prihvataju vraćene proizvode?
- **Šta** se vraća, odnosno koji su to proizvodi i njihove karakteristike?
- **Kako** se vraćeni proizvod obnavlja, odnosno koje su opcije i procesi obnavljanja i tretmana vraćenih proizvoda?
- **Ko** sprovodi opcije obnavljanja i tretmana, odnosno učesnici u sistemu povratne logistike i koja je njihova uloga?

Što se tiče odgovora na pitanje koji su to razlozi koji primoravaju kompanije da prihvate vraćene proizvode od strane korisnika de Brito (2004) navodi sledeće:

- društvena odgovornost,
- tržište (profit) i
- zakonska regulativa.

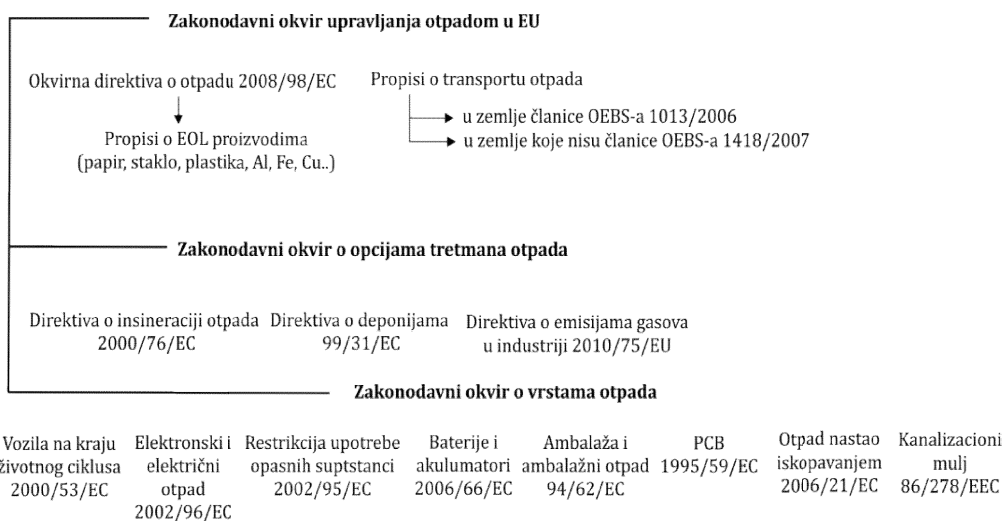
U nastavku su ovi razlozi detaljnije objašnjeni.

Društvena odgovornost – Obnavljanje proizvoda koji su korišćeni od strane krajnjih korisnika a zatim vraćeni unazad u lancu snabdevanja, za kompaniju predstavlja veoma važan element u izgradnji društveno odgovorne i ekološki orijentisane kompanije. U istraživanju Janse i ostalih (2009) navedeno je da je uvođenje programa povratne logistike u kompanijama uslovljeno konkurentskom prednošću (41%) i zakonima (23%). Doonan i ostali (2005) u svom istraživanju tvrde da dok je krajem 20 veka zakonska regulativa bila primarni pokretač uvođenja efektivnih programa povratne logistike u kompanije, to danas predstavljaju potrošači. U studiji BearingPoint Inc. (2008), kojom su obuhvaćeni direktori nabavke velikih, malih i srednjih kompanija u različitim sektorima industrije poput transporta, energije, automobilske, tekstilne, itd., 91% od 600 ispitanika su naveli da je razlog uvođenja programa povratne logistike u kompanije dobijanje etikete društveno odgovorne kompanije i na taj način povećanje lojalnosti i zadovoljstva korisnika. Prema ispitivanju sprovedenom još 2005 godine u SAD (Greve i Davis 2012), 95% korisnika se ne bi odlučilo na ponovnu kupovinu od kompanije ukoliko su imali negativna iskustva prilikom vraćanja proizvoda nazad. Ovo je posebno značajno kod elektronske trgovine, kao jedne od industrija koja je možemo reći najviše uslovljena povratom proizvoda. Na primer, u EU je usvojena direktiva 2011/83/EU kojom je od 13.06.2014. god. potrošačima dato pravo da se narudžbina povuče za svaki proizvod koji je kupljen ili poručen bilo gde sem u prodavnici (na primer od prodavca koji je došao do vas, internet, telefon) u roku od 14 dana (http://europa.eu/youreurope/citizens/shopping/shopping-abroad/returning-unwanted-goods/index_en.htm). Takođe, kao razlog uvođenja zelenih aktivnosti u poslovanje svojih kompanija 70% ispitanika u istraživanju sprovedenom 2008. god. (BearingPoint Inc. 2008) je navelo dobijanje etikete društveno odgovorne i ekološki orijentisane kompanije.

Zakonske obaveze - Zaštita životne sredine je jedan od primarnih pokretača sistema povratne logistike, a kako nijedna kompanija nije voljna da sama pokrene inicijativu za zaštitu životne sredine, bez neke vrste naknade ili profita, nacionalne vlade zemalja širom sveta su shvatile da je neophodno doneti zakone koji

obavezuju proizvođače da se ponašaju odgovorno prema životnoj sredini. U zakonskoj regulativi svakako prednjači EU koja je donela niz direktiva, a neke od njih imaju globalan uticaj poput Direktive o elektronskom otpadu (*eng. WEEE Directive*). Politika EU, prvenstveno po pitanju otpada, evoluirala je tokom poslednjih 30 godina kroz sprovođenje niza akcionih planova zaštite životne sredine i zakona koji su imali za cilj smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu i zdravlje ljudi, istovremeno stvarajući uslove za razvoj energetske i resursno efikasne ekonomije (slika 2.2). Primeri zakonskih instrumenata za zaštitu životne sredine u EU uključuju (<http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/waste#tab-related-publications>):

- zakonodavstvo po pitanju specifičnih tokova otpada kao na primer pakovanja (EU 1994), vozila (EU 2000), i elektronske i električne opreme (EU 2000, 2012)
- zakonodavstvo i uputstva za tretman otpada poput odlaganja otpada na deponije (EU 1999), insineracije (EU 2006), opcija tretmana (EU 2006,2010)
- zakonodavstvo u oblasti performansi proizvoda poput ekodizajna (EU 2005,2009), i restrikcije upotrebe određenih opasnih supstanci (EU 2002,2011)
- tematske strategije i okvire, kao na primer tematska strategija o reciklaži otpada (EU 2005) i okvir direktive po pitanju otpada (EU 2008)



Slika 2.2 Zakonodavni okvir upravljanja otpadom u EU

(<http://www.eurometrec.org/html/waste-laws.php>)

Ekonomski razlozi (profit) – Danas je većina globalnih proizvođača i prodajnih lanaca prepoznala uticaj povratnih tokova proizvoda, a upravljanje povratnim tokovima proizvoda se danas definiše više kao investiciona strategija kompanija i kao jedan od načina za smanjenje operativnih troškova kompanije, a ne kao neizbežan trošak. Međutim kako troškovi rukovanja povratnim tokovima proizvoda mogu dostići čak 50\$ po proizvodu i mogu biti i do 3 puta veći nego u direktnoj logistici (Shear i ostali 2003), kompanije moraju organizovati i upravljati aktivnostima povratne logistike na način da ostvare profit, a takvih primera ima mnogo. Tako primena neke od opcija obnavljanja proizvoda poput popravke ili reciklaže predstavlja mogući dodatni izvor prihoda za kompaniju preko plasiranja obnovljenih proizvoda na sekundarna tržišta. To potvrđuje i činjenica da se samo u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) svake godine proda u vrednosti od 100 miliona dolara proizvoda koji su prošli proces ponovne proizvodnje, dok taj sektor industrije zapošljava više od pola miliona ljudi (Hagerty i Glader 2011). Na primeru mobilnih telefona ova mogućnost je još očiglednija. Greve i Davis (2012) navode da se godišnje u proseku proda 1,2 milijarde mobilnih telefona na globalnom nivou. Tokom 2010. godine, stopa povratka mobilnih telefona je bila oko 8% što iznosi oko 96 miliona mobilnih telefona ili otprilike 16 000 t. Tržišna cena popravljenog ili na bilo koji drugi način obnovljenog mobilnog telefona se kreće u rasponu od 35-75% originalne cene. To ubedljivo govori o potencijalu vrednosti sekundarnog tržišta ove vrste proizvoda. Zatim, obnavljanjem korišćenih proizvoda se smanjuje zavisnost od snabdevača sirovinama (Tabela 2.5), ali obnavljanje proizvoda nekada je i jedini način da se dođe do određene komponente ili delova proizvoda. Na primer, u slučaju kada se proizvod više ne proizvodi, funkcionalne komponente proizvoda su neophodne usled garancijskog roka.

Tabela 2.4 Poređenje tržišnih cena sirovina i recikliranih materijala (Mudgal i ostali 2014)

Materijal	Cena sirovine (€/t)	Cena recikliranog materijala (€/t)	Odnos cene sirovine i recikliranog materijala (%)
Staklo	52-59	12.5-34	24-58

Materijal	Cena sirovine (€/t)	Cena recikliranog materijala (€/t)	Odnos cene sirovine i recikliranog materijala (%)
Papir/karton	717-776	115-136	16-18
Aluminijum	1719-1774	650-1080	38-61
Čelik	394-630	160-180	41-29
HDPE Plastika	990-1200	245-280	25-23
PET plastika	1550-1700	390-475	25-28

Najočigledniji primer ostvarivanja profita je preko reciklaže ambalažnog otpada. Prihodi od sedam glavnih kategorija reciklabila u EU u periodu od 2004.-2008. godine su se skoro udvostručili i iznose više od 60 milijardi EUR (European Environment Agency (EEA) 2011)(Tabele 2.6 i 2.7).

Tabela 2.5 Obrt prihoda u reciklažnom sektoru za period 2004.-2009*. god.

Parametar/godina	2004	2006	2007	2008	2009
Ostvareni prihod od reciklaže 7 ključnih reciklabilnih materijala (10 ⁶ EUR)	32535	47008	56082	60824	37229
Ukupna bruto dodatna vrednost u sektorima proizvodnje, energije i upravljanja otpadom u EU (10 ⁶ EUR)	1930790	2113325	2221800	2243801	1919044
Relativan odnos a/b (%)	1.69	2.22	2.52	2.70	1.94
Ukupna bruto dodatna vrednost u EU (10 ⁶ EUR)	9490958	9877205	10405157	11011791	11188957
Relativan odnos a/c (%)	0.34	0.48	0.54	0.55	0.33

* reciklirani materijali obuhvataju sedam glavnih grupa materijala namenjenih reciklaži: staklo; papir i karton; plastika, čelik i gvožđe; aluminijum, bakar i nikel; plemeniti metali; materijali za pakovanje

Tabela 2.6 Količine recikliranih otpadnih materijala za pakovanje (1000 t) u EU (Fischer i ostali 2011)

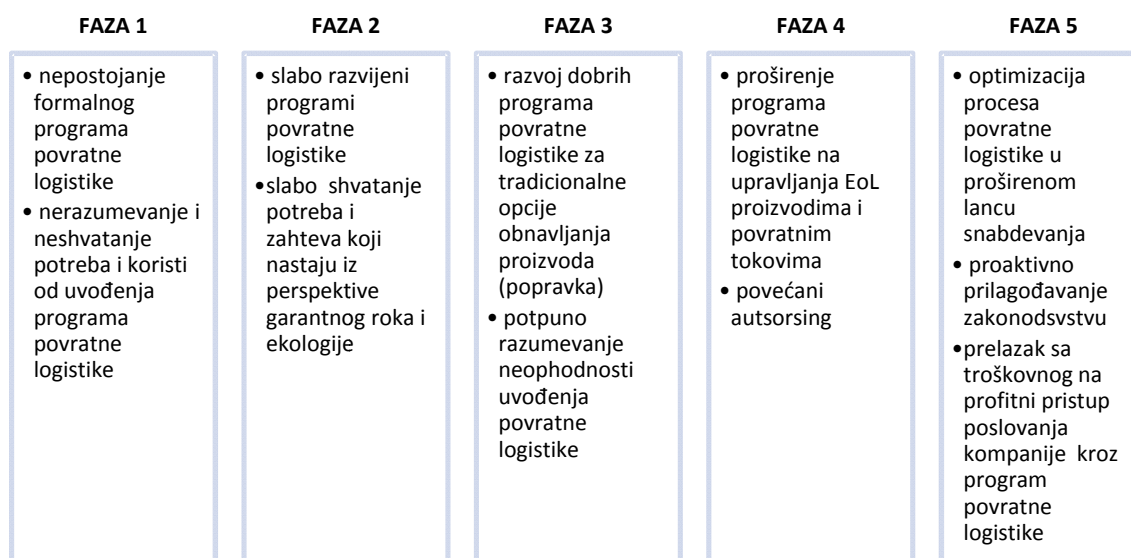
Količina recikliranih materijala (t)/godina	2004	2006	2007	Porast u količini recikliranih materija za period 2004-2007. god. (%)
Staklo	9371138	10007344	10431098	11.3
Papir i karton	21084092	23846340	24447851	16
Plastika	3250344	3975925	4119849	26.8
Metal	2753191	3227045	3215961	16.8
Svi materijali korišćeni za pakovanje proizvoda	36458765	41056654	42214759	16

U današnjem konkurentskom načinu poslovanja, više se ne postavlja pitanje da li će proizvod biti vraćen nego kada će biti vraćen (Greve i Davis 2012). Nacionalno udruženje maloprodaje procenjuje da je vrednost vraćenih proizvoda tokom 2011. god. u SAD iznosila oko 200 miliona dolara, što predstavlja uvećanje od oko 12% u odnosu na 2008. god

(http://www.logisticsmgmt.com/wp_content/purolator_wp_content_091213.pdf). Svi navedeni razlozi su primorali kompanije da razviju i uvedu program povratne logistike u svoje poslovanje, ali sam proces implementacije razvijenih programa može naići na određene poteškoće usled brojnih razloga, od kojih su neki navedeni u tabeli 2.7. Najčešće se proces razvoja i implementacije programa povratne logistike u praksi odvija kroz pet faza (slika 2.3)

Tabela 2.7 Barijere pri implementaciji programa povratne logistike (prilagođeno i preuzeto od Agrawal i ostali 2015)

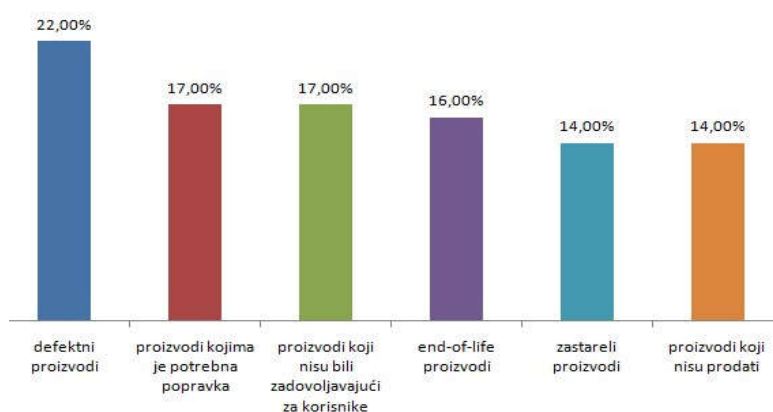
Autori	Faktori	Sektor industrije	Zemlja
(Carter i Ellram 1998)	Preferencija korisnika, ograničenje u resursima neophodnim za razvoj i uvođenje programa povratne logistike, zakonska regulativa	/	/
(Rogers & Tlbben-Lembke 1998)	Stav top menadžmenta, kompanijski propisi i akti	/	/
Janes (2010)	Nedostatak jasnih procedura oko povratka proizvoda, neadekvatan sistem praćenja performansi sistema, neprepoznavanje strateške vrednosti povratnih tokova itd.	Elektronska industrija	SAD
Mittal i Sangwan (2013)	Zakonodavstvo, pritisak javnosti, tehnologija, organizacija resursa u kompaniji	Industrija	Indija
Abdulrahman (2014)	Nedostatak eksperata u povratnoj logistici, nedostatak početnog kapitala, nedostatak ekonomskih državnih instrumenata itd.	Proizvodnja	Kina



Slika 2.3 Faze razvoja povratne logistike u poslovanjima kompanija (prilagođeno sa <http://cerasis.com/2015/07/08/reverse-logistics/>)

Očekuje se nastavak trenda porasta povratka proizvoda, pogotovo sa razvojem elektronske trgovine, tako da kompanije danas moraju aktivno da upravljaju tokovima vraćenih proizvoda. Međutim, pre nego što se određena strategija upravljanja povratnim tokovima usvoji potrebno je razumeti razloge povratka proizvoda. Najčešći razlozi povratka proizvoda prema istraživanju BearingPoint Inc. (2008) su prikazani na slici 2.4, dok glavne razloge povratka proizvoda unazad u lancu snabdevanja de Brito (2004) klasifikuje na sledeći način :

- proizvodni povraćaji proizvoda,
- distributivni povraćaji proizvoda i
- korisnički povraćaji proizvoda



Slika 2.4 Razlozi vraćanja proizvoda (preuzeto i prilagođeno od BearingPoint Inc. (2008))

Proizvodni povraćaji obuhvataju sve slučajeve gde se komponente ili proizvodi moraju popraviti u toku neke od faza proizvodnje. To su na primer sirovine koje su višak nakon proizvodnog procesa, poluproizvodi ili gotovi proizvodi koji nisu prošli kontrolu kvaliteta pa se moraju vratiti na doradu ili prepravke, itd.

Distributivni povraćaji podrazumevaju sve slučajeve povraćaja koji su inicirani tokom distributivne faze lanca snabdevanja. De Brito (2004) ove tokove kategorise na sledeći način :

- *opozivi proizvoda* - opozvani proizvodi su oni koji se povlače sa tržišta zbog naknadno utvrđene opasnosti po bezbednost i zdravlje ljudi. Tokom 2010. god. u SAD je recimo preko 1000 različitih

artikala bilo povučeno sa tržišta usled akata izdatih od strane vladinih agencija (Greve i Davis 2012).

- *B2B (eng. bussines to bussines) komercijalni povraćaji* - predstavljaju sve slučajeve kada postoji dogovor između proizvođača i distributera o vraćanju proizvoda usled pogrešne ili oštećene isporuke, kratkog životnog veka proizvoda na prodajnim mestima ili kada se jednostavno proizvod ne proda. U ovu grupu povraćaja mogu se svrstati i sezonski povraćaji kao i povraćaji usled isteklog roka upotrebe.
- *funkcionalni povraćaji* - uzimaju u obzir one proizvode kojima je glavna funkcija da se kreću napred i nazad u lancu snabdevanja, kao što je slučaj sa paletama, kontejnerima, izmenjivim transportnim sudovima i drugim oblicima transportno-manipulativnih jedinica za višestruku upotrebu.

Korisnički povraćaji obuhvataju sve one proizvode koji se uključuju u povratni logistički tok nakon što je proizvod dospao u ruke krajnjih potrošača, odnosno kupaca. U literaturi se navode brojni razlozi za ovu grupu povratnih tokova. Lista razloga može biti manja ili veća, u zavisnosti od životnog ciklusa proizvoda. De Brito (2004) ove razloge deli u sledeće grupe:

- *B2C (eng. bussines to consumer) komercijalni povraćaji* (garantovani povraćaj novca) – u slučaju kada se kupac predomisli nakon već obavljene kupovine i preuzetog proizvoda, jer proizvod ne zadovoljava kupčeva očekivanja; obično se radi o kratkom vremenskom periodu nakon kupovine i kupac dobija natrag svoj novac (nakon donošenja 2011/83/EU u Evropskoj Uniji ovaj vid povratka proizvoda nazad je postao veoma aktuelan). Naime, prema ovoj Direktivi ukoliko se proizvod kupi putem interneta, telefona, mejla ili faksa, kupac ima pravo da u roku od 14 radnih dana, bez ikakvog objašnjenja ili navođenja razloga, vrati taj proizvod prodavcu)
- *povraćaji na osnovu garancije* – ukoliko dođe do kvara ili proizvod ne funkcioniše na način koji je kupac očekivao, on može vratiti proizvod na osnovu garantnog lista koji dobija prilikom kupovine od prodavca;

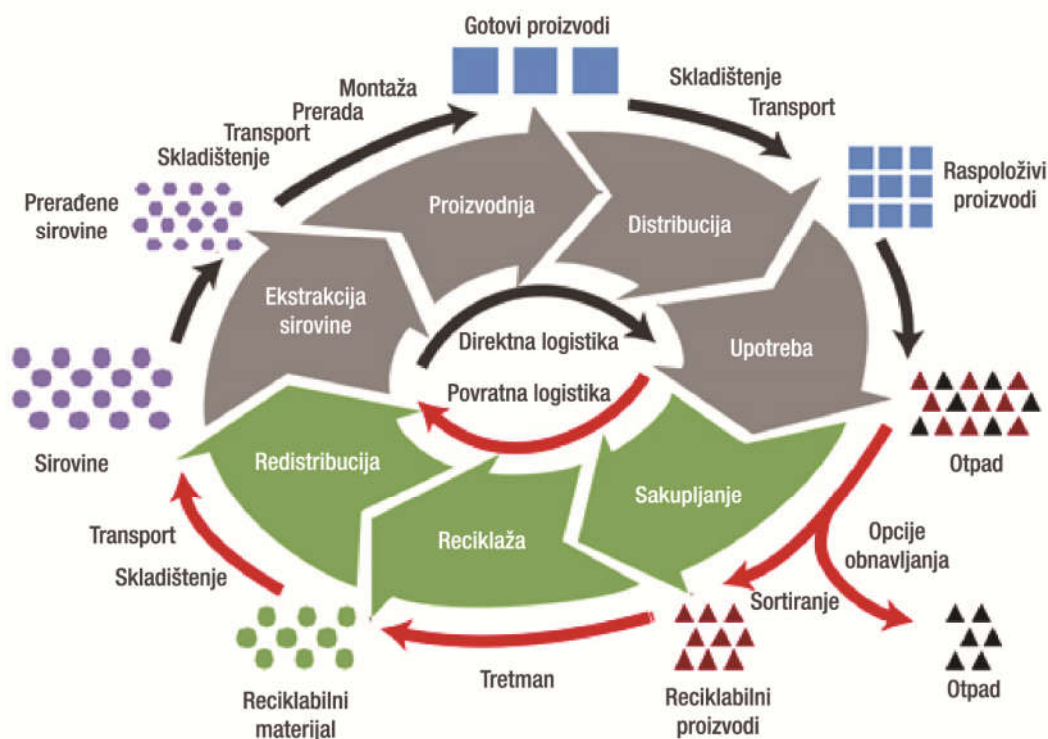
zavisno od kvara, kupac dobija novi proizvod, vraća mu se uloženi novac ili se vrše popravke na istom, nakon čega se ponovo vraća kupcu.

- *servisni povratni tokovi* – nakon isteka garantnog perioda kupac takođe može da vrati proizvod na popravku, ali ta usluga više nije besplatna; ove popravke se mogu vršiti kod kupca, ili se proizvod transportuje do servisnog centra.
- vraćanje proizvoda na kraju njihovog korišćenja (eng. *End-of-Use povratni tokovi*) obuhvataju sve povratne logističke tokove u situacijama kada korisnik ima mogućnost da vrati proizvod u nekom stadijumu životnog veka proizvoda. Jedan od čestih primera je slučaj lizinga proizvoda ili na primer vraćanje ambalaže poput staklenih boca.
- vraćanje proizvoda na kraju životnog veka (eng. *End-of-Life povratni tokovi*) – obuhvata vraćanje proizvoda koji su na kraju životnog veka. Ova vrsta povraćaja je najčešća danas kod elektronskih i električnih aparata, usled brzih promena koji se dešavaju u ovoj industriji i skraćanja životnog ciklusa proizvoda. Elektronska industrija potroši oko 14 miliona dolara na povratak proizvoda, a proizvođači bez dobro organizovanog sistema povratne logistike mogu izgubiti i preko 50% od vrednosti vraćene robe obzirom da se ovi proizvodi vrlo lako mogu prodati na sekundarnim tržištima (Greve i Davis 2012). Pored izgubljene dobiti, kompanije mogu biti suočene sa veoma visokim kaznama ukoliko ne ispune zahteve koje su propisani zakonima za ovu vrstu proizvoda.

2.4 Aktivnosti povratne logistike

Sistem povratne logistike obuhvata niz aktivnosti usmerenih u cilju ekološki prihvatljivog odlaganja proizvoda ili sprovođenja ekološki prihvatljivog tretmana. Ove aktivnosti uključuju sakupljanje proizvoda, operacije testiranja i sortiranja, demontažu proizvoda, skladištenje, transport i sam proces sprovođenja neke od opcija obnavljanja. Kada se proizvod transformiše kroz neku od mogućih opcija tretmana (na primer reciklaža), potreban je još jedan korak, odnosno potrebno je taj proizvod otpremiti na novo ili staro tržište čime se i stvara, odnosno nastaje

zatvoreni lanac snabdevanja kružnog toka (Slika 2.5). U nastavku je detaljnije objašnjena svaka od aktivnosti povratne logistike.

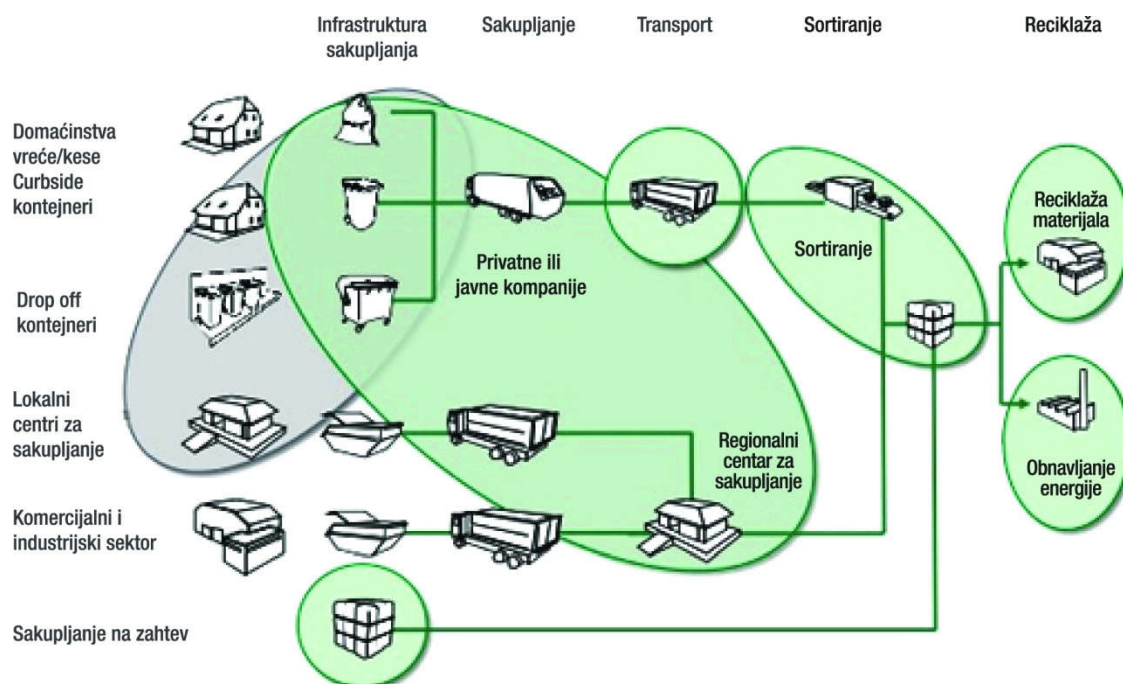


Slika 2.5. Aktivnosti povratne logistike

(http://www.arasche.com/page7/assets/Rasche_SfE_October2009.pdf)

2.4.1 Sakupljanje

Sakupljanje proizvoda je prva, ali, može se reći, i ključna aktivnost povratne logistike. To je aktivnost povratne logistike koja inicira sve ostale i koja mora biti planirana unapred kako bi se realizovala u skladu sa važećim zakonodavstvom i kako bi sistem povratne logistike bio profitabilan (Gungor i Gupta 1999). Sakupljanje se odnosi na dopremu proizvoda od lokacije u lancu snabdevanja sa kojeg se vrši povraćaj (fabrika, distributer ili potrošač-korisnik), do lokacije gde se vrši neki od oblika obnavljanja proizvoda, na primer reciklaža (slika 2.6).



Slika 2.6 Primer reciklažnog sistema (preuzeto i prilagođeno od

<http://www.slideshare.net/ECO-invest/stiglitz-christian-packaging-waste-management-following-the-extended-producer-responsibility-epr-principle-1995-2012-in-europe-and-the-austrian-experience>)

Sam način organizacije sakupljanja povratnih tokova proizvoda je, pre svega, uslovljen logističkom infrastrukturom sakupljanja, vrstom generatora povratnih tokova, njihovim demografskim i socio-ekonomskim karakteristikama, kao i vrstom proizvoda koji se sakuplja. Generalno, sve generatore povratnih tokova možemo podeliti na dve grupe, na domaćinstva i industriju i komercijalni sektor. Domaćinstva, generišu povratne tokove ambalaže i raznih proizvoda i materijala koji se mogu na neki način obnoviti (npr. kućni aparati, tekstil, nameštaj itd), ali u znatno manjim količinama nego industrijski i komercijalni sektor. Upravo te količine i određuju, na neki način, sam način organizacije sistema sakupljanja. Naime, pošto su kod industrije prisutne velike količine odbačenih proizvoda i materijala, sakupljanje se organizuje na način da se najčešće u definisanom vremenskom intervalu dolazi na lokaciju generatora i otpad koji je sakupljen za dati vremenski period se transportuje na sledeću lokaciju u sistemu povratne logistike. Kada su u pitanju domaćinstva, odnosno individualni generatori povratnih tokova, kako su u pitanju male količine koje se generišu, postoji nekoliko

strategija sakupljanja povratnih tokova proizvoda, koje se sreću kako u praksi tako i u literaturi, i to su:

- Sistem sakupljanja koji podrazumeva donošenje upotrebljenih proizvoda na zasebnu, za tu svrhu unapred utvrđenu i opremljenu lokaciju (*eng. bring collection system ili eng. drop-off locations*). Ovaj sistem sakupljanja je najčešće prisutan kod ambalažnog otpada (slika 2. 7) i njegova prednost je odvojeno sakupljanje različitih vrsta proizvoda koje kasnije nije potrebno razdvajati, tj. sortirati po vrsti materijala.



Slika 2.7. Kontejneri za sakupljanje ambalažnog otpada

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trash_Recycling_with_Disposal_Containers.jpg)

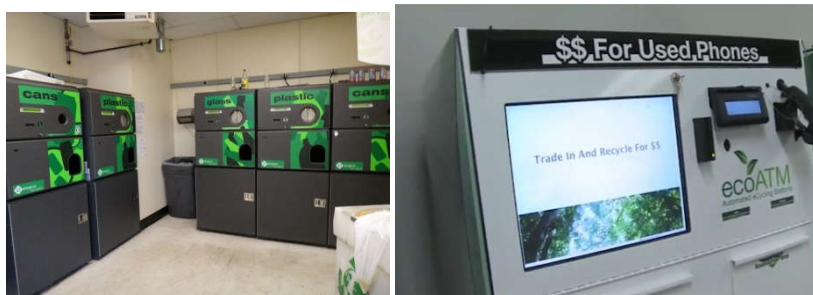
- sistem prikupljanja proizvoda odloženih duž trotoara (*eng. Curbside system ili door-to- door system*) (slika 2.8). Ovim načinom sakupljanja se sve vrste materijala i proizvoda mešaju, što kasnije otežava procese sortiranja i tretmana. U poređenju sa drop-off strategijom, ova strategija ima značajno više tačaka, tj. lokacija koje je potrebno obići prilikom sakupljanja, ali kada su u pitanju sakupljene količine, ova strategija je pokazala bolje rezultate nego drop-off.



Slika 2.8 Sistem prikupljanja proizvoda odloženih duž trotoara

(<http://www.leegov.com/solidwaste/residential/curbside>)

- Povraćaj automatom (*eng. Return vending machines*) podrazumeva sakupljanje raznih vrsta povratnih tokova proizvoda (ambalažni otpad, elektronski i električni aparati, tekstil, itd) za koji se može ili ne mora dobiti određena svota novca, što zavisi od vrste proizvoda i izabrane strategije prikupljanja istog, odnosno da li je sistem baziran na dobrovoljnoj bazi ili bazi novčane nagrade kao podsticaja za prikupljanje što većih količina proizvoda (slika 2.9).



Slika 2.9 Povraćaj automatom

(<http://cuckoostuff.blogspot.rs/2012/01/vending-machine-for-cash.html>

<http://www.nyctransitforums.com/forums/topic/36078-the-official-reverse-vending-machine-thread/page-2>)

- ponovno punjenje i depozit (*eng. Refill/deposit system*) je u suštini sistem baziran na kauciji i odnosi se u najvećem broju slučajeva na staklenu ambalažu. Do pre 20-tak godina za proizvode koji su pakovani u staklenu ambalažu prilikom kupovine se ostavljala određena svota novca kao obezbeđenje povratka staklene boce, tj. pakovanja. Međutim tokom poslednje decenije trend prelaska na pakovanje za jednokratnu upotrebu je potisnuo ovaj sistem, do tada standardan za robu pakovanu u staklenu ambalažu.
- otkupni centri (*eng. Buy-back centres*), kao i kod drop-off sistema sakupljanja, podrazumevaju lokacije na kojegenerator otpada donesi proizvode koje želi da odbacii, za razliku od drop-off strategije, za njih dobija određenu novčanu nadoknadu. Takođe, broj lokacija na kojima se nalaze otkupni centri je znatno manji nego broj lokacija u drop-off strategiji.

Ukoliko imamo u vidu moguće razloge povratka proizvoda, ovih pet strategija se odnose prvenstveno na proizvode koje korisnici iskoriste, a zatim odbace. Dakle, ne odnose se na povratak po osnovu garancije ili servisiranja, već je najčešće u

pitanju ambalažni otpad (staklo, limenke, PET boce) ili e-otpad. Svaka od navedenih strategija ima svoje prednosti i mane, i prilikom izbora načina sakupljanja određene vrste proizvoda potrebno je u obzir uzeti različite logističke, demografske, zakonodavne i ekološke faktore.

2.4.2 Sortiranje, testiranje, inspekcija

Sortiranje povratnih tokova proizvoda se može obaviti na dva načina: sortiranje na izvoru, odnosno slučaj kada sam generator sortira proizvode, najčešće prema vrsti materijala, ili slučaj kada se sortiranje vrši kasnije u nekom od objekata predviđenih za operacije sortiranja (npr. transfer stanice). Ukoliko se sortiranje vrši na izvoru, kompleksnost sortiranja u daljem sistemu povratne logistike opada, ali to za posledicu ima usložnjavanje procesa sakupljanja transportnim vozilom. Sa druge strane, ukoliko ne postoji sortiranje na izvoru, proces sakupljanja proizvoda nije toliko kompleksan, ali se sam proces sortiranja kasnije usložnjavava. U okviru aktivnosti inspekcije i testiranja proizvoda vrši se inspekcija proizvoda, procenjuje se kvalitet i određuje tip procesa obnavljanja, odnosno tretmana. Ova faza je takođe veoma bitna jer se dolazi do saznanja o stanju, tj. kvalitetu vraćenih proizvoda. U daljem postupanju sa proizvodima vrši se njihovo sortiranje i usmeravanje prema tipu obnavljanja koji je za njih određen. Ukoliko kroz direktno obnavljanje nije moguć povratak proizvoda na tržište oni se šalju na tzv. procesno obnavljanje. Ova vrsta obnavljanja može obuhvatiti nekoliko operacija kao što su čišćenje, rastavljanje na delove ili ponovno sastavljanje. U slučaju da nije moguće primeniti nijedan od navedenih oblika obnavljanja, proizvod se svrstava u otpad i odlaže na deponiju.

2.4.3 Opcije tretmana

U literaturi je opšte prihvaćena podela opcija tretmana koje su predložili Thierry i ostali (1995). Oni su naveli pet različitih opcija obnavljanja na koje je moguće poslati proizvod (ili delove proizvoda) na kraju upotrebnog (*eng. End-of-Use Products*) ili životnog veka (*eng. End-of-Life Products*):

- direktno ponovno korišćenje
- popravka

- nadogradnja
- ponovna proizvodnja
- recikliranje

Direktna ponovna upotreba podrazumeva da se vraćeni proizvod direktno prodaje novom potrošaču na istom tržištu sa kojeg je vraćen, ili se šalje na sekundarna tržišta i prodaje po povoljnijoj ceni (diskontne cene). Radnje koje eventualno mogu da prethode ponovnoj upotrebi jesu čišćenje i sitnije popravke, a u cilju dovođenja proizvoda u stanje u kome se može ponovo prodati. Jedan od primera proizvoda koji podleže ovoj opciji jeste ambalaža za višestruku upotrebu, kao što su boce, palete ili kontejneri (Fleischmann i ostali 1997).

Popravka proizvoda podrazumeva vršenje određenih radnji nad proizvodom ili njegovim pojedinim delovima u cilju dovođenja proizvoda u stanje ispravnosti, odnosno radno stanje. Kvalitet proizvoda koji su popravljani najčešće je manji od kvaliteta novih proizvoda (Parlikad i ostali 2003). Primera ima mnogo uključujući proizvode poput bele tehnike, industrijskih mašina i elektronske opreme (Fleischmann i ostali 1997).

Nadogradnja ima za cilj da proizvod dovede u radno stanje rastavljanjem na delove, proverom i testiranjem modula i zamenom onih koji su disfunkcionalni. Nadogradnja može uključiti i tehnološko poboljšanje proizvoda, odnosno zamenu prevaziđenih komponenata sa tehnološki superiornijim (Parlikad i ostali 2003). Primeri kompanija koje se bave nadogradnjom korišćenih računara su IBM Refurbished, Dell Refurbished, itd.

Ponovna proizvodnja je tip obnavljanja gde se proizvodi potpuno rastavljaju na module i delove. Vršiti se inspekcija delova, a potom se oni koji nisu u funkciji ili su tehnološki prevaziđeni, popravljaju ili zamenjuju novim. Ako je potrebno i izvodljivo, izvršava se nadogradnja nekih modula. Cilj ponovne proizvodnje je dovođenje proizvoda do standarda kvaliteta koji važi i za nove proizvode (Parlikad i ostali 2003).

Reciklaža predstavlja skup tehničko-tehnoloških operacija za dobijanje sirovina iz korišćenih proizvoda. Nakon razvrstavanja proizvoda, slede logističke operacije

skladištenja, pakovanja i transporta do pogona za reciklažu. U fabrikama se vrši dorada i/ili prerada različitim tehničko-tehnološkim postupcima, nakon čega se dobija sirovina koja se, sada kao sekundarna sirovina, ponovo vraća u isti ili neki drugi proizvodni proces u cilju dobijanja gotovog proizvoda.

Kada proizvod koji je vraćen kroz proces povratne logistike ne može da se obnovi ni na jedan način od prethodno navedenih, onda se on mora odložiti na deponiju u skladu sa zakonodavstvom. Alternativa odlaganju na deponije jeste dobijanje energije iz otpadnih materijala insineracijom, koja ima određenih uticaja na okruženje (Parlikad i ostali 2003). Insineracija otpada se primenjuje u cilju smanjivanja zapremine otpada, a energija koja se dobija iz procesa spaljivanja se može iskoristiti.

Sve navedene aktivnosti povratne logistike, poput sakupljanja, sortiranja, testiranja i opcija obnavljanja tj. tretmana, povezane su transportnom aktivnošću, čija je realizacija u ovom slučaju vrlo zahtevna. Sama aktivnost transporta učestvuje velikim delom u troškovima povratne logistike, uzimajući u obzir malu vrednost proizvoda i veliki broj lokacija koje je potrebno obići kako bi se proizvodi sakupili.

2.4.4 Karakteristike vraćenih proizvoda i učesnici u sistemu povratne logistike

U cilju sagledavanja pojma i problema povratne logistike, svakako je bitno definisati šta je to što ulazi u proces povratne logistike, koji su to proizvodi i kakve su im karakteristike. Pod karakteristikama se podrazumevaju standardne osobine poput dimenzija, vrednosti, mogućnosti transportovanja, zahteva prilikom transporta i skladištenja, materijala od kojih je proizvod izrađen itd. Prema pojedinim karakteristikama vraćenih proizvoda određuje se dalje postupanje sa njima i način na koji se može dobiti neki oblik vrednosti iz njih – da li će se proizvod samo popraviti, oprati, rastaviti na delove ili reciklirati u potpunosti itd. Broj delova i materijala od kojih je proizvod izrađen (sastav) u mnogome je značajan aspekt prilikom određivanja načina obnavljanja proizvoda. Pored broja i vrste različitih materijala bitan je i način na koji su ti materijali sastavljeni u proizvodu, odnosno koliko je lako ili teško izdvojiti materijale koji sačinjavaju proizvod. Kao primer može se navesti prisustvo opasnih materija (De Brito 2004),

njihova kompaktnost sa ostalim materijalima i način izolovanja iz proizvoda, imajući u vidu da opasne materije zahtevaju poseban tretman prilikom obnavljanja.

Kao što je veoma bitan aspekt proizvoda u sistemu povratne logistike, tako je veoma važno i predstaviti učesnike u lancu povratne logistike, one koji omogućuju i realizuju čitav proces. De Brito (2004) navodi da su najbitniji „igrači“ u sistemu povratne logistike sledeći:

- učesnici tradicionalnog lanca snabdevanja, tj. direktne logistike (snabdevač, proizvođač, trgovac na veliko, trgovac na malo)
- učesnici specijalizovanih povratnih lanaca – špekulanti, specijalisti za reciklažu, posvećene organizacije ili fondacije
- državne institucije – EU, nacionalne vlade, itd.
- ostale organizacije – npr. dobrotvorne organizacije

Kod različitih učesnika razlikuju se i aktivnosti koje obavljaju, kao i razlozi zbog kojih su oni uopšte deo sistema povratne logistike. Neki od učesnika su odgovorni ili organizuju povratni lanac, dok drugi učesnici imaju ulogu samo da izvršavaju pojedine aktivnosti (npr. komunalne službe se pojavljuju u okviru faze sakupljanja i eventualno razvrstavanja proizvoda koji se vraćaju; firme koje proizvode mobilne telefone dužne su, po WEEE direktivi u EU, da organizuju celokupan lanac za prikupljanje i povraćaj odbačenih telefona; transportne kompanije se uključuju u procesu dopreme proizvoda do sledećeg učesnika u lancu, koji je npr. specijalizovan za određeni oblik reciklaže, itd.). Ceo lanac povratka proizvoda mora biti efikasan, efektivan i optimalan, što je i suština povratne logistike. Potrebno je naglasiti da različiti učesnici povratnog lanca imaju različite ciljeve i interese u okviru svojih uloga, što predstavlja dodatni problem prilikom optimizacije celokupnog lanca.

Na osnovu svega navedenog moguće je napraviti osnovni okvir sistema povratne logistike (slika 2.10), koji daje odgovore na pitanja zašto se proizvodi vraćaju unazad u lancu snabdevanja, šta odnosno koji proizvodi se vraćaju, kako se vraćeni proizvodi tretiraju i ko je uključen u navedene procese.

Zašto?	<u>Razlozi povratka proizvoda</u>	<u>Razlozi prijema vraćenih proizvoda</u>
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ proizvodni povraćaj ▪ distributivni povraćaj ▪ korisnički povraćaj 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ekonomski (profit) ▪ društvena odgovornost ▪ zakonska regulativa
Šta?	<u>Vrsta proizvoda</u>	<u>Karakteristike proizvoda</u>
Kako?	<u>Procesi</u>	<u>Opcije tretmana</u>
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sakupljanje ▪ inspekcija, sortiranje i testiranje ▪ transport 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ponovna upotreba ▪ ponovna proizvodnja ▪ reciklaža ▪ nadogradnja ▪ popravka
Ko?		
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ učesnici tradicionalnog lanca snabdevanja ▪ učesnici u sistemu povratne logistike ▪ državne institucije ▪ nevladine organizacije 	

Slika 2.10 Osnovni okvir sistema povratne logistike (preuzeto i prilagođeno od de Brito 2004)

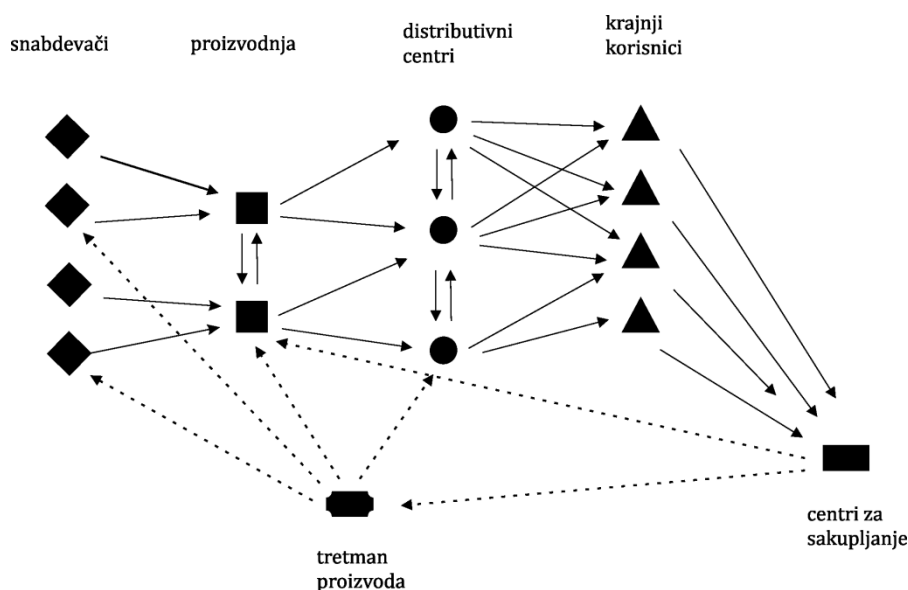
3 MREŽE POVROTNE LOGISTIKE

U ovom poglavlju su opisane osnovne karakteristike mreža povratne logistike koje ih diferenciraju od tradicionalnih distributivnih mreža. Naime, samo prisustvo opcija obnavljanja u povratnoj logistici uvodi dodatne elemente u strukturu mreže, koji inače nisu prisutni u distributivnim logističkim mrežama. Nakon opisa osnovnih karakteristika mreža povratne logistike, u ovom poglavlju su analizirane predložene klasifikacije mreža koje se mogu naći u literaturi. Takođe, dat je pregled literature koja tretira problematiku projektovanja mreža u kontekstu povratne logistike.

3.1. Karakteristike i klasifikacija mreža povratne logistike

Lociranje objekata u bilo kom sistemu (proizvodnom, distributivnom, uslužnom, itd.) spada u odluke strateškog karaktera, koje zahtevaju veoma velika investiciona ulaganja i imaju dugoročne implikacije na funkcionisanje samog sistema. Tipične odluke u logističkim i proizvodno distributivnim sistemima, prilikom projektovanja mreže, između ostalog su i određivanje broja, lokacije i kapaciteta objekata i definisanje transportnih veza na mreži (Owen i Daskin 1998). Tradicionalni distributivni logistički sistemi obuhvataju nekoliko nivoa u strukturi mreže i to su najčešće fabrike za proizvodnju, distributivni centri i krajnji korisnici. Proizvodi se od fabrika za proizvodnju otpremaju do krajnjih korisnika u jednom (direktnom) smeru. Međutim, većina postojećih logističkih sistema nije

isprojektovana da podrži aktivnosti povratne logistike, jer samo prisustvo opcija obnavljanja u povratnoj logistici uvodi neke nove karakteristike logističkih sistema, što znači da se u logistički sistem mogu uvesti nove funkcije ili novi učesnici, kao na primer lokacije centara za testiranje i sortiranje, sakupljanje i tretman vraćenih proizvoda (slika 3.1). Naime, proizvode koji imaju suprotan smer kretanja od tradicionalnog toka proizvoda potrebno je sakupiti od krajnjih korisnika i otpremiti na odgovarajuće lokacije na kojima se izvršavaju operacije testiranja i sortiranja. Zatim, u zavisnosti od stanja u kome se proizvodi nalaze, dalje se proizvodi otpremaju na lokacije na kojima se vrši proces tretmana. Proizvodi ili delovi proizvoda koji se ni na koji način ne mogu obnoviti se otpremaju na deponiju. U tom smislu, vrlo često, potrebno je ili redizajnirati postojeću logističku mrežu ili uspostaviti potpuno novu mrežu povratne logistike, kako bi bili u mogućnosti da na efikasan način upravljamo povratnim tokovima proizvoda.



Slika 3.1 Logistički sistem sa direktnim i povratnim tokovima proizvoda (prilagođeno od Melo i ostali 2007)

Jasno je da finansijski uspeh sprovođenja aktivnosti povratne logistike zavisi od operativne profitabilnosti uspostavljene logističke mreže. Odnosno, u kontekstu uspostavljanja logističke infrastrukture za efikasno i efektivno upravljanje

povratnim tokovima neophodno je dati odgovore na sledeća pitanja (Bostel i ostali 2005, Akçalı i ostali 2009):

- Koliko objekata je neophodno za efikasno sprovođenje aktivnosti povratne logistike?
- Gde locirati te objekte?
- Koje opcije obnavljanja svaki od objekata treba da obavlja?
- Koliki je kapacitet ovih objekata?
- Koja je alokacija fizičkih tokova između ovih objekata?
- Ko su učesnici u sistemu povratne logistike i koje su njihove odgovornosti?
- Da li se povratni i direktni tokovi proizvoda posmatraju kao zasebni ili zbirni tokovi u sistemu? Ako se posmatraju zasebno, koji je stepen njihove integracije, ako ga uopšte ima?
- Itd.

U literaturi se naglašavaju dve osnovne karakteristike mreža povratne logistike koje diferenciraju njihovo projektovanje i ujedno ga čine kompleksnijim od projektovanja tradicionalnih mreža:

- konvergentna struktura mreže, za razliku od tradicionalnih distributivnih mreža koje karakteriše divergentna struktura,
- stepen stohastičnosti u kvantitetu i kvalitetu vraćenih proizvoda, ali i trenutku vremena kada se proizvodi vraćaju.

Fleischmann i ostali (1997) naglašavaju da iako neke od opcija obnavljanja u povratnoj logistici ne zahtevaju formulisanje potpuno novih matematičkih modela za projektovanje mreža povratne logistike i da se postojeći modeli i pristupi u domenu upravljanja zalihama, proizvodnjom i povratnom distribucijom mogu primeniti na povratne tokove proizvoda, ipak se ne mogu primeniti na sve moguće varijante problema. U tom smislu su proširenja i prilagođavanja postojećih matematičkih modela neophodna, a ukoliko to problem zahteva i formulisanje novih, kako bi se na pravi način obuhvatile sve karakteristike mreža povratne logistike.

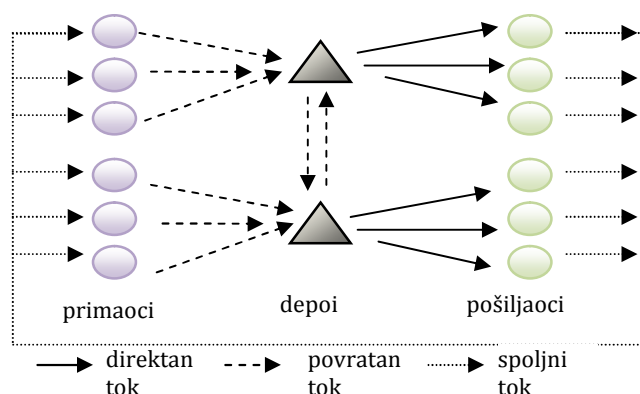
Primeri povratnih logističkih mreža su raznovrsni, a razlike koje postoje tiču se uključenih strana i njihovih odgovornosti, ali takođe i strukture mreže u smislu centralizacije i broja nivoa u mreži (Fleischmann i ostali 2001). Ukoliko se pak posmatraju vrste vraćenih proizvoda i opcije tretmana (Bostel i ostali 2005) moguće je napraviti sledeću podelu mreža povratne logistike:

- **Mreže za ponovnu upotrebu proizvoda** – Ponovna upotreba proizvoda se odnosi na proizvode koje je moguće koristiti više od jednog puta od strane istih ili različitih korisnika na istim ili različitim lokacijama na mreži. Carrasco-Gallego i ostali (2012) su sve proizvode koje je moguće na neki način ponovo upotrebiti klasifikovali na:
 - povratne transportno-manipulativne jedinice,
 - povratne materijale za pakovanje proizvoda i
 - proizvode koje je moguće ponovo upotrebiti (više od jednom).

U *povratno transportno-manipulativne jedinice* spadaju proizvodi poput paleta, gajbi, kontejnera, a koji mogu bez nekih većih operacija direktno biti korišćeni. Minimalni procesi kao što je čišćenje se zahtevaju pre ponovne upotrebe, što za posledicu ima prilično jednostavnu strukturu mreže, odnosno obuhvata mali broj nivoa. Veoma veliki broj povratnih ciklusa i odsustvo nekih složenijih procesa obnavljanja rezultuju visokim transportnim troškovima (Flapper 1996). U *povratne materijale za pakovanje proizvoda* spadaju oni materijali koji služe za primarno pakovanje proizvoda, odnosno oni materijali koji štite i čuvaju proizvod u stanju u kakvom se želi isporučiti krajnjem korisniku. U ove materijale spadaju na primer staklena ambalaža, kertridži za štampače, boce za gasove itd. U treću kategoriju, autori svrstavaju proizvode koji se upotrebljavaju više od jednog puta i kao primer navode upotrebu brojne medicinske opreme na primer sterilizovane medicinske instrumente, invalidska kolica, sve proizvode koje je kroz neki sistem moguće iznajmiti i vratiti (npr. knjige, bicikli, itd.).

Što se tiče ciklusa ponovne upotrebe proizvoda, oni su relativno veliki i za staklenu bocu na primer broj ciklusa ponovne upotrebe iznosi 25, drvenu paletu 50 a plastičnu gajbu 50 (Geyer i ostali 2007), što za posledicu ima znatno veće transportne troškove (Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999). U tom smislu je

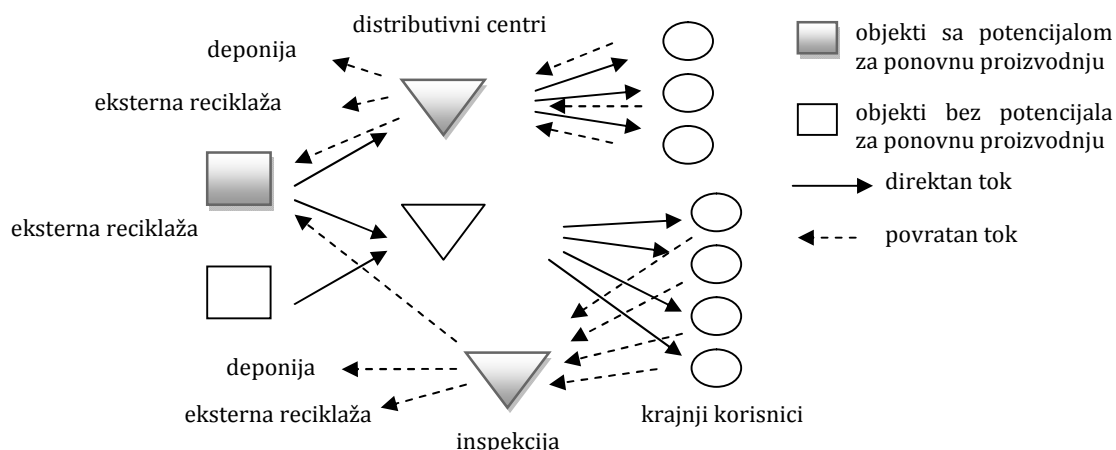
decentralizovana mreža bolje rešenje od centralizovane, jer se transportni troškovi od depoa koji su bliži krajnjim korisnicima znatno smanjuju. Sa druge strane, decentralizacija depoa na više lokacija naglašava značaj balansiranja tokova ove vrsta proizvoda za ovu vrstu mreže (Slika 3.2). Primeri povratno logističkih mreža za ponovnu upotrebu proizvoda se mogu naći u radovima Kroon i Vrijens 1995; Guide i van Wassenhove 2002; Mollenkopf i ostali 2005; Del Castillo i Cochran 1996; Rudi i ostali 2000.



Slika 3.2. Mreže za direktnu upotrebu proizvoda (prilagođeno od Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999)

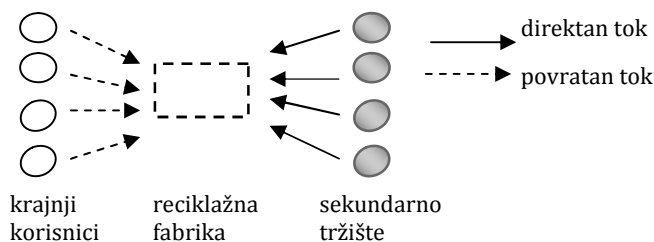
- **Mreže za ponovnu proizvodnju** –Proizvodi na kraju životnog veka ili proizvodi kojima je potrebno redovno održavanje (npr. fotokopir mašine) se vraćaju najčešće originalnom proizvođaču, i onda se delovi ili neke komponente prerađuju kroz proces ponovne proizvodnje kako bi bili korišćeni kao novi delovi ili komponente. Glavni motiv uspostavljanja ove vrste mreža je čisto ekonomski, odnosno dodata vrednost proizvoda kroz proces ponovne proizvodnje čije su osnovne karakteristike kvalitet vraćenog proizvoda (stanje), kao i bliska veza sa osnovnim procesom proizvodnje. Neizvesnost u pogledu kvantiteta, kvaliteta i trenutka povratka proizvoda su faktori koji direktno utiču na profitabilnost i efikasnost ovih vrsta mreža (Rogers i Tibben-Lembke 1998). Možemo reći da ova vrsta mreža služi kao posrednik između sakupljanja proizvoda i ponovne distribucije i u tom smislu imaju kompleksnu strukturu u odnosu na mreže za ponovnu upotrebu proizvoda (Fleischmann i ostali 1997). Kako su ove mreže veoma zavisne od stanja proizvoda, decentralizacija procesa testiranja i sortiranja sa jedne strane može smanjiti nepotrebne transportne

troškove, ali sa druge strane se zahtevaju viske investicije u opremu za testiranje i sortiranje pošto se obično radi o veoma složenim i vrednim proizvodima (Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999). Primeri ovih mreža se mogu naći u radovima Guide i van Wassenhove 2002; Sasikumar i ostali 2010; Korchi i Millet 2011.



Slika 3.3 Mreža za ponovnu proizvodnju (Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999)

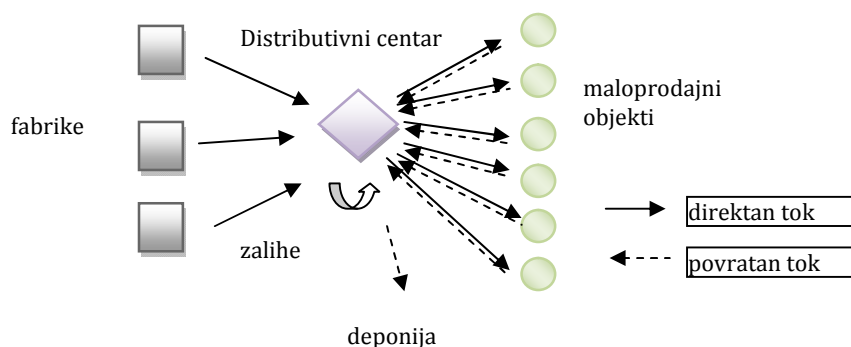
- **Reciklažne mreže** – Uzimajući u obzir malu vrednost proizvoda koji se recikliraju i visoke investicione troškove za neophodnu reciklažnu tehnologiju, ekonomija obima se može postići jedino reciklažom velikih količina proizvoda. To za posledicu ima centralizovanu strukturu mreže, odnosno koncentraciju objekata za reciklažu na nekoliko lokacija. Dodatno treba imati u vidu da sam proces reciklaže ne zavisi toliko od stanja proizvoda kao proces ponovne proizvodnje, tako da je i sama mreža znatno jednostavnija (slika 3.4) (Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999).



Slika 3.4 Primer reciklažne mreže (Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999)

Primeri ovakvih mreža se mogu pronaći u radovima Barros i ostali 1998, Kara i Onut 2010, itd.

- **Mreže za komercijalne povraćaje** – Prema Bloemhof-Ruwaard i ostali (1999), ova vrsta povraćaja se deli na dva tipa: na proizvode koji nisu prodani i vraćaju se iz maloprodajnih objekata i na proizvode koji su oštećeni tokom transporta ili zbog pogrešne isporuke. Proizvodi se skladište i vrši se njihova inspekcija i sortiranje u cilju definisanja daljeg postupanja sa njima, odnosno ukoliko se proizvodi klasifikuju kao proizvodi tipa A skladište se kao komercijalne zalihe dok se proizvodi tipa B prodaju na sekundarnim tržištima. Ostali proizvodi se ili recikliraju ili ponovo proizvode (slika 3.5).



Slika 3.5 Primer mreže za komercijalne povraćaje (Bloemhof-Ruwaard i ostali 1999)

Barker i Zabinsky (2008) su pokušale da naprave opšti okvir za donošenje odluka u sistemima povratne logistike i na taj način kao jedan od ciljeva ovog okvira klasifikuju mreže povratne logistike. Kako se povratni tokovi proizvoda generalno mogu podeliti na tri faze:

- fazu sakupljanja
- fazu testiranja i
- fazu tretmana

a svaka od ovih faza se odlikuje određenim karakteristikama mreže koje uključuju iznalaženje različitih kompromisa, sve ovo dovodi do različitih konfiguracija mreža. Sistemi za sakupljanje proizvoda i materijala mogu biti zajednički za celu industriju u kojima se jedna vrsta proizvoda a koju proizvodi više proizvođača sakuplja na nivou te iste industrije (na primer e-otpad) ili mogu biti ograničeni na samo jednu kompaniju. Prednost sakupljanja jedne vrste proizvoda na nivou čitave

industrije je u postizanju ekonomije obima usled velikih količina proizvoda. Međutim, individualna kompanija u ovom sistemu ima ograničenu kontrolu, a inicijalni troškovi ovog sistema su znatno veći uzimajući u obzir veličinu i strukturu sistema. Sistemi za sakupljanje proizvoda na nivou jedne kompanije, takođe imaju svoje prednosti i mane. Ovi sistemi učvršćuju veze sa klijentima, međutim troškovi rutiranja su znatno veći nego u sistemima sakupljanja na nivou čitave industrije jer ekonomija obima ne može biti dostignuta zbog manjih količina. Međutim, iskorišćenje vozila se u ovom sistemu može povećati u slučaju kada se integrišu povratni i direktni tokovi (primer praznih kontejnera) i kada postoji mali broj lokacija koje je potrebno obići u ruti, a prednost je nedostupnost informacija konkurenciji.

Što se tiče operacija testiranja i sortiranja, one mogu biti centralizovane ili se mogu obavljati na više lokacija. Centralizacija procesa testiranja i sortiranja snižava troškove specijalizovane radne snage i opreme neophodne za testiranje pogotovo u slučaju proizvoda čije je testiranje i sortiranje veoma skupo. Jedan nedostatak centralizovanog testiranja i sortiranja je u visokim transportnim troškovima prilikom transporta delova proizvoda ili proizvoda koji se ni na koji način ne mogu obnoviti (proizvodi bez obzira na stanje u kom se nalaze se otpremaju do objekta za testiranje i sortiranje, pa tek onda na deponiju). Što se tiče decentralizovanog testiranja i sortiranja, dodatni troškovi transporta se izbegavaju, ali procedure sortiranja i testiranja moraju biti konzistentne i pouzdane, jer se mreža komplikuje dodatno sa dva posebna toka, toka otpada i toka proizvoda koji se na neki način mogu obnoviti.

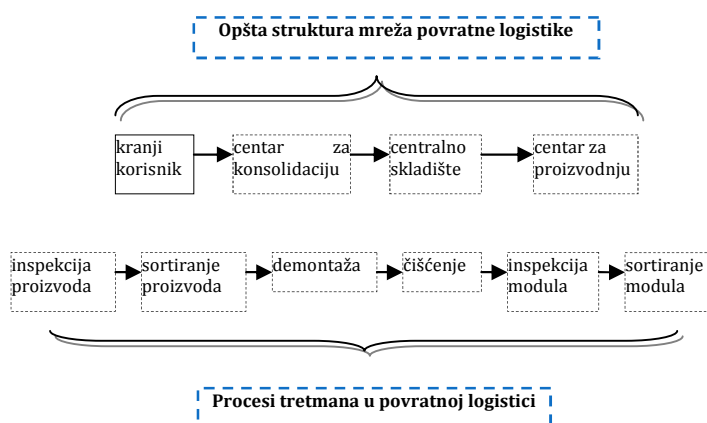
Opcije tretmana se mogu obaviti na lokaciji proizvodnje originalnog proizvoda ili na nekom drugom mestu. Prednost sprovođenja tretmana na originalnoj lokaciji je efikasnije iskorišćenje postojećih procesa i opreme u originalnom objektu i najčešće se koristi za obnavljanje rezervnih delova. Međutim, ukoliko se sistem organizuje na ovakav način postoji zahtev za dodatnim kapacitetom objekta, što je glavni nedostatak ovog pristupa. Sa druge strane, ukoliko se operacije tretmana obavljaju na nekoj drugoj lokaciji, ekonomiju obima je moguće dostići ukoliko se proizvodi sakupljaju u čitavoj industriji. Međutim troškovi izgradnje dodatnih

objekata su glavni nedostatak ovog pristupa. Predloženi okvir za donošenje odluka o konfiguraciji povratno logističke mreže prikazan je u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Predloženi okvir za donošenja odluka prilikom projektovanja povratno logističke mreže (prilagođeno od Barker i Zabinsky 2008)

Faza	Potrebne odluke	Faktori odlučivanja
sakupljanje	na nivou čitave industrije	pogodno za veće količine proizvoda mogućnost podele troškova sa ostalim proizvođačima ne komplikuje dodatno postojeći lanac snabdevanja
	na nivou jedne kompanije	visok stepen kontrole od strane proizvođača smanjen procenat industrijske špijunaže poboljšanje direktnog odnosa sa korisnicima
sortiranje/ testiranje	centralizovano	pogodno za procedure testiranja i sortiranja koje generišu visoke troškove pojednostavljuje se logistička mreža
	decentralizovano	pogodno za velike količine proizvoda pogodno za procedure testiranja i sortiranja koje generišu niske troškove mogućnost uključanja 3PL provajdera izbegava se dodatni transport delova i materijala do deponije
opcije tretmana	originalna lokacija proizvodnje	pogodno za opciju ponovne proizvodnje, obnavljanje rezervnih delova visok stepen kontrole od strane proizvođača
	drugi objekat ili lokacija	pojednostavljuje se logistička mreža (bez dodatnih objekata u mreži) pogodno za veće količine proizvoda mogućnost podele troškova sa ostalim proizvođačima ne komplikuju se procesi u originalnom objektu

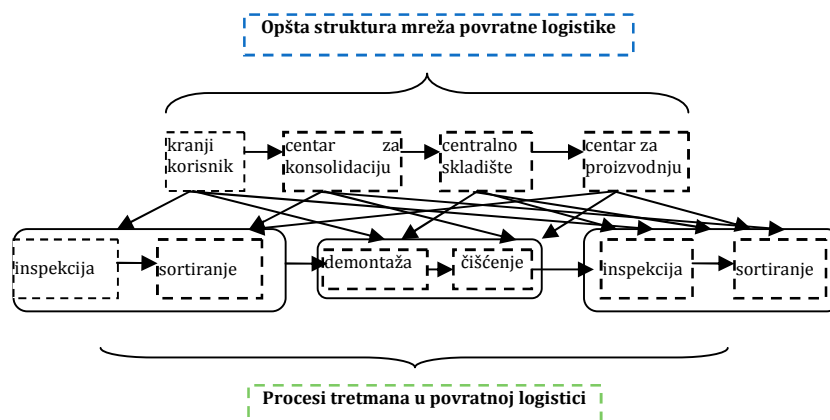
El korch i Millet (2011) su predložili opšti pristup projektovanju mreža povratne logistike koji na osnovu opšte strukture logističkih mreža i aktivnosti povratne logistike daje 18 kombinacija strukture povratno logističke mreže (slika 3.6), koje je u zavisnosti od konteksta i cilja (veći profit ili veća ekološka korist) moguće primeniti.



Slika 3.6 Kanal povratne logistike (preuzeto i prilagođeno od El korch i Millet 2011)

Kako bi se smanjio broj mogućih kombinacija mreže, šest aktivnosti povratne logistike su grupisane u tri glavne aktivnosti: inspekcija proizvoda je dodeljena aktivnosti sortiranja, demontaža dodeljena aktivnosti čišćenja, a inspekcija modula

dodeljena aktivnosti sortiranja modula. Ovo grupisanje je bazirano na hipotezi da je spajanje aktivnosti efikasnije ako ga radi jedan učesnik, što dovodi do 18 mogućih struktura mreže (Slika 3.7).



Slika 3.7 Moguće kombinacije strukture povratne logistike (El korchi i Millet 2011)

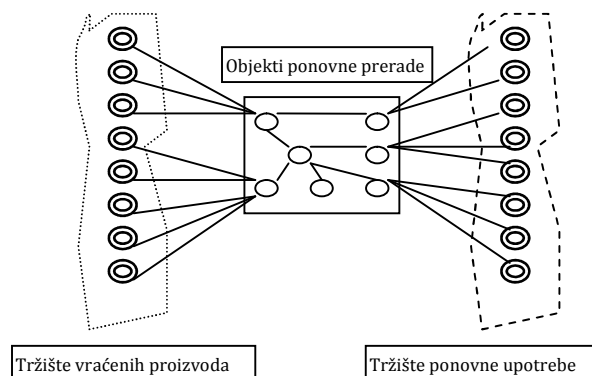
3.2 Pregled literature o lokacijskim problemima u povratnoj logistici

Tokom poslednjih 20 godina publikovan je značajan broj radova koji modeliraju probleme u povratnoj logistici, pogotovo projektovanje mreža povratne logistike, kao strateškog problema odlučivanja. U tom smislu, kako je i navedeno u tabeli 2.1, publikovan je i značaj broj preglednih radova o različitim problemima povratne logistike. U nastavku su detaljnije opisani najznačajniji pregledni radovi u kontekstu projektovanja mreža povratne logistike, odnosno lokacijskim problemima u povratnoj logistici. U navedenim preglednim radovima analizirani su detaljno radovi objavljeni u posmatranim periodima.

Rad Fleischmann-a i ostalih (1997) je prvi rad koji se može pronaći u naučnoj literaturi koji definiše kontekst istraživanja u povratnoj logistici sa aspekta operacionih istraživanja. To je istovremeno i prvi pregledni rad kvantitativnih metoda u kontekstu povratne logistike. Autori zaključuju da iako nije bilo mnogo radova u trenutku kada su oni pisali pregledni rad a koji su obrađivali kvantitativne metode u povratnoj logistici, da su dalja istraživanja neophodna. Autori su projektovanje mreža povratne logistike svrstali u oblast povratne

distribucije koju su definisali kao sakupljanje i transport vraćenih proizvoda i pakovanja. U ovom radu je po prvi put naglašena razlika između projektovanja tradicionalnih distributivnih mreža i mreža povratne logistike. Pomenute dve karakteristike mreža povratne logistike su sasvim dovoljne za autore da zaključe da „povratna distribucija nije simetrična slika tradicionalne distribucije“, i u tom smislu su modifikacije i proširenja tradicionalnih lokacijskih modela neophodna, pogotovo ako se direktni i povratni tokovi modeliraju istovremeno.

Fleischmann i ostali (2000) su analizirali 45 radova koji se bave projektovanjem mreža za obnavljanje proizvoda u različitim industrijama, uporedili su projektovanje ovih mreža sa tradicionalnim proizvodno distributivnim sistemima i na kraju predložili klasifikaciju ove vrste mreža. Iz sličnosti u aktivnostima mreža za obnavljanje proizvoda proističe i slična topologija i autori naglašavaju da se sve mreže za obnavljanje proizvoda mogu grubo podeliti na tri dela (slika 3.8).



Slika 3.8 Topologija mreža za obnavljanje proizvoda (preuzeto od Fleischmann i ostali 2000)

U prvom delu mreže, a koji odgovara aktivnosti sakupljanja, tokovi odbačenih proizvoda konvergiraju ka objektima za ponovnu obradu. Tržište vraćenih ili odbačenih proizvoda, kako su ga autori nazvali se odlikuje velikim brojem izvora ovih tokova. Na suprotnom kraju mreže, a koja odgovara fazi redistribucije, tokovi obrađenih proizvoda divergiraju ka tržištu ponovne upotrebe. Središnji deo mreže se odnosi na proces prerade proizvoda i u zavisnosti od kompleksnosti samog procesa može obuhvatati samo jedan nivo pri tom obuhvatajući jedan ili više paralelnih čvorova, ili može imati više nivoa u strukturi mreže. Autori naglašavaju da je u suštini samo prvi deo mreže povratan u odnosu na tradicionalne sisteme i iz

tog razloga koriste termin mreže za obnavljanje proizvoda, a ne mreže povratne logistike. U svakom slučaju, učesnik u ovakvom sistemu, a koji vrši procese ponovne prerade, odgovoran je za samu strukturu mreže. Osnovna pretpostavka modeliranja ovakvih mreža je da se ponuda i tražnja posmatraju kao egzogene promenljive, odnosno izvori i ciljevi su poznati i fiksni, dok je središnje čvorove potrebno locirati.

Autori zatim uočavaju razlike u analiziranim radovima, odnosno navode po čemu se mreže za obnavljanje proizvoda međusobno razlikuju:

- Stepen centralizacije kojise odnosi na broj objekata u kojima se odvijaju slične ili iste aktivnosti. U centralizovanoj strukturi svaka aktivnost se odvija na jednoj ili nekoliko tačno određenih lokacija, dok se u decentralizovanoj strukturi iste ili slične aktivnosti odvijaju na više lokacija paralelno. Centralizacija se onda može videti i kao mera horizontalne integracije ili širine mreže.
- Analogno, broj nivoa u mreži, a koji se odnosi na broj objekata iz kojih proizvodi izlaze sekvencijalno, se može posmatrati kao dubina ili vertikalna integracija mreže. U mrežama sa jednim nivoom sve aktivnosti su integrisane u jednom tipu objekta, dok se kod višenivovskih mreža različite aktivnosti odvijaju na više različitih lokacija.
- Povezanost sa ostalim mrežama se odnosi na povezanost nove mreže sa postojećim. Naime, logistička mreža može biti dodata na već postojeću ili postavljena kao potpuno nova nezavisna struktura.
- Otvoreni vs. zatvoreni lanci snabdevanja kružnog toka (*eng. open vs. closed loop* struktura) karakterišu povezanost dolaznih i odlaznih tokova na mreži. U zatvorenoj strukturi izvori i ponori tokova su u jednoj tački za razliku od otvorene strukture mreža.
- Vrsta kooperacije se odnosi na inicijativu, odnosno odgovornost, učesnika za uspostavljanje mreže (inicijativa može doći od jedne kompanije ili zajedničkom kooperacijom čitave industrije)

Autori naglašavaju da je neophodno razviti nove matematičke metode, jer postojeći tradicionalni lokacijski modeli ne mogu da obuhvate sve relevantne karakteristike mreža za ponovnu preradu.

Akçali i ostali (2009) su dali pregled literature od 62 rada koji tretiraju problematiku lokacije objekata u kontekstu povratne logistike i lanaca snabdevanja kružnog toka. Autori zaključuju da se tradicionalne formulacije lokacijskih problema uglavnom koriste kod modela vezanih samo za povratni tok proizvoda, dok se potpuno nove formulacije lokacijskih problema sreću kod drugog tipa mreže jer zatvoreni lanci snabdevanja kružnog toka imaju kompleksniju strukturu. U tabelama 3.3 i 3.4 (sa legendom za njihovo razumevanje datoj u tabeli 3.2), a koje su preuzete od autora ovog rada, dat je pregled analiziranih radova iz vizure strukture mreže, karakteristika modela i načina rešavanja.

Tabela 3.2. Legenda (za tabele 3.3 i 3.4)(preuzeto od Akçali i ostali 2009)









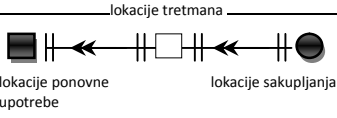
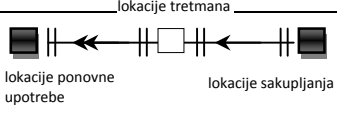
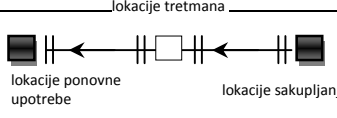
simbol	definicija
	Poznate lokacije sa ograničenjima u ponudi/traznji/kapacitetu
	Poznate lokacije bez ograničenja u ponudi/traznji/kapacitetu
	Potencijalne lokacije sa ograničenjima u ponudi/traznji/kapacitetu
	Potencijalne lokacije bez ograničenja u ponudi/traznji/kapacitetu
	Čvorovi koji prihvataju tokove od jednog izvora
	Čvorovi koji prihvataju tokove od više izvora
	Tokovi jedne vrste proizvoda
	Tokovi više vrsta proizvoda

Tabela 3.3 Karakteristike modela koji analiziraju isključivo povratne tokove proizvoda (Akçali i ostali 2009)

Broj nivoa u mreži	Referenca	Struktura mreže	Karakteristike modela	Pristup rešavanja
2 nivoa diskretni	Jayaraman (1999)		Statički Deterministički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno
	Schultmann (2003)		Statički Deterministički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno
	Lieckens i Vaele (2007)		Statički stohastički MINLP Sa kapacitativnim ograničenjima	Heuristika

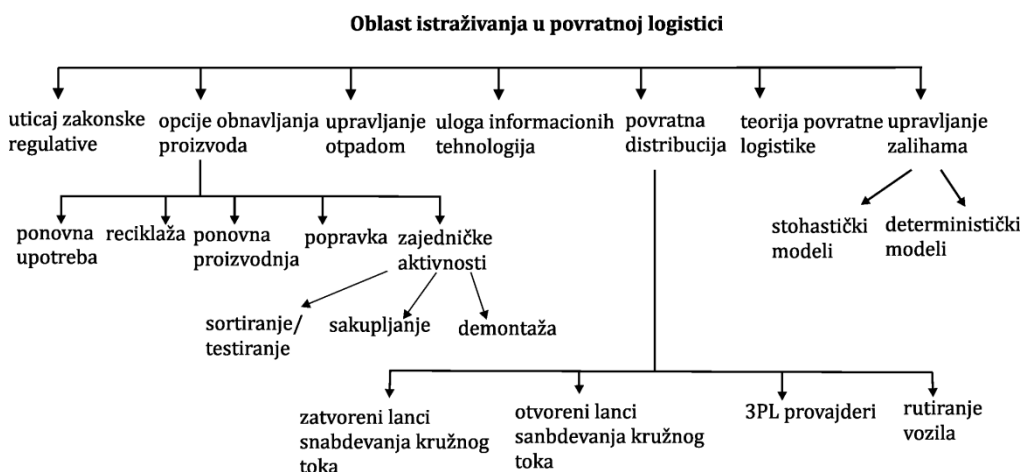
Broj nivoa u mreži	Referenca	Struktura mreže	Karakteristike modela	Pristup rešavanja
	Wang (1995)	<p>lokacije tretmana</p> <p>lokacije ponovne upotrebe</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP Direktna otprema Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno
	Jayaraman (2003)	<p>lokacije tretmana</p> <p>krajnji korisnici</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Heuristika i egzaktno
	Min (2006)	<p>lokacije tretmana</p> <p>krajnji korisnici</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MINLP Sa kapacitativnim ograničenjima	Genetski algoritmi
3 nivoa	Wang i Yang (2007)	<p>lokacije ponovne upotrebe</p> <p>lokacije tretmana</p> <p>lokacije skladištenja</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP Direktna otprema Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno heuristika
	Realf (1999)	<p>lokacije ponovne upotrebe</p> <p>lokacije tretmana</p> <p>lokacije sortiranja</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Dinamički Deterministički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno rešenje
	Realf (2004)	<p>lokacije ponovne upotrebe</p> <p>lokacije tretmana</p> <p>lokacije sortiranja</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	dinamički stohastički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Robusna optimizacija
	Barros (1998)	<p>lokacije ponovne upotrebe</p> <p>lokacije tretmana</p> <p>lokacije skladištenja</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP Direktna otprema Sa kapacitativnim ograničenjima	heuristika
	Listes i Dekker (2005)	<p>lokacije ponovne upotrebe</p> <p>lokacije tretmana</p> <p>lokacije skladištenja</p> <p>lokacije sakupljanja</p>	Statički stohastički MILP Direktna otprema Sa kapacitativnim ograničenjima	Stohastički pristup optimizaciji

Tabela 3.4 Karakteristike modela koji analiziraju integraciju direktnih i povratnih tokova (Akçali i ostali 2009)

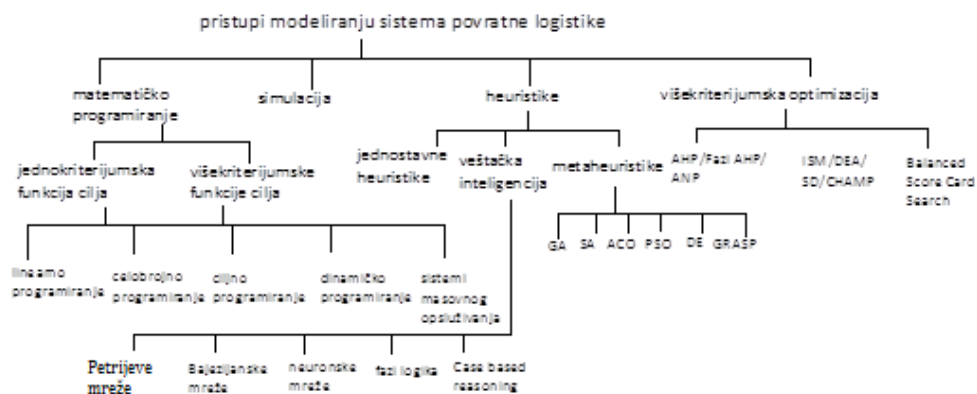
Broj nivoa mreži	Referenca	Struktura mreže	Karakteristike modela	Pristup rešavanja
1 nivo mreže	Marin i Pelegrin (1998)	<p>Krajnji korisnici proizvodnja</p>	Statički Deterministički MILP bez kapacitativnih ograničenja	Egzaktno rešenje Heuristka
	Sahyouni (2007)	<p>distributivni centri Krajnji korisnici lokacije za sakupljanje</p>	Statički Deterministički MILP bez kapacitativnih ograničenja	Egzaktno rešenje Heuristka
2 nivoa mreže	Fleischmann i ostali (2001)	<p>distributivni centri proizvodnja krajnji korisnici ponovna proizvodnja Lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP bez kapacitativnih ograničenja	Egzaktno rešenje
	Üster i ostali (2007)	<p>proizvodnja distributivni centri krajnji korisnici ponovna proizvodnja lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP bez kapacitativnih ograničenja	Egzaktno rešenje
	Salema i ostali (2006)	<p>ponovna proizvodnja distributivni centri krajnji korisnici lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP bez kapacitativnih ograničenja	Egzaktno rešenje
	Salema i ostali (2007)	<p>ponovna proizvodnja distributivni centri krajnji korisnici lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički/ stohastički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno rešenje CPLEX 8.1
	Beamon i Fernies (2004)	<p>distributivni centri sa i bez mogućnosti sakupljanja krajnji korisnici proizvodnja lokacije sakupljanja</p>	Statički Deterministički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno rešenje
	Sim i ostali (2004)	<p>ponovna proizvodnja distributivni centri krajnji korisnici lokacije sakupljanja</p>	Dinamički Deterministički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno rešenje CPLEX 7.0 Heuristka Genetski algoritmi
	Ko i Evans (2007)	<p>proizvodnja distributivni centri krajnji korisnici lokacije sakupljanja</p>	Dinamički Deterministički MINLP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno rešenje

Broj nivoa u mreži	Referenca	Struktura mreže	Karakteristike modela	Pristup rešavanja
	Lu i Bostel (2007)	<p>Diagram showing a network with nodes for 'proizvodnja' (production), 'ponovna proizvodnja' (reverse production), and 'Lokacije sakupljanja' (collection locations), all connected to 'krajnji korisnici' (end users).</p>	Statički Deterministički MILP bez kapacitativnih ograničenja	Egzaktno rešenje Heuristika
	Listes (2007)	<p>Diagram showing a network with nodes for 'proizvodnja' (production) and 'lokacije sakupljanja' (collection locations), leading to 'krajnji korisnici' (end users).</p>	Statički stohastički MILP Sa kapacitativnim ograničenjima	Egzaktno rešenje

Najsveobuhvatnija analiza radova koji tretiraju problematiku projektovanja mreža povratne logistike je objavljena u radu Sasikumar i Kannan (2009). U ovom radu, autori su predložili klasifikaciju radova (slika 3.9) koji se bave problemima povratne logistike u zavisnosti od istraživanog problema, a analizirali su 543 rada objavljena u međunarodnim časopisima, zbornicima konferencija objavljene u periodu od 1967. do 2008. godine (tabela 12). Autori su takođe dali i klasifikaciju korišćenih metoda za rešavanje različitih problema u povratnoj logistici (slika 3.10).



Slika 3.9 Klasifikacija radova o oblastima istraživanja u povratnoj logistici (preuzeto od Sasikumar i Kannan 2009)



Slika 3.10 Klasifikacija korišćenih pristupa modeliranja sistema povratne logistike preuzeto od Sasikumar i Kannan (2009).

Tabela 3.5 Raspodela radova po časopisima u periodu 1967-2008. god. (preuzeto od Sasikumar i Kannan 2009)

časopis	2008 i 2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	1990 do 2000	Pre 1990	ukupno
International Journal of Production Research	15	7	5	7	3	3	3	15	1	59
International Journal of Production Economics	15	3	2	7	5	5	5	9	-	51
European Journal of Operational Research	8	2	1	2	7	2	4	18	-	49
Computers i Industrial Engineering	3	4	6	1	-	2	-	15	1	27
International Journal of Physical Distribution and Logistics Management	1	4	4	1	-	3	-	5	1	19
Computers i Operations Research	13	1	-	-	-	-	-	3	-	17
Omega	14	6	-	-	1	1	-	4	1	17
Resources, Conservation and Recycling	1	2	3	1	1	1	1	6	-	16
Journal of Cleaner Production	5	2	1	1	2	-	2	1	-	14
Interfaces	-	-	1	-	4	-	-	8	-	13
OR Spectrum	1	1	-	1	1	-	5	4	-	13
Journal of Operations Management	4	1	1	1	1	-	-	3	1	12
Journal of the Operational Research Society	-	1	1	1	2	1	-	5	-	11
California Management Review	-	-	-	8	1	-	-	1	1	11
IIE Transactions	-	-	-	3	-	1	1	4	-	9
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	3	-	3	-	-	1	-	1	-	08
Production i Operations Management	-	-	1	-	1	1	5	-	-	08
Management Science	-	2	2	1	-	-	-	3	-	08
Production, Planning and Control	-	-	-	1	-	-	1	3	-	06
International Journal of Operations and Production Management	-	1	-	-	-	-	2	2	-	05
Journal of Electronics Manufacturing	-	-	-	-	-	1	-	4	-	05
Naval Research Logistics	-	-	1	-	-	-	1	1	2	05
Technovation	-	1	-	-	-	-	-	3	-	04
Supply Chain Management: An International Journal	-	-	-	1	-	2	-	1	-	04

Ostali radovi u kontekstu projektovanja mreža se mogu pronaći u preglednim radovima (Sasikumar i Kannan 2008; Melo i ostali 2007; Pokharel i Mutha 2009; Elwany i ostali 2007; Kannan Govindan i ostali 2014; Agrawal i ostali 2015)

Ono što se kao generalni zaključak može izvući iz svih radova koji tretiraju projektovanje mreža povratne logistike, i u čemu se skoro svi autori preglednih radova slažu, je da je jedan od glavnih nedostataka lokacijskih modela za projektovanje povratno logističke mreže nepostojanje opštih modela koji se mogu primeniti u većini slučajeva, dakle nezavisno od vrste proizvoda, industrije i sl. Iz tog razloga većina radova koji tretiraju problematiku lokacije u kontekstu povratne logistike sadrže modele razvijane namenski za tačno određen sistem, odnosno za određeni tip proizvoda. Radovi koji na kvalitativan način analiziraju mreže povratne logistike su većinom objavljeni krajem devedesetih godina XX veka i početkom XXI veka. U njima su objašnjeni osnovni koncepti povratne logistike, međutim i do današnjih dana svi autori se slažu u jednom a to je da je ovih radova izuzetno malo, nasuprot radovima koji sadrže kvantitativne metode. Odnosno, postojeći teoretski radovi nisu pružili sistematsku podršku i metode kako bi podržali mnogobrojne primene (Bostel i ostali 2005).

4 LOKACIJSKI-RUTING PROBLEMI

U ovom poglavlju su opisane osnovne karakteristike lokacijskih ruting problema, data njihova klasifikacija, kao i pregled literature lokacijskih ruting problema u kontekstu povratne logistike.

4.1 Osnovne karakteristike lokacijskih ruting problema

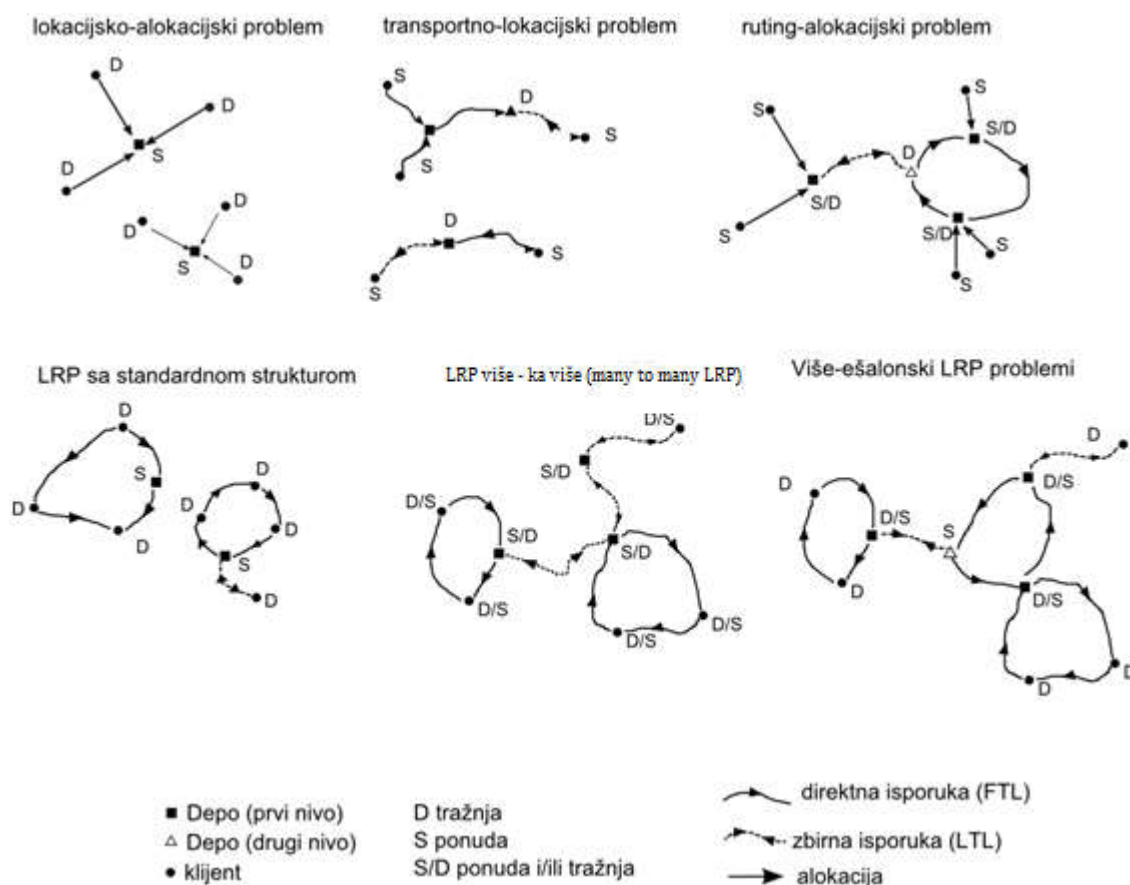
Lokacijski ruting problemi kako im i samo ime kaže, spajaju dva problema, problem lociranja objekata (*eng. facility location*) i određivanja ruta vozila (*eng. vehicle routing*) u jedan model gde se strateške i taktičke/operativne odluke istovremeno posmatraju i optimizuju. Od 50-ih godina XX veka, dva najčešća termina koja se mogu sresti u naučnoj literaturi u oblasti operacionih istraživanja su termini lociranja objekata i rutiranja vozila. Iako su ova dva veoma važna problema možemo reći dobro definisana i istražena, veoma dug period su se posmatrala nezavisno jedan od drugog, a razlozi ovakvog pristupa su različiti, što je u nastavku detaljnije objašnjeno. Realni problem često zahtevaju da se problemi lociranja objekata i rutiranja vozila modeliraju istovremeno, a ne nezavisno jedan od drugog. U lokacijskim modelima koji se koriste prilikom projektovanja distributivnih sistema, najčešće je potrebno locirati objekat na način da se troškovi distribucije minimiziraju. Mera koja se koristi za rastojanja koje prelaze vozila (transportni troškovi) se najčešće predstavlja kao suma rastojanja od distributivnog centra do korisnika ili suma otežanih rastojanja, gde ova težina predstavlja prosečan zahtev korisnika ili frekvenciju usluge koja se zahteva. Ovako predstavljeni troškovi impliciraju direktnu isporuku od distributivnog centra do korisnika (*eng. full truckload FTL*) i pokazala se opravdanom u situacijama kada budući zahtevi korisnika nisu poznati ili kada postoji veliki stepen varijacije u njihovim zahtevima. Međutim, u praksi je češći slučaj da su prisutne zbirne isporuke (*eng. less than truck load LTL*), odnosno kada je vozilom potrebno obići više korisnika u ruti. U tim situacijama, sa jedne strane neophodna je procena troškova rutiranja prilikom izbora

lokacije distributivnog centra jer značajno utiču na performanse celokupnog sistema, dok sa druge strane projektovanje ruta vozila zavisi od same lokacije distributivnog centra. Takođe, odluke o lokaciji i rutiranju su međusobno povezane i uslovljene i moraju se posmatrati, modelirati i optimizovati simultano. Christofides i Eilon (1969) su dokazali do koje granice je opravdano aproksimirati troškove rutiranja u zbirnim isporukama kao linearnu funkciju rastojanja i u skladu sa tim modelirati posmatrani problem kao lokacijski. Ukoliko definisani uslov nije zadovoljen, problem se mora posmatrati kao LRP, a ne kao čisto lokacijski problem.

Uopšteno, možemo reći da LRP daju odgovore po pitanju

- broja, kapaciteta i lokacije objekata,
- alokacije zahteva ka objektima i
- određivanja ruta vozila.

Ovako široko definisana oblast istraživanja je doprinela da modeli koji obuhvataju donošenje odluka o lokaciji objekata i rutiranju vozila, na bilo kom nivou ili fazi posmatranog problema, budu klasifikovani kao LRP. Recimo, ukoliko se posmatra samo fizička struktura mreže (slika 4.1), jedino lokacijsko-alokacijski problemi ne spadaju u LRP jer ne postoje rute između čvorova tražnje(klijenti) i čvorova ponude (depoi), što znači da se odluke po pitanju rutiranja ne donose (Lopes i ostali 2013). Neki od autora smatraju da i transportno-alokacijski problemi ne spadaju u LRP, jer rutiranje vozila ne postoji ali je na neki način uzeto u obzir jer postoje direktne rute. Neki od autora pak smatraju da je i ove probleme potrebno klasifikovati kao LRP. Takođe, pojedini problemi zahtevaju da im se pristupa kao LRP ako se u obzir uzme i priroda same robe, kao što je recimo slučaj sa transportom opasnih materija. (Nagy i Salhi 2006) tvrde da možda LRP nisu tako jasno definisani kao što je recimo Weber-ov problem u okviru teorije lokacije, ili problem trgovačkog putnika, u okviru oblasti rutiranja, ali se LRP mogu posmatrati kao specijalni slučajevi problema lokacije objekata i rutiranja vozila. Na primer, ukoliko zahtevamo da klijenti budu direktno povezani sa skladištem, LRP postaje klasičan lokacijski problem, ili ako fiksiramo lokacije objekata LRP postaje klasičan problem rutiranja vozila.



Slika 4.1. Vrste LRP-a (preuzeto i prilagođeno od (Lopes i ostali 2013))

Ideja da se problemi lokacije objekata i rutiranja vozila posmatraju i modeliraju jednovremeno se javila pre skoro 50 godina. Međutim, iako je naglašena međusobna povezanost i uticaj lokacijskih i odluka rutiranja, nedovoljno razvijena tehnologija i nepostojanje odgovarajućih tehnika optimizacije, su uslovile da se ovi problemi veoma dug vremenski period posmatraju nezavisno jedan od drugog (Prodhon i Prins 2014). Nagy i Salhi (2006) navode dodatne razloge za nezavisno posmatranje lokacija objekata i rutiranja vozila među istraživačima:

- postoji dosta praktičnih problema u kojima prilikom lociranja objekata ne postoji aspekt rutiranja vozila i u takvim situacijama LRP očito nisu odgovarajući pristup,
- istraživači generalno posmatraju lokacijske odluke kao odluke strateškog karaktera koje nije moguće promeniti, bar ne u kratkom vremenskom periodu, dok se problem rutiranja vozila posmatra kao operativna ili taktička odluka koja je izmenljiva u kratkom vremenskom periodu. U tom smislu, kombinovanje lokacijskih i odluka rutiranja u istom periodu planiranja nije odgovarajuće usled

razlike u vremenskim periodima za koje se ove odluke donose. Ovaj stav je naveo autore da istražuju u tom pravcu i dokazano je da se korišćenjem LR pristupa smanjuju troškovi tokom dužeg vremenskog perioda, u okviru koja je dozvoljena i promena ruta (Salhi i Nagy 1999)

- LRP su konceptualno mnogo teži problemi od lokacijskih i u tom smislu je mnogo lakše istraživati lokacijske odluke.
- Rešavanju problema koji su formulisani kao LRP najčešće se pristupalo sa hijerarhijskog aspekta. Tradicionalni pristup, koji podrazumeva prvo lociranje objekata, a onda određivanje ruta vozila, vremenom se zamenjivao integralnim pristupom jednovremene lokacije i rutiranja. Ovaj tradicionalni pristup je bio pogodan za izučavanje LRP-a jer nisu postojali egzaktni algoritmi za dobijanje rešenja, kako je već rečeno. Međutim, sa napretkom u optimizaciji, danas je moguće modelirati lokacijske i rutiranje probleme kao celinu. Između ostalog, hijerarhijski pristup rešavanju LR problema, često ne odgovara, odnosno ne opisuje adekvatno mnoge probleme u kojima ne postoji jasan prioritet između lociranja i rutiranja. Salhi i Ri (1989) su bili prvi autori koji su dokazali da strategija hijerarhijskog pristupa rešavanju LRP-a dovodi do suboptimalnih rešenja. Ova ključna činjenica je inspirisala istraživanje u oblasti LRP-a od tada do danas.
- LRP spada u NP-teške probleme obzirom da obuhvata dva NP-teška problema, što se dalje svakako reflektuje na njegovo rešavanje. Uopšteno, sve metode za rešavanje LRP-a razlažu ga na njegove glavne komponente: lokaciju, alokaciju i rutiranje, a zatim se ovi delovi problema rešavaju iterativno, simultano ili nezavisno jedan od drugog. U literaturi se izdvajaju dva pristupa rešavanju LRP-a: egzaktni i heuristički algoritmi. Egzaktni algoritmi sa jedne strane pružaju uvid u sam problem, daju optimalna rešenja, ali usled kompleksnosti LRP-a mogu rešiti samo probleme malih dimenzija. Sa druge strane, heuristički algoritmi su pogodni za rešavanje problema većih dimenzija, jer omogućuju dobijanje kvalitetnih rešenja (ne obavezno i optimalnih) u prihvatljivom vremenu rada što je i uslovalo njihovu upotrebu.

Što se tiče heurističkih algoritama, Nagy i Salhi (2006) su predložili sledeću klasifikaciju heuristika za rešavanje LRP, u zavisnosti od načina na koji se modelira veza između problema lociranja objekata i rutiranja vozila:

- Sekvencijalne metode prvo rešavaju lokacijski deo problema, a zatim se na osnovu određene lokacije objekta rešava problem rutiranja vozila. Ovaj pristup ne dozvoljava povratnu informaciju iz faze rutiranja ka fazi lokacije, što kako je već naglašeno dovodi do suboptimalnih rešenja, što je dokazano u radovima Salhi i Ri (1989) i Salhi i Nagy (1999). Međutim u slučajevima kada ne postoje neke druge mere za merenje performansi ovakav pristup rešavanju problema je jako koristan. Ovakav pristup rešavanju LRP se može naći u radovima Or i Pierskalla 1979; Nambiar i ostali 1989; Srivastava i Benton 1990.
- Metode bazirane na klasterima dele skup korisnika na klastere: jedan klaster po potencijalnoj lokaciji objekta ili po jednoj ruti vozila. Zatim se rešavanju LRP modela pristupa na jedan od sledeća dva načina:
 - Locira se objekat u svakom klasteru, a zatim se rešava problem rutiranja vozila za svaki klaster.
 - Rešava se problem rutiranja vozila za svaki klaster, a zatim određuje lokacija objekta.

Ovakav pristup rešavanju je na neki način sličan prvoj grupi heuristika, jer ne postoji interakcija između problema lociranja i rutiranja. Međutim, metode bazirane na grupisanju korisnika su bazirane na određenom okviru plana rutiranja, tako da ovaj pristup predstavlja bolji pokušaj integrisanja lokacijskih i ruting odluka (Chan i ostali 2001; Barreto i ostali 2007; Toyoglu i ostali 2012)

- Iterativne heuristike za rešavanje LRP modela dekomponuju problem na dva podproblema a zatim se iterativnim metodama rešavaju ova dva podproblema, sve dok se unapred zadat kriterijum zaustavljanja ne zadovolji. Ovde je problem iznaći način na koji se informacije prenose iz jedne faze u drugu (Salhi i Nagy 2009; Schwardt i Fischer 2009; Perl i Daskin 1984; Duhamel i ostali 2010; Tavakkoli-Moghaddam i ostali 2010)
- Hijerarhijske heuristike posmatraju lokacijski problem kao glavni problem, i u hijerarhijskom algoritmu se u svakom koraku određivanja lokacije objekata poziva podkorak koja rešava problem rutiranja. Problem lociranja objekata se

posmatra kao hijerarhijski superiorniji u odnosu na problem rutiranja. Ovako formulisani pristup rešavanju LR problema daju bolji uvid u performanse sistema kao i bolja rešenja (Nagy i Salhi 1996; Albareda-Sambola i ostali 2005; Melechovsky i ostali 2005; Bozkaya i ostali 2010)

Za različite formulacije LRP-a, brojni autori su koristili različite heurističke pristupe za njihovo rešavanje. Ove metode uključuju algoritam tabu pretraživanja (Albareda-Sambola i ostali 2005; Caballero i ostali 2007; Tuzun i Burke, 1999; Boccia i ostali 2010; simulirano kaljenje (Wu i ostali, 2002; Yu i ostali 2010), metoda promenljivih okolina (eng. Variable Neighborhood Search-VNS) Schwengerer i ostali 2012; Jarbou i ostali 2013; Pirkwieser i Raidl 2010). Ostali heuristički algoritmi se mogu pronaći u radovima Prins i ostali 2007, Duhamel i ostali 2010, Derbel i ostali 2012; Manzour-al-Ajdad i ostali 2012; Karaoglan i ostali 2012).

4.2 Klasifikacija LR problema i pregled literature

Ideja kombinovanja 2 nivoa odluka u jednom matematičkom modelu datira još iz 60-ih godina XX veka, ali je u tom periodu cilj bio naglašavanje potrebe jednovremene optimizacije ovih odluka kao i problemi vezani za samo rešavanje LRP-a (Marazana 1964). Radovi koji definišu probleme kao LRP u većem broju počinju da se objavljuju tokom 80-ih godina XX veka i od tada je objavljeno nekoliko preglednih radova (Prodhon i Prins 2014; Drexl i Schneider 2015; Nagy i Salhi 2006; Lopes i ostali 2013; Min i ostali 1998).

Postoji jako veliki broj formulacija i varijanti LRP-a, koje je nemoguće objediniti i predstaviti na jednom mestu, ali se grubo, svi radovi mogu podeliti sa aspekta dva kriterijuma: karakteristika samog problema i načina rešavanja (Min i ostali 1998). Što se tiče karakteristika LRP problema, neke od njih su predstavljene tabelom 4.1.

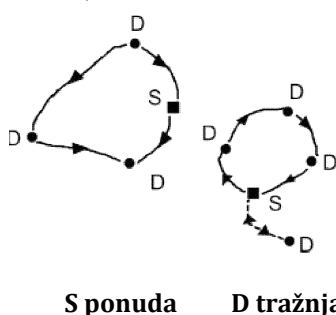
Tabela 4.1. Neke od karakteristika LRP (prilagođeno i dopunjeno od Lopes i ostali 2013)

		karakteristika		
objekat	broj	jedan		
		više	fiksni broj	
	kapacitet	ograničen	maksimalno dozvoljen	
	Potencijalne lokacije	ograničen broj (diskretni lokacijski problem)	neograničen broj	(kontinualni lokacijski problem)
	Troškovi otvaranja objekta	fiksni	varijabilni	
korisnici	priroda zahteva opsluge	stohastika	deterministika	
	lokacija	korisnici locirani u čvorovima mreže	korisnici locirani na granama mreže	korisnici locirani u čvorovima i granama

karakteristika			
			mreže
	opsluga izvršena	iz jednog puta	iz više puta
	vrsta zahteva	isporuka	sakupljanje
	raspored opsluge	fiksni	vremenski prozori
vozila	broj po depou	jedno	više
	flota	heterogena	homogena
	troškovi	fiksni	varijabilni
	kapacitet	ograničen	neograničen
proizvodi	jedan	količina	
	više	količina	
	opasani/neopasni	količina	

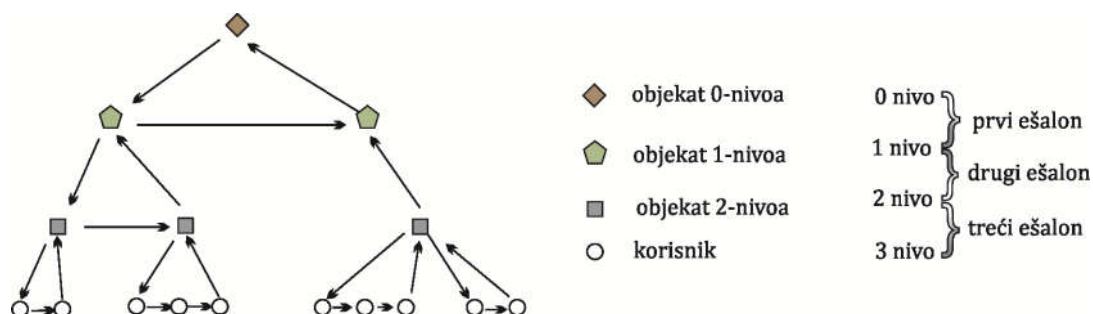
Na osnovu hijerarhijskog nivoa mreže, sve LRP možemo podeliti na modele jednog nivoa ili modele sa više nivoa u mreži Drexl i Schneider (2015). Kod LRP sa jednim nivoom u strukturi mreže, određuje se lokacija objekta kao i rute od objekta do korisnika što je prikazano slikom 4.2.

LRP sa jednim nivoom u strukturi mreže



Slika 4.2 LRP sa jednim nivoom u strukturi mreže (preuzeto i prilagođeno od Lopes i ostali. 2013)

Osnovna ideja multi- ili N-ešalonskih LRP je da se korisnici ne opslužuju direktno iz centralnog objekta već N fazno u N-ešalonskoj mreži. Ova N-ešalonska mreža sadrži N+1 nivoa (ešalona) lokacija. U okviru ešalona $n \in \{1,2 \dots N\}$ se razmatra transport samo od nivoa lokacije n-1 do nivoa lokacije n (slika 4.3). Unutar svakog ešalona, vozila opslužuju objekte koji definišu, odnosno obrazuju taj nivo mreže, pri čemu, na taj način, dolazi do transfera robe između različitih ešalona.



Slika 4.3 Primer LRP-a sa više ešalona (preuzeto od Drexl i Schneider 2015)

U poslednjih par godina se pojavio značajan broj radova o multiešalonskim LRP, mada jako malo radova modeliraju sisteme sa više od dva nivoa u mreži. Prvi rad koji se dotakao ovog problema je istraživanje Ambrosino i Scutella (2005) u kome autori posmatraju mrežu sa četiri nivoa. Na prvom nivou mreže su proizvodni pogoni, drugom nivou mreže distributivni centri, nivo tri se sastoji od transfer stanica, dok se na četvrtom nivou mreže nalaze krajnji korisnici. Rute vozila se definišu od drugog nivoa mreže, a autori su posmatrali i aspekt zaliha kao i heterogenu flotu vozila i dinamički i statički slučaj modela. LRP sa više nivoa u mreži se mogu pronaći u radovima Hamidi i ostali (2012a), Hamidi i ostali (2012b), Hamidi i ostali (2014).

Što se tiče LRP sa dva nivoa mreže, oni su od skoro počeli da se detaljnije istražuju i počevši od 2009. godine objavljeno je dosta radova koji tretiraju ovu tematiku što je rezultiralo objavljivanjem preglednog rada o 2E-LRP u (Cuda i ostali 2014). Prvi radovi koji su dvo-ešalonski LRP (LRP-2E) formulisani i posmatrani u kontekstu distribucije novina su radovi Jacobsen i Madsen (1980) i Madsen (1983). Prvi rad koji se pojavio u literaturi nakon ova dva rada koji tretira LRP-2E je rad Lin i Lei (2009) i od tada su autori počeli intenzivnije da se bave ovim problemom (Nguyen i ostali 2012a; Nguyen i ostali 2012b; Boccia i ostali 2010, Boccia i ostali 2011).

Kako je predmet istraživanja doktorske disertacije 2E-LRP, u nastavku je prikazan pregled literature o ovim problemima. Mreža koja se sastoji od dva ešalona obuhvata tri skupa čvorova koje odgovaraju potencijalnim lokacijama depoa (tj. izvornim tačkama), potencijalnim lokacijama za satelite (središnji objekti) i krajni korisnici (tj. ponorne tačke). Krajni korisnici se nalaze na poznatim i fiksnim lokacijama, dok se lokacije depoa i satelita određuju. Opisana mreža se može predstaviti preko dva ešalona, gde prvi ešalon obuhvata veze između depoa i satelita, dok drugi ešalon obuhvata veze između satelita i krajnjih korisnika. Troškovi otvaranja depoa i satelita su dati, kao i zahtevi svakog od korisnika koji moraju biti opsluženi raspoloživim transportnim sredstvom iz jednog ili više depoa. što znači da roba mora biti isporučena korisnicima preko satelita. Isporučka robe se odvija sa dve vrste vozila, za svaki ešalon. Cilj 2E-LRP je lociranje depoa i/ili satelita i određivanje skupa ruta za svaki ešalon, tako da se minimiziraju ukupni troškovi sistema.

Prodhon i Prins (2014) u preglednom radu o LRP tvrde da su prvi radovi o 2E-LRP objavljeni 80-ih godina XX veka i to su upravo radovi Jacobsen i Madsen (1980) i

Madsen (1983). Nakon ova dva rada, prvi sledeći rad je objavljen tek 2009. godine. Autori naglašavaju da je uzrok ovome NP-priroda problema. Nakon 2009. god. pojavio se značajan broj radova koji su doprineli objavljivanju preglednog rada o dvoešalonskim problemima rutiranja vozila, gde je značajan deo rada posvećen pregledu literature o 2E-LRP (Cuda i ostali 2014). Boccia i ostali (2010) su predložili algoritam tabu pretraživanja za 2E-LRP, gde je problem dekomponovan na 2 problema LRP sa kapacitativnim ograničenjima, za svaki ešalon. Tabu pretraživanje je bazirano na ideji razdvajanja LRP-a na dva problema, a zatim opet razdvajanje svakog LRP-a na problem lociranja objekata sa kapacitativnim ograničenjima i problem rutiranja vozila sa više depoa. U suštini rešavana su četiri podproblema gde algoritam prvo pronalazi rešenja za prvi ešalon, a zatim se na osnovu dobijenog rešenja prvi ešalon reoptimizuje. Predložena heuristika je testirana na instancama generisanim od strane autora. Contardo i ostali (2012) su predložili novu formulaciju 2E-LRP sa dva indeksa i algoritam grananja i odsecanja za rešavanje malih i srednjih instanci problema. Za rešavanje velikih test instanci, autori su predložili ALNS (*eng. adaptive large-neighbourhood search*) metaheuristiku. Oba algoritma, i egzaktni i heuristički, razlažu LRP na dva problema, za svaki ešalon posebno, i globalno rešenje se dobija preko definisanih pravila za dobijanje rešenja za svaki ešalon.

Nguyen i ostali (2012a) i Nguyen i ostali (2012b) su rešavali varijantu problema 2E-LRP sa jednim depoom koji je već lociran, tako da se lokacijske odluke donose samo za satelite koji imaju ograničen kapacitet. Nguyen i ostali (2012a) za rešavanje posmatranog problema koristili su GRASP metodu (*eng. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure -GRASP*) u kombinaciji sa PR metodom (*eng. path relinking -PR*). GRASP se sastoji od dve faze koje se iterativno izvršavaju. Svaka od iteracija u prvoj fazi koristi tri gramzive heuristike „randomized“ i dva algoritma promenljivog spusta (*eng. Variable Neighborhood Descent -VND*) da ih poboljša. Isti problem je posmatran i u radu Nguyen i ostali (2012b) u kome su autori predložili drugi način rešavanja - višestruku iterativnu lokalnu pretragu (*multistart iterated local search (ILS)*) sa tabu listom i PR metodom. Ovaj algoritam je dao bolje rezultate od prethodnog.

Govindan i ostali (2014) su posmatrali 2E-LRP sa vremenskim prozorima za optimizaciju lanca snabdevanja lako kvarljive robe. Problem su formulisali kao višekriterijumski model celobrojnog programiranja i predložili hibridni metaheuristički

algoritam. Performanse predloženog pristupa rešavanju su validirane kroz testiranje na 12 generisanih instanci, a evaluacija je izvršena poređenjem sa benčmark problemima u literaturi.

Dalfard i ostali (2013) su predstavili nelinearnu formulaciju 2E-LRP i predložili dva metaheursitička algoritma za rešavanje (hibridni genetski algoritam i simulirano kaljenje). Karaoglan i Altiparmak (2014) su modelirali LRP sa vozilima koja pored kapacitivnih ograničenja imaju mogućnost sakupljanja različitih vrsta proizvoda prilikom povratka u bazu. Za rešavanje ovog problema autori su predložili memetski algoritam baziran na genetskom algoritmu, simuliranom kaljenju i celobrojnoj formulaciji problema.

Ono što se može videti iz dostupne literature je da ne postoji veliki broj radova koji formulišu probleme u sistema povratne logistike kao LRP. Naime, u kontekstu povratne logistike većina objavljenih radova koji formulišu probleme kao LRP se fokusira na opasan otpad ili opasne materije (Samanlioglu 2013; Alumur i Kara 2007; Zhao i Verter, 2;Cappanera i ostali 2003). Ali u kontekstu proizvoda koji nisu opasni, recimo ambalaže, u literaturi je pronađeno samo nekoliko radova koji formulišu problem kao LRP u sistemu povratne logistike.

Liu i ostali (2012) su formulisali višekriterijumski LR model za optimizaciju mreže povratne logistike. Za rešavanje formulisanog modela su koristili metaheuristku optimizacija kolonijom čestica. Rahim i Sepil (2014) su formulisali LRP model za optimizaciju reciklažne mreže za staklenu ambalažu. Autori su kombinovali problem maksimalnog pokrivanja uz prisustvo parcijalnog pokrivanja za lokacijski deo problema, a za deo problema rutiranja su koristili formulaciju selektivnog problema trgovačkog putnika. Za rešavanje formulisanog LRP-a autori su predložili ugnježdenu heuristiku baziranu na VNS-u. Sheriff i ostali (2014) su posmatrali LRP u povratnoj logistici baziran na kvalitetu vraćenih proizvoda i visini nadoknade koja se dobija za njih u zavisnosti od stanja u kome se proizvodi nalaze. Caballero i ostali (2007) su modelirali LRP za fabrike za insineraciju klaničnog otpada, a za njegovo rešavanje su predložili metod tabu pretraživanja.

U nastavku je opisan posmatrani problem, formulisan kao LRP za optimizaciju povratno logističke mreže.

5 OPTIMALNI I HEURISTIČKI PRISTUP ZA REŠAVANJE LRP ZA OPTIMIZACIJU RECIKLAŽNE MREŽE

U ovom poglavlju predstavljen je i opisan model LRP za optimizaciju reciklažne mreže. Nakon opisa problema data je matematička formulacija, predstavljena i opisana heuristika predložena za rešavanje problema većih dimenzija i prikazani dobijeni rezultati.

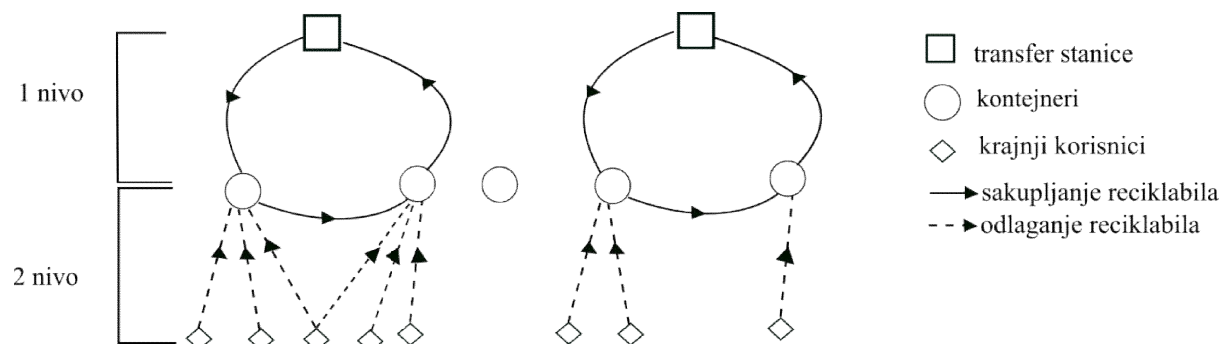
5.1 Opis problema

Problem razmatran u disertaciji se, kako je već napomenuto, odnosi na modeliranje mreže povratne logistike, i to mreže za reciklažu, kao LRP-a. Model koji je predložen se odnosi na ambalažni otpad, kao jedan od tokova otpada koji je moguće ponovo iskoristiti primenom reciklaže kao opcije obnavljanja. Između ostalog za ovaj tok otpada su propisani ciljevi reciklaže za svaku vrstu ambalažnog otpada, odnosno papir, plastiku, metal, staklo. Model je primenjen na jednu vrstu ambalažnog otpada, PET ambalažu, ali se može primeniti na bilo koju vrstu ambalažnog otpada.

Kako bi se ispunili ciljevi propisani bilo nacionalnim ili međunarodnim zakonodavstvom potrebno je imati odgovarajuću infrastrukturu za reciklažu proizvoda. Reciklažna mreža mora biti pažljivo isplanirana kako bi sam proces reciklaže bio profitabilan, tako da proizvodi namenjeni reciklaži budu sakupljeni efikasno od krajnjih korisnika, odnosno da ih bude dovoljno jer su to proizvodi koji imaju malu vrednost.

Problem koji je razmatran odnosi se na razvoj reciklažnih mreža u gradskim urbanim sredinama baziranim na konceptu stanovanja u stambenim blokovima. Ova činjenica

značajno je uticala na strukturu i proces razvoja LR modela problema. Reciklažna mreža modelirana u ovom radu podrazumevala je dvo-nivovsku strukturu sistema. Prvi nivo obuhvata transfer stanice i transportne procese dopreme reciklabila do tih stanica, dok se na drugom nivou nalaze kontejneri u koje krajnji korisnici odlažu reciklabile (slika 5.1). Druga specifičnost predloženog modela jeste i pokušaj da se u model inkorporira i uticaj atraktivnosti lokacije kontejnera, u smislu udaljenosti od krajnjih korisnika, na očekivanu količinu sakupljenih reciklabila.



Slika 5.1 2E-LRP reciklažna mreža

Naime, da bi proizvode koji su odbačeni od strane krajnjih vlasnika ili korisnika učinili dostupnim za proces reciklaže, prvi korak je njihovo efikasno prikupljanje. Cilj je svakako obezbediti što veće količine ovih proizvoda jer one predstavljaju sirovine u procesu reciklaže. U tom smislu, prvo je neophodno odrediti lokaciju kontejnera kao objekata na prvom nivou mreže. Realff i ostali (2000) su naglasili značaj lociranja kontejnera u reciklažnim sistemima u doprinošenju maksimizaciji sakupljanja reciklabila. Biehl i ostali (2007) naglašavaju da su kontejneri esencijalni elementi bilo kog sistema povratne logistike koji utiču na povećanje prikupljenih vraćenih proizvoda i smanjenje transportnih troškova. Proces izbora lokacija kontejnera ne bi smeo da zavisi isključivo od ekonomskih i tehničkih parametara, već se u ovaj proces moraju aktivno uključiti i krajnji korisnici, jer su u krajnjem slučaju oni odgovorni za sortiranje proizvoda u svojim domovima i donošenje proizvoda do definisanih lokacija za njihovo odlaganje. Najčešći način za podsticanje što većeg učešća krajnjih korisnika u procesima reciklaže, u cilju prikupljanja što većih količina proizvoda, je stimulisanje novčanom nadoknadom. Ali kada se zahteva dobrovoljna akcija, lični troškovi vezani za vreme koje je potrebno za sortiranje i donošenje proizvoda do tačno definisanih lokacija, moraju biti minimizirani kako bi se osiguralo što veće učešće korisnika. U mnogim istraživanjima (Perrin i Barton 2001; Domina i Koch 2002; Gonzalez-Torre i Adenso-

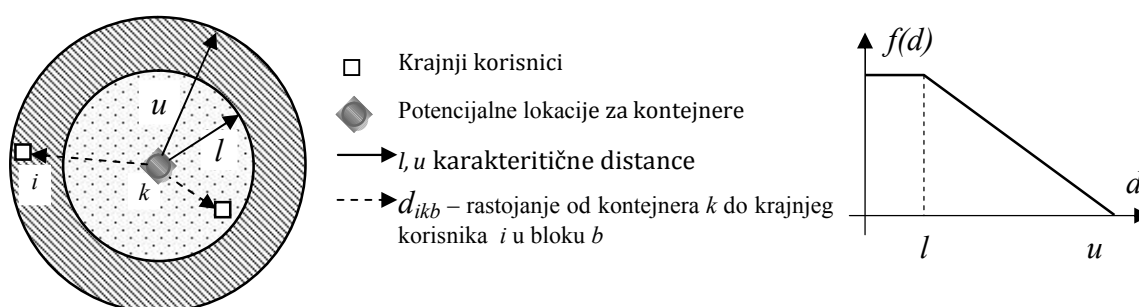
Diaz 2005) je pokazano da blizina i pristupačnost lokacija za sakupljanje igra ključnu ulogu za aktivno učešće krajnjih korisnika u bilo kom sistemu sakupljanja. Jedan od načina da se smanje lični troškovi korisnika jeste minimizacija rastojanja od njih do kontejnera. Gonzalez-Torre i Adenso-Diaz (2005) navede da njihovo istraživanje potvrđuje prethodna sprovedena u Škotskoj (Speirs and Tucker 2001) i Španiji (Domina and Koch 2002), kojima je utvrđeno da ukoliko krajnji korisnici imaju veći broj kontejnera za odlaganje reciklabila koji su locirani bliže njihovim domovima, voljniji su da sortiraju i odnose reciklabile na te lokacije. Odnosno, količina sakupljenih i sortiranih reciklabila je značajno veća nego kada je broj kontejnera manji i udaljeniji od njihovih domova. Iz priloženih rezultata, zaključeno je da većina krajnjih korisnika koji sortiraju tri ili četiri vrste proizvoda namenjenih reciklaži pešače manje od pet minuta od svog doma do lokacije na kojoj se nalaze kontejneri. Odnosno uloženi trud, tj. napor (kvantifikovan kao broj frakcija proizvoda sortiranih kod kuće) krajnjih korisnika koji recikliraju je stimulisan blizinom kontejnera za sakupljanje reciklabila.

U cilju analize uticaja rastojanja između krajnjih korisnika i tačaka sakupljanja odbačenih proizvoda, na strukturu povratno logističke mreže, a samim tim i na količine sakupljenih proizvoda lokacije za sakupljanje, u ovom radu predloženo je korišćenje "funkcije pokrivanja". Ova funkcija modelira uticaj rastojanja između krajnjih korisnika i kontejnera na način da ukoliko su korisnici u okviru nekog prihvatljivog rastojanja od kontejnera, tada će korisnik biti pokriven od strane kontejnera, odnosno biće prikupljene količine od tog korisnika. Odnosno, profit dobijen od prodaje reciklabila za specifičan kontejner je povezan sa blizinom kontejnera do krajnjih korisnika. Za svakog krajnjeg korisnika su definisana dva karakteristična rastojanja l i u ($l \leq u$), gde l predstavlja vrlo prihvatljivo (najbližu) rastojanje za krajnjeg korisnika između njega i lokacije kontejnera, dok u predstavlja gornju granicu rastojanja do koje korisnik prihvata da pešači kako bi doneo reciklabile do mesta odlaganja. Tako možemo reći da je krajnji korisnik i , u proizvoljnom stambenom bloku b , potpuno "pokriven od strane određenog kontejnera" ukoliko je rastojanje između njega i kontejnera k $d_{ikb} \leq l$. To zapravo znači da će, u ovom slučaju sve količine reciklabila koje se nalaze kod korisnika i biti i prikupljene. Ukoliko se kontejner nalazi na rastojanju u , ništa od količina neće biti prikupljeno, odnosno "stepen pokrivanja" je jednak nuli. Kada se kontejner u odnosu na korisnika i nalazi na rastojanju $l < d_{ikb} < u$, smatra se da je on delimično pokriven sa

stepenom pokrivanja koji je definisan linearnom funkcijom pokrivanja $f(d) = \frac{u-d_{ikb}}{u-l}$, $f(d) \in [0,1]$ (slika 5.2), . Dakle, predloženo je da količine koje će biti prikupljene zavise od rastojanja od krajnjih korisnika do kontejnera što je saglasno konceptu koji predlažu Berman i ostali (2003), gde se stepen pokrivenosti i -tog korisnika kontejnerom k u bloku b (Z_{ikb}) definiše na sledeći način:

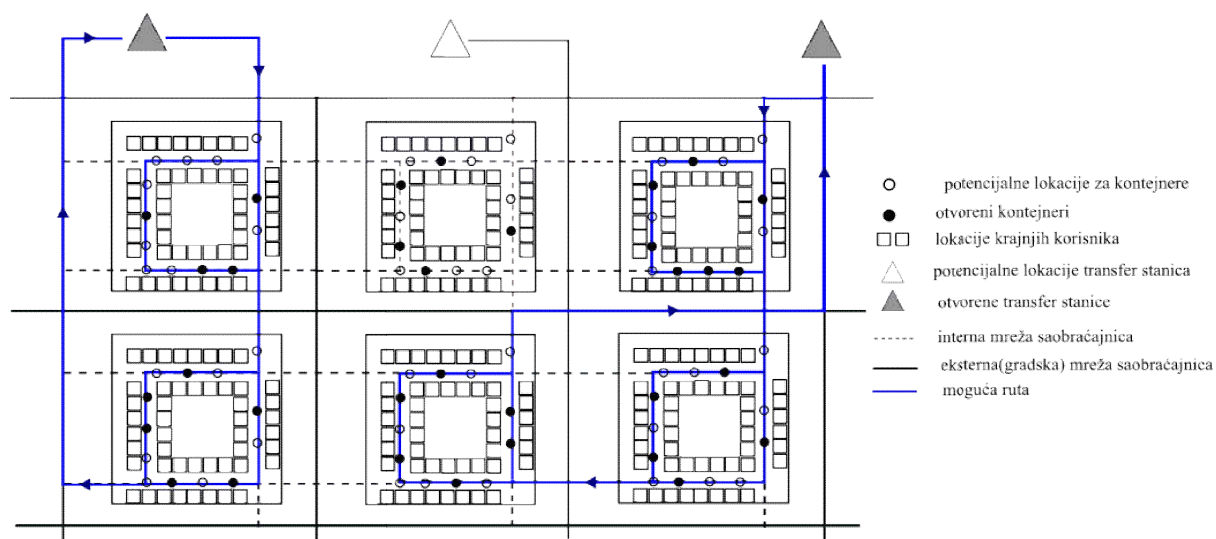
:

$$Z_{ikb} = \begin{cases} 1, & \text{kada je } 0 \leq d_{ikb} \leq l \\ f(d_{ikb}), & \text{kada je } l < d_{ikb} \leq u \\ 0, & \text{kada je } d_{ikb} > u \end{cases}$$



Slika 5.2 Funkcija pokrivanja

Kako je već rečeno, posmatran je problem kada su krajnji korisnici locirani u tzv. gradskim blokovima. Naime, većina modernih gradova ima takozvanu blok strukturu. Blokovi mogu biti raznih oblika i veličina, okruženi glavnom gradskom mrežom saobraćajnica. Okarakterisani su zgradama u kojima ljudi žive i internom mrežom saobraćajnica. Ova interna mreža saobraćajnica povezuje blokove sa glavnom (eksternom) gradskom mrežom saobraćajnica. Kako bi se u ovakvom okruženju sakupili reciklabili, potrebno je kontejnere za sakupljanje reciklabila locirati duž ovih saobraćajnica kako bi im vozilo koje ih sakuplja imalo pristup (slika 5.3). U predloženom modelu termin krajnji korisnik se odnosi na zgradu unutar bloka ili ulaz u zgradu, ukoliko ih ima više, dakle ne na pojedinačnog korisnika, nego na samu zgradu.



Slika 5.3 Reciklažna mreža

Sakupljene reciklabile je potrebno transportovati od blokova do transfer stanica (TS), u kojima se reciklabili sortiraju i konsoliduju za dalju obradu ili se potencijalno u njima sprovodi i određeni tretman. Transfer stanice se nalaze na prvom nivou mreže i kako je predstavljeno slikom 5.3, vozilo polazi iz transfer stanice, obilazi blokove u kojima je neophodno sakupiti reciklabile i vraća se u transfer stanicu. Sakupljanje reciklabila je u suštini transportna aktivnost, tokom koje vozila ograničenog kapaciteta obilaze kontejnere locirane u gradskim blokovima.

Dužina rute unutar bloka se može razlikovati u zavisnosti od veličine i oblika samog bloka, ali kada vozilo uđe u blok ono se kreće jedino po saobraćajnicama duž kojih su locirani kontejneri. Mreža internih saobraćajnica je obično jednostavna i optimalna ruta unutar bloka, koja odgovara problemu rutiranja po lukovima, se može unapred odrediti. To ujedno znači da se rute unutar blokova mogu posmatrati kao predefinisane konstante. Sa druge strane, blokovi se mogu posmatrati kao čvorovi mreže prvog nivoa, koje u procesu sakupljanja vozila obilaze, pri čemu se dužina ruta unutar bloka dodaje troškovima rutiranja kao konstanta. Dakle, rutiranje vozila postoji samo od transfer stanica do blokova, dok se troškovi rutiranja unutar blokova određuju unapred i dodaju troškovima rutiranja. Još jedna specifičnost postavke predloženog modela se ogleda u sledećem: *usled ograničenog kapaciteta i očekivane količine reciklabila u bloku, u jednoj ruti vozilo ne može obići veliki broj blokova, odnosno, maksimalni broj blokova u jednoj ruti je tri ili četiri*. Sve ove činjenice nam omogućavaju da se problem rutiranja vozila u definisanoj postavci LRP, posmatra kao problem višestrukog spajanja ili sparivanja

(eng. multiple matching problem) umesto klasičnih formulacija ruting problema. Pristupi sparivanja ili višestrukog sparivanja su korišćeni i primenjivani na različite probleme i njihov detaljniji prikaz se može pronaći u (Gerards 1995).

Dužina rute internih saobraćajnica može varirati u zavisnosti od oblika i veličine bloka. Duž internih saobraćajnica može biti postavljen manji ili veći broj kontejnera. Iako sama dužina rute unutar blokova ne zavisi od broja kontejnera koji su u njemu locirani, broj kontejnera svakako utiče na broj neophodnih stajanja, odnosno na vreme koje vozilo provede pored kontejnera kako bi pretovarilo reciklabile iz njih u vozilo. Uticaj broja kontejnera u bloku je dvojak i manifestuje se kroz : vreme neophodno za pretovar sadržine kontejnera u vozilo i vremenske gubitke zbog manje prosečne brzine kretanja unutar bloka kao posledice višestrukog zaustavljanja.

Broj otvorenih (lociranih) kontejnera se određuje sa ciljem maksimizacije profita određenog na bazi kompenzacije (eng. trade-off) između ostvarenog profita i troškova otvaranja kontejnera, što čini lokacijski deo problema na drugom nivou mreže. Veći broj otvorenih kontejnera znači kraće rastojanje od krajnjih korisnika do kontejnera, ali i veće troškove otvaranja kontejnera i vice versa.

Sa druge strane, broj otvorenih kontejnera ima uticaja na troškove vozila koji sakupljaju reciklabile koji se nalaze u kontejnerima, jer veći broj otvorenih kontejnera uzrokuje duže vreme putovanja i samim tim veće transportne troškove. U zavisnosti od kapaciteta vozila, broja i kapaciteta kontejnera u svakom bloku, vozilo može obići u ruti više od jednog bloka uz prisustvo prethodno uvedene pretpostavke da vozilo u jednoj ruti ne može obići više od četiri bloka.

Problem rutiranja vozila u posmatranom problemu se odnosi na prvi nivo mreže i obzirom da u jednoj ruti vozilo obilazi do četiri bloka, problem rutiranja vozila se može predstaviti kao multidimenzionalni problem sparivanja u kome vozilo obilazi jedan, dva, tri ili četiri bloka.

Ovako definisan LR model je konceptualno sličan sa klasom 2E-LRP , ali treba naglasiti da predložena formulacija ne odgovara distribuciji, nego procesu sakupljanja.

Na bazi izložene ideje i definisanog koncepta predložen je LR model koji uz maksimizaciju profita teži uspostavljanju reciklažne mreže tako što određuje:

- Optimalne lokacije inicijalnih mesta za sakupljanje odbačenih ili vraćenih proizvoda (kontejnera);

- Optimalne lokacije transfer stanica;
- Rute vozila koja sakupljaju reciklabile.

5.2 Matematička formulacija problema

Matematička formulacija opisanog problema za cilj ima maksimizaciju profita koja se dobija sakupljanjem reciklabila istovremenim određivanjem lokacija kontejnera i transfer stanica i ruta vozila koja sakupljanju reciklabile. Pretpostavke modela su sledeće:

- Transfer stanice nemaju ograničen kapacitet i sakupljeni reciklabili se transportuju do transfer stanica, koje su okarakterisane troškovima otvaranja
- Sakuplja se jedna vrsta proizvoda
- Potencijalne lokacije za kontejnere i transfer stanice su predefinisane, što znači da lokacijski delovi problema pripadaju klasi diskretnih problema
- Termin krajnji korisnik u modelu se odnosi na stambenu zgradu u bloku. Svaki krajnji korisnik je okarakterisan količinom otpada koju generiše na dnevnom nivou, što odgovara ukupnoj količini koja je generisana od strane svih domaćinstava u zgradi
- Svaka potencijalna lokacija za kontejnere je okarakterisana rastojanjem do krajnjih korisnika, dok je sam kontejner definisan kapacitetom. Potencijalna lokacija kontejnera „pokriva“ krajnjeg korisnika samo ako se krajnji korisnik nalazi unutar definisanog rastojanja do te lokacije
- Dužina saobraćajnica unutar svakog bloka je predefinisana i ne zavisi od broja otvorenih kontejnera smeštenih duž internih saobraćajnica unutar blokova. Svojom dužinom saobraćajnica obezbeđuje mogućnost smeštanja zahtevanog broja kontejnera.
- Troškovi rutiranja se odnose na transportne troškove od transfer stanica do blokova spojenih u jednoj ruti, kao i predefinisanih troškova interne rute unutar blokova
- Generisane količine reciklabila tokom posmatranog perioda ne dozvoljavaju vozilu da obiđe više od četiri bloka u jednoj ruti
- Vozila počinju i završavaju svoju rutu u istoj transfer stanici

U modelu su prisutne tri kategorije troškova. Prva kategorija se odnosi na troškove otvaranja kontejnera i troškove koje vozilo provede pored svakog kontejnera obavljajući aktivnost sakupljanja uključujući i izgubljeno vreme usled smanjene brzine kretanja. Druga kategorija se odnosi na troškove otvaranja transfer stanica, dok se treća kategorija odnosi na transportne troškove vozila koje obavlja aktivnost sakupljanja. U skladu sa pretpostavkom modela da vozilo može obići najviše četiri bloka u ruti, kako su TS i blokovi čvorovi prvog nivoa mreže, sve moguće rute su u stvari sva moguća sparivanja ovih čvorova. Neka je B skup blokova, $p, q, w, e \in B$ i $j \in J$ skup potencijalnih TS. Pretpostavimo da je mreža $B \cup J$ potpuno povezana, što je logična pretpostavka za svaku gradsku mrežu. U tom slučaju, sve moguće rute koje kreću iz TS, $j \in J$ i koje obilaze sve čvorove $p, q, w, e \in B$ mogu biti predstavljene skupom binarnih promenljivih, čiji indeksi predstavljaju jednu permutaciju čvorova posećenih u jednoj ruti. Odnosno, jedna moguća sekvenca, tj. jedan mogući redosled obilaska n čvorova, ($1 \leq n \leq 4$) odnosi se zapravo na jedan od mogućih redosleda obilaska n stambenih blokova. Kako vozilo kreće i završava rutu u TS, binarne promenljive imaju maksimalno 5 i minimalno 2 indeksa. Na primer, u slučaju čvorova $p, q, w, e \in B$, postoje 24 moguće rute koje obilaze četiri bloka ($4!$), 24 moguće rute koje obilaze tri bloka ($3! \binom{4}{3}$), 12 mogućih ruta koje obilaze dva bloka ($2! \binom{4}{2}$), dok u slučaju obilaska po jednog bloka postoje četiri direktne rute. Kako bi se smanjio broj promenljivih i dimenzije modela, posmatrane su samo najkraće rute, što je i prirodno, pa u tom slučaju, za definisana četiri bloka uvek postoji bar jedna najkraća ruta koja ih obilazi, ($\binom{4}{3}$) četiri rute koje obilaze tri bloka, ($\binom{4}{2}$) šest ruta koje obilaze dva bloka i četiri direktne rute (svaki blok).

Ukoliko najkraće rute obeležimo sa

$Y_{jpqwe}, Y_{jpwq}, Y_{jpqe}, Y_{jpwq}, Y_{jqwe}, Y_{jpq}, Y_{jpw}, Y_{jpe}, Y_{jqw}, Y_{jqe}, Y_{jwe}, Y_{jp}, Y_{jq}, Y_{jw}, Y_{je}$, gde indeksi promenljivih predstavljaju permutaciju čvorova najmanje dužine $1 \leq n \leq 4$, onda su sve moguće rute kojima se obilaze sva četiri bloka njihove kombinacije koje obezbeđuju obilazak svih čvorova. Na primer, kombinacije ruta koje obezbeđuju obilazak svih čvorova mogu biti: Y_{jpqwe} , ili Y_{jpwq} i Y_{je} , ili Y_{jpq} i Y_{jwe} , itd.

Za predloženi model celobrojnog linearnog programiranja korišćenje su sledeće oznake:

Skupovi:

$B = \{1, \dots, b, \dots, |B|\}$ skup blokova

$I_b = \{1, \dots, i, \dots, |I_b|\}$ skup krajnjih korisnika u bloku b

$K_b = \{1, \dots, k, \dots, |K_b|\}$ skup potencijalnih lokacija za kontejnere u bloku b

$J = \{1, \dots, j, \dots, |J|\}$ skup potencijalnih lokacija za transfer stanice

Parametri modela:

R jedinični prihod ostvaren od prodaje sakupljenih reciklabila

d_{ikb} rastojanje između krajnjeg korisnika $i \in I_b$ i potencijalne lokacije kontejnera $k \in K_b$ u bloku $b \in B$

Z_{ikb} stepen pokrivenosti za rastojanje d_{ikb} između krajnjeg korisnika $i \in I_b$ i potencijalne lokacije kontejnera $k \in K_b$ u bloku $b \in B$

$$Z_{ikb} = \begin{cases} 1, & \text{za } 0 \leq d_{ikb} \leq l \\ f(d_{ikb}), & \text{za } l < d_{ikb} \leq u \\ 0, & \text{za } d_{ikb} > u \end{cases}$$

F_{kb} troškovi otvaranja kontejnera $k \in K_b$ u bloku $b \in B$

F_j troškovi otvaranja transfer stanice $j \in J$

α_{kb} troškovi uzrokovani smanjenom brzinom kretanja vozila unutar bloka i vremena stajanja provedenog kod svake otvorene lokacije za kontejner $k \in K_b$ u bloku $b \in B$

Q_r kapacitet vozila (ili rute)

Q_j kapacitet transfer stanice $j \in J$

Q_b kapacitet kontejnera u bloku $b \in B$ (pretpostavljeno je da su kontejneri istog kapaciteta u svim blokovima)

Q_{ib} raspoloživa količina reciklabila kod krajnjeg korisnika $i \in I_b$ u bloku $b \in B$

$C_{jppqw}, C_{jppq}, C_{jpp}, C_{jpp}$ transportni troškovi obilaska kontejnera u blokovima

$p, q, w, e \in B$ u jednoj ruti (uključujući i troškove od/do transfer stanice $j \in J$ i troškova unutar blokova), za rute koje obilaze četiri, tri, dva ili jedan blok $b \in B$, respektivno.

M (dovoljno veliki pozitivan broj)

Promenljive:

$$Y_{kb} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko je kontejner } k \in K_b \text{ otvoren u bloku } b \in B \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{uoliko je transfer stanica } j \in J \text{ otvorena} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$Y_{j p q w e} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko se čvorovi } p, q, w, e \in B \text{ obilaze u jednoj ruti od transfer stanice } j \in J \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$Y_{j p q w} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko se čvorovi } p, q, w \in B \text{ obilaze u jednoj ruti od transfer stanice } j \in J \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$Y_{j p q} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko se čvorovi } p, q \in B \text{ obilaze u jednoj ruti od transfer stanice } j \in J \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$Y_{j p} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko se čvor } p \in B \text{ obilazi u jednoj ruti od transfer stanice } j \in J \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$0 \leq X_{ikb} \leq 1$ definiše deo reciklabila donetih od krajnjeg korisnika $i \in I_b$ do kontejnera $k \in K_b$ u bloku $b \in B$.

Koristeći uvedene oznake opisani problem moguće je predstaviti sledećom matematičkom formulacijom:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_b \sum_k \sum_i R Q_{ib} X_{ikb} - \sum_b \sum_k (F_{kb} + \alpha_{kb}) Y_{kb} - \sum_j F_j Y_j - \sum_j \sum_{p \in B} \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} C_{j p q w e} Y_{j p q w e} - \\ & \sum_j \sum_{p \in B} \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} C_{j p q w} Y_{j p q w} - \sum_j \sum_{p \in B} \sum_{q \in B/\{p\}} C_{j p q} Y_{j p q} - \sum_j \sum_{p \in B} C_{j p} Y_{j p} \end{aligned} \quad (1)$$

uz ograničenja:

$$X_{ikb} \leq Z_{ikb}, \quad \forall i \in I_b, \forall k \in K_b, \forall b \in B \quad (2)$$

$$\sum_k X_{ikb} \leq 1, \quad \forall i \in I_b, \forall b \in B \quad (3)$$

$$\sum_i Q_{ib} X_{ikb} \leq Y_{kb} Q_b, \quad \forall k \in K_b, \forall b \in B \quad (4)$$

$$X_{ikb} \leq Y_{kb}, \quad \forall k \in K_b, \forall b \in B \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j p q w e} + \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j q p w e} + \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j q w p e} + \\ & \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j q w e p} + \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} Y_{j p q w} + \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} Y_{j q p w} + \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} \sum_{w \in B/(\{p\} \cup \{q\})} Y_{j q w p} + \\ & \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} Y_{j p q} + \sum_j \sum_{q \in B/\{p\}} Y_{j q p} + Y_{j p} = 1, \quad \forall p \in B \end{aligned} \quad (6)$$

$$Y_{jppqwe} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), \forall e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\}) \quad (7)$$

$$Y_{jppqw} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}) \quad (8)$$

$$Y_{jppq} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\} \quad (9)$$

$$Y_{jp} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B \quad (10)$$

$$\sum_{i,k} Q_{ip} X_{ikp} + \sum_{i,k} Q_{iq} X_{ikq} + \sum_{i,k} Q_{iw} X_{ikw} + \sum_{i,k} Q_{ie} X_{ike} - M(1 - Y_{jppqwe}) \leq Q_r Y_{jppqwe} \quad (11)$$

$$\forall j \in J, \forall p \in B, q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), \forall e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})$$

$$\sum_{i,k} Q_{ip} X_{ikp} + \sum_{i,k} Q_{iq} X_{ikq} + \sum_{i,k} Q_{iw} X_{ikw} - M(1 - Y_{jppqw}) \leq Q_r Y_{jppqw} \quad (12)$$

$$\forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\})$$

$$\sum_{i,k} Q_{ip} X_{ikp} + \sum_{i,k} Q_{iq} X_{ikq} - M(1 - Y_{jppq}) \leq Q_r Y_{jppq}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\} \quad (13)$$

$$\sum_{i,k} Q_{ip} X_{ikp} - M(1 - Y_{jp}) \leq Q_r Y_{jp}, \forall j \in J, \forall p \in B \quad (14)$$

$$\sum_k Y_{kp} \geq Y_{jppqwe}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\}) \quad (15)$$

$$\sum_k Y_{kq} \geq Y_{jppqwe}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\}) \quad (16)$$

$$\sum_k Y_{kw} \geq Y_{jppqwe}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\}) \quad (17)$$

$$\sum_k Y_{ke} \geq Y_{jppqwe}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\}) \quad (18)$$

$$\sum_k Y_{kp} \geq Y_{jppqw}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}) \quad (19)$$

$$\sum_k Y_{kq} \geq Y_{jppqw}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}) \quad (20)$$

$$\sum_k Y_{kw} \geq Y_{jppqw}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}) \quad (21)$$

$$\sum_k Y_{kp} \geq Y_{jppq}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\} \quad (22)$$

$$\sum_k Y_{kq} \geq Y_{jppq}, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\} \quad (23)$$

$$\sum_k Y_{kp} \geq Y_{jp}, \forall j \in J, \forall p \in B \quad (24)$$

$$Y_{kb} \in \{0,1\}, Y_j \in \{0,1\}, Y_{jppqwe} \in \{0,1\}, Y_{jppqe} \in \{0,1\}, Y_{jqwpe} \in \{0,1\}, Y_{jqwep} \in \{0,1\}, Y_{jppqw} \in \{0,1\}, Y_{jqpw} \in \{0,1\}, Y_{jqwp} \in \{0,1\},$$

$$Y_{jppq} \in \{0,1\}, Y_{jpp} \in \{0,1\}, Y_{jp} \in \{0,1\}, X_{ikb} \leq 1, X_{ikb} \geq 0 \quad (25)$$

Funkcija cilja (1) maksimizira profit koji se dobija kao razlika prihoda ostvarenog od prodaje sakupljenih reciklabila (prvi član funkcije cilja) i ukupnih troškova sistema. Ukupni troškovi sistema se sastoje od fiksnih troškova otvaranja kontejnera, troškova uzrokovanih smanjenom brzinom kretanja vozila unutar bloka i vremena stajanja

provedenog kod svake otvorene lokacije za kontejner (član 2 u funkciji cilja), troškova otvaranja transfer stanica (član 3 u funkciji cilja) i troškova rute (preostali članovi funkcije cilja) koji se odnose na sve moguće rute obilaska jednog, dva, tri ili četiri bloka.

Skup ograničenja (2) definiše maksimalnu količinu reciklabila generisanih od strane krajnjeg korisnika i odloženih u kontejner k , u stambenom bloku b , koju je moguće sakupiti saglasno vrednosti definisane funkcije pokrivanja. Ograničenja (3) opisuju mogućnost da krajnji korisnik i odlaže reciklabile u više od jednog kontejnera k u bloku b (višestruka alokacija korisnika) respektujući činjenicu da ukupna količina koju krajnji korisnik odloži u kontejnere ne može biti veća od generisane. Sprečavanje da količina reciklabila dodeljena kontejneru k pređe njegov kapacitet definiše se skupom ograničenja (4), dok ograničenja (5) obezbeđuju da se reciklabili mogu odlagati u kontejner k samo ako je taj kontejner otvoren. Ograničenja (6) sprečavaju višestruki obilazak istog čvora tj. bloka i istovremeno obezbeđuju da svaki blok bude opslužen tačno jednom. Skupovi ograničenja (7)-(10) obezbeđuju da vozila započnu i završavaju svoje ture samo u transfer stanicama koje su otvorene, dok skupovi ograničenja (11)-(14) obezbeđuju da kapacitet vozila ne bude prekoračen. Skupovima ograničenja (15)-(24) se obilaze samo oni blokovi u kojima postoje otvoreni kontejneri i , na kraju, poslednji skup ograničenja (25) definiše domene promenljivih odlučivanja.

5.3 Heuristički pristup rešavanju problema

Usled kompleksnosti predloženog matematičkog modela, instance koje se mogu rešiti optimalno su malih dimenzija i prilikom preliminarnog testiranja modela, srednje i velike test instance nisu mogle biti rešene optimalno. Kako bi se prevazišao ovaj problem, razvijen je heuristički algoritam za rešavanje formulisanog matematičkog modela, koji se pokazao kao veoma efikasan.

Kako opisani problem predstavlja specifičnu verziju 2E-LRP, u kome su rute na drugom nivou mreže poznate unapred a lociranje kontejnera za reciklabile se određuje sa ciljem maksimizacije profita ostvarenog od prodaje sakupljenih reciklabila, direktna primena postojećih i opisanih pristupa za rešavanje problema nije bila moguća. Osnovna ideja razvoja heurističkog algoritma je bazirana na razdvajanju problema lokacije objekata i rutiranja vozila, relaksacijom modela (1)-(25) i inkorporiranjem gramzivog heurističkog pristupa u lokacijskom, a potom rešavanjem ruting dela problema

ponovnom primenom celobrojnog matematičkog programiranja, ali za redizajniranu reciklažnu mrežu, proširenu kopijama blokova sa prethodno lociranim kontejnerima.

U prvoj fazi predloženog algoritma primenom "gramzive heuristike" određuju su skupovi kontejnera unutar blokova koji će biti otvoreni na nekima od predefinisanih lokacija, alokacija krajnjih korisnika i očekivana količina reciklabila koja se može sakupiti pri takvoj konfiguraciji sistema. U okviru ove faze generiše se veći broj potencijalnih konfiguracija sistema - kopija blokova, sa različitim brojem i lokacijom kontejnera čije se otvaranje predlaže. Zatim se, u drugoj fazi predloženog algoritma, određuju optimalne rute za vozila koja obilaze blokove kao i lokacije transfer stanica uzimajući u obzir prošireni prostor pretrage koji je posledica generisanja većeg broja kopija blokova, odnosno mogućih konfiguracija sistema.

U nastavku su detaljnije obrađene faze predloženog heurističkog pristupa:

Faza 1: određivanje broja i lokacija kontejnera za sakupljanje reciklabila, alokiranje krajnjih korisnika otvorenim kontejnerima i utvrđivanje prikupljene količine reciklabila

Prva faza heurističkog algoritma se sastoji od dva koraka:

- ***korak 1: određivanje broja i lokacija otvorenih kontejnera u svakom bloku***

Broj potrebnih lokacija za lociranje kontejnera u svakom bloku ($N_o^p_kontejnera(b)$) se procenjuje se primenom sledećeg izraza

$$N_o^p_kontejnera(b) = \left\lceil \sum_i Q_{ib} / Q_b \right\rceil,$$

gde je Q_{ib} ukupna raspoloživa količina generisanih reciklabila od svih krajnjih korisnika ($\forall i \in I_b$) u bloku $b \in B$, a Q_b predstavlja kapacitet kontejnera. Ovaj broj je zaokružen na prvu veću celobrojnu vrednost. U cilju proširenja prostora za pretragu rešenja, definišu se dve celobrojne vrednosti $l_s \leq |K_b|$, $r_s \leq |K_b|$, $l_s \leq r_s$, koje određuju donju i gornju granicu broja kontejnera koji se otvaraju na bazi prethodno određenog potrebnog broja kontejnera ($N_o^p_kontejnera(b)$), tj. opseg variranja broja potencijalnih kontejnera $l_s \leq N_o^p_kontejnera(b) \leq r_s$. Za svakog krajnjeg korisnika $i \in I_b$ i kontejner $k \in K_b$, unutar svakog bloka b primenom funkcije Z_{ikb}

računa se i maksimalna moguća količina sakupljenih reciklabila, i na osnovu toga određuje se pristupačnost kontejnera k u bloku b (CPE_{kb}) primenom sledećeg izraza:

$$CPE_{kb} = \sum_i Z_{ikb}$$

Kako bi se za svaki broj kontejnera koji se otvara odredile i konkretne lokacije, iskorišćena je gramziva heuristika. To podrazumeva da se za svaki zahtevani broj kontejnera u bloku otvara prvih $No_kontejnera(b)$ sa najvećim vrednostima pogodnosti CPE_{kb} . Budući da se osnovna ideja proširenja prostora pretrage bazira na variranju potrebnog broja kontejnera u bloku u opsegu (l_s, r_s) , primenom predloženog pristupa stvara se $r_s - l_s + 1$ kopija bloka b , koji se razlikuju po broju i lokacijama kontejnera. Odnosno, $C_b^{No_kontejnera(b)} \subseteq K_b$, $|C_b^{No_kontejnera}| = No_kontejnera(b)$, su podskupovi kontejnera koji se otvaraju u bloku b ukoliko se zahteva otvaranje ukupno $No_kontejnera(b)$.

- **korak 2:** alokacija krajnjih korisnika ka otvorenim kontejnerima i utvrđivanje prikupljene količine reciklabila

U drugom koraku prve faze predloženog heurističkog algoritma vrši se alokacija krajnjih korisnika $i \in I_b$ ka kontejnerima koje je potrebno otvoriti $k \in C_b^{No_kontejnera(b)}$, i utvrđuje se količina reciklabila koja se može prikupiti, pri čemu se to radi za svaku od $r_s - l_s + 1$ kopija bloka b . Alokacija korisnika i utvrđivanje količine reciklabila koja se može sakupiti realizuje se primenom sledećeg matematičkog modela:

$$Max \sum_i \sum_k X_{ikb} \quad (26)$$

Pri ograničenjima:

$$X_{ikb} \leq Z_{ikb} \quad \forall i \in I_b, \forall k \in C_b^{No_kontejnera(b)} \quad (27)$$

$$\sum_{i \in I_b} X_{ikb} \leq Q_b, \quad \forall k \in C_b^{No_kontejnera(b)} \quad (28)$$

$$\sum_{k \in C_b^{No_kontejnera(b)}} X_{ikb} \leq Q_{ib}, \quad \forall i \in I_b \quad (29)$$

$$X_{ikb} \geq 0 \quad (30)$$

Funkcija cilja (26) maksimizira prikupljene količine reciklabila sakupljene u svakoj od kopija svakog od blokova. Skup ograničenja (27) limitira količinu reciklabila koje je moguće prikupiti saglasno funkciji Z_{ikb} . Ograničenja (28) predstavljaju kapacitativna ograničenja kontejnera, dok ograničenje (29) obezbeđuje da sakupljena količina ne može premašiti ukupnu količinu generisanu od strane korisnika. Poslednja ograničenja definišu prirodu promenljivih X_{ikb} .

Rezultat ove faze algoritma su broj otvorenih kontejnera i prikupljena količina reciklabila za svaku od "kopija" bloka b . Na osnovu toga moguće je za svaku kopiju bloka izračunati prihod od sakupljenih reciklabila kao

$$\sum_{i \in I_b} \sum_{k \in C_b^{\text{No_kontejnera}(b)}} R X_{ikb} \quad , \quad \text{troškove otvaranja kontejnera} \quad \sum_{k \in C_b^{\text{No_kontejnera}(b)}} F_{kb} \quad \text{kao i troškove}$$

usled vremena potrebnog za izvođenje operacija sakupljanja i smanjene brzine

$$\text{kretanja vozila} \quad \sum_{k \in C_b^{\text{No_kontejnera}(b)}} \alpha_{kb}$$

Faza 2: određivanje optimalnih ruta vozila i lokacije transfer stanica

Za određivanje optimalnih ruta, formira se proširena mreža sa $l_s + r_s + 1$ čvorova koja sadrži sve "kopije" blokova i sve potencijalne lokacije za transfer stanice. U cilju pojednostavljenja notacije, neka je sa B označen novi prošireni skup blokova koja uključuje i sve "kopije". Ukoliko R_{pqwe} , R_{pqw} , R_{pq} , R_p označavaju prihode koji se mogu ostvariti prodajom sakupljenih reciklabila u grupama blokova $pqwe$, pqw i pq , odnosno u bloku p , a F_{pqwe} , F_{pqw} , F_{pq} , F_p i α_{pqwe} , α_{pqw} , α_{pq} , α_p , odgovarajuće troškove saglasno notaciji u prethodnom delu, onda se rute vozila i optimalna konfiguracija sistema mogu odrediti rešavanjem sedećeg matematičkog modela:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_j \sum_{p \in B} \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B / (\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} (R_{pqwe} - F_{pqwe} - \alpha_{pqwe} - C_{j pqwe}) Y_{j pqwe} + \\ & \sum_j \sum_{p \in B} \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} (R_{pqw} - F_{pqw} - \alpha_{pqw} - C_{j pqw}) Y_{j pqw} - \sum_j \sum_{p \in B} \sum_{q \in B / \{p\}} (R_{pq} - F_{pq} - \alpha_{pq} - C_{j pq}) Y_{j pq} \quad (31) \\ & + \sum_j \sum_{p \in B} (R_p - F_p - \alpha_p - C_{j p}) Y_{j p} - \sum_j F_j Y_j \end{aligned}$$

Pri ograničenjima:

$$\begin{aligned} & \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B / (\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j pqwe} + \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B / (\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j qpwe} + \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B / (\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j qwe} + \\ & \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} \sum_{e \in B / (\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})} Y_{j qwe} + \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} Y_{j pqw} + \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} Y_{j qpw} + \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} \sum_{w \in B / (\{p\} \cup \{q\})} Y_{j qwp} + \\ & \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} Y_{j pq} + \sum_j \sum_{q \in B / \{p\}} Y_{j qp} + Y_{j p} = 1, \quad \forall p \in B \end{aligned} \quad (32)$$

$$Y_{jppqwe} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}), e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\}) \quad (33)$$

$$Y_{jppqw} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\}, \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}) \quad (34)$$

$$Y_{jppq} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B, \forall q \in B/\{p\} \quad (35)$$

$$Y_{jpp} \leq Y_j, \forall j \in J, \forall p \in B \quad (36)$$

$$(Q_p + Q_q + Q_w + Q_e)Y_{jppqwe} \leq Q_r Y_{jppqwe}, \quad (37)$$

$$\forall j \in J \quad \forall p \in B \quad \forall q \in B/\{p\} \quad \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\}) \quad e \in B/(\{p\} \cup \{q\} \cup \{w\})$$

$$(Q_p + Q_q + Q_w)Y_{jppqw} \leq Q_r Y_{jppqw}, \quad (38)$$

$$\forall j \in J \quad \forall p \in B \quad \forall q \in B/\{p\} \quad \forall w \in B/(\{p\} \cup \{q\})$$

$$(Q_p + Q_q)Y_{jppq} \leq Q_r Y_{jppq}, \forall j \in J \quad \forall p \in B \quad \forall q \in B/\{p\} \quad (39)$$

$$Q_p Y_{jppqwe} \leq Q_r Y_{jpp}, \forall j \in J \quad \forall p \in B \quad (40)$$

$$Y_j \in \{0,1\}, Y_{jppqwe} \in \{0,1\}, Y_{jppqw} \in \{0,1\}, Y_{jppq} \in \{0,1\}, Y_{jpp} \in \{0,1\}, Y_{jppqwe} \in \{0,1\}, Y_{jppqw} \in \{0,1\}, Y_{jppq} \in \{0,1\}, Y_{jpp} \in \{0,1\},$$

$$Y_{jppq} \in \{0,1\}, Y_{jpp} \in \{0,1\}, Y_{jpp} \in \{0,1\} \quad (41)$$

Funkcija cilja (31) maksimizira prihod ostvaren prikupljanjem reciklabila. Ograničenja (32) zabranjuju višestruku posetu istog čvora tj. bloka i obezbeđuju da svaki blok bude posećen tačno jedanput. Skupovi ograničenja (33)-(36) obezbeđuju da vozila kreću samo iz transfer stanica koje su otvorene, dok sledeći skup ograničenja predstavljaju kapacitativna ograničenja vozila. I na kraju skup ograničenja (41) definiše prirodu promenljivih odlučivanja.

Imajući u vidu sve opisano, predložen heuristički pristup se može sumirati na sledeći način, dok je grafički prikaz heuristike prikazan slikom 5.4:

Početak algoritma

Za sve $b \in B$

odrediti broj potencijalnih lokacija za kontejnere u svakom bloku

$$N_o^p_kontejnera(b) = \left\lceil \frac{\sum_i Q_{ib}}{Q_b} \right\rceil$$

Za sve $i \in I_b$

Za sve $k \in K_b$

Za svakog krajnjeg korisnika i kontejner
izračunati količinu reciklabila koju je moguće sakupiti primenom
funkcije Z_{ikb} , i na osnovu toga pristupačnost kontejnera k za krajnjeg
korisnika i , $CPE_{kb} = \sum_i Z_{ikb}$

definisati donju (l_s) i gornju (r_s) granicu prostora pretraživanja u
kojoj se varira broj $No_kontejnera(b)$

Set $No_kontejnera(b)=l_s$

postavljanje $No_kontejnera(b)=l_s$ bude kopija bloka $b \in B$
sa brojem kontejnera $No_kontejnera(b)$

Sve dok $No_kontejnera(b) \leq r_s$ ponavljati

Pamtiti kopije blokova b i skupa B^{copy}

pronaći podskup kontejnera $C_b^{No_kontejnera(b)} \subseteq K_b, |C_b^{No_kontejnera(b)}| =$

$No_kontejnera(b)$ sa najvećom vrednošću CPE_{kb}

alocirati krajnje korisnike $i \in I_b$ ka otvorenim kontejnerima

$k \in C_b^{No_kontejnera(b)}$ primenom modela (26)-(30)

za svaku "kopiju" bloka $b \in B$

izračunati sakupljenju količinu reciklabila $Q_b = \sum_{i \in I_b} \sum_{k \in C_b^{No_kontejnera(b)}} X_{ikb}$

izračunati prihod ostvarenom prodajom sakuljenih recikabila RQ_b ,

troškove otvaranja kontejnera $\sum_{k \in C_b^{No_collection_points(b)}} F_{kb}$ i troškove zadržavanja

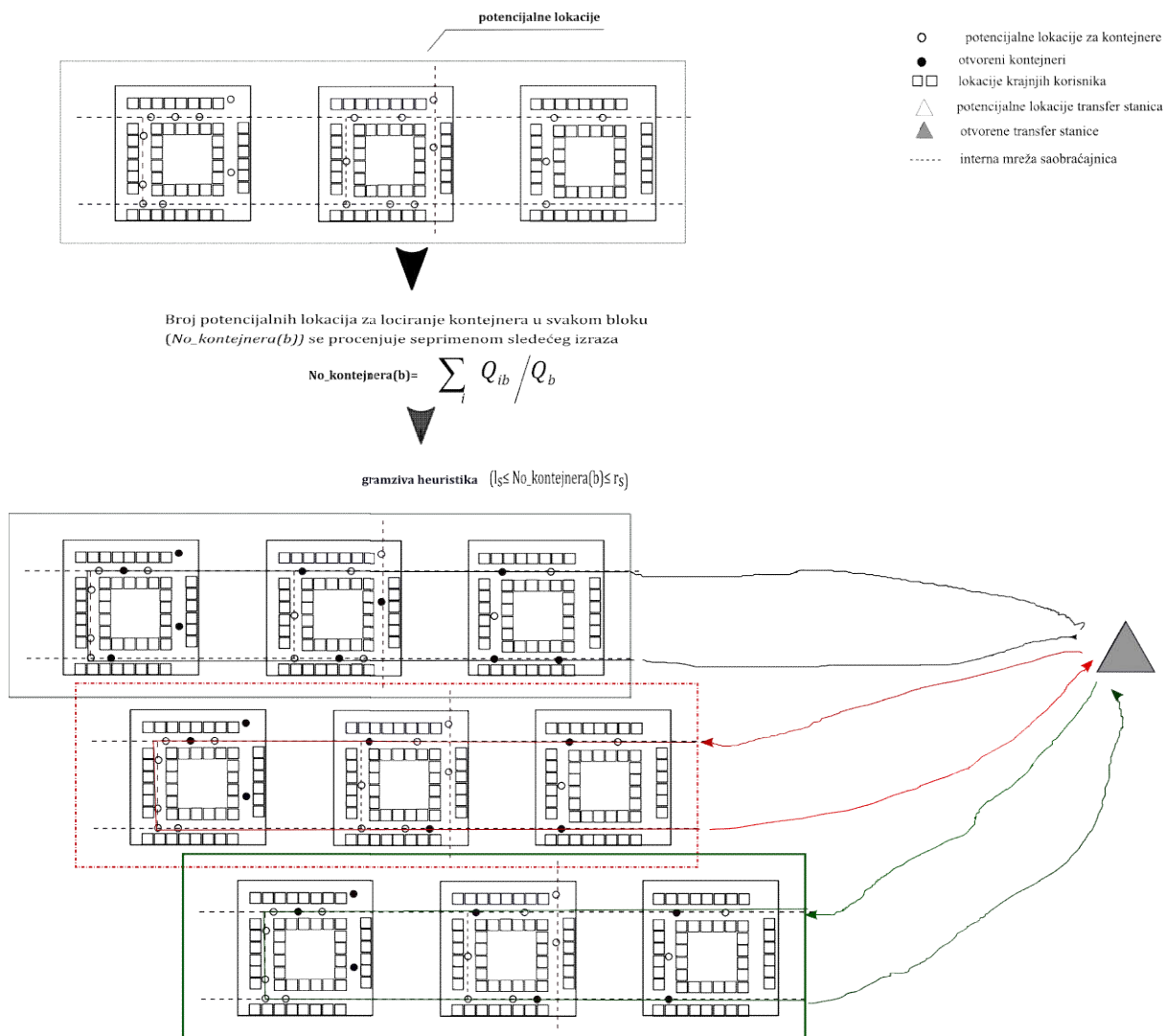
$$\sum_{k \in C_b^{No_collection_points(b)}} \alpha_{kb}$$

Za sve blokove $b \in B \cup B^{copy}$

izračunati optimalne rute rešavanjem modela (31) – (41) i

zapamtiti optimalne konfiguracije sistema za sakupljanje reciklabila

Kraj algoritma



Slika 5.4 Grafički prikaz heurističkog algoritma

5.4 Numerički primer

Kako bi testirali predloženi model i heuristički pristup, generisano je tri skupa različitih testnih instanci: male, srednje i velike. Glavna karakteristika generisanih instanci je broj krajnjih korisnika, koji generišu količine koje je potrebno sakupiti. Svi parametri modela odgovaraju problemima realnih dimenzija (u slučaju republike Srbije) iako nije rešavan nijedan specifičan problem. Kako je rečeno, preliminarnim testiranjem mogli su se rešiti problemi smo malih dimenzija tako da je za testiranje predložene heuristike generisano ukupno 400 instanci malih dimenzija čiji su ulazni parametri dati tabelom 5.1.

Tabela 5.1. Ulazni parametri za test instance malih dimenzija

Ulazni parametri	Male test instance	
Troškovi otvaranja kontejnera (€/dan)	0.5	
Troškovi otvaranja transfer stanica (€/dan)	0	
Troškovi zaustavljanja po svakom kontejneru (€/po zaustavljanju)	0.002	
prihod (€/kg)	0.12264	
Kapacitet kontejnera (kg)	20	
Kapacitet rute (kg)	650	250
Donja prihvatljiva granica rastojanja za korisnika do kontejnera (m)	50	
gornja prihvatljiva granica rastojanja za korisnika do kontejnera (m)	400	
Period sakupljanja	7 dana	
Broj blokova	{4,5,6,8,10,12,15,20}	
Broj potencijalnih lokacija za transfer stanice	2	
Generisana dnevna količina reciklabila (kg) u svakom bloku	A*B*P gde su: A – raspodela ukupno generisanog otpada -Normalna raspodela (0.1;0.8) B - broj stanovnika u svakom bloku -Beta raspodela (2,5) celobrojnih vrednosti [48,200] P - % PET boca u ukupno generisanom otpadu(3%)	
Broj potencijalnih lokacija za kontejnere	Broj potencijalnih lokacija za kontejnere je određen kao veća vrednost od dve i+proračunate vrednosti: celobrojna vrednost količnika ukupne generisane količine otpada i kapaciteta kontejnera i ukupnog broja krajnjih korisnika u bloku.	
Rastojanje između blokova (m)	Ravnomerna raspodela [100,700]	
Rastojanja između transfer stanica i blokova (m)	Ravnomerna raspodela [1000,10000]	
Rastojanja unutar blokova (m)	Ravnomerna raspodela [400,1200]	
Rastojanja između krajnjih korisnika i potencijalnih lokacija za kontejnere	Beta raspodela (2,5) u opsegu [15,400]	
Transportni troškovi (€/km)	0.9	0.6
Broj krajnjih korisnika po bloku	Ravnomerna raspodela celobrojnih vrednosti [4,7]	

Generisane su instance sa dva različita parametra kako bi testirali predloženu heuristiku: različiti kapaciteti vozila i transportni troškovi vozila. Vozilo manjeg kapaciteta odgovora maksimalnoj dnevnoj količini reciklabila u svakom bloku koje je potrebno sakupiti, dok vozilo većeg kapaciteta odgovara maksimalnoj dnevnoj količini u četiri bloka koja je potrebno sakupiti (maksimalna dužina rute). Transportni troškovi unutar svakog bloka su tri puta veći u odnosu na troškove od transfer stanica do blokova, usled smanjene brzine kretanja i višestrukog zaustavljanja vozila unutar blokova. Predloženi matematički model je rešavan primenom komercijalnog softvera Cplex 12.6, na Intel(R) Core(TM) i5-4200U (2.30 GHz, RAM 8Gb) i rešavanje je zaustavljano nakon 7200 s CPU vremena. Rezultati odbijeni optimalnim i heurističkim rešavanjem modela su prikazani tabelom 5.2. Prosečan broj instanci rešenih optimalno

je označen sa #opt**, prosečne vrednosti funkcije cilja: oimalno i rešenje dobijeno heuristikom označene su Fopt* i Fheu*, respektivno. Oznake CPUopt* i CPUheu* se odnose na prosečno vreme u sekundama potrebno za rešavanje modela optimalno i heuristikom.. Prosečna vrednost razlike odstupanje*(F)) između rešenja dobijenih optimalnim rešavanjem i heurističkim pristupom je izračunata kao odstupanje* (%) = $100 \times (\text{vrednost optimalnog rešenja} - \text{vrednost heuristike}) / \text{vrednost optimalnog rešenja}$.

Tabela 5.2 Poređenje rešenja optimalnog i heurističkog pristupa rešavanju modela

Male instance												
Q _r (kg)	650						250					
Broj blokova	#opt**	Fopt*	Fheu*	CPUopt*	CPUheu*	odstupanje*(F)	#opt**	Fopt*	Fheu*	CPUopt*	CPUheu*	odstupanje*(F)
4	25/25	27.71	27.71	0.02	0.11	0.00%	25/25	25.94	25.68	0.07	0.11	0.93%
5	25/25	29.47	29.47	0.04	0.17	0.00%	25/25	31.45	31.17	0.39	0.14	0.83%
6	25/25	34.77	34.77	0.06	0.22	0.00%	25/25	37.54	37.32	0.80	0.18	0.55%
8	25/25	53.23	53.23	0.21	0.48	0.00%	25/25	52.32	51.80	12.36	0.32	2.72%
10	25/25	64.39	64.39	0.60	1.09	0.00%	25/25	66.90	66.59	54.08	0.52	0.46%
12	25/25	77.01	77.01	1.57	1.99	0.00%	25/25	76.94	76.40	438.57	0.98	0.71%
15	25/25	95.01	95.01	10.12	5.88	0.00%	09/25	91.26	90.40	4379.68	2.78	0.91%
20	25/25	136.06	136.06	78.73	16.41	0.00%	0/25	-	133.63	-	6.50	-
prosek		64.71	64.71	11.42	3.29	0.00%		54.62	54.119	697.99	1.445	1.01%
minimum		27.71	27.71	0.02	0.11	0.00%		25.94	25.683	0.077	0.11	0.46%
maksimum		136.06	136.06	78.73	16.41	0.00%		91.26	133.63	4379.68	6.50	2.72%

*prosečna vrednost

** od 25 instanci

U slučaju vozila većeg kapaciteta, sve instance su rešene optimalno a razlika između vrednosti funkcije optimalnog i heurističkog pristupa je 0.00%. U slučaju vozila manjeg kapaciteta, unutar definisanog vremena rešavanja od 2h sve instance nisu rešene optimalno a razlika između vrednosti funkcije cilja optimalnog i heurističkog pristupa iznosi 1.01%. Ovi rezultati pokazuju da je predloženi heuristički pristup efektivan u rešavanju formulisanog matematičkog modela zato što pruža dovoljno dobra ili čak optimalna rešenja za mnogo kraće vreme rešavanja nego modeli rešavani CPLEX solverom.

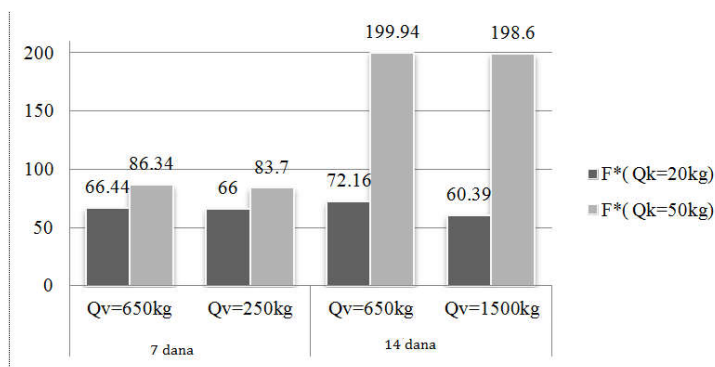
Ulazni parametri modela koji su korišćeni kod inicijalnog testiranja heurističkog pristupa su prošireni i varirani u cilju boljeg sagledavanja ponašanja sistema, odnosno utvrđivanja kako promena parametara sistema utiče na samu konfiguraciju

posmatranog sistema, tj, njegove performanse. Neke od pretpostavki koje smo uveli u model su ključne za određivanje performansi posmatranog sistema kao na primer različiti kapaciteti vozila, različiti kapaciteti kontejnera za sakupljanje reciklabila kao i različita frekvencija sakupljanja generisanih reciklabila. Ulazni parametri modela za utvrđivanje performansi modeliranog reciklažnog sistema su dati tabelom 5. 2, dok su svi parametri isti kao i u tabeli 5.3. Za sve ulazne parametre generisano je po 50 instanci za svaki broj blokova.

Tabela 5.3 Ulazni parametri modela za utvrđivanje performansi sistema

instance	Period sakupljanja (dani)	Kapacitet rute (kg)	Transportni troškovi (€/km)	Kapacitet kontejnera (kg)	Troškovi otvaranja kontejnera (€/dan)	Broj krajnjih korisnika u bloku
Male	7	250	0.6	20	0.5	Ravnomerna raspodela celobrojnih vrednosti [4,7]
				50	0.7	
		650	0.9	20	0.5	
	14	650	0.9	20	0.5	
				50	0.7	
		1500	1.2	20	0.5	
Srednje	3	300	0.7	20	0.5	Ravnomerna raspodela celobrojnih vrednosti [5,25]
				50	0.7	
		1000	1	20	0.5	
	5	500	0.8	20	0.5	
				50	0.7	
		1500	1.2	20	0.5	
Velike	1	300	0.7	20	0.5	Ravnomerna raspodela celobrojnih vrednosti [10,70]
				50	0.7	
		900	0.9	20	0.5	
	3	900	0.9	20	0.5	
				50	0.7	
		3000	1.5	20	0.5	
				50	0.7	

U slučaju problema malih dimenzija, odnosno malih test instanci posmatrana je situacija kada se reciklabili sakupljaju na svakih 7 i 14 dana. Za svaki period sakupljanja, testirane su performanse sistema sa različitim kapacitetima vozila i kontejnera. Profit dobijen za različite parametre sistema je predstavljen slikom 5.5, dok su detaljniji rezultati predstavljeni tabelom 5.4.



*prosečna vrednost

Slika 5.5 Prosečna vrednost funkcije cilja za različite parametre sistema (male instance)

Dobijeni rezultati pokazuju da se profit povećava, ukoliko se reciklabili sakupljaju na duži vremenski period. Odnosno ukoliko obilazimo blokove na svake dve nedelje umesto nedeljno, ostvariće se veći profit, što je i očekivano. Međutim, ukoliko kapaciteti kontejnera i vozila nisu dovoljni da prime generisane količine, onda se dolazi u situaciju izgubljene dobiti. Kao što se i može videti iz rezultata, u slučaju manjeg kapaciteta kontejnera i kada se reciklabili sakupljaju na svake dve nedelje, iako su sve potencijalne lokacije a kontejnere otvorene, skoro 50% ukupne generisane količine reciklabila nije prikupljeno usled nedovoljnog kapaciteta kontejnera. Kada se posmatraju kapaciteti i troškovi angažovanja vozila manjeg ili većeg kapaciteta, na slici 5.6 je prikazana iskorišćenost vozila za modelirane ulazne parametre sistema, koja naravno zavisi od količine reciklabila koje je potrebo sakupiti.

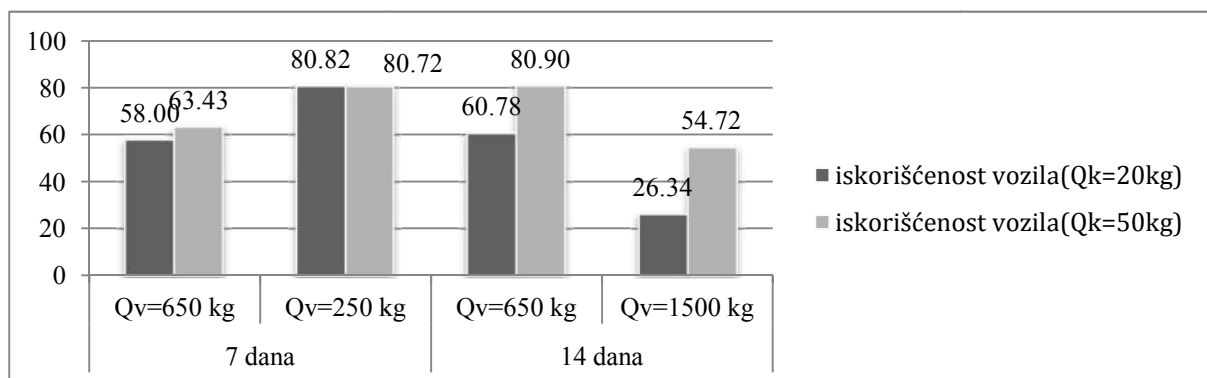
Tabela 5.4 Performanse reciklažnog sistema za probleme malih dimenzija

Period sakupljanja	Kapacitet rute (kg)	Kapacitet kontejnera (kg)	Performanse sistema	Broj blokova							
				4	5	6	8	10	12	15	20
7 dana	250	20	Broj otvorenih TS** od dve moguće	22	38	43	47	46	48	50	50
			Broj ruta*	4	4	5	5	7	7	9	11
			% otvorenih kontejnera *	98.33	97.39	97.98	97.58	97.80	97.91	97.7	97.7
		% sakupljenih količina* (kg)	91.54	92.55	90.42	91.04	91.56	90.65	91.6	91.6	
		Broj otvorenih TS** od dve moguće	22	38	43	47	46	49	50	50	
		Broj ruta*	3	5	5	6	7	9	10	13	
	650	20	% otvorenih kontejnera *	48.99	48.29	50.12	50.13	48.97	49.55	49.0	49.1
			% sakupljenih količina* (kg)	99.24	99.49	99.51	99.72	99.50	99.51	99.5	99.5
			Broj otvorenih TS** od dve moguće	22	38	43	47	46	48	50	50
		Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
		% otvorenih	96.83	95.50	96.57	96.57	96.53	96.55	96.8	97.0	

Period sakupljanja	Kapacitet rute (kg)	Kapacitet kontejnera (kg)	Performanse sistema	Broj blokova								
				4	5	6	8	10	12	15	20	
14 dana	650	50	kontejnera *								8	3
			% sakupljenih količina* (kg)	90.35	91.10	89.37	90.28	90.62	89.78	91.07	90.73	
			Broj otvorenih TS** od dve moguće	22	38	43	47	46	49	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
			% otvorenih kontejnera *	46.78	46.91	47.49	48.64	47.33	47.73	47.20	47.28	
			% sakupljenih količina* (kg)	97.46	98.26	97.52	98.62	98.34	98.25	98.41	98.47	
		20	Broj otvorenih TS** od dve moguće	22	38	43	47	46	48	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
			% otvorenih kontejnera *	100	100	100	100	100	100	100	100	
			% sakupljenih količina* (kg)	0.48	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.48	
			50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	34	43	44	49	49	49	50	50
				Broj ruta*	3	3	4	4	5	6	7	9
	% otvorenih kontejnera *	0.88		0.88	0.89	0.89	0.88	0.89	0.88	0.89		
	% sakupljenih količina* (kg)	0.98		0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99		
	1500	Broj otvorenih TS** od dve moguće		22	38	43	47	46	48	50	50	
		Broj ruta*		1	2	2	2	3	3	4	5	
		% otvorenih kontejnera *	100	100	100	100	100	100	100	100		
		% sakupljenih količina* (kg)	0.48	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.48		
		50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	22	38	43	47	46	48	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
	% otvorenih kontejnera *		0.90	0.89	0.90	0.90	0.89	0.90	0.89	0.89		
	% sakupljenih količina* (kg)		0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99		

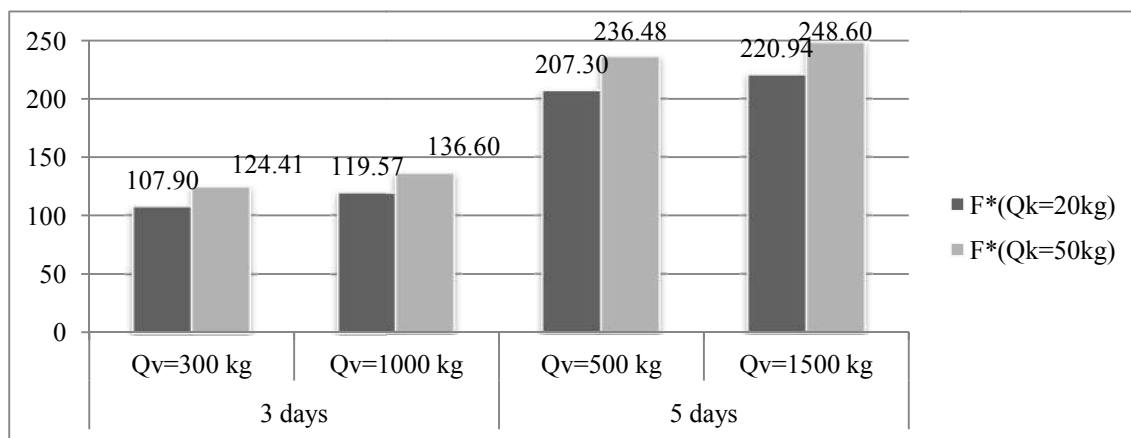
** od 50 instanci

*prosečna vrednost



Slika 5.6 Prosečna iskorisćenost vozila (%) za različite vrednosti Q_k i Q_v (male instance)

U slučaju srednjih instanci, prosečna vrednost funkcije cilja se povećavala sa povećanjem vremena posmatranja modela (slika 5.7). Performanse sistema za srednje instance su predstavljen tabelom 5.5, dok je prosečna iskorišćenost vozila za različite parametre sistema predstavljena slikom 5.8.



*prosečna vrednost

slika 5.7 Prosečna vrednost funkcije cilja za različite parametre sistema (srednje instance)

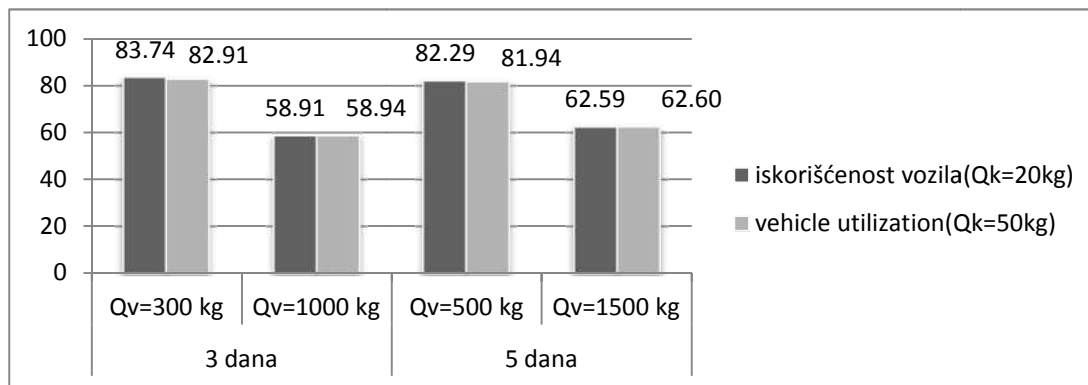
Tabela 5.5 Performanse reciklažnog sistema za probleme srednjih dimenzija

Period sakupljanja	Kapacitet rute (kg)	Kapacitet kontejnera (kg)	Performanse sistema	Broj blokova								
				4	5	6	8	10	12	15	20	
3 dana	300	20	Broj otvorenih TS** od dve moguće	44	48	47	50	50	50	50	50	50
			Broj ruta*	4	4	6	7	10	10	12	16	
			% otvorenih kontejnera *	51.35	51.77	51.99	51.98	52.24	51.99	51.89	52.23	
		50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	45	48	48	50	50	50	50	50	
			Broj ruta*	4	4	6	7	10	10	13	16	
			% otvorenih kontejnera *	22.35	22.03	22.27	22.35	22.37	22.31	22.47	22.49	
	1000	20	Broj otvorenih TS** od dve moguće	24	43	44	47	50	49	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
			% otvorenih kontejnera *	53.37	53.39	53.18	53.36	53.36	53.14	53.06	53.31	
		50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	24	42	44	47	50	49	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
			% otvorenih kontejnera *	23.24	23.04	23.01	23.08	23.10	23.06	23.12	23.08	
5 dana	500	20	Broj otvorenih TS** od dve moguće	45	48	48	50	50	50	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
			% otvorenih kontejnera *	23.24	23.04	23.01	23.08	23.10	23.06	23.12	23.08	
		50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	24	42	44	47	50	49	50	50	
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5	
			% otvorenih kontejnera *	23.24	23.04	23.01	23.08	23.10	23.06	23.12	23.08	

Period sakupljanja	Kapacitet rute (kg)	Kapacitet kontejnera (kg)	Performanse sistema		Broj blokova							
					4	5	6	8	10	12	15	20
1500	50	20	Broj ruta*		4	5	6	8	10	10	13	16
			% otvorenih kontejnera *		86.42	86.44	86.48	86.45	86.68	86.31	86.20	86.94
			% sakupljenih količina* (kg)		98.92	98.74	99.12	99.07	99.21	99.06	99.22	99.38
			Broj otvorenih TS** od dve moguće		44	48	48	50	50	50	50	50
			Broj ruta*		4	5	6	8	10	10	13	16
			% otvorenih kontejnera *		35.74	35.97	35.97	35.86	36.14	36.01	35.91	36.28
	50	20	% sakupljenih količina* (kg)		98.95	98.97	99.27	99.19	99.04	99.30	99.33	99.46
			Broj otvorenih TS** od dve moguće		24	42	44	46	50	50	50	50
			Broj ruta*		2	2	2	2	3	3	4	5
			% otvorenih kontejnera *		87.56	36.82	87.43	87.50	87.65	87.27	87.07	87.64
			% sakupljenih količina* (kg)		99.82	99.91	99.83	99.82	99.84	99.74	99.78	99.81
			Broj otvorenih TS** od dve moguće		24	42	44	46	50	50	50	50
50	50	Broj ruta*		2	2	2	2	3	3	4	5	
		% otvorenih kontejnera *		36.44	36.82	36.48	36.53	36.62	36.56	36.50	36.74	
		% sakupljenih količina* (kg)		99.87	99.91	99.88	99.85	99.89	99.88	99.87	99.90	
		Broj otvorenih TS** od dve moguće		24	42	44	46	50	50	50	50	
		Broj ruta*		2	2	2	2	3	3	4	5	
		% otvorenih kontejnera *		36.44	36.82	36.48	36.53	36.62	36.56	36.50	36.74	

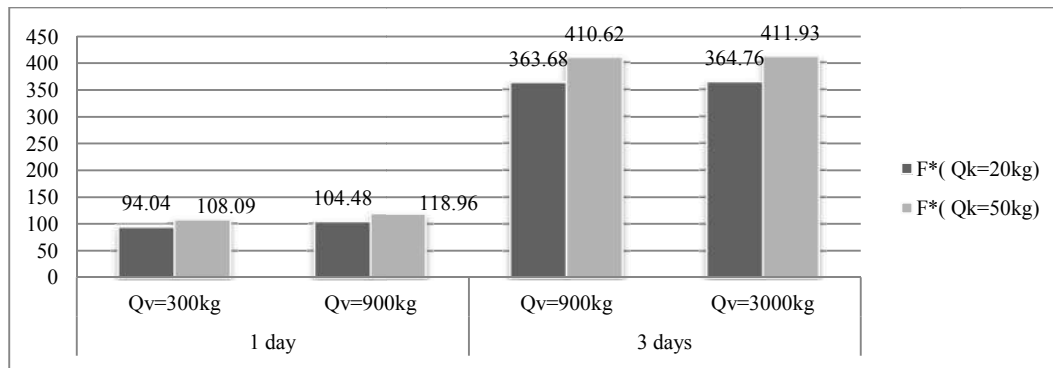
** od 50 instanci

*prosečna vrednost



Slika 5.8 Prosečna iskorišćenost vozila (%) za različite vrednosti Q_k i Q_v (srednje instance)

U slučaju problema velikih dimenzija, prosečna vrednosti funkcije cilja za različite parametre sistema su predstavljene slikom 5.9. Performanse sistema za velike instance su predstavljene tabelom 5.6, dok je prosečna iskorišćenost vozila za različite parametre sistema predstavljena slikom 5.10.



*prosečna vrednost

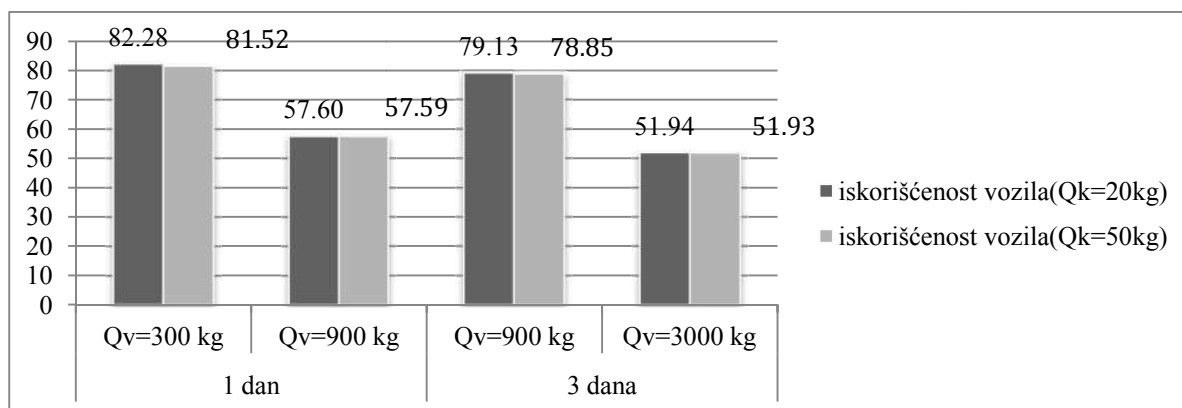
Slika 5.9 Prosečna vrednost funkcije cilja za različite parametre sistema (velike instance)

Tabela 5.6 Performanse reciklažnog sistema za probleme velikih dimenzija

Period sakupljanja	Kapacitet rute (kg)	Kapacitet kontejnera (kg)	Performanse sistema	Broj blokova							
				4	5	6	8	10	12	15	20
1 dan	300	20	Broj otvorenih TS** od dve moguće	41	45	47	50	50	49	50	50
			Broj ruta*	3	4	5	7	8	9	11	15
			% otvorenih kontejnera *	18.01	17.98	18.05	18.04	18.19	18.03	18.11	18.14
		% sakupljenih količina* (kg)	97.68	97.37	98.14	98.16	98.64	98.36	98.46	98.59	
		50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	41	45	46	50	50	49	50	50
			Broj ruta*	3	4	5	7	8	9	11	14
	% otvorenih kontejnera *		7.79	7.77	7.91	7.94	8.13	7.95	8.01	7.89	
	900	20	% sakupljenih količina* (kg)	97.71	97.30	98.44	98.30	98.75	98.68	98.93	98.80
			Broj otvorenih TS** od dve moguće	30	40	44	50	50	49	50	50
			Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5
		50	% otvorenih kontejnera *	18.56	18.66	18.56	18.52	18.59	18.49	18.53	18.54
			% sakupljenih količina* (kg)	99.77	99.70	99.73	99.76	99.71	99.72	99.71	99.69
Broj otvorenih TS** od dve moguće			30	41	40	44	50	50	49	50	
3 dana	900	20	Broj ruta*	1	2	2	2	3	3	4	5
			% otvorenih kontejnera *	8.13	8.21	8.22	8.22	8.36	8.19	8.21	8.14
			% sakupljenih količina* (kg)	99.68	99.73	99.74	99.67	99.75	99.70	99.69	99.72
		50	Broj otvorenih TS** od dve moguće	42	46	47	50	50	50	50	50
			Broj ruta*	4	5	5	7	8	10	12	15
			% otvorenih kontejnera *	53.94	54.26	54.03	53.88	53.91	53.85	54.12	54.03
	900	20	% sakupljenih količina* (kg)	99.78	99.47	99.71	99.64	99.60	99.69	99.74	99.73
			Broj otvorenih TS** od dve moguće	42	46	47	50	50	50	50	50
			Broj ruta*	4	5	5	7	8	10	12	15
		50	% otvorenih kontejnera *	53.94	54.26	54.03	53.88	53.91	53.85	54.12	54.03
			% sakupljenih količina* (kg)	99.78	99.47	99.71	99.64	99.60	99.69	99.74	99.73
			Broj otvorenih TS** od dve moguće	42	46	47	50	50	50	50	50

Period sakupljanja	Kapacitet rute (kg)	Kapacitet kontejnera (kg)	Performanse sistema	Broj blokova							
				4	5	6	8	10	12	15	20
a	3000	20	moguće Broj ruta*	4	5	5	7	8	10	12	15
			% otvorenih kontejnera *	22.15	22.35	22.28	22.19	22.29	22.17	22.29	22.23
			% sakupljenih količina* (kg)	99.80	99.53	99.75	99.70	99.69	99.78	99.80	99.78
			Broj otvorenih TS** od dve moguće Broj ruta*	30	41	40	44	50	50	49	50
			% otvorenih kontejnera *	54.06	54.62	54.24	54.10	54.18	54.02	54.29	54.23
			% sakupljenih količina* (kg)	99.90	99.92	99.92	99.91	99.89	99.89	99.91	99.91
	50	50	Broj otvorenih TS** od dve moguće Broj ruta*	30	41	40	44	50	50	49	50
			% otvorenih kontejnera *	22.25	22.55	22.39	22.29	22.39	22.27	22.37	22.33
			% sakupljenih količina* (kg)	99.91	99.95	99.93	99.92	99.92	99.92	99.92	99.93

** od 50 instanci
*prosečna vrednost



Slika 5.10 Prosečna iskorisćenost vozila (%) za različite vrednosti Q_k i Q_v (velike instance)

Kada se uporede rezultati dobijeni rešavanjem problema malih, srednjih i velikih instanci kao generalan zaključak se može reći da sistem ima bolje performanse ukoliko su kontejneri za sakupljanje reciklabila većeg kapaciteta jer se tada ostvaruje veći profit. Naime, u slučaju kada je period sakupljanja duži a kapacitet kontejnera manji, jednostavno ne postoji mogućnost za sakupljanje generisanih količina reciklabila usled nedovoljno kapaciteta kontejnera, što predstavlja izgubljenu dobit ali i ekološku opasnost.

Predloženi pristup u istraživanju, može biti veoma koristan za vladine institucije, lokalnu samoupravu, kao i druge organizacije koje se bave pitanjima zaštite životne

sredine, naročito kada reciklažna infrastruktura ne postoji ili je potrebno razviti. Štaviše, čak i u slučajevima kada odgovarajuća infrastruktura za reciklažu postoji, ovo istraživanje ukazuje na potrebu za poboljšanjem i reorganizacijom postojećeg sistema.

6 ZAKLJUČAK

Postojeća infrastruktura, poslovni modeli i primenjena tehnologija, zajedno sa usvojenim obrascima ponašanja i potrošnje, drže današnje ekonomije "zaključanim" u linearnom obrascu rasta i razvoja društva, koji je postao neodrživ. U vremenu kada su resursi neophodni za proizvodnju ograničeni, i oštre konkurencije oko pronalaženja novih izvora sirovina ili pronalaženje potpuno novih sirovina, sa jedne strane i ograničenih kapaciteta i prostora za deponije, ponovno korišćenje proizvoda i materijala je postalo neizbežno. U tom smislu, pretvaranje otpada u resurs postaje ključno. Ciljevi koji su definisani Direktivama EU su bili ključni pokretači za poboljšanje upravljanja otpadom, stimulaciju inovacija u reciklaži proizvoda, ograničavanju upotrebe zemljišta za deponije, kao i za promenu obrasca ponašanja potrošača. Ukoliko se proizvod ponovo upotrebi, reciklira i ukoliko otpad u jednoj industriji postane sirovina za drugu industriju, otvara se mogućnost promene linearnog obrasca razvoja ekonomije u cirkularni u kome je otpad eliminisan a sirovine se koriste na efikasan i održiv razvoj. Kako bi se otpad pretvorio u sirovinu, tokom 2014. godine, EU je donela zakonodavni okvir vezan za cirkularnu ekonomiju koji obuhvata niz zakonskih akata, a sve u cilju dostizanja ciljeva koji su definisani Strategijom razvoja EU do 2020.

Količine i vrednost proizvoda koji se kreću unazad u lancu snabdevanja se povećavaju usled ekoloških, zakonodavnih i tržišnih inicijativa. Stock (2002) navodi da se vrednost vraćene robe u periodu od 10 godina, povećala sa \$40 milijardi u 1992. godini do preko \$100 milijardi u 2002. god. Sa druge strane, kompanije su prepoznale ekonomsku vrednost koja se nalazi u vraćenim proizvodima. Efikasno i efektivno upravljanje povratnim tokovima proizvoda može doneti direktnu korist kompanijama kroz smanjenje sirovina u proizvodnji, stvaranje novih vrednosti kroz oporavak i obnavljanje vraćenih proizvoda, ili kroz smanjenje troškova odlaganja otpada na način koji je ekološki, društveno i zakonski prihvatljiv. Finansijska korist je prisutna i kod

rastavljanja vraćenih proizvoda na delove, od kojih se funkcionalni delovi ponovo vraćaju na tržište (uz eventualnu pripremu i/ili čišćenje), a otpad odlaže na odgovarajući način. Osim direktne ekonomske koristi od efikasnog i efektivnog upravljanja povratnim tokovima, kompanije mogu imati i indirektne koristi, od kojih je jedna svakako i sprečavanje konkurencije da se domogne određene tehnologije.

Dakle, danas se ne postavlja pitanje da li je potrebno upravljati povratnim tokovima, već kako to na najbolji mogući način uraditi. Rešenje problema upravljanja povratnim tokovima proizvoda, materijala i roba, pruža povratna logistika (eng. *reverse logistics*) jer ponovno korišćenje proizvoda, u bilo kom obliku, donosi korist kako u ekološkom tako i u socioekonomskom pogledu.

Predmet ovog istraživanja je prvenstveno bilo ukazivanje na značaj povratne logistike, jednovremeno posmatrajući i strateški i taktički/operativni nivo odlučivanja, koji kao takav donosi uštede na duži vremenski period. U istraživanju je predstavljen matematički model mešovitog celobrojnog linearnog programiranja za definisanje optimalne mreže za reciklažu ambalažnog otpada, formulisan kao lokacijski-ruting model (eng. *Location Routing Problem, LRP*) i heuristički algoritam za njegovo rešavanje.

Rešenja dobijena predloženim heurističkim algoritmom su blizu optimalnih ili čak optimalna. Predloženi model je testiran za različite parametre sistema kako bi dobili bolji uvid u performanse sistema. Predloženi pristup u istraživanju, može biti veoma koristan za vladine institucije, lokalnu samoupravu, kao i druge organizacije koje se bave pitanjima zaštite životne sredine, naročito kada reciklažna infrastruktura ne postoji ili je potrebno razviti. Štaviše, čak i u slučajevima kada odgovarajuća infrastruktura za reciklažu postoji, ovo istraživanje ukazuje na potrebu za poboljšanjem i reorganizacijom postojećeg sistema.

Ovo istraživanje doprinosi literaturi lokacijskih-ruting problema u sledećim aspektima. Kao prvo, predložena je MILP formulacija 2E-LRP za projektovanje reciklažne mreže za ambalažni otpad, respektujući specifičnosti mreža povratne logistike. Kao drugo, za rešavanje formulisanog modela razvijena je efikasna heuristika za rešavanje problema srednjih i velikih dimenzija, a koji odgovaraju realnim problemima. Istraživanje ima nekoliko budućih pravaca daljeg unapređenja od koji su na primer: istraživanje performansi sistema sa različitim funkcijama pokrivanja; formulisanje problema za sakupljanje više vrsta proizvoda, odnosno reciklabila; ispitivanje performansi sistema

za vozila sa pregradama koje sakupljaju više vrsta proizvoda. Zatim, moguće je proširiti posmatrani problem tako da se obuhvati i sekundarno tržište proizvoda, i na taj način bi se modelirao ceo zatvoreni lanac snabdevanja kružnog toka. Na kraju, još jedno moguće proširenje i unapređenje ovog istraživanja je uvođenje hibridnih vozila u sistem, čime bi ceo posmatrani sistem postao još „zeleniji“.

7 LITERATURA

Abdulrahman, M.D., Gunasekaran, A., Subramanian, N., 2014. Critical barriers in implementing reverse logistics in the Chinese manufacturing sectors. *International Journal of Production Economics* 147(Part B), pp. 460-71.

Agrawal, S., Singh, R.K. & Murtaza, Q., 2015. A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, pp.76-92.

Akçali, E., Çetinkaya, S. & Üster, H., 2009. Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), pp.231-248.

Aksen, D., Aras, N. & Karaarslan, A.G., 2009. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns. *International Journal of Production Economics*, 119(2), pp.308-327.

Albareda-Sambola, M., Díaz, J. A., Fernández, E., Diaz, J. A., & Fernandez, E. (2005). A compact model and tight bounds for a combined location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 32(3), 407–428.

Alumur, S., Kara, B.Y., 2007. A new model for the hazardous waste location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 34(5), pp.1406-1423.

Ambrosino, D., & Scutellà, M. G., 2005. Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165, pp. 610-624.

Barker, T.J. & Zabinsky, Z.B., 2008. Reverse logistics network design: a conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), pp.250-260.

Barreto, S., Ferreira, C., Paixao, J., Sousa Santos, B., 2007. Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 179, Issue 3, 16, pp.968-977.

Barros, I., Dekker, R., Scholten, V., 1998. A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110(2), pp.199-214.

Beamon, B.M, Fernandes, C., 2004. Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning Control* 15 (2004), pp.270-281.

BearingPoint Inc., 2008. 2008 Supply Chain Monitor " How mature is the Green Supply Chain?". Dostupno na http://www.stlwarehousing.com.au/info/BearingpointGreenSupplyChain2008_SurveyReport.pdf

Being wise with waste: The EU's approach to waste management. Retrieved from: <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/WASTE%20BROCHURE.pdf> Accessed 10.02.15.

Berman, O., Dmitry Krass, D., Drezner, Z. The gradual covering decay location problem on a network, *European Journal of Operational Research* 151 (2003) 474-480

Biehl, M., Prater, E., & Realf, M. J. (2007). Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems. *Computers and Operations Research*, 34(2), 443-463.

Bloemhof-Ruwaard, J.M., Fleischmann, M., van Nunen, J.A.E.E., 1999. Reviewing Distribution Issues in Reverse Logistics. *New trends in distribution logistics*. M. Grazia Speranza, Paul Stähly (Eds). Volume 480 of the series *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pp 23-44. Springer.

Boccia, M., Crainic, T. G., Sforza, A., & Sterle, C. (2010). A metaheuristic for a two echelon location-routing problem. In P. Festa (Ed.), *Volume 6049 of Lecture notes in computer science, Experimental algorithms* (pp. 288-301). Springer.

Boccia, M., Crainic, T. G., Sforza, A., & Sterle, C. (2011). Location-routing models for designing a two-echelon freight distribution system. *Cirrelet*.

Bozkaya, B., Yanik, S., and Balcisoy, S. (2010). A GIS-based optimization framework for competitive multi-facility location-routing problem. *Networks and Spatial Economics* 10(3), pp 297-320.

Caballero, R., González, M., Guerrero, F. M., Molina, J., & Parolera, C. (2007). Solving a multiobjective location routing problem with a metaheuristic based on tabu search. Application to a real case in Andalusia. *European Journal of Operational Research*, 177(3), pp. 1751-1763.

Cappanera, P., Gallo, G., & Maffioli, F. (2003). Discrete facility location and routing of obnoxious activities. *Discrete Applied Mathematics*, 133(1), 3-28.

Carrasco-Gallego, R., Ponce-Cueto, E. & Dekker, R., 2012. Closed-loop supply chains of reusable articles: a typology grounded on case studies. *International Journal of Production Research*, 50(19), pp.5582-5596.

Carter, C.R. & Ellram, L.M., 1998. Reverse Logistics: A Review of the literature and framework for future investigations. *Journal of Business Logistics*, 19(1), pp.85-102.

Chan, H.K., Yin, S. & Chan, F.T.S., 2010. Implementing just-in-time philosophy to reverse logistics systems: a review. *International Journal of Production Research*, 48(21), pp.6293-6313.

Chan, Y., Carter, W.B., Burnes, M.D., 2001. A multiple-depot, multiple-vehicle, location-routing problem with stochastically processed demands. *Computers and Operations Research* 28, 803-826.

Chanintrakul, P., Mondragon, A.E.C., Lalwani, C., Wong, C.Y., 2009. *Int. J. Business Performance and Supply Chain Modelling. Business*, 1(1), pp.61-81.

Christofides, N. & Eilon, S., 1969. Expected Distances in Distribution Problems. *or*, 20(4), pp.437-443.

Contardo, C., Hemmelmayr, V. & Crainic, T.G., 2012. Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 39(12), pp.3185-3199.

Cuda, R., Guastaroba, G. & Speranza, M.G., 2014. A survey on two-echelon routing problems. *Computers and Operations Research*, 55, pp.185-199.

Dalfard, V.M., Kaveh, M. & Nosratian, N.E., 2013. Two meta-heuristic algorithms for two-echelon location-routing problem with vehicle fleet capacity and maximum route length constraints. *Neural Computing and Applications*, 23(7-8), pp.2341-2349.

Daugherty, P.J., Autry, C.W. & Ellinger, A.E., 2001. Reverse logistics: The relationship between resource commitment and program performance. *Journal of Business Logistics*, 22(1), pp.107-124.

de Brito, M.P., 2004. *Managing Reverse Logistics or Reversing Logistics Management??* Thesis, Erasmus Research Institute of Management (ERIM) pp.1-327.

Del Castillo, E. and Cochran, J.K., 1996. Optimal short horizon distribution operations in reusable container systems. *Journal of the Operational Research Society*, 47 (1), 48-60.

Derbel, H., Jarboui, B., Hanafi, S., & Chabchoub, H. (2012). Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2865–2871.

Derbel, H., Jarboui, B., Hanafi, S., & Chabchoub, H. (2012). Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2865-2871. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.146>.

Dogan, K., & Süleyman, S. (2003). Report: Cost and financing of municipal solid ? waste collection services in Istanbul. *Waste Management & Research*, 21(5), 480- 485. <http://doi.org/10.1177/0734242x0302100511>.

Domina, T., & Koch, K. (2002). Convenience and frequency of recycling: Implications for including textiles in curbside recycling programs. *Environment and Behavior*, 34(2), 216-238. <http://doi.org/10.1177/0013916502342004>.

Doonan, J., Lanoie, P., & Laplante, B. (2005). Determinants of environmental performance in the Canadian pulp i paper industry: An assessment from inside the industry. *Ecological Economics*, 55(1), 73-84.

Dowlathshahi, S. (2000). Developing a theory of Reverse Logistics. *Interfaces*, Vol. 30, No 3, May- June, pp. 143-155

Drexler, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 283- 308.

Duhamel, C., Lacomme, P., Prins, C., & Prodhon, C. (2010). A GRASP × ELS approach for the capacitated location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 37(11), 1912-1923.

EC (2005), Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Taking sustainable use of resources forward - A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste, COM/2005/0666 final, 21.12.2005.

EC (2006), Integrated pollution prevention and control reference document on best available techniques for the waste treatment industries, European Commission.

EC (2006), Integrated pollution prevention and control reference document on best available techniques for waste incineration, European Commission.

EC (2013). Review of waste policy and legislation. Retrieved from: http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned_initiatives/docs/2014_env_005_waste_review_en.pdf Accessed 15.11.14. EEA (2010).

El korchi, A. & Millet, D., 2011. Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), pp.588-597.

Elwany, H., Fors, N., Harraz, N., Galal, N. 2007. Reverse Logistics Network Design?: Review of Models and. *Proceedings of the 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, pp.2234-2242.

EU (1994), European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste, OJ L 365, 31.12.1994, pp. 10-23.

EU (1999), Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, OJ L 182, 16.7.1999, pp. 1-19.

EU (2000), Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles - Commission Statements, OJ L 269, 21.10.2000, pp. 34-43.

EU (2002), Directive 2002/95/EC of the European Parliament i of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical i electronic equipment, OJ L 37, 13.2.2003, pp. 19-23.

EU (2002), Directive 2002/96/EC of the European Parliament i of the Council of 27 January 2003 on waste electrical i electronic equipment (WEEE) - Joint declaration of the European Parliament, the Council i the Commission relating to Article 9, OJ L 37, 13.2.2003, pp. 24-39.

EU (2005), Directive 2005/32/EC of the European Parliament i of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products i amending Council Directive 92/42/EEC i Directives 96/57/EC i 2000/55/EC of the European Parliament i of the Council, OJ L 191, 22/07/2005, pp. 29-58.

EU (2008), Directive 2008/98/EC of the European Parliament i of the Council of 19 November 2008 on waste i repealing certain Directives, OJ L 312, 22.11.2008, pp. 3-30.

EU (2009), Directive 2009/125/EC of the European Parliament i of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, OJ L 285, 31.10.2009, pp. 10-35.

EU (2010), Directive 2010/75/EU of the European Parliament i of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention i control), OJ L 334, 17.12.2010, pp. 17-119.

EU (2011), Directive 2011/65/EU of the European Parliament i of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical i electronic equipment, OJ L 174, 1.7.2011, pp. 88-110.

EU (2012), Directive 2012/19/EU of the European Parliament i of the Council of 4 July 2012 on waste electrical i electronic equipment (WEEE), OJ L 197, 24.7.2012, pp. 38-71.

EU Commission, 2014. Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe. Dostupno na

[http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/COM\(2014\)%20398%20final.pdf](http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/COM(2014)%20398%20final.pdf)

European Commission, 2010. Being wise with waste?: the EU 's approach to waste management. Publications Office of the European Union, p.20. Available at: http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/WASTE_BROCHURE.pdf.

European Commission, 2011. EC COMMUNICATION: Roadmap to a Resource Efficient Europe. Dostupno na <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0571>

European Environment Agency (EEA), 2011. Earnings, jobs i innovation: the role of recycling in a green economy. Dostupno na: <http://www.eea.europa.eu/publications/earnings-jobs-i-innovation-the>.

Fischer, C., Bakas, I. & Bjørn, A., 2011. Green economy and recycling in Europe. ETC/SCP working paper 5/. Dostupno na <http://lup.lub.lu.se/record/2303703>.

Flapper, S.D.P., 1996. Logistic aspects of reuse: An overview. Proceedings of the First International Working Seminar on Reuse. Eindhoven, The Netherlands, pp. 109-118.

Fleischmann, M. (2001). Quantitative Models for Reverse Logistics. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam, the Netherlands. PhD Thesis

Fleischmann, M. ,Krikke, H.R., Dekker, R.,Flapper, S. D.P. 2000. A characterisation of logistics networks for product recovery. Omega, 28(6), pp.653-666.

Fleischmann, M. J.M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. van der Laan, J.A.E.E. van Nune, L.N. van Wassenhove 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. European Journal of Operational Research, 103(1), pp.1-17.

Fleischmann, M., Beullens,P., Bloemhof-Ruwaard,J.M., Van Wassenhove, L.N., 2001. The impact of product recovery on logistics network design, Production Oper Manage 10, pp. 156-173.

Gerards, A. M. H. (1995). Matching. In M. O. Ball, T. L. Magnati, C. L. Monma, & G. L. Nemahuser (Eds.), Handbooks in OR & MS: 7 (pp. 135-224). Elsevier Science B.V.

Geyer, R., Van Wassenhove, L.N., and Atasu, A., 2007. The economics of remanufacturing under limited component durability and finite product life cycles. *Management Science*, 53 (1), pp. 88-100.

Giuntini R., Iel T. (1995) Master the six R's of reverse logistics, *Transportation i Distribution*, 36(4), pp.97-98.

González-Torre, P. L., & Adenso-Díaz, B. (2005). Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling. *Waste Management*, 25(1), 15-23. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.007>.

Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., Devika, K. 2014a. Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, pp.9-28.

Govindan, K., Soleimani, H. & Kannan, D., 2014b. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), pp.603-626.

Greve, C. & Davis, J., 2012. Recovering lost profits by improving reverse logistics. UPS White paper. Dostupno na <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Recovering+Lost+Profits+by+Improving+reverse+logisitcs#0>.

Guide VDR Jr, V Jayaraman, R Srivastava, WC Benton. 2000. Supply-chain management for recoverable manufacturing systems - *Interfaces* 30(3) 125-142.

Guide, V.D.R. and Van Wassenhove, L.N., 2002. The reverse supply chain. *Harvard Business Review*, 80 (2), 25-26.

Gungor, A. & Gupta, S.M., 1999. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey. *Computers and Industrial Engineering*, 36(4), pp.811-853.

Hagerty, J.R., Glader, P., 2011. From trash heap to store shelf. Dostupno na <http://online.wsj.com/article/SB10001424052748704115404576095881429852432.html>

Hamidi, M., Farahmand, K., & Reza Sajjadi, S. (2012a). Modeling a four-layer location- routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3, 43-52.

Hamidi, M., Farahmand, K., Reza Sajjadi, S., & Nygard, K. (2012b). A hybrid GRASP- tabu search metaheuristic for a four-layer location-routing problem. *International Journal*

Hamidi, M., Farahmand, K., Reza Sajjadi, S., & Nygard, K. (2014). A heuristic algorithm for a multi-product four-layer capacitated location-routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 5(1), 87-100.

Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. & Hoornweg, D., 2012. What a waste: a global review of solid waste management. World Bank, Washington DC, p.9. dostupno na: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:WHAT+A+WASTE:+A+global+review+of+solie+waste+management#0>.

Ilgin, M.A. & Gupta, S.M., 2010. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), pp.563-591.

Jacobsen, S.K., Madsen, O.B.G., 1980. A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem. *European Journal of Operational Research* 5, 378-387.

Jahre, M. (1995). Logistics systems for recycling-efficient collection of household waste [Ph.D. thesis]. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.

Janes B, Schuur P, Brito De MP. A reverse logistics diagnostic tool: the case of the consumer electronics industry. *Int J Adv Manuf Technol* 2010;47(5-8):495-513

Janse, Bastiaan, Schuur, P., & Brito, M. P. D. (2009). A reverse logistics diagnostic tool: The case of the consumer electronics industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 1-19

Jarboui, B., Derbel, H., Hanafi, S., & Mladenovic, N. (2013). Variable neighborhood ' search for location routing. *Computers & Operations Research*, 40(1), 47-57.

Jayant, Arvind. 2012. Reverse Logistics: Perspectives, Empirical Studies And Research Directions. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*

Jayaraman, V. & Srivastava, R., 1999. A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50(5), pp.497-508.

Jayaraman, V., Gupta, R. & Pirkul, H., 2003. Selecting hierarchical facilities in a service-operations environment. *European Journal of Operational Research*, 147(3), pp.613-628.

Kara, S.S., Onut, S (2010). A stochastic optimization approach for paper recycling reverse logistics network design under uncertainty *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7 (4), 717-730

Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2014). A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. *Computers and Operations Research*, 55, 200-216. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.009>. 48

Karaoglan, I., Altiparmak, F., Kara, I., & Dengiz, B. (2012). The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. *Omega*, 40(4), 465-477.

Ko, H.J., Evans, G.W. 2007. A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs, *Computers and Operations Research* 34, pp. 346-366

Kroon, L., G.Vrijens. 1995. Returnable containers: An example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25 (2) pp. 56-68.

Kulcar, T., 1996. Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of Operational Research* 90, 26-44.

Lee, D.-H. & Dong, M., 2008. A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), pp.455-474.

Lieckens, K, Vandaele, N., 2007. Reverse logistics network design with stochastic lead times, *Computers and Operations Research* 34, pp. 395-416

Lin, J.-R., & Lei, H.-C. (2009). Distribution systems design with two-level routing considerations. *Annals of Operations Research*, 172, 329-347 . ISSN 0254-533.

Listes, O., Dekker, R., 2005. A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research* 160 pp. 268-287

Listes,O., 2007. A generic model for supply-and-return network design, *Computers and Operations Research* 34 pp. 417-442

Liu, H., Wang, W., & Zhang, Q. (2012). Multi-objective location-routing problem of reverse logistics based on GRA with entropy weight. *Grey Systems: Theory and Application*, 2(2), 249-258.

Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S., & Barreto, S. (2013). A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), 795-822.

Lu, Z., Bostel,N. 2007 A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case for remanufacturing activities, *Comput Oper Res* 34 (2007), 299-323.

Madsen, O. (1983). Methods for solving combined two level location-routing problems of realistic dimensions. *European Journal of Operational Research*, 12, 295-301.

Manzour-al-Ajdad, S.M.H., Torabi, S. a. & Salhi, S., 2012. A hierarchical algorithm for the planar single-facility location routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(2), pp.461-470.

Maranzana, F.E.: On the location of supply points to minimise transport costs. *Operational Research Quarterly* 15, 261270, (1964)

Marín,A., Pelegrín, B.,1998.The return plant location problem: Modelling and resolution, *European Journal od Operations Research* 104 pp. 375-392

Melechovsky, J., Prins, C., Wolfler Calvo, R., 2005. A metaheuristic to solve a location-routing problem with non-linear costs. *Journal of Heuristics* 11, 375-391

Melo, T., Nickel, S. & Gama, F.S. Da, 2007. Facility Location and Supply Chain Management - A comprehensive review. *Berichte des Fraunhofer ITWM*, 130(130), pp.1-63.

Min, H., Jayaraman, V. & Srivastava, R., 1998. Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 108(1), pp.1-15.

Min, H., Ko, C.S. & Ko, H.J., 2006. The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), pp.309-320.

Minahan, T., 1998. Manufacturers take aim at the end of the supply chain. *Purchasing*, 124 (6), 111-112

Mittal VK, Sangwan KS. Assessment of hierarchy and inter-relationships of barriers to environmentally conscious manufacturing adoption. *World J Soc Technol Sustain Dev* 2013;10(4):297-307

Mollenkopf, D., Closs, D., Twede, D., Lee, S., Burgess, G., 2005. Assessing the viability of reusable packaging: a relative cost approach. *Journal of Business Logistics*, 26 (1), 169-19

Mudgal, S., Kong, M.A., Mitsios, A., Pahal, S., Lecerf, L., Acoleyen, M.V., Lambert, S., Fedrigo, Watkins, E., 2014. Ex-post evaluation of certain waste stream Directives. Final report. p.373.

Murphy, P.R. & Poist, R.F. (1989). Management of logistical relocations: an empirical analysis of literature suggestions. *Transportation research forum.*, pp. 177-184.

Nagy, G., & Salhi, S. (2006). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649-672.

Nambiar, J.M., Gelders, L.F., Van Wassenhove, L.N., 1989, Plant location and vehicle routing in the Malaysian rubber smallholder sector: a case study. *European Journal of Operational Research* 38, 14-26.

Nguyen, V.-P., Prins, C., & Prodhon, C. (2012a). Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 113-126.

Nguyen, V.-P., Prins, C., & Prodhon, C. (2012b). A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(1), 56-71. OECD (2008).

OECD environmental outlook to 2030. Retrieved from http://www.oecd-ilibrary.org/fr/environment/oecd-environmental-outlook-to-2030_9789264040519-en Accessed 10.02.15.

Oecd, 2008. Environmental Outlook to 2030. Dostupno sa <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/40200582.pdf>

Or, I., Pierskalla, W.P., 1979. A transportation location-allocation model for regional blood banking. *AIIE Transactions* 11, 86-94.

Owen, S.H. & Daskin, M.S., 1998. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3), pp.423-447.

Parlikad, A.K., McFarlane, D., Fleisch, E., Gross, S. (2003). The Role of Product Identity in End-of-Life Decision Making, White paper. Dostupno na http://cocoa.ethz.ch/downloads/2014/06/None_CAM-AUTOID-WH017.pdf

Perl, J., Daskin, M.S., 1984. A unified warehouse location-routing methodology. *Journal of Business Logistics* 5, 92-111

Perrin, D., & Barton, J. (2001). Issues associated with transforming household attitudes and opinions into materials recovery: A review of two kerbside recycling schemes. *Resources, Conservation and Recycling*, 33(1), 61-74. [http://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00075-1](http://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00075-1).

Pirkwieser, S., & Raidl, G. R. (2010). Variable neighborhood search coupled with ILP-based very large neighborhood searches for the (periodic) location-routing problem. In M. J. Blesa, C. Blum, G. Raidl, A. Roli, & M. Sampels (Eds.), Volume 6373 of *Lecture notes in computer science, Hybrid metaheuristics* (pp. 174-189). Springer.

Pokharel, S. & Mutha, A., 2009. Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), pp.175-182.

Prahinski, C. & Kocabasoglu, C., 2006. Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, 34(6), pp.519-532.

Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P., & Calvo, R. W. (2007). Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41, 470-483.

Prodhon, C. & Prins, C., 2014. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), pp.1-17.

Quesada, I., 2003. The Concept of Reverse Logistics. A Review of Literature. Annual Conference for Nordic Researchers in Logistics (NOFOMA 03), pp.1-15.

Rahim, F., & Sepil, C. (2014). A location-routing problem in glass recycling. *Annals of Operations Research*, 223(1), 329-353.

Realf, M. J., Ammons, J. C., & Newton, D. (2000). Strategic design of reverse production systems. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), 991-996.

Realf, M.J. , Ammons,J.C. ,Newton, D.J., 2004. Robust reverse production system design for carpet recycling, *IIE Trans* 36,pp. 767-776.

Realf,M.J. , Ammons, J.C., Newton,D.J., 1999. Carpet recycling: Determining the reverse production system design,*J Polym-Plast Technol Eng* 38, pp. 547-567.

REVLOG.Povratna logistika. www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/Introduction.htm, 2004.Pristupljeno 20.10.2010.

Rogers, D. & Tibben-Lembke, R., 1998. Going Backwards?: Reverse Logistics Trends i Practices Going Backwards?: Reverse Logistics Trends i Practices. p.2.

Rubio, S., Chamorro, A. & Miranda, F.J., 2008. Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005). *International Journal of Production Research*, 46(4), pp.1099-1120.

Rudi, N., Pyke, D.F., and Sporsheim, P.O., 2000. Product recovery at the Norwegian national insurance administration. *Interfaces*, 30 (3), 166-179

Sahyouni,K., Savaskan,R.C., Daskin, M.S., 2007. A facility location model for bidirectional flows, *Transportation Science* 41, 484-499.

Salema, M.I., Póvoa, a P.B. & Novais, a Q., 2006. A warehouse-based design model for reverse logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 57(6), pp.615-629.

Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., and Novais, A.Q. An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *Eur J OperRes* 179 (2007), 1063-1077.

Salhi, S. i Ri, G. K., "The effect of ignoring routes when locating depots", *European Journal of Operational Research* 39, 150-156 (1989).

Salhi, S., Fraser, M., 1996. An integrated heuristic approach for the combined location vehicle fleet mix problem. *Studies in Locational Analysis* 8, 3-21

Salhi, S., Nagy, G., 1999. Consistency and robustness in location- routing. *Studies in Locational Analysis* 13, 3-19.

Salhi, S., Nagy, G., 2009. Local improvement in planar facility location using vehicle routing *Annals of Operations Research* 167 (1), 287-296

Samanlioglu, F., 2013. A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), pp.332-340.

Sasikumar, P. & Kannan, G., 2008. Issues in reverse supply chains, part II: reverse distribution issues - an overview. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), pp.234-249.

Sasikumar, P. & Kannan, G., 2009. Issues in reverse supply chain, part III: classification i simple analysis. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2(1), pp.2-27.

Sasikumar, P., Kannan, G. & Haq, a. N., 2010. A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery-a case of truck tire remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), pp.1223-1234.

Schultmann, F., Engels, B., Rentz, O., 2003. Closed-loop supply chains for spent batteries, *Interfaces* 33 pp. 57-71.

Schwardt, M., & Fischer, K. (2009). Combined location-routing problems - A neural network approach. *Annals of Operations Research*, 167, 253-269

Schwengerer, M., Pirkwieser, S., & Raidl, G. R. (2012). A variable neighborhood search approach for the two-echelon location-routing problem. In J.-K. Hao, & M.

Middendorf (Eds.), Volume 7245 of Lecture notes in computer science, Evolutionary computation in combinatorial optimization (pp. 13-24). Springer.

Shear, H., Speh, T.W., Stock, J.R., 2003. The warehousing link of reverse logistics. In: Presented at the 26th Annual Warehousing Education i Research Council Conference, San Francisco, CA.

Sheriff, K.M.M., Nachiappan, S. & Min, H., 2014. Combined location i routing problems for designing the quality-dependent i multi-product reverse logistics network. Journal of the Operational Research Society, 65(6), pp.873-887.

Shih, L.-H., 2001. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances i computers in Taiwan. Resources, Conservation i Recycling, 32(1), pp.55-72.

Sim,E., Jung,S., Kim,H., Park,J.,2004. A generic network design for a closed-loop supply chain using genetic algorithm, Lecture Notes in Comput Sci 3103. pp.1214-1225.

Speirs,D., Tucker, P.,2001. A profile of recyclers making special trips to recycle Journal of Environmental Management, 62 (2), pp. 201-220

Srivastava, R., Benton, W.C., 1990. The location-routing problem: Considerations in physical distribution system design. Computers in Operations Research 17, 427-435.

Stock J.R., Reverse Logistics, Council of Logistics Management, Oak Brook, IL. 1992.

Stock, J., Speh, T., Shear, H.2002. Many Happy (Product) Returns, Harward bussines reiew

Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., & Mazloomi, Z. (2010). A new integrated mathematical model for a bi-objective multi-depot location-routing problem solved by a multi-objective scatter search algorithm. Journal of Manufacturing Systems, 29, 111-119.

Thierry, M., Salomon, M., Nunnen, J., Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in Product Recovery Management. California Management review. 37, pp. 114-135.

Tibben-Lembke, R.S., Rogers, D.S. 2002. Differences Between Forward and Reverse Logistics in a Retail Environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5)pp.271-282

Toyoglu, H., Karasan, O. E., & Kara, B. Y. (2012). A new formulation approach for location-routing problems. *Networks and Spatial Economics*, 12(4), 635-659.

Tuzun, D. & Burke, L.I., 1999. A two-phase tabu search approach to the location routing problem. *European Journal of Operational Research*, 116(1), pp.87-99.

UK Department for Transport, 2004. The Efficiency of Reverse Logistics Executive Report, The Chartered Institute of Logistics and Transport (UK), Logistics and Transport Centre, dostupno na <http://www.som.cranfield.ac.uk/som/dinamic-content/media/documents/reverselogexec.pdf>

Uredba o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada za period od 2010. do 2014. Godine. Dostupno na [http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2009Novembar/uredba_o_planu_smanjenja_ambalaznog_otpadan\[1\].pdf](http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2009Novembar/uredba_o_planu_smanjenja_ambalaznog_otpadan[1].pdf)

Üster, H., Easwaran, G., Akçalı, E., Çetinkaya, S., 2007. Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multiproduct closed-loop supply chain network design model, *Naval Research Logistics* 54, pp.890-907.

Vaughn, J., 2014. The circular economy. pp.1-29. Dostupno na http://adsoftheworld.com/sites/default/files/jwt_the_circular_economy.pdf

Wang I.L., Yang, W.C. 2007. Fast heuristics for designing integrated e-waste reverse logistics networks, *IEEE Trans Electronics Packaging Manufact* 30, 147-154.

Wang, C.H., Even, J.C., Adams, S.K. 1995. A mixed-integer linear model for optimal processing and transport of secondary materials, *Resources, Conservation Recycling* 15 65-78

Wang, Z.W.Z. & Bai, H.B.H., 2010. Reverse logistics network: A review. *Industrial Engineering i Engineering Management (IEEM)*, 2010 IEEE International Conference on, pp.1139-1143.

Wang,C.H., Even, J.C., Adams,S.K., 1995. A mixed-integer linear model for optimal processing and transport of secondary materials, *Resources, Conservation Recycling* 15, pp.65-78.

Watson-Gandy, C.D.T., Dohrn, P.J., 1973. Depot location with van salesmen - a practical approach. *Omega* 1, 321-329.

World Bank (2012). What a waste: A global review of solid waste management. Washington, DC 20433, USA: Urban Development & Local Government Unit World Bank Retrieved from: http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf Accessed 05.02.15.

Wu, T.-H., Low, C. & Wei-Bai, J., 2002. Heuristic solutions to multi-depot location routing problems. *Computers i Operations Research*, 29(February 2001), pp.1393-1415.

Wu, T.-H., Low, C., & Wei-Bai, J. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location routing problems. *Computers and Operations Research*, 29, 1393-1415.

Yang, H. & Wang, C., 2007. Integrated framework for reverse logistics. *New Trends in Applied Artificial Intelligence*, pp.501-510.

Yu, V. F., Lin, S. W., Lee, W., & Ting, C. J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 58(2), 288-299.

Zhao, J. & Verter, V., 2015. A bi-objective model for the used oil location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 62, pp.157-168.

Zhao, J., & Verter, V. (2015). A bi-objective model for the used oil location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 62, 157-168

Zhou, Y. & Wang, S., 2008. Generic Model of Reverse Logistics Network Design. *Journal of Transportation Systems Engineering i Information Technology*, 8(3), pp.71-78.

Internet reference

http://europa.eu/youreurope/citizens/shopping/shopping-abroad/returning-unwanted-goods/index_en.htm

<http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/waste#tab-related-publications>

<http://www.eurometrec.org/html/waste-laws.php>

(http://www.logisticsmgmt.com/wp_content/purolator_wp_content_091213.pdf.)

[http://cerasis.com/2015/07/08/reverse-logistics/\)](http://cerasis.com/2015/07/08/reverse-logistics/)

http://www.arasche.com/page7/assets/Rasche_SfE_October2009.pdf

<http://www.slideshare.net/ECO-invest/stiglitz-christian-packaging-waste-management-following-the-extended-producer-responsibility-epr-principle-1995-2012-in-europe-and-the-austrian-experience>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trash_Recycling_with_Disposal_Containers.jpg

<http://www.leegov.com/solidwaste/residential/curbside>

<http://cuckoostuff.blogspot.rs/2012/01/vending-machine-for-cash.html>

[http://www.nyctransitforums.com/forums/topic/36078-the-official-reverse-vending-machine-thread/page-2\)](http://www.nyctransitforums.com/forums/topic/36078-the-official-reverse-vending-machine-thread/page-2)

BIOGRAFIJA AUTORA

Branislava Ratković je rođena 12.11.1979. u Sremskoj Mitrovici, gde je sa odličnim uspehom završila osnovnu školu i gimnaziju. Saobraćajni fakultet, Odsek za logistiku, upisala je školske 1999/2000. godine i diplomirala 2006. sa prosečnom ocenom u toku studija 8,49 i ocenom 10 na diplomskom radu (Tema diplomskog rada «Problemi elektronskog i električnog otpada i zahtevi prema logističkom sistemu»). Nakon diplomiranja upisala je magistarske, a potom 2008/2009. godine prešla na doktorske studije na Saobraćajnom fakultetu. Na doktorskim studijama položila je sve ispite predviđene nastavnim planom i programom, sa prosečnom ocenom 10 (deset). U zvanje saradnika u nastavi na Saobraćajnom fakultetu, za užu naučnu oblast „Rukovanje materijalom i eko logistika“, izabrana je 01. aprila 2007. godine, a u zvanje asistenta na Saobraćajnom fakultetu, za užu naučnu oblast „Rukovanje materijalom i eko logistika“, izabrana je 15. novembra 2009. godine. Na Saobraćajnom fakultetu je angažovana u obavljanju nastavnih aktivnosti iz više predmeta: *Roba u logističkim procesima*, *Osnovi mehanizacije pretovara*, *Mehanizacija pretovara i Logistika povratnih tokova*. Na diplomskim akademskim (master) studijama angažovana je na predmetu *Posebne oblasti logistike povratnih tokova* i *Modeliranje lanaca snabdevanja*.

U toku dosadašnjeg rada, Branislava Ratković je učestvovala kao autor i koautor u izradi preko 40 naučno-istraživačkih radova objavljenih u međunarodnim i domaćim časopisima i zbornicima radova sa međunarodnih i domaćih konferencija. Pored toga, učestvovala je i kao član autorskog tima u izradi 9 naučno-istraživačkih i stručnih studija i projekata.

PRILOZI

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Бранислава Ратковић

број уписа D-II-06/08

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Модели за решавање проблема лоцирања ресурса у системима повратне логистике

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 17.08.2016



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора	Бранислава Ратковић
Број уписа	D-II-06/08
Студијски програм	Саобраћај
Наслов рада	Модели за решавање проблема лоцирања ресурса у системима повратне логистике
Ментор	др Милорад Видовић, редовни професор, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Потписани 

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 15.03.2016.

Потпис докторанда



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Модел за решавање проблема лоцирања ресурса у системима повратне логистике

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 15.03.2016.



1. Ауторство Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство делити под истим условима. Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.