

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**  
**ФАКУЛТЕТ ОРГАНИЗАЦИОНИХ НАУКА**

**Јасенка Д. Ђикановић**

**ИНТЕГРИСАНИ МОДЕЛ ЛОГИСТИКЕ СНАБДЕВАЊА И ПОВРАТНЕ  
ЛОГИСТИКЕ ЗАСНОВАН НА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОМ ОДЛУЧИВАЊУ**

**-докторска дисертација-**

**Београд, 2015.**

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF ORGANISATIONAL SCIENCES**

**Jasenka D. Djikanovic**

**INTEGRATED FORWARD AND REVERSE LOGISTIC MODEL BASED ON  
MULTI-CRITERIA DECISION MAKING**

**- Doctorial Dissertation -**

**Belgrade, 2015.**

Докторска дисертација је рађена на Факултету организационих наука, на студијском програму Информациони системи и менаџмент; изборно подручје Менаџмент. Приликом дефинисања теме, садржаја и наслова, као и током израде докторске дисертације консултован је **проф. др Мирко Вујошевић**.

Комисија за преглед, оцену и одбрану дисертације на докторским студијама:

Ментор:

1. др Мирко Вујошевић, ред. проф. Факултета организационих наука, Универзитета у Београду

Чланови комисије:

2. др Драган Васиљевић, ред. проф. Факултета организационих наука, Универзитета у Београду
3. др Милан Станојевић, ред. проф. Факултета организационих наука, Универзитета у Београду
4. др Драгана Макајић Николић, доцент Факултета организационих наука, Универзитета у Београду
5. др Милорад Видовић, ред. проф. Саобраћајног факултета, Универзитета у Београду

## **Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике заснован на вишекритеријумском одлучивању**

### **Резиме:**

Ефикасна логистичка мрежа води и ка конкурентској предности предузећа и помаже предузећима да се суоче са све већим и строжим регулативама у области заштите животне средине и неизвесностима у пословању. Конфигурација логистичке мреже (нпр. дефинисање локација, капацитета и технологија објеката) је један од најважнијих стратешких проблема у менаџменту ланцима снабдевања и њен утицај на укупне резултате ланца снабдевања је изузетно велик.

Посебна пажња у дисертацији је посвећена интегрисаним моделима логистике снабдевања и повратне логистике. Интегрисани модели логистике снабдевања и повратне логистике, познати су и као затворене петље ланаца набавке, а дефинишу се као мреже које укључују традиционалне канале, односно традиционалне логистичке активности и токове заједно са повратним каналима. Један од основних разлога развоја интегрисане мреже логистике снабдевања и повратне логистике је смањење трошкова који настају у целокупном ланцу снабдевања, повећање профита, али и оставарење специфичних циљева који се у виду законских уредаба и регулатива постављају пред предузећа, а односе се на повећану бригу о заштити животне средине. Основна претпоставка дисертације је да се методе из области операционих истраживања које се заснивају на математичким моделима разматраних појава и процеса, могу ефикасно применити у циљу доношења одлука у логистичком систему који истовремено обухвата процес снабдевања и процес повраћаја средстава.

Предмет истраживања у овој докторској дисертацији је повратна логистика, као и интегрисани модели логистике снабдевања и повратне логистике. Повратна логистика обухвата логистичке активности кроз целокупни ток производа од тренутка када престане потреба корисника за тим производом до његовог поновног коришћења на тржишту или коначног одлагања. Пре свега, повратна логистика

укључује физички транспорт коришћених производа од крајњег корисника до произвођача, односно планирање свих аспеката дистрибуције. У овој дисертацији ће се развити и решити такви модели локација и рутирања који ће омогућити да се производи и материјали које је потребно допремити до снабдевача/произвођача до крајњег корисника, као и производи које је потребно вратити од корисника ка произвођачу, односно ка његовом складишту, врате најкраћим путем и са најмањим трошковима.

Циљ истраживања је допринос развоју интегрисаног модела логистике снабдевања и повратне логистике. Проблем који треба решити јесте одређивање мреже интегрисане логистике како би се сјединиле мреже логистике снабдевања и повратне логистике, и тиме дао допринос повећењу ефикасности и ефективности целокупног ланца снабдевања.

У овој дисертацији представљено је пет модела који описују проблеме избора локација и рута у интегрисаним моделима логистике снабдевања и повратне логистике. Модели су решени коришћењем метода вишекритеријумске анализе и хеуристичких метода. Један од представљених модела избора локације решен је коришћењем фази *AHP* методе. Четири *NP* тврдих проблема решено је коришћењем хеуристичких метода. За математичке моделе са једном и више функција циља развијене су хеуристике засноване на методи променљивих околина (енгл. *Variable neighbourhood search – VNS*). За сваки од четири модела који су решени методом променљивих околина развијена су по два алгорита.

У свим моделима је за локално претраживање коришћена метода променљивог спуста (енгл. *Variable neighbourhood descend – VND*) и примењен је исти алгоритам за све моделе.

Проблеми мањих димензија су решени до оптималности и резултати добијени коришћењем хеуристика упоређени су са оптималним решењима. Оптимално решење је представљено ради процене и потврде решења добијених коришћењем хеуристика.

Резултати спроведеног истраживања показују да развијене хеуристике дају решења блиска оптималним, и да је време извршавања коришћењем хеуристика знатно краће. Очекивани резултати треба да користе истраживачима из области које се баве логистичким принципима и логистиком као науком, али и практичарима који доносе логистичке одлуке у производним предузећима.

**Кључне речи:** логистика, снабдевање, повратна логистика, интегрисани модел, вишекритеријумско одлучивање, локацијски проблем, проблем рутирања, управљање транспортом, управљање ланцем снабдевања.

## **Integrated forward and reverse logistic model based on multi-criteria decision making**

### **Abstract**

Adequate design of logistics network provides an appropriate platform for efficient and effective supply chain management. Efficient logistics network also leads to a competitive advantage of a company and help them to cope with the growing and stricter regulations in the field of environmental protection and the uncertainties of the business. Logistics network configurations (e.g. definition of location, facilities and technology facilities) is one of the most important strategic issues in supply chain management and its impact on the overall performance of the supply chain is extremely high.

The research subject presented in this paper are integrated models of forward and reverse logistics supply. Integrated models of logistics and reverse logistics supply, are also known as closed-loop supply chains, and they are defined as networks that include traditional channels and traditional logistics activities and flows along with the return channel. One of the main reasons for the development of an integrated network of logistics and supply reverse logistics are cost reduction produced in the entire supply chain, increase profits, and achievement of specific goals regarding legal statutes and regulations that are businesses facing and which are related to the heightened concern about environment. The basic premise of this paper is that methods from the field of operations research based on mathematical models of the considered phenomena and processes, can be efficiently used to make decisions in a logistics system that also includes the processes of supply and reverse processes.

The aim of the research is to contribute to the development of an integrated model of supply logistics and reverse logistics. The problem to be solved is the determination of integrated logistics network in order to unite the network of logistics and reverse logistics

supply, and thereby contribute by increasing the efficiency and effectiveness of the entire supply chain.

In this dissertation, we presented five models that describe the problems selection of locations and routes in integrated logistics models of supply and reverse logistics. The problems are solved with multi-criteria analysis and heuristic methods. One of the presented models of the selection of location is solved using fuzzy *AHP* method. Four NP hard problems were solved using heuristic methods. For mathematical models with one or more objective functions were developed heuristics based on Variable neighborhood search (*VNS*) method. For each of the four models that are solved using *VNS* two algorithms.

For local search Variable neighborhood descend (*VND*) is used for all models and the same algorithm is used for all four models.

Problems with a small number of nodes are solved to the optimality and the results obtained with heuristics are compared with the optimal solutions. Optimal solutions are presented to assess and verify solutions obtained by heuristics.

Results of the research show that the developed heuristics provide solutions close to optimal, and that the execution time using heuristics is significantly shorter. The expected results should be used by researchers in the field dealing with the principles of logistics and logistics as a science, but also by practitioners who make logistical decisions in production companies.

**Keywords:** logistics, supply, reverse logistics, integrated model, multiple criteria decision making, problem location, routing problem, transportation management, supply chain management



## САДРЖАЈ

САДРЖАЈ.....	9
1 УВОД.....	15
1.1 Дефинисање проблема истраживања.....	19
1.2 Циљеви истраживања.....	22
1.3 Полазне хипотезе истраживања.....	23
1.4 Научне методе истраживања.....	24
1.5 Очекивани научни и стручни допринос истраживања.....	25
2 ЛАНЦИ СНАБДЕВАЊА.....	27
2.1 Дефинисање концепта ланца снабдевања.....	27
2.2 Логистички систем и његови елементи.....	30
2.2.1 Логистика збрињавања отпада и амбалаже у оквиру предмета логистике	32
2.3 Повратна логистика.....	34
2.3.1 Подручје истраживања повратне логистике.....	37
2.3.2 Системи повратне логистике.....	38
2.3.3 Чиниоци повратне логистике.....	39
2.3.4 Најчешћи проблеми повратне логистике.....	42
2.4 Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике.....	44
3 ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	46
3.1 Преглед литературе из области проучавања модела повратне логистике.....	46
3.2 Преглед литературе из области <i>LRP</i> модела у затвореном ланцу снабдевања	49
3.3 Преглед литературе из области проблема рутирања возила у затвореном ланцу снабдевања.....	51
3.4 Коришћење методе променљивих околина у затвореним ланцима снабдевања.....	52
4 УПОРЕДНИ ПРИКАЗ УПРАВЉАЊА ОТПАДОМ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ И ЕВРОПСКОЈ УНИЈИ.....	57

4.1	Управљање отпадом у Републици Србији.....	57
4.1.1	Посебни токови отпада .....	60
4.1.2	Управљање посебним токовима отпада .....	61
4.2	Законодавна решења управљања отпадом у Европској унији .....	62
4.3	Разлике у управљању отпадом од електронске и електричне опреме у Републици Србији у Европској унији.....	64
5	РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ИЗБОРА ЛОКАЦИЈЕ ПРИМЕНОМ ФАЗИ АНР	
	МЕТОДЕ – МОД. <i>ФАЗИ АНР 1</i> .....	66
5.1	<i>АНР</i> метода.....	67
5.2	Фази скуп и фази број.....	68
5.3	Фази <i>АНР</i> метода .....	68
5.4	Примена фази <i>АНР</i> методе на студији случаја - МОД. <i>ФАЗИ АНР1</i> .....	71
5.5	Критеријуми одлучивања за МОД. <i>ФАЗИ АНР1</i> .....	72
5.6	Резултати <i>АНР</i> анализе и дискусија за МОД. <i>ФАЗИ АНР1</i> .....	75
6	ХЕУРИСТИЧКИ ПРИСТУП РЕШАВАЊУ ПРОБЛЕМА ЛОКАЦИЈЕ И	
	РУТИРАЊА ВОЗИЛА .....	80
6.1.1	Дефинисање околине решења и појам растојања између двеју тачака... 87	
6.2	Метода променљивих околина.....	88
6.2.1	Метода променљивог спуста.....	92
6.3	Основе планирања пута и возила .....	93
6.4	Проблеми рутирања возила – <i>VRP</i> .....	94
6.5	Проблеми локација и рутирања - <i>LRP</i> .....	95
6.6	<i>LRP</i> у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике .. 97	
6.6.1	Развој модела – <i>LRP MOD 1</i> .....	99
6.6.1.1	Методологија вишециљног програмирања са применом <i>VNS</i> и методе променљивих околина .....	105
6.7	Примена хеуристике на решавање проблема <i>LRP MOD 1</i> .....	107
6.7.1	Формирање редоследа производа .....	107
6.7.2	Претраживање локација и рута – алгоритам <i>VNS2</i> .....	112
6.7.2.1	Размрдавање .....	113
6.7.2.2	Локално претраживање – <i>VND</i> метода.....	114

6.7.3	Резултати за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	116
6.7.4	Анализа осетљивости за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	122
6.8	Метода променљивих околина за <i>LRP</i> са једном функцијом циља.....	125
6.8.1	Развој модела <i>LRP_MOD_2</i> .....	125
6.8.2	Формирање редоследа производа .....	127
6.8.3	Резултати за модел <i>LRP_MOD_2</i> .....	129
6.8.4	Анализа осетљивости за модел <i>LRP_MOD_2</i> .....	130
6.9	Модел са две функције циља за <i>LRP</i> са минимизацијом количине производа које нису враћене у повратни ток.....	133
6.9.1	Развој модела <i>LRP_MOD_3</i> .....	133
6.9.2	Резултати за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	136
6.9.3	Анализа осетљивости за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	139
6.10	Упоредни приказ резултата добијених применом различитих модела .....	141
6.11	<i>VNS</i> за <i>VRP</i> у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике .....	143
6.11.1	Развој модела <i>VRP_MOD_1</i> .....	145
6.11.2	Претраживање рута возила применом <i>VNS</i> алгоритма.....	152
6.11.3	Формирање редоследа корисничких центара .....	153
6.11.4	Претраживање руте возила за сваки кориснички центар појединачно ( <i>VNS2</i> алгоритам) .....	158
6.11.4.1	Размрдавање.....	159
6.11.4.2	Локално претраживање – <i>VND</i> метода .....	160
6.11.5	Резултати за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	161
7	ЗАКЉУЧАК.....	168
	Литература: .....	174
	Биографија.....	201

## Листа слика и табела

### Слике

Слика 2.1. Утицаји окружења на повратну логистику (Станивуковић, 2003).....	37
Слика 4.1. Количине електричних и електронских производа стављених на тржиште у периоду од 2010-2012 [146].....	62
Слика 5.1. Број производа у периоду 2010 – 2012.....	67
Слика 5.2. АНП хијерархија за МОД. _ФАЗИ_АНП1.....	73
Слика 6.1. Затворени ланац логистичке мреже за моделе <i>LRP_MOD_1-3</i> .....	99
Слика 6.2. Пример прве структуре суседства за моделе <i>LRP_MOD_1-3</i> .....	111
Слика 6.3. Пример осталих структура суседства за моделе <i>LRP_MOD_1-3</i> .....	112
Слика 6.4. Пример структуре суседства за фазу размрдавања за моделе <i>LRP_MOD_1-3</i> .....	114
Слика 6.5. Пример структуре суседства за локално претраживање за моделе <i>LRP_MOD_1-3</i> .....	115
Слика 6.6. Руте и број возила на свакој рути за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	118
Слика 6.7. Ниво задовољења потреба корисника у односу на профит за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	121
Слика 6.8. Коришћење нееколошких материјала и технологија у односу на профит за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	121
Слика 6.9. Локације, руте и број возила на свакој рути за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	138
Слика 6.10. Парето крива за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	139
Слика 6.11. Кретање возила за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	144
Слика 6.12. Пример структуре суседства за модел <i>VRP_MOD_1</i> за <i>VNS1.1</i> .....	155
Слика 6.13. Пример структуре суседства за модел <i>VRP_MOD_1</i> за <i>VNS1.2</i> .....	156
Слика 6.14. Пример $N^{hmax}$ структура суседства за модел <i>VRP_MOD_1</i> за <i>VNS1.3</i> и <i>VNS1.4</i> .....	157

Слика 6.15. Пример структуре суседства у фази размрдавања за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	159
Слика 6.16. Пример структуре суседства за локално претраживање за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	160
Слика 6.17. Руте возила и број возила на свакој рути за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	164

## Табеле

Табела 2.1. Разлика између концепата логистике снабдевања и повратне логистике	45
Табела 3.1. Класификација радова из области повратне логистике .....	47
Табела 3.2. Класификација радова из области повратне логистике по научним часописима .....	48
Табела 3.3. Класификација радова из области проблема локације и рутирања у <i>IFRL</i> .....	54
Табела 3.4. Класификација радова из области проблема рутирања возила у <i>IFRL</i> ...	55
Табела 5.1. Оригинална и фази Saaty скала.....	69
Табела 5.2. Матрице поређења по паровима за <i>МОД. _ФАЗИ_АНП1</i> .....	76
Табела 5.3. Фази тежине ( $W_i$ ), дефазификоване вредности ( $M_i$ ) и нормализоване вредности ( $N_i$ ) за <i>МОД. _ФАЗИ_АНП1</i> .....	78
Табела 5.4. Ранг алтернатива за <i>МОД. _ФАЗИ_АНП1</i> .....	79
Табела 6.1. Класификација хеуристичких метода 1 .....	84
Табела 6.2. Класификација хеуристичких метода 2 .....	84
Табела 6.3. Приступы решавању <i>LRP</i> .....	87
Табела 6.4. Параметри за мале и велике тест проблеме за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	116
Табела 6.5. Оптимална решења је тест примере са малим бројем чворова за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	117
Табела 6.6. <i>VNS</i> хеуристика за тест примере са малим бројем чворова за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	118
Табела 6.7. <i>VNS</i> хеуристика за већи број чворова (80-400 корисничких центара) за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	119

Табела 6.8. VNS хеуристика за већи број чворова (500 корисничких центара) за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	120
Табела 6.9. Анализа осетљивости за различите вредности $u$ и $r$ за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	123
Табела 6.10. Анализа осетљивости за различите вредности тражње за модел <i>LRP_MOD_1</i> .....	124
Табела 6.11. Параметри за тест проблеме за модел <i>LRP_MOD_2</i> .....	130
Табела 6.12. Резултати VNS хеуристике за модел <i>LRP_MOD_2</i> .....	130
Табела 6.13. Анализа осетљивости за различите вредности $u$ и $r$ за модел <i>LRP_MOD_2</i> .....	131
Табела 6.14. Анализа осетљивости за различите вредности тражње за модел <i>LRP_MOD_2</i> .....	132
Табела 6.15. Оптимална решења је тест примере са малим бројем чворова за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	136
Табела 6.16. VNS хеуристика за тест примере са малим бројем чворова за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	137
Табела 6.17. VNS хеуристика за тест примере са већим бројем чворова (60-500 корисничких центара) за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	138
Табела 6.18. Анализа осетљивости за различите вредности $u$ и $r$ за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	140
Табела 6.19. Анализа осетљивости за различите вредности тражње за модел <i>LRP_MOD_3</i> .....	141
Табела 6.20. Оптимално решење за мали број чворова за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	162
Табела 6.21. Хеуристике 1.1 и 1.2 за мали број чворова за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	162
Табела 6.22. Хеуристике 1.3 и 1.4 за мали број чворова за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	162
Табела 6.23. Улазни подаци за пример са три корисничка центра за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	163
Табела 6.24. Испоручене количине за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	163
Табела 6.25. Резултати хеуристика 1.1 – 1.2 за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	165
Табела 6.26. Резултати хеуристика 1.3 – 1.4 за модел <i>VRP_MOD_1</i> .....	165

## 1 УВОД

Повратна логистика је појам који, заједно са појмовима рециклаже и управљања токовима отпада чини једну од најзначајнијих еколошких тема. Логистичка функција пружа подршку у управљању робним токовима, кретању материјала и финалних производа од набавке сировина, складиштења, прераде и дистрибуције готових производа до крајњег корисника (Vlajić и остали, 2009), а у новије време, ова дефиниција може се проширити и пружањем подршке управљању кретањем готових производа назад ка произвођачу, након завршетка њиховог животног циклуса.

У савременим условима пословања, које карактеришу ограничени ресурси и лимитирани капацитети објеката за одлагање отпада, поправка и поновно коришћење већ употребљених производа и материјала су кључни за обезбеђење подршке растућој популацији и повећању нивоа конзумације и коришћења производа. Могућности поновног коришћења употребљених производа и материјала обезбеђују нови ток материјала од корисника ка произвођачу, а затим, након поправке, и ток од произвођача ка кориснику. Управљање производима и материјалима у смеру супротном од смера кретања материјала и производа у традиционалном ланцу снабдевања представља област проучавања која се назива повратном логистиком (Fleischmann, 2000).

Како током последњих неколико година проблеми заштите животне средине добијају све више на значају, и притисак на предузећа да предузимају активности рециклаже и поновног коришћења производа све више јача. Повећање активности које се односе на рециклажу и повраћај производа условљени су законским регулативама, али и потребама корисника. Као резултат, јавља се велика количина материјала и производа који су враћени са тржишта из одређеног разлога. Ово узрокује већи број проблема у пословању и доношење потпуно нових одлука са којима се менаџери до сада нису сусретали. Ова врста проблема је у литератури операционих истраживања

позната као локацијски проблем. То значи да треба одредити локације објеката логистике узимајући у обзир постојећу мрежу саобраћајница. Из тог разлога, развијају се интегрисани ланци снабдевања у којима се кретање материјала и производа одвија у затвореном току.

Мрежа повратне логистике, управљање оваквом мрежом и њен дизајн су сложенији од мреже класичне логистике. Постоје два главна разлога за то:

- Узајамни утицај две врсте токова и могућих координација и интеграција, као и ограничења између токова од произвођача ка купцу и токова повратне логистике – од купца ка произвођачу
- Постојање бројних неизвесности повезаних са повратним токовима, као што су квалитет враћених производа, квантитет и време потребно за њихову поправку.

С обзиром на значајност теме и на велики број објављених радова и извршених истраживања у овој области, развио се и велики број приступа решавању проблема повратне логистике, а у новије време нарочит је акценат на развој адекватних интегрисаних математичких модела. Имајући у виду комплексност савременог пословања, као и да, у складу са тим, и пословне одлуке зависе од већег броја утицајних фактора, потребно је развити такав математички модел који ће у обзир узети и до сада развијене принципе вишекритеријумског одлучивања.

Дисертација је организована на следећи начин: дефинисање основних појмова који су предмет истраживања дат је у другом поглављу. У трећем поглављу дат је преглед стања у области истраживања на основу увида у отворену литературу. Четврто поглавље даје осврт на законску регулативу, а посебно у делу који се односи на управљање посебним токовима отпада. У петом поглављу дата је формулација и студија случаја вишеатрибутивног модела избор локација у ланцу повратне логистике применом методе аналитичко – хијерархијских процеса (енгл. *Analytic*



*Hierarchy Process*) коју ћемо скраћено писати „АНР“. У шестом поглављу формулисани су интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике. У оквиру овог поглавља представљена су четири модела. У последњем, седмом поглављу дата су закључна разматрања и предложени су правци даљег истраживања.

Детаљнији садржај наведених поглавља је следећи. У другом поглављу дефинисани су основни појмови. Повратна логистике је појам који се у оквиру ове дисертације детаљно разматра, те је и указано на чиниоце повратне логистике, као и на проблеме који се јављају у дизајну мреже и дефинисању ланца повратне логистике. Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике је појам чијем је дефинисању посвећена додатна пажња, а посебно имајући у виду да је развој ове области у повоју, те да у постојећој литератури овај појам није детаљно обрађен. У оквиру логистике, као научне дисциплине посебно се разматра и појам збрињавања отпада и амбалаже.

У трећем поглављу представљен је преглед великог броја расположивих тема из области проблема локације и рутирања возила (енгл. *Location routing problems – LRP*), проблема рутирања возила (енгл. *Vehicle routing problems – VRP*) и проблема повратне логистике, за које је процењено да су у вези са предметом дисертације. У даљем тексту користиће се скраћенице наведене у заградама. Проблеми избора локације и проблеми рутирања возила су, најпре, разматрани одвојено. Локацијски проблеми представљају стратешке, а проблеми рутирања тактичке проблеме. Руте представљају тактички проблем, јер су потребе и могућности за њиховим свакодневним мењањем потпуно оправдане и применљиве, док се, наравно, проблеми одређивања локација, решавају једном и њихова решења треба да буду применљива и да дају резултате у дужем временском периоду. Развојем информационих технологија омогућено је да се ове две врсте проблема интегришу и заједнички посматрају.

Прикупљена литература је организована у четири одвојене целине:

- преглед литературе из области проучавања модела повратне логистике
- преглед литературе из области проблема локација и рутирања у затвореном ланцу снабдевања
- преглед литературе из области проблема рутирања возила у затвореном ланцу снабдевања
- коришћење Методе променљивих околина у затвореним ланцима снабдевања.

Такође, извршена је и подела радова по месту објављивања (часописи, међународне конференције, поглавља у књигама, студије и тезе). Табела расподеле радова по часописима обухвата радове који су објављени до 2014. године.

У четвртом поглављу дат је сажет приказ законских основа управљања отпадом и Републици Србији, као и приказ законодавних решења из ове области у Европској унији. Такође, у овом поглављу је указано и на проблеме третирања отпада у Србији, а посебно електронског и електричног отпада чији утицај имају изразитно негативан утицај на животну средину.

Пето поглавље посвећено је развоју модела избора локације применом *AHP* методе. За проблем избора локација у повратном логистичком току, приложена је нумеричка студија случаја. Циљ нумеричке студије је да покаже применљивост приказаног модела. У докторској дисертацији су коришћени софтверски пакети *MatLab* и *GLPK*.

Шесто поглавље посвећено је моделирању интегрисане мреже логистике снабдевања и повратне логистике. У овом поглављу приказана су четири модела. Три модела представљају *LRP* проблеме, а последњи модел је проблем у коме је решен само проблем рутирања возила – *VRP* модел. Два, од укупно три представљена проблема избора локација и рутирања су вишециљни модели, док је у једном моделу разматрана само једна функција циља. Функције циља које су разматране у моделу са

три функције циља односе се на профит, ниво задовољења потреба корисника и еколошки утицај коришћења различитих материјала и технологија. Стабилност развијених модела тестирана је спровођењем анализа осетљивости три параметра: тражња корисничког центра, очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника и очекивани проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање.

### **1.1 Дефинисање проблема истраживања**

Повратна логистика се односи на све логистичке активности везане за сакупљање, растављање и обраду коришћених производа, делова производа и/или материјала у циљу осигуравања одрживе (еколошки прихватљиве) обнове. Два основна разлога за брзи развој повратне логистике су глобализација тржишта и политика у односу на заштиту животне средине. Осим еколошког аспекта, активности повраћаја производа су и економски мотивисане. Међутим, еколошки и економски проблеми у оквиру активности повратне логистике се често преплићу. Из тог разлога, предузећа теже да комбинују еколошке и економске предности како би се пословне активности у ланцу снабдевања одвијале несметано и са најмањим трошковима.

Повратна логистика се бави следећим питањима:

- Које су алтернативе за опоравак производа, делова производа и материјала?
- Ко би требало да извршава спектар операција везаних за обнављање?
- Како би ове операције требало извршавати?
- Да ли је могуће да се активности типичне за повратну логистику интегришу у продукционе и дистрибутивне системе?
- Који су трошкови, а које су користи повратне логистике, гледано како из економског, тако и из еколошког угла?

Основни разлози због којих се повратној логистици посвећује све већа пажња су:

- Закони везани за животну средину који приморавају предузећа да примају назад своје производе и да се старају о даљем поступању са њима
- Економска корист од коришћења враћених производа у производном процесу уместо измиривања великих трошкова депоновања
- Растућа свест корисника о животној средини

Предмет овог истраживања је развој математичких модела интегрисане логистике снабдевања и повратне логистике који су засновани на проблемима локација и рутирања. Дакле, у раду ће се развити и решити такви модели локација и рутирања који ће омогућити да се производи и материјали које је потребно допремити до снабдевача/произвођача до крајњег корисника, као и производи које је потребно вратити од корисника ка произвођачу, односно ка његовом складишту, врате најкраћим путем и са најмањим трошковима.

Модели који ће бити представљени састоје се од три нивоа у току од произвађача ка кориснику:

- Произвођач
- Дистрибутивни центар
- Кориснички центар

У повратном току, производи се враћају из корисничког центра у депо у коме се производи разврставају на оне који се могу поправити и на оне који се не могу поправити, те се у зависности од ове класификације они враћају код произвођача и поново улазе у производни ток, или се отпремају у депо за одстрањивање.

У оквиру дисертације разматраће се различити вишециљни модели. Најпре, ће се развити и решити проблем избора локације у повратном ланцу логистике применом фази *AHP* методе.

Циљеви који ће бити разматрани у следећем моделу су следећи:

- Максимизирати профит у интегрисаном ланцу
- Оптимизовати ниво задовољења потреба корисника (енгл. *service level*).
- Минимизирати коришћење материјала и технологија који су штетни за околину

Након тога, разматраће се модел који има две функције циља:

- Профит у интегрисаном ланцу који треба максимизирати
- Количина производа који се не враћају у поновни ток производње коју треба минимизирати

Осим наведених модела, разматраће се и модел који има само једну функцију циља (максимизација профита), како би се сагледало како функције циља које је односе на процесе специфичне за повратни ток, утичу на смањење профита. У последњем делу рада, презентован је модел рутирања возила, при чему мрежа ланца снабдевања, за разлику од претходно наведена три модела, укључује и добављаче. Сви модели који ће бити разматрани у раду имају унапред дефинисане капацитете (енгл. *Capacitated LRP*).

Циљ дефинисања мреже интегрисане логистике је да сједини мреже логистике снабдевања и повратне логистике како би се повећала ефикасност и ефективност целокупног ланца снабдевања.

Предности примене интегрисаног модела логистике снабдевања и повратне логистике огледају се не само у директним економским циљевима, као што су снижење трошкова и повећање профитабилности, већ и у постизању специфичних циљева предузећа оријантисаних ка повећању конкурентности и остварењу боље тржишне позиције условљеном повећаном свешћу корисника о брзи и заштити животне средине. Имајући у виду и законска ограничења у погледу отпреме отпада, којима све већи број земаља у свету прибегава, повратна логистика, у савременом пословању не представља избор, већ неминовност за све учеснике на тржишту.

## **1.2 Циљеви истраживања**

Основни циљ и задатак истраживања је развој модела којим се решавају проблеми оптимизације процеса логистике снабдевања и повраћаја производа ради поправке, поновног коришћења или искључивања из даље производње. Дакле, циљ овог истраживања је да се развију модели мреже логистике снабдевања и повратне логистике који ће задовољити следеће циљеве: повећање укупног профита, повећање задовољења потреба корисника, смањење коришћења материјала и технологија који су штетни за околину, смањење количине производа који се не враћају у поновни ток производње. Због тежине проблема дизајна мреже повратне логистике са вишециљним карактеристикама, у оквиру рада ће бити примењене савремене методе оптимизације како би се дошло до решења. Проблеми малих диманзија биће решени до оптималности, коришћењем постојећих софтвера, док ће проблеми већих димензија бити решени коришћењем хеуристичка. Хеуристичка метода која ће бити коришћена у овој дисертацији је метода променљивих околина (енгл. *Variable Neighbourhood Search - VNS*). Ова метода развијена је крајем XX века предложили (Младеновић и Hansen 1997).

Адекватна логистичка мрежа представља услов за дефинисање адекватне платформе за ефикасно и ефективно управљање целокупним ланцем снабдевања. Проблеми

рутирања возила и њихова проширења, као и комбиновани проблеми локација и рутирања представљају *NP*-тврде проблеме.

Главни циљ дисертације, може се класификовати на више поједначних циљева:

1. Пронаћи оптималне локације произвођача, дистрибутивних центара, Корисничких центара и локације депоа у коме се производи који су враћени од корисника разврставају, као и депоа у које се допремају производи који се искључују из даљег тока производње
2. Пронаћи оптималне локације објеката тако да се минимизирају укупни трошкове, укључујући и трошкове пенала и пређени пут
3. Дефинисати оптималне руте у интегрисаном току логистике снабдевања и повратне логистике.

### **1.3 Полазне хипотезе истраживања**

Хипотезе докторског рада дефинишу се у складу са предметом и циљевима истраживања.

Општа хипотеза докторског рада је да се повратна логистика може интегрисати са логистиком снабдевања.

Полазна хипотеза је следећа:

Ланац снабдевања са током од произвођача ка кориснику се може интегрисати са повратним ланцем снабдевања у јединствени ланац који се може представити оптимизационим моделом у коме се тражи задовољење више циљева.

Да би се проверила полазна хипотеза потребно је дефинисати такав математички модел који ће интегрисати логистику снабдевања и повратну логистику у јединствени оптимизациони модел вишекритеријумског одлучивања. Математички модел који ће бити представљен треба да се заснива на теорији локације и до сада развијеним моделима рутирања возила.

Посебне хипотезе:

- Може се развити и решити проблем одређивања локација и рута који ће узети у обзир и токове логистике снабдевања и токове повратне логистике.
- Може се развити и решити проблем рутирања возила који узима у обзир и токове логистике снабдевања и токове повратне логистике.
- Може се развити и решити проблем локација и рутирања који је заснован на вишециљном одлучивању и који узима у обзир и токове логистике снабдевања и токове повратне логистике.

#### **1.4 Научне методе истраживања**

Од општих метода научних истраживања у току израде докторске дисертације користиле су се методе сакупљања и критичке обраде расположиве литературе у вези са предметом истраживања, анализа садржаја сакупљеног материјала, систематизација и анализа постојећих приступа и знања у области истраживања.

Методе прикупљања и анализе садржаја користе се у уводном делу дисертације у коме су представљени основни појмови. Метод анализе садржаја је опсервациона истраживачка метода која се веома често користи у категоризацији научне литературе (Pokharel i Mutha, 2009). То је поступак којим се неки вербални, квалитативни документ преводи у квантитативне податке.



Осим наведених општих метода, као посебна метода користи се метода науке о менаџменту односно операциона истраживања где је кључан елемент моделирање. У контексту овог истраживања, моделирање се односи на математичко моделирање. Такође, користиће се метода експеримента на рачунару уз помоћ савремених софтвера и анализа резултата експерименталних метода.

Тешки проблеми захтевају анализу и примену аналитичког приступа, јер проналажење правог решења оваквих проблема захтева строго структуриран приступ. Адекватна и коректна анализа проблема захтева и адекватно разумевање и познавање одређеног проблема. Проблем који ће бити представљен у овој дисертацији је сложен и припада групи  $NP$  тврдих проблема, те ће за његово дефинисање и решавање бити коришћен аналитички приступ.

## **1.5 Очекивани научни и стручни допринос истраживања**

Очекивани научни допринос је у:

- Прегледу и критичком осврту на до сада објављену литературу из области истраживања.
- Ближем разумевању проблема и феномена повратне логистике и могућности њеног интегрисања са логистиком снабдевања.
- Ближем разумевању проблема управљања отпадом и посебним токовима отпада.
- Развоју вишециљних математичких модела логистике снабдевања интегрисане са повратном логистиком. Математичке моделе треба да карактерише оригиналност у односу на до сада развијене моделе који су објављени у научној и стручној литератури.

- Развоју оригиналних хеуристика које се заснивају на методи променљивих околина, за решавање презентованих локацијских проблема и проблема рутирања возила.
- Решавању реалног проблема избора локације депоа за класификацију враћених производа и центра за одстрањивање производа који се више неће користити.

Верификација научних резултата ће се извршити објављивањем истих у релевантним научним часописима.

## 2 ЛАНЦИ СНАБДЕВАЊА

Основни појмови који ће бити разматрани у овој дисертацији су:

- Ланац снабдевања,
- Логистички систем и његови елементи. Посебно ће се разматрати логистика збрињавања отпада и амбалаже, као део предмета истраживања логистике,
- Повратна логистика (њени системи, чиниоци, проблеми...),
- Интегрисани ланац логистика снабдевања и повратне логистике.

### 2.1 Дефинисање концепта ланца снабдевања

Ланац снабдевања је група међусобно повезаних предузећа који додају вредност у току трансформисања улаза од његовог оригиналног извора до испоруке производа захтеваног од стране крајњег корисника. Christopher (1998) ланац снабдевања дефинише као мрежу организација повезаних путем узводних и низводних токова у различитим процесима и активностима који производе вредност у облику производа и услуга по захтеву корисника. И у овој дефиницији ланца снабдевања је наглашено да активности у оквиру ланца треба да буду дизајниране и усмерене ка задовољењу потреба корисника. Такође, у дефиницији савремених ланаца снабдевања готово увек се истиче крајњи корисник и задовољење његових потреба, те, стога можемо закључити да он представља саставни део ланца. Главни фокус ланца снабдевања, осим задовољења потреба корисника, је и на управљању материјалима, финансијским и информационим токовима. Васиљевић (2001) дефинише управљање ланцем снабдевања као концепт заснован на идеји ширења информација између снабдевача, произвођача, дистрибутера, превозника и продаваца у чему је улога Интернета кључна, те стога излази изван оквира пословног ентитета, односно компаније.

Одбор менаџмента логистике (2003) дефинисао је управљање ланцем снабдевања као управљање које је имплементирано коришћењем интегрисаних корпоративних функција и пословних просеца унутар и између предузећа. Управљање ланцем снабдевања је често поистовећивано са појмовима логистике, операционог менаџмента, набавке, или је дефинисано као комбинација наведених појмова. Дефинисање управљања ланцем снабдевања је утолико теже, јер имплементација ланца снабдевања захтева примену великог броја активности. Уопштено, управљање ланцем снабдевања може се дефинисати као планирање, имплементација и контрола ефикасности и ефикасности напредних и повратних токова и залиха производа, услуга и релевантних информација између почетних тачака набавке сировина до крајњег коришћења како би се задовољили захтеви корисника. Менаџери група мултинационалних компанија, који су се касније афирмисали у Форум глобалног ланца набавке (енгл. *Global Supply Chain Forum - GSCF*), 1994. године су дефинисали управљање ланцем снабдевања. У фебруару 1996. оквир управљања ланцем снабдевања развијен од стране *GSCF*, представљен је на тродневном семинару спонзорисаном од стране Одбора менаџмента логистике, а касније је овај оквир представљен и у литератури (Cooper, Lambert, and Pagh 1997). *GSCF* дефинише управљање ланцем снабдевања као 'интеграцију кључних пословних процеса до крајњег корисника од почетног снабдевача који обезбеђују производе, услуге и информације које стварају вредност за корисника и остале интересне групе или стејкхолдере' (Cooper, Lambert, and Pagh 1997). Имплементација ланца набавке садржи три основна елемента: структуру мреже ланца набавке, пословне процесе ланца набавке и компоненте менаџмента. Структура мреже ланца снабдевања састоји се од чланова ланца који су повезани кључним процесима.

Управљање ланцем снабдевања обухвата примену три концептуалне компоненте: конфигурацију ланца снабдевања, међусобне везе у ланцу снабдевања и координацију ланца снабдевања. У развоју ланца снабдевања као типични проблеми се јављају:

- Проблем остварења конкурентске позиције целокупног ланца,

- Проблем избора партнерских предузећа ради креирања ланца снабдевања,
- Проблем дефинисања мреже ланца снабдевања и др.

Само присуство на тржишту на коме влада велика конкуренција, више није довољно како би се остварила конкурентска предности, и стога се предузећа фокусирају на редефинисање њиховог тржишног простора или профитних зона (Pagell и остали, 2007). Циљеви управљања ланцем снабдевања су многоструки. Један од његових основних циљева је смањење залиха, и смањење улагања у управљање залихама у ланцу. Управљање залихама доводи до смањења трошкова држања залиха, а тиме и до смањења укупних трошкова у ланцу. Као циљ управљања ланцем снабдевања може се навести и побољшање услуге, веће задовољство корисника и остварење конкурентске предности.

Управљање ланцима снабдевања је увек привлачило велику пажњу како теоретичара, тако и практичара који се баве различитим областима менаџмента. Ланци снабдевања показују карактеристике сложених система, те операциона истраживања и примена математичких модела у решавању проблема из области управљања ланцима снабдевања имају велику улогу. Сложеност ланца снабдевања огледа се у великом броју учесника у ланцу који имају различите интересе и циљеве, као и ентитета ван ланца снабдевања чији се захтеви морају задовољити (нпр. држава, друштвене норме и сл.) У складу са тим, често супротстављеним циљевима, потребно је пронаћи оно решење које даје оптималне вредности за изабране мере перформансе.

У савременим условима пословања, управљање ланцем снабдевања постаје сложеније, јер се законима и прописима захтева повраћај производа на крају животног циклуса. Такође, предузећа, ради смањења трошкова, враћају производе које корисници више неће користити, у своје прерађивачке центре које, након прераде, поново износе на тржиште. Овакве околности узрокују проширење ланца снабдевања и укључивање додатних предузећа која су специјализована за одређене повратне активности и процесе, и самим тим, управљање ланцем снабдевања постоје

још сложеније и захтева још јаче и координисаније активности и комуникације између чланова ланца. Највиши ниво сарадње у ланцима снабдевања је колаборација и она укључује размену информација, усклађивање активности, дељење ресурса и одговорности између учесника, ради остваривања заједничких циљева.

## **2.2 Логистички систем и његови елементи**

Предмет проучавања логистике није строго детерминисан и различити теоретичари, практичари и истраживачи који се баве овом облашћу дефинишу различите логистичке активности. Логистички систем представља скуп одређених активности које прате трошкови, а циљ сваке организације треба да буде минимизација укупних трошкова логистичких активности (Васиљевић, 2001). Најчешће се под логистичким активностима подразумевају:

- транспорт,
- складиштење,
- паковање,
- избор локације фабрика, складишта и малопродајних простора,
- управљање материјалом,
- управљање поруџбинама,
- контрола и управљање залихама.

Елементи логистичког система су уско повезани, а један од кључних елемената у логистичком ланцу је транспортни систем. Трошкови транспорта представљају једну трећину укупних трошкова логистике, те је стога и утицај транспорта на укупне резултате логистичког система велики (Altiparmak и остали, 2006). Значај транспортног система и његов утицај на целокупан ланац снабдевања узроковани су чињеницом да се активности транспорта захтевају од процеса набавке сировина,

током производње, као и након завршеног процеса производње, приликом испоруке производа и њиховог повраћаја.

Транспорт заузима веома значајно место у логистичком систему и то не само због улагања у транспортне капацитете и ангажованости великог броја људи у активностима транспорта, већ и због тога што се производне активности не могу обављати без транспорта који повезује произвођаче и потрошаче материјалних добара. Транспорт обухвата све облике преноса људи, ствари и информација, а његов домен превазилази оквире држава.

Осим транспорта, складиштење је, такође, веома важна логистичка активност. Складиште је простор за ускладиштење производа са намером да исти касније буду укључени у даљи транспорт, производњу, дистрибуцију или потрошњу. Користи од складиштења производа у малопродаји видљиве су у постизању економичности у транспорту превожењем веће количине производа, добијањем количинских попушта приликом куповине производа, остваривањем добрих односа и дугорочне сарадње са добављачима и праћењем променљивих услова на тржишту. Логистички тренд који се почетком XXI века убрзано развија је организација дистрибуционих центара. Разлика између складишта и дистрибуционих центара је у томе што складишта служе, пре свега, за чување производа, док је намена дистрибуционих центара - проток производа. У дистрибуциони центар долазе веће пошиљке производа које се, затим, дележују на мање количине, и даље транспортују у ланцу набавке. Дистрибуциони центри могу опслуживати производима већи број територија, него што то могу складишта. У овој дисертацији ће у оквиру презентованих модела бити разматрани дистрибуциони центри, док складиштење и управљање залихама неће бити разматрани.

Остали елементи логистичког система нису предмет проучавања овог рада, те се они неће детаљније образлагати.

### 2.2.1 Логистика збрињавања отпада и амбалаже у оквиру предмета логистике

У новије време, долази и до реорганизације међународних професионалних организација које се баве проблемима ланца снабдевања. Тако је јануара 2005. Савет за управљање логистиком (енгл. *Council of Logistics Management – CLM*) променио назив у Савет професионалаца за управљање ланцем снабдевања (енгл. *Council of Supply Chain Management Professionals – CSCMP*). Логистика се, од тада, третира као део ланца снабдевања.

Како би се постигла ефикасност у пословању, савремени произвођач мора да управља процесом производње и залихама које обезбеђују несметано одвијање процеса производње. У дистрибуцији се пред произвођача поставља захтев за квалитетном услугом испоруке (поузданост испоруке, спремност на испоруку, време испоруке и др.). Тако се у XX веку појављују и нови појмови који постају предмет проучавања логистике:

- пословна логистика,
- маркетиншка логистика,
- инжењерска логистика,
- индустријска логистика.

Као пословну функцију и пословну праксу, логистику чине активности и процеси везани за материјалне, информационе, енергетске и новчане токове унутар ланца снабдевања који обједињују производне системе, складишта, транспортна средства и инфраструктуру (Васиљевић, 2001). Циљ пословне логистике је што ефикасније повезивање места извора робе са тачком њене испоруке потрошачима. Пословна логистика је грана логистике која се крајем XX и почетком XXI века убрзано развијала и она се може поделити на:



- логистику набавке,
- логистику производње,
- логистику продаје,
- логистику збрињавања отпада и амбалаже,
- логистику транспорта и сл.

Логистика збрињавања отпада и амбалаже као главни циљ има бригу о отпаду у складу са начелима и прописима заштите животне средине. Отпад из производње је потребно сакупити од потрошача и одлагати на депоније или припремити за рециклирање. Појединачни циљеви логистике збрињавања отпада су:

- Сортирање отпада по врстама и сакупљање у посебним амбалажама,
- Убрзавање процеса поновног коришћења рециклираних материјала у производњи,
- Одлагање непрерадивих материјала и отпада на посебним одлагалиштима,
- Минимизирање трошкова прикупљања, међускладиштења, употребе или одлагања.

Како можемо закључити, неке од основних активности логистике у пословању савремених предузећа претпостављају постојање ланца повратне логистике као обавезног тока производа и материјала.

Развоју и примени логистике у пословању допринела је и компјутеризација пословања, која је условила развој великог броја специјализованих програма и софтвера за пружање помоћи у пословању и доношење адекватних одлука како би се укупни трошкови пословања, а међу њима и логистички трошкови, смањили.

### 2.3 Повратна логистика

Повратна логистика (енгл. *Reverse logistics*) може се дефинисати као део логистике који се бави враћањем производа, смањењем извора, рециклажом, заменом материјала, поновном употребом материјала, одлагањем отпада и реновирањем, поправкама и поновном производњом (Mentzer и остали, 2001). Повратна логистика обухвата логистичке активности кроз целокупни ток производа након што престане потреба корисника за тим производима, до њиховог поновног коришћења на тржишту или коначног одлагања. Пре свега, концепт повратне логистике укључује физички транспорт коришћених производа од крајњег корисника до произвођача, односно планирање свих аспеката дистрибуције. Заједно са финансијским, информационим и токовима материјала, људи, робе и помоћних материјала, повратна логистика представља део ширег логистичког система. Ланац набавке и мрежа повратне логистике имају одређене специфичности, јер токови иду у 'обрнутом' смеру, односно од потрошача ка произвођачу. Повратна логистика укључује концепт мрежа “од - много – ка - неколико”, уместо конвенционалних “од - неколико – ка - многима”.

Pohlen i Farris (1992) дефинишу повратну логистику као кретање добара од корисника ка произвођачу у каналу дистрибуције. Rogers i Tibben-Lembke (1998) повратну логистику дефинишу као процес планирања, имплементације и контролисања токова сирових материјала, залиха, готових производа и релевантних информација од тачке коришћења до почетне тачке са циљем поновног давања вредности производу или адекватног одлагања.

Произвођачи све више постају свесни да не могу да приуште производњу таквих производа који ће бити бачени кроз неколико година. Од камера за једнократну употребу до кетрица за штампач и застарелих модела мобилних телефона, производи се рециклирају, поново користе и поправљају више него што је то било изражено и у једном другом раздобљу савременог индустријског доба. Подршка томе је и

масовност производње, те стога, постоји и огроман број производа које је потребно вратити на поправку или отпремити на отпад. Према садашњем стању на тржишту, корисници који ‘производе’ материјал који се може поново употребити или рециклирати, често, нису финансијски стимулирани за увођење материјала у ланац повратне логистике. Стога се, у неким земљама, доносе закони и прописи којима се држава укључује и инвестира у активности и напоре ентитета у ланцу снабдевања који се односе на повраћај производа и материјала. Деветнаест држава у оквиру САД је донело законе који захтевају од произвођача електричних уређаја да финансирају сигурно отпремање њихових уређаја на отпад. У Европи, где је површина простора које се може корисити за одлагање отпада мала, закони су још строжији. У неколико земаља, као што су Немачка и Холандија, већ су усвојени закони који се односе на регулативе пословања предузећа у овом домену. Оваква пракса се брзо проширила и на друге земље Европе, САД и Јапан. Дакле, савремено пословање дефинише стално унапређење начина на које се токови и канали рециклирања могу укључити у активности традиционалне логистике.

Осим закона и прописа, постоје још два основна разлога због којих се повратној логистици и развоју њеног концепта придаје велика пажња. Први разлог убрзаног развоја повратне логистике је економска вредност која постоји у производу и након његовог коришћења од стране произвођача. Најбољи примери оваквих производа су метални отпаци, мотори аутомобила и др. Друго, и међу корисницима производа долази до буђења свести и захтевања таквих произвођачких пракси које су оријентисане ка заштити животне средине, и стога, потрошачи бирају да купују оне производе чији произвођачи показују и негују тзв. зелену произвођачку праксу. Управо наведени разлози развоја и примене повратне логистике, говоре у прилог томе да није могуће један овако сложен систем моделирати тако да се као циљ његовог решавања дефинише максимизација профита или минимизација трошкова, јер постоји више утицајних фактора и више интересних сфера који узрокују и дефинишу развој ланца снабдевања у који су укључени и повратни токови. Стога, у

моделирање система повратне логистике неопходно је увести вишекритеријумско одлучивање.

Још један узрок комплексности повратне логистике је висок ниво неизвесности, фреквенција повраћаја коришћених производа и квалитет враћених производа. Произвођачи често имају јако мало контроле над количинама и путевима повраћаја производа. Такође, и квалитет враћених производа може варирати од скоро нових до потпуно похабаних, што зависи и од самог производа и до тржишта.

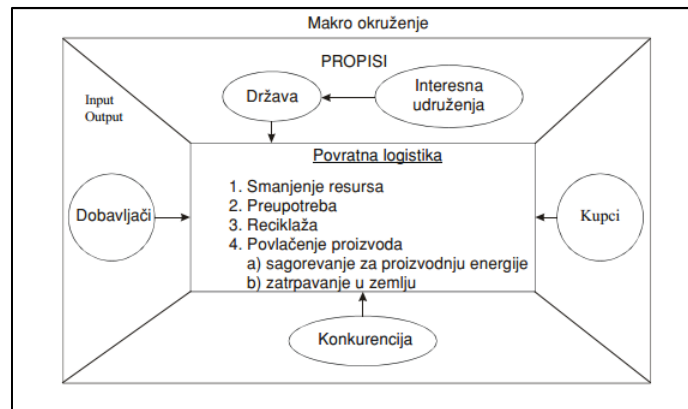
Повратна логистика се не може посматрати као традиционална логистика, која само 'иде' у обрнутом смеру, јер њу карактеришу подручја доношења одлука која се разликују у односу на она која се односе на традиционалну логистику. Такође, повратну логистику карактеришу различити канали, центри за прикупљање производа (тзв. 'collection' центри), сектори за доношење одлука итд. Из тог разлога, очигледно је да се повратна логистика може посматрати као независно подручје истраживања. Адекватан модел повратне логистике може помоћи учесницима у ланцу снабдевања да смање трошкове и побољшају своју ефикасност.

Управљање логистичким процесима и њиховим активностима је, услед њихове велике димензионалности, широког спектра одлука различитог обима и временског хоризонта, веома сложено. Ипак, врсте одлука за системе као што је логистички могу бити сврстане у три категорије: стратешко планирање, тактичко планирање и оперативно планске одлуке.

Стратешко планирање се бави дизајном мреже, успостављањем менаџерске политике и развојем људских ресурса како би се задовољили захтеви окружења и циљеви организације. Bostel и остали (2005) предлажу хијерархијски оквир за планирање повратне логистике у оквиру стратешког планирања:

- Одређивање броја и врста свих логистичких објеката, као што су производни погони, магацини, дистрибутивни центри у класичном логистичком каналу, и одговарајући објекти у каналу повратне логистике, као што су центри за прикупљање и сортирање, центри за поправке и др.
- Одређивање капацитета и ресурса потребних за све наведене објекте.
- Аlokације услужних подручја у одговарајуће објекте за дистрибуцију и прикупљање производа.

Утицаји из окружења на повратну логистику приказани су на слици 2.1 (Станивуковић, 2003).



Слика 2.1. Утицаји окружења на повратну логистику (Станивуковић, 2003)

### 2.3.1 Подручје истраживања повратне логистике

Подручје истраживања повратне логистике представља:

- Материјал који настаје током процеса производње (шкарт, отпад, и сл.),
- Неисправан производ који је грешком послат велетрговцу или директно кориснику,

- Исправан производ који је грешком послат купцу,
- Исправан производ који је застарео,
- Производ којем је истекао рок трајања,
- Неисправан производ који је отказао у току гарантног рока и који треба заменити,
- Неисправан производ који је послат на поправку,
- Производ чији је радни век истекао,
- Амбалажа која је коришћена за заштиту производа током транспорта,
- Контејнери и палете,
- Резервни делови.

### 2.3.2 Системи повратне логистике

Повратни канали у систему повратне логистике су најчешће:

- Откупни центри,
- Разне друштвене групе које се баве заштитом животне средине,
- Стручњаци за сакупљање отпада,
- Центри за рециклажу,
- Складишта прерађевина.

На основу типа средстава која су предмет враћања, системи повратне логистике могу бити класификовани у четири главне групе које имају своје карактеристике:

- Директна мрежа поновног коришћења (енгл. *Directly reusable network - DRN*) - Ова мрежа обухвата нове, неотворене производе и контејнере који се могу поново користити, као што су палете, кутије и стандардни контејнери. Они могу бити поновно коришћени директно и без извођења било каквих операција на њима. На овим објектима је потребно извршавати само

активности провере, чишћења и одржавања у мањем обиму. Токови од произвођача ка купцу и обрнуто су веома повезани. Стога, овај систем представља затворену мрежу.

- Мрежа поновне производње (енгл. *Remanufacturing network - RMN*) - Производи или њихови делови на крају животног циклуса се враћају и неке компоненте могу бити поновно коришћене у производњи нових производа. Ова мрежа је затворена из разлога што се процес производње у коме се користе постојећи делови најчешће обавља од стране истог произвођача.
- Мрежа сервиса за поправке (енгл. *Repair service network - RSN*) – Дефектни производи се враћају на поправку у сервисни центар. Ова мрежа се дефинише као отворена.
- Мрежа за рециклажу (енгл. *Recycling network - RN*) – Сирови материјали, као што су метали, стакло и папир, углавном се рециклирају од стране посебног предузећа. Ова мрежа може бити посматрана као отворена.

Сваки од ових система захтева прикупљање коришћених производа и компоненти, односно производа и компоненти који су већ допремљени до корисника, иако нису били коришћени, њихово поновно процесуирање и поновну дистрибуцију.

### **2.3.3 Чиниоци повратне логистике**

Модел повратне логистике је специфичан, јер постоји више разлога због којих производ може бити враћен, односно постоји више чинилаца повратне логистике:

1. Повлачење поруџбине – у овом случају поруџбина је повучена и она мора бити преузета и враћена произвођачу.

2. Повраћај производа који су у гарантом року – производи који се налазе у продавницама, код дистрибутера или код трговаца на велико морају се вратити код произвођача ради поправке у гарантном року.
3. Повраћај материјала који се може поново користити.
4. Повраћај контејнера у којима су се налазили производи који су испоручени купцу.
5. Оштећени производи – производи који су оштећени током транспорта или у току коришћења.

Осим наведених, постоје још неки чиниоци повратне логистике, као што су повраћаји сезонских средстава (средства која је потребно допремити до произвођача на крају сезоне), опасни материјали, и производи који се транспортују како би се изједначила понуда у неким продајним центрима у којима постоји мањак производа у односу на друге продајне центре.

Производи могу бити преузети директно од купца (нпр. у случају, оштећене робе), из продајног центра или из центра за сакупљање враћених производа (нпр. у случају повраћаја материјала који се може поново користити). Повратна логистика односи се и на процесе доношења одлука о томе где ће се производ на коме је пријављен квар поправити, заменити или одложити. У случају да се поправка производа врши на терену, односно на месту где се производ налази (енгл. *on-site*), потребно је транспортовати људе и средства за поправку. У случају да се производ поправља у радионици (енгл. *off-site*), потребно га је допремити од места квара до депоа у коме ће се извршити поправка. Уопштено, повратни токови у логистичком систему се могу поделити на повратне токове производа и повратне токове амбалаже. Једна од основних активности повратне логистике односи се на рециклажу материјала. У оквиру повратне логистике, рецикалажа материјала се може образложити следећим процесима:

1. сакупљање отпадног материјала,



2. његово испоручивање одговарајућем центру у оквиру система повратне логистике,
3. повраћај прерађеног производа на тржиште.

Процес рециклаже не може бити извршен без постојања адекватног система повратне логистике. Кључне области повратне логистике односе се, не само на рециклажу материјала, већ и на враћање нових, коришћених и употребљивих производа. Повраћај нових производа односи се на враћање неупотребљених производа који не одговарају захтевима корисника и, најчешће, се јављају приликом куповина из каталога. Осим наведеног, враћање производа односи се и на повраћај дефектних производа, за које се, веома често дешава да су оштећени у току транспорта. Осим повраћаја испоручених, дефектних производа, може се догодити да је кориснику испоручен погрешан производ или да му је испоручен одговарајући производ, али у погрешној количини. Враћање мало употребљаваних производа ради рекламације се обавља када проблем у употреби производа настане у гарантном року. Повраћај производа у гарантном року заузима значајно место у систему повратне логистике и његовом изучавању, јер корисници који врате производ на овај начин, очекују да им производ у буде враћен у веома кратком року, као и да произвођач или продавац на залихама имају производ који ће корисник моћи да користи док његов производ не буде поправљен.

Корисници се често, путем маркетиншких кампања, позивају да оштећене производе врате у малопродајне објекте, а као надокнаду добијају новац или попуст приликом куповине новог производа. Овакав вид повраћаја производа, до скоро је био везан за одређене индустрије, као што је нпр. аутоиндустрија, али се у новије време, он јавља и у другим индустријама, па је чест пример оваквих повраћаја телекомуникациона и рачунарска опрема.

Осим ефеката на финансијске резултате предузећа, овакви видови кампања имају позитивне утицаје и на животну средину и бригу о њеној заштити. У оваквим

случајевима, потрошач враћа употребљен и искоришћен производ у продајни објекат или центар за откуп. Произвођач, на овај начин, долази до резервних делова, које може уградити у нове производе, али и показује да је друштвено одговоран.

#### **2.3.4 Најчешћи проблеми повратне логистике**

Оно што карактерише појам повратне логистике је велики број нерешених питања – подједнако практичних и теоријских. Како би се пришло решавању проблема, потребно је применити теорију и методе планирања дистрибуције, управљања залихама, планирања производње, и сл. Такође, потребан је развој нових приступа у планирању залиха при доради претходно већ коришћених производа, али, подједнако је важно и развити моделе планирања локација и рута производа који су предмет враћања од корисника ка потрошачу. Један од највећих проблема повратне логистике и њене практичне примене, односи се управо на дизајн такве мреже повратне логистике, која ће свим учесницима у ланцу повратне логистике, обезбедити профит. Осим наведеног, проблеми повратне логистике односе се и на доношење одлука о транспорту производа, јер ти трошкови могу да превазиђу њихову вредност и тиме пониште све финансијске предности програма повлачења. Ако ови трошкови (рециклаже или преупотребе) премаше укупне трошкове испоруке нових производа или материјала, предузеће нема профитни мотив за примену система повратне логистике. Такође, трошкови паковања производа нису исти за све производе, већ се они разликују од производа до производа. Врсте производа који су враћени могу припадати различитим асортиманима. Стога су укупни трошкови у ланцу повратне логистике знатно виши у односу на трошкове произведене у ланцу класичне логистике и они представљају значајну ставку у укупним трошковима предузећа. Поред овога, проблем је и локација опреме за рециклажу, прераду или обнављање производа и материјала. Због тога се локација бира тако да се минимизирају будући издаци за транспорт.

У савременим условима пословања, једино добра координација процеса производње са компонентама логистичког система, може довести до смањења трошкова и повећања профита. Савремено друштво пред предузећа поставља различите захтеве који се, између осталог, односе и на рециклажу материјала, промовисање корисничких услуга и повећану заштиту корисника, те је неопходно да активности повратне логистике буду саставни део логистичког система.

Постоји велики број одлука које учесници у ланцу снабдевања морају размотрити пре него што дефинишу потенцијалне локације објеката. Неке од ових одлука односе се на начин прикупљања производа, да ли ће њихово тестирање бити извршено на месту прикупљања података или у фабрици у којој се производи и производе, као и да ли би ове операције могле бити изведене ефективније укључивањем трећих лица специјализованих за обављање логистичких активности (енгл. *third-party logistics provider* - *3PL*). Прикупљање производа који су предмет враћања је веома компликовано, јер је амбалажа, често, оштећена, некомплетна или отворена. У оваквој амбалажи, повећан је ризик да и производ буде оштећен. Стога је неопходно да у предузећу постоји унапред одређен стандард или одлука како би се дефинисало који производи се могу само препаковати и вратити на тржиште, а који производи се морају вратити у процес поновне производње или отпремити за рециклажу или отпад. Због великог опсега могућих дестинација за сваку враћену ставку, одређивање где ће се поједичани производ отпремити може захтевати значајно време. Концепт повратне логистике заснива се на повраћају производа и материјала који се веома тешко може предвидети. Можемо рећи да је повраћај производа и материјала у ланцу повратне логистике случајан и неизvestан, те је и продајна цена производа који је враћен на тржиште, непозната. Веома често се захтева ефикасна и брза продаја оваквих производа, због утицаја на финансијски резултат предузећа и њиховог приказа у пословним књигама. Такође, како би се производи који су прошли кроз ланац повратне логистике вратили на тржиште и продали, неопходне су и додатне информације које се могу добити маркетиншким истраживањима, а односе се на атрактивност производа који је враћен на тржиште. Потешкоће у маркетиншким

активностима односе се и на немогућност да се корисницима обезбеди уједначено снабдевање производима, с обзиром на неизвесности у повраћају производа. Преговарање између чланова ланца снабдевања у интегрисаном ланцу је компликованије, јер квалитет производа није уједначен. Такође, треба узети у обзир и чињеницу да се приликом пласирања производа који су враћени са тржишта, у преговарање и сарадњу у ланцу набавке укључују и нови чланови ланца, којих нема у класичном ланцу снабдевања, а који се баве продајом на секундарном тржишту, рециклажом и сл. Такође, прикупљање производа директно од корисника је, вероватно, скупље од изградње центра за прикупљање коришћених производа. Наравно, произвођачи морају схватити да повраћај производа има једну карактеристику која је јако важна при доношењу различитих одлука у ланцу снабдевања, а то је променљивост повраћаја. Стога, при доношењу одлука о дизајну мреже повратног ланца снабдевања, треба поставити питање да ли ће изглед мреже бити другачији, ако је количина производа који се враћају значајно виша или значајније нижа него што је предвиђено.

С обзиром на неизвесност која је уско повезана са концептом повратне логистике, можемо закључити да ефикасан и ефективан ланац повратне логистике и интегрисани ланац логистике снабдевања и повратне логистике захтевају знатно већи број информација и ефикасније планирање у односу на класичан ланац снабдевања усмерен од произвођача ка тржишту. До сада је развијен велики број *LRP* модела повратне логистике, узимајући у обзир временске оквире, укључивање одлука о залихама и распоређивању у *LRP*, као одлука о симултаном прикупљању и испоручивању производа и сл.

#### **2.4 Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике**

Мрежа повратне логистике може бити креирана независно од мреже традиционалне логистике или као интегрисана мрежа, односно интегрисана мрежа традиционалне и

повратне логистике (енгл. *Integrated forward and reverse logistics – IFRL*). Један од главних проблема у развоју система повратне логистике односи се на његову интеграцију са постојећим системима класичне логистике снабдевања. Проблеми који могу настати у затвореном ланцу снабдевања (енгл. *Closed loop supply chain - CLSC*) истраживани су у великом броју студија случаја. Међу моделима који су први почели да се развијају како би се решио интегрисани проблем логистике снабдевања и повратне логистике, били су модели локације. Интегрисани модели традиционалне и повратне логистике, познати и као затворене петље ланца набавке, дефинисани су од стране Аксали и остали (2009) као мреже које укључују традиционалне канале, односно традиционалне активности и токове заједно са повратним каналима. Предности интегрисане мреже традиционалне и повратне логистике над одвојеним мрежама препознате су од стране многих истраживача. То је резултовало у растућем броју истраживања дизајна интегрисане мреже традиционалне и повратне логистике. У овој дисертацији ће бити разматран дизајн мреже интегрисане традиционалне и повратне логистике. У табели 2.1. представљене су разлике између логистике снабдевања и повратне логистике.

Табела 2.1. Разлика између концепата логистике снабдевања и повратне логистике

Логистика снабдевања	Повратна логистика
Мање неизвесности, јер су врсте и количине производа које треба транспортовати познате	Повећана неизвесност, јер су врсте и количине производа које треба транспортовати тешко предвидиве
Транспорт од 'једног' ка 'много'	Транспорт од 'много' ка 'једном'
Квалитет производа униформан	Квалитет производа није униформан
Стандардни канали дистрибуције	Канали дистрибуције који нису стандардни
Укупни трошкови дистрибуције су релативно мали	Укупни трошкови дистрибуције представљају значајну ставку у укупним трошковима предузећа
Менаџмент залихама не захтева сталне промене и доношење одлука	Менаџмент залихама захтева стално доношење нових одлука, јер се врсте и количине производа који су предмет повраћаја стално мењају
Преговарање између чланова ланца снабдевања једноставно	Преговарање између чланова ланца снабдевања комплексно

### 3 ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

У овом поглављу приказан је преглед стања у области истраживања на основу доступне литературе из области:

- проучавања модела повратне логистике,
- проучавања *LRP* у затвореном ланцу снабдевања,
- проучавања проблема рутирања возила у затвореном ланцу снабдевања,
- коришћења методе променљивих околина у затвореним ланцима снабдевања.

У оквиру прикупљања и анализе података, претраживане су следеће базе података: *ScienceDirect*, *SAGE journals*, *WILEY*, *IEEE Xplore*, *Interscience*, *Scindeks*, *EmeraldInsight*, *Google Scholar*, *ASME Digital Library*, *JSTOR*, *J-STAGE*, *Elsevier* и *Springer*. Осим наведених, коришћене су и информације повезане са предметом истраживања прикупљене путем Интернета, као и у формалним и неформалним комуникацијама са стручним појединцима из области истраживања.

#### 3.1 Преглед литературе из области проучавања модела повратне логистике

Са развојем теорије, објављене су и многе студије случаја које указују на различите приступе и могућности концепта повратне логистике. Ammons и остали (1997) представили су логистичку мрежу рециклаже тепиха у Холандији. Spengler и остали (1997) проучавали су могућности рециклаже и примене концепта повратне логистике у Немачкој индустрији челика. Thierry и остали (1995) представили су процесе повратне логистике, а предмет њиховог проучавања биле су копир машине. Jayaraman и остали (1999) анализирали су логистичку мрежу електричне опреме у предузећу које се бавило њиховом поправком и поновном производњом. Berger и Debaille (1996) су проучавали ситуације поправке коришћених производа. Krikke и Harten (1999) проучавали су мрежу повратне логистике за тзв. трајне производе, односно производе који се користе током дужег временског периода. Kroon и Vrijens

(1995) су анализирали логистички систем за паковања за транспорт производа која се могу поново користити. У табели 3.1 извршена је главна класификација модела повратне логистике. Разматрани су радови који су објављени до 2014. године.

Табела 3.1. Класификација радова из области повратне логистике

Класификација и подкласификација	Литература	Укупно
Модели повратне логистике	Vidovic и остали (2003); Dekker и остали (2004); Bernon и Cullen (2007); Vlachos и остали (2007); Srivastava (2008); Jamshidi (2008); Husakova (2008); Du и Evans (2008); Mutha и Pokharel (2009); Lee и Dong (2009); Cruz-Rivera и Ertel (2009); Sbihi и остали (2010); Khor и остали (2013); Ramos и остали (2013); Rahim и остали (2014); Niknejad и Petrovic (2014); Soleimani и Govindan (2014); Ramos и остали (2014); 271. Xiang Li и остали (2014);	19
Интегрисани модели логистике снабдевања и повратне логистике	Kibum Kim и остали (2006); Lu и Bostel (2007); Ketzenberg (2009); El-Sayed и остали (2010); Wang и остали (2010); Khajavi и остали (2011); Das и остали (2012); Babazadeh и остали (2012); Lee и остали (2012); Cardoso и остали (2013); Keyvanshokoo и остали (2013); Diabat и остали (2013); Jung и остали (2014); Devika и остали (2014); Kim и остали (2014);	15
<i>EE</i> отпад	Achillas и остали (2010); Gomes и остали (2011); Li и остали (2012); Dat и остали (2012); Alumi и остали (2012); <b>Roman (2012)</b> ; Yao и остали (2013); Govindan и Popiuc (2014);	8
		42

У табели 3.2. извршена је класификација проучаваних радова по међународним научним часописима. Циљ овакве класификације је да се идентификују часописи који

су примарни за дату област истраживања (преко 10% од укупног броја анализираних радова)

Табела 3.2. Класификација радова из области повратне логистике по научним часописима

Часопис	Година објављивања										Укупно
	пре 2006	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
European Journal of Operational Research	-	-	-	-	2	-	-	1	1	4	8
Computers and Operations Research	-	-	2	1	-	1	-	-	1	1	6
Omega	-	-	-	1	-	-	-	-	-	2	3
Annals of Operations Research	-	-	-	-	-	1	-	-	-	2	3
Waste Management	-	-	-	-	-	1	1	-	1	-	3
Computers & Industrial Engineering	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	3
The International Journal of Transport and Logistics	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	2
Остали часописи (11 часописа)	0	0	1	0	1	0	1	5	3	0	11
											39

Примарни часописи за област истраживања проблем повратне логистике су *European Journal of Operational Research* и *Computers and Operations Research*.

Осим часописа који су наведени у табели, часописи који су разматрани у прегледу литературе су: *International Journal of Logistics: Research and Applications*, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *Resources, Conservation and Recycling*, *iBusiness*, *International Journal of Production Economics*, *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, *International Journal of Innovative, Computing, Information and Control*, *Applied Mathematical*



*Modelling, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Expert Systems with Applications, и Waste Management and Research.*

Анализом прикупљене литературе може се уочити пораст броја радова из области повратне логистике, чак и у међународним часописима чија се примарна област разликује од ове тематике, као што су *International Journal of Innovative, Computing, Information and Control; Applied Mathematical Modelling* и сл. Због актуелности проблема повратне логистике, значајно се повећева и број научних радова и истраживања у овој области.

### **3.2 Преглед литературе из области *LRP* модела у затвореном ланцу снабдевања**

Област истраживања повратне логистике може се класификовати у две категорије: квалитативна истраживања која се баве студијама случаја и квантитативне анализе засноване на оптимизационим методама. Са развојем теорије, објављене су и многе студије случаја које указују на различите приступе и могућности концепта повратне логистике. Један од првих истраживача који се бавио овом облашћу био је Stock (1992). Први математички модели из области ланца повратне логистике били су представљени од стране следећих аутора: Kroon и Vrijens (1995), Barros и остали (1998), Jayaraman и остали (1999).

Sheu и остали (2005) су представили вишециљни модел линеарног програмирања са циљевима оптимизације операција у ланцу набавке, интеграције логистике снабдевања и повратне логистике, укључујући и доношење одлука о залихама. Zhao и остали (2009) су проучавали сложени ланац набавке у коме постоји затворена мрежа ланца набавке која садржи једног добављача, вишеструке захтеве тржишта, много продаваца и по једно предузеће специјализовано за логистичке послове (енгл. *Third party logistics – 3PL*). Kannan и остали (2010) су представили модел мешовитог целобројног линеарног програмирања како би одредили ниво сировог материјала, ниво производње, ниво дистрибуције и залиха, и ниво сировина за рециклажу са

циљем да минимизирају укупне трошкове ланца снабдевања. Овај проблем је решен применом генетског алгоритма. Khajavi и остали (2011) представили су интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике заснован на мрежи која укључује и производњу, дистрибуцију, потрошачке зоне, центре за прикупљање производа и центре за поправку и одлагање производа. Vernon и Cullen (2007) наводе неопходност постојања интегрисаног приступа како би повратна логистика могла да се развија и опстане.

Истраживања у овој области све више добијају на значају и број објављених радова постаје све већи, а модели и методе за њихово решавање све прецизније. Већина математичких модела којима су решавани проблеми локације били су модели целобројног програмирања. Krikke и Harten (1999) представили су некапацитетни локацијски модел за дизајн мреже повратне логистике са више нивоа. Овај модел су решили коришћењем софтвера LINDO. Spengler и остали (1997) развили су вишенивоски модел за одређивање локације складишта. Проблем је решен коришћењем софтвера GSMS/OSL. Fleischman и остали (2001) представили су модел мешовитог целобројног програмирања за дизајн мреже враћених производа. Овај модел је био заснован на класичном вишенивоском моделу одређивања локације складишта и касније су га проширили Salema и остали (2007). Модификовани модел је укључивао и додатна ограничења која су се односила на капацитете, као и на увођење више различитих производа које треба транспортовати. Такође, овај модел је укључивао и неизвесности у тражњи и повраћајима производа. Следећи капацитетни проблем локације и алгоритам за његово решавање заснован на Лагранжовој релаксацији представили су Lu и Bostel (2005). Easwaran и Uster (2010) решили су капацитетни проблем локације са више производа користећи егзактни алгоритам. Они су користили Бендерсов алгоритам за добијање оптималног решења. Wang и Hsu (2010) користили су генетске алгоритме за решавање капацитетног проблема локације. Pishvae и остали (2011) развили су алгоритам заснован на комбинацији локалног претраживања и генетских алгоритама за решавање капацитетног

вишенивоског *IFRL* проблема локације. Ding (2010) је развио модел који узима у обзир и локације нових објеката и проширење постојећих.

Safaei (2014) предлаже интегрисани вишециљни модел у коме је разматрана мрежа која обухвата добављаче, произвођаче и дистрибутере. Niknejad and Petrovic (2014) представили су интегрисану мрежу повратне логистике са два алтернативним рутама у повратном току: поновна производња и отпад. Mohammadi и остали (2013) представили су вишециљни модел за стохастички проблем избора локација и рута за тзв. 'green hub' локације. Циљ модела је минимизација укупних трошкова и укупног негативног еколошког утицаја. Ramos и остали (2014) су развили вишециљни модел са три функције циља: економском функцијом, функцијом циља која разматара еколошке утицаје и функцијом циља која разматра социјалне услове у одрживом систему повратне логистике. Amin и Zhang (2013) су представили вишециљни модел у затвореној мрежи ланца снабдевања и они су разматрали еколошке утицаје као једну од функција циља. Hishamuddin и остали (2014) су разматрали двонивоски модел обнављања (енгл. *recovery model*) и решили га коришћењем хеуристика.

### **3.3 Преглед литературе из области проблема рутирања возила у затвореном ланцу снабдевања**

Последњих година су проблеми рутирања возила истраживани у великом броју научних радова (Geyer и остали (2004); Srivastava (2007); Lee и остали (2008); Alfonso-Lizarazo и остали (2013); Keyvanshokoo и остали (2013); Cardoso и остали (2013); Roghanian и Razhoheshfar (2014); Hatefi и Jolai (2014)). Проблемима рутирања возила треба посветити велику пажњу приликом разматрања концепта повратне логистике. Kristianto и остали (2014) предлажу ланац снабдевања у коме су оптимизоване и залихе и руте возила. Lin и остали (2014) предлажу зелени проблем рутирања возила (енгл. *Green vehicle-routing Problems - GVRP*), при чему VRP проблеме класификују у три категорије: *Green-VRP*, проблеми рутирања и загађења (енгл. *Pollution Routing Problem*) и проблеми рутирања возила у повратној логистици

(енгл. *VRP in Reverse Logistics*). Kim и остали (2009) су предложили проблем рутирања возила за рециклажу електричних уређаја у Јужној Кореји. Они су проблем решили коришћењем алгоритма Табу претраживања (енгл. *Tabu Search algorithm*). Buharkal и остали (2012) су изучавали проблеме рутирања возила за прикупљање отпада. Предложили су модел са временским окворима и за решавање проблем користили су алгоритам '*Large neighborhood search*'. Bing и остали (2014) су представили проблем рутирања возила за прикупљање пластичног отпада и Холандији. Они су користили алгоритам Табу претраживања како би побољшали руте. Tapan и остали (2012) су користили генетски алгоритам за решавање проблема рутирања возила са симултаним испоручивањем и прикупљањем производа. Сао и остали (2010) су предложили отворени проблем рутирања возила са неизвесном тражњом и они су проблем решили коришћењем побољшане методе '*Differential evolution algorithm (IDE)*'.

### **3.4 Коришћење методе променљивих околина у затвореним ланцима снабдевања**

Током прве деценије XXI века, најчешће су за решавање проблема локација и рутирања коришћене хеуристике, како што су генетски алгоритми, табу претраживање или симулирано каљење. У новије време, за решавање *NP*-тврдих проблема, користе се хибридни алгоритми који настају интегрисањем више хеуристика. Такође, *VNS* алгоритми су веома често коришћени за решавање *LRP* и *VRP* проблема са великим бројем података.

Govindan и остали (2014) су представили нови двонивоски проблем локација и рутирања са временским оквирима у затвореном логистичком ланцу. Проблем је решен робусном метахеуристиком за решавање вишециљних проблема. Метахеуристика је користила методу вишециљне оптимизације засноване на оптимизацији роја честица (енгл. *multi-objective particle swarm optimization - MOPSO*) и адаптирану методу вишециљне оптимизације засновану на Методи променљивих

околина (енгл. *adapted multi-objective variable neighborhood search - AMOVNS*). Циљ модела је била минимизација трошкова. Метода променљивих околина је хеуристика која се користи за решавање локацијских-рутинг проблема. Rath and Gutjahr (2014) су представили *VNS* метода за решавање вишециљног проблема избора локација и рутирања. Eskandarpour и остали (2013) су предложили Методу паралелних промена околина (енгл. *Parallel variable neighborhood search*) за вишециљну оптимизацију у затвореном ланцу снабдевања. Циљеви који су разматрани у овом истраживању су укупни фиксни и варијабилни трошкови, укупно кашњење и загађење животне средине. Zolfagharinia и остали (2014) су формулисали модел повратне логистике са две врсте локација на којима се прикупљају залихе: услужне и оне у којима се прерађују производи који су враћени од стране корисника. Они су дефинисали хибридную методу променљивих околина (енгл. *hybrid variable neighborhood search*) која је заснована на симулацији. Метода променљивих околина је коришћена и ради решавања других проблема у ланцу повратне логистике. Eskandarpour и остали (2014) су користили Методу променљивих околина заједно са '*Landscape*' анализом како би решили проблем избора логистичког провајдера. Проблем су представили као проблем целобројног мешовитог програмирања са две функције циља. Такође, представили су и нову Методу променљивих околина у којој су предложили девет структура суседстава. Devika et al (2014) су разматрали затворени ланац снабдевања са шест нивоа и они су развили три нове хибридне хеуристичке методе засноване на Адаптираном '*imperialist competitive*' алгоритму и методи променљивих околина. Castillo-Villar (2014) је предложио *VNS* методу за решавање проблема рутирања и распоређивања са променљивим брзинама и временским оквирима. Cruz и остали (2012) су представили *VNS* хеуристику за проблем рутирања возила са симултаним прикупљањем и испоручивањем. Они су за локално претраживање користили методу променљивог спуста (енгл. *Variable Neighborhood Descent - VND*) и табу претраживање (енгл. *Tabu Search - TS*). У табели 3.3. извршена је главна класификација *LRP* модела у којима су изучавани проблеми повратне логистике.

Табела 3.3. Класификација радова из области проблема локације и рутирања у *IFRL*

Класификација и подкласификација		Литература	Укупно	
Локацијски - рутинг проблеми	Прегледни радови	Fleischmann и остали (1997); Carter и Ellram(1998); Min и остали (1998); Guide (1999); Fleischmann и остали (2000); Nagy и остали (2007); Melo и остали (2009); Akcali и остали (2009); Pokharel и Mutha (2009); Vidal и остали (2013); Lin и остали (2014); Prodhon и остали (2014);	12	
	Егзактни алгоритми	Laporte (1989); Easwaran и Uster (2010); Wang и Hsu (2010); Belenguer и остали (2011); Contardo и остали (2014);	5	
	Хеуристике	Генетски алгоритми	Min и остали (2006); Kannan и остали (2010); Pishvae и остали (2011);	3
		<i>Tabu</i>	Tuzun и остали (1999); Caballero и остали (2007); Byung Ki Lee и остали (2008); Melo и остали (2012);	4
		Симулирано каљење	Wu и остали (2002); Vincent F. Yua (2010); Zarandi и остали (2011); Karaoglan и остали (2012);	4
		<i>LNS</i>	Hemmelmaug и остали (2012); Contardo и остали (2012); Méndez и остали (2013);	3
		Хибридни алгоритми	Javid и остали (2010); Prodhon (2011); Derbel и остали (2012); Mousavi и остали (2013); John Willmer Escobar и остали (2013); Guerrero и остали (2013); Govindan и остали (2013); Tlili и остали (2014); Nadizadeha и остали (2014); Peng-Sheng Youa и остали (2014);	10
		<i>VNS</i>	Mladenovic (1988); Hansen и Mladenovic (2003); Pirkwieser и Raidl (2010); Hansen и остали (2010); Mladenovic и остали (2012); Jarboui и остали (2013); Macedo и остали (2013); Rahim и остали (2014);	8
				49

У табели 3.4. извршена је главна класификација модела проблема рутирања возила у којима су изучавани проблеми повратне логистике.

Табела 3.4. Класификација радова из области проблема рутирања возила у *IFRL*

Класификација и подкласификација		Литература	Укупно	
Проблеми рутирања возила	Егзактни алгоритми	Lee и остали (2006); Minis и Tatarakis (2011);	2	
	Хеуристике	Генетски алгоритми	Surekha и Sumathi (2011); Tasan и Gen (2012);	2
		<i>Tabu</i>	Chen и Wu (2006); Montane и Galvao (2006); Bianchessi и Righini (2007); Gribkovskaia и остали (2007); Kim и остали (2009); Bing и остали (2014)	6
		<i>LNS</i>	Goel и Gruhn (2005); Buhrkal et al. (2012); Azi и остали (2014);	3
		Хибридни алгоритми	Zachariadis и остали (2009); Repoussis и остали (2010); Yu и остали (2011);	3
		<i>VNS</i>	Кytojoki и остали (2007); Fleszar и остали (2009); Imran и остали (2009); Chen и остали (2010); Kuo и Wang (2012); Xu и остали (2012); Cruz et al. (2012); Salhi и остали (2013); Zolfagharinia et al (2014), Eskandarpour et al (2014); Castillo-Villar (2014)	11
<i>MCDM</i>	фази	Alves и остали (2009); Cao и Lai (2010); Barker и Zabinsky (2011); Milosevic и Naunovic (2013);	4	
			31	

Највећи део прикупљене литературе чине радови који су објављени у научним часописима. Примарни часописи за област истраживања локацијских – рутинг

проблема и проблема рутирања возила су *European Journal of Operational Research*, *Computers and Operations Research* и *Expert System with Applications*.

Осим наведених, часописи који су разматрани у прегледу литературе су: *Networks, Resources, Conservation and Recycling*, *IIE Transactions*, *Discrete Optimization*, *Computers & Chemical Engineering*, *Transportation Research Part E*, *Journal of Manufacturing Systems*, *Transportation Research Part B*, *World Applied Programming*, *World Applied Programming u Operations Research Proceedings*, *Waste Management*, *Mathematical Problems in Engineering*, *Computers & Operations Research*, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

Анализом прикпуљене литературе може се уочити пораст броја радова из области повратне логистике, чак и у међународним часописима чија се примарна област разликује од ове тематике, као што су *International Journal of Innovative, Computing, Information and Control*, *Applied Mathematical Modelling* и сл. Због актуелности проблема повратне логистике, значајно се повећева и број научних радова и истраживања у овој области.



## **4 УПОРЕДНИ ПРИКАЗ УПРАВЉАЊА ОТПАДОМ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ И ЕВРОПСКОЈ УНИЈИ**

Електричну и електронску опрему чине уређаји за чије је функционисање потребна електрична енергија или електромагнетно поље. Такође, овим производима припада и опрема за производњу, пренос и мерење струје или јачине електромагнетног поља. Отпад од електричне и електронске опреме представља ону опрему и уређаје које власник више не жели да користи и жели да их одбаци. Отпад од електричне и електронске опреме чине и склопови и саставни делови опреме који настају у индустрији. Отпад од електричних и електронских уређаја чине отпадни апарати из домаћинства, као што су телевизори, радио-апарати, фрижидери, замрзивачи, рачунари, телефони и сл. Већина овог отпада припада групи опасних отпада, јер ови уређаји садрже компоненте које су окарактерисане као опасне за околину.

У овом делу дисертације сажето је приказан законски основ управљања отпадом у Републици Србији. Циљ овог поглавља је да дефинише основне разлоге за спровођење истраживања у наредним поглављима. Из тог разлога је, најпре, представљена пракса која се сада примењује у Србији, а затим су представљени законски оквири управљања отпадом у Европској унији, који представљају законе којима и Србија тежи. Како је број проблема у погледу управљања отпадом у Републици Србији заиста велики, ми ћемо се у овој дисертацији бавити само неким деловима и могућностима за побољшања, а пре свега онима у погледу проналажења оптималних локација у повратним токовима производње.

### **4.1 Управљање отпадом у Републици Србији**

Законским регулативама, У Србији је *ЕЕ* отпад класификован по следећој листи разреда опреме:

1. Велики кућни апарат
2. Мали кућни апарати

3. Опрема за информатичке технологије и телекомуникације
4. Опрема широке потрошње за разоноду
5. Опрема за осветљење
6. Електрични и електронски алати
7. Играчке, опрема за рекреацију (разоноду) и спорт
8. Медицински помоћни уређаји
9. Инструменти за праћење и надзор
10. Аутомати

Оно што карактерише Републику Србију у другој деценији XIX века је усаглашавање за законима и директивама Европске уније. Стога је Република Србија донела већи број стратегија и националних планова којима би се регулисало управљање отпадом. Утицај отпада у Републици Србији има вишеструко негативно дејство, и ово стање нема тенденцију побољшања, без обзира на законе и уредбе донете у последњих неколико година, као што су:

- Национални програм интеграције из 2008. године,
- Стратегија увођења чистије производње у Републици Србији из 2009. године,
- Национална стратегија управљања отпадом са програмом приближавања Европској унији (2013),
- Закон о управљању отпадом [145],
- Стратегије управљања отпадом за период 2010-2019. године [146],
- Просторни план Републике Србије је у припреми. Поглавље о управљању отпадом дефинисаће инфраструктуру за управљање отпадом у простору.

Основни закони и подзаконска акта којима се регулише област рециклаже електричног и електронског отпада су још и:

- Закон о транспорту опасног терета,

- Правилник о листи електронских и електричних производа, мерама забране и ограничења коришћења електричне и електронске опреме која садржи опасне материје и начину и поступку управљања отпадом од електричних и електронских производа,
- Правилник о начину складиштења и обележавања опасног отпада,
- Правилник о условима и начину сакупљања, транспорта, складиштења и третмана отпада који се користи као секундарна сировина или за добијање енергије.

Националном Стратегијом управљања отпадом [146] уведен је концепт интегралног управљања отпадом у Републици Србији. У Стратегији управљања отпадом за период 2010-2019. године [146] као кључни кораци у управљању отпадом наводе се јачање постојећих, али и усвајање нових мера ради успостављања интегралног система управљања отпадом. Такође, у Стратегију [146] је укључено и спровођење мера на прихватању веће појединачне одговорности у погледу заштите животне средине, и активније учешће јавности у процесима доношења одлука.

И поред званичних докумената донетих и прописаних од стране Републике Србије, стање на терену је јако лоше. Као највећи проблеми могу се идентификовати следећи:

- Недовољна инфраструктура за третирање и одлагање отпада,
- Недостатак података о токовима отпада,
- Непостојање постројења за складиштење, третман и одлагање отпада,
- Загађење земљишта, површинских и подземних вода отпадом.

Обавезе и одговорности произвођача производа дефинисани су чланом 25 Закона о управљању отпадом. Према овом члану Закона, само произвођач или увозник чији производ после употребе постаје опасан отпад, дужан је да тај отпад преузме после употребе, без накнаде трошкова и са њима поступи у складу са овим законом [145] и

другим прописима док су обавезе произвођача отпада дефинисане чланом 26. Чланом 26 Закона о управљању отпадом произвођач отпада је дужан да сачини план управљања отпадом само у случају да производи више од 100 тона неопасног отпада или више од 200 кг опасног отпада годишње. Такође, под неопасним отпадом се не подразумева сав отпад из производње, већ само онај који је класификован као отпад чланом 15 истог Закона. У случају производње отпада који није дефинисан као опасан, регулативе су још увек веома слабе.

Према Стратегији управљања отпадом [146], "сви произвођачи и узозници електричних и електронских производа, дужни су да управљање отпадом од електричних и електронских производа ускладе са Законом о управљању отпадом" [145]. Сходно члану 22 Закона о управљању отпадом, све послове који се односе на вођење и ажурирање базе података о управљању отпадом, вођење података о расположивим и потребним количинама отпада и извештавање о управљању отпадом, обавља Агенција за заштиту животне средине. Закон о управљању отпадом се бави и дефинише поступање са различитим врстама отпада. Чланом 50 прописано је управљање отпадом од електричних и електронских производа и овим чланом забрањено је одлагање отпада од електричних и електронских производа без претходног третмана.

#### **4.1.1 Посебни токови отпада**

Законом о управљању отпадом у Републици Србији отпад од електричне и електронске опреме дефинисан је као посебан ток отпада. Као посебни токови отпада Стратегијом управљања отпадом за период 2010-2019. године [146], дефинисани су:

- Амбалажни отпад,
- Истрошене батерије и акумулатори,
- Отпадна уља,
- Отпадне гуме,

- Отпадна возила,
- Отпадне флуоресцентне цеви које садрже живу,
- Отпад контаминиран дуготрајним органским загађујућим супстанцама,
- Медицински отпад,
- Отпад животињског порекла,
- Пољопривредни отпад,
- Муљ из уређаја за пречишћавање комуналних отпадних вода,
- Грађевински отпад и отпад од рушења,
- Отпад који садржи азбест,
- Отпад од експлоатације минералних сировина и отпад од енергетике и
- Отпад из индустрије титан диоксида.

#### **4.1.2 Управљање посебним токовима отпада**

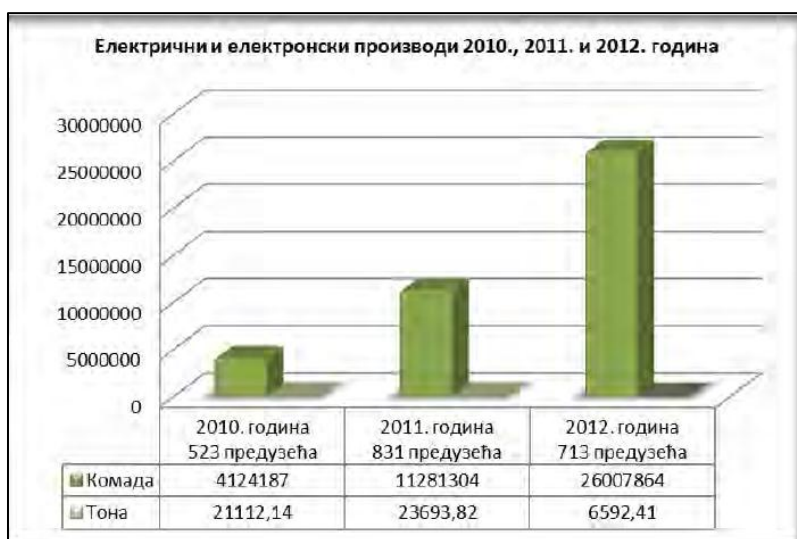
Члановима 47-58 Закона о управљању отпадом [145] прописан је начин управљања посебним токовима отпада, као и обавеза извештавања власника ових врста отпада и достављања података Агенцији за заштиту животне средине. На основу прикупљених података Агенција објављује годишње извештаје. Подаци који се користе за израду ових извештаја су разврстани у две групе:

- Подаци о производима који после употребе постају посебни токови отпада у складу са Уредбом,
- Подаци о поновном коришћењу отпада.

Како можемо закључити, посебни токови отпада дефинисани су као и у моделу који ће бити представљен у овом раду.

Управљање посебним токовима отпада у Републици Србији се реализује кроз информациони систем Националног регистра. Сумарни приказ количина производа

стављених на тржиште током 2010, 2011 и 2012. године који припадају групи електричних и електронских производа представљен је на слици 4.1. Од укупне количине електричних и електронских уређаја који су изнети на тржиште у 2012, према подацима из Извештаја [120], 10.601,5 t је прерађено, а 62 t овог отпада су депоноване. Како је у Извештају [120] наведено, Уредба у делу који се односи на електричне и електронске производа се најчешће мењала, те је за ову врсту производа најтеже прикупити податке.



Слика 4.1. Количине електричних и електронских производа стављених на тржиште у периоду од 2010-2012 [146]

## 4.2 Законодавна решења управљања отпадом у Европској унији

За разлику од нашег законодавства, Европска унија је донела читав низ прописа и регулатива које се односе на управљање отпадом:

- Директива о отпаду (Директива 75/ 442/ ЕЕЦ допуњена Директивом 91/156/ ЕЕЦ),
- Директива о опасном отпаду (Директива 91/89/ЕЕЦ допуњена Директивом 94/31/ЕЦ),

- Директива Савета 2008/98/ЕЦ о отпаду која замењује и допуњује Оквирну директиву 75/442/ЕЕЦ, 2006/12/ЕЦ којом се успоставља систем за координисано управљање отпадом у ЕУ са циљем ограничења производње отпада,
- Директива Савета 99/31/ЕЦ о депонијама која има за циљ да се увођењем строжих техничких захтева редукују негативни ефекти одлагања отпада, а нарочито се узимају у обзир негативни ефекти на земљишта, воде, површинске и подземне воде, као и ефекти на здравље становништва.

Такође, у регулативи ЕУ постоје и посебне Директиве које се односе на проблеме електричног и електронског отпада:

- Директива о електричном и електронском отпаду (енгл. *Waste of Electrical and Electronic Equipment – WEEE*) која прописује селективно сакупљање електричних и електронских уређаја помоћу одговарајућих система, индивидуалну одговорност произвођача, стопе поновне употребе и рециклаже које се креће у распону од 50-80% у зависности од категорије уређаја и пружање информација крајњим корисницима чије је учешће у прикупљању отпада јако велико.
- Директива о ограничењима за употребу опасних материја (енгл. *Restriction of the use of hazardous substances – RoHS*) којом се одређује удео тешких метала и контролисаних супстанци у односу на масу одређене компоненте. Максимална дозвољена концентрација опасних супстанци износи 0.1% по тежини у хомогеним системима.

Ове Директиве су 2006. године постале важећи закони Европске уније и произвођачи који своје пословне праксе не ускладе са наведеним Директивама не могу да извозе своје производе на тржиште Европске уније.

У законодавству Европске уније, постоји заједничка дефиниција отпада за све земље чланице. Оквирном Директивом о отпаду (енгл. *Waste Framework Directive*), отпад се

дефинише као свака супстанца или предмет из категорија датих Анексом 1 (енгл. *Council Directive 91 / 156/EEC*) коју власник одбацује, намерава или је приморан да је одбаци. Ова дефиниција је обавезујућа за све чланице Европске уније.

Европска унија својим законима подстиче производњу чистих производа, којима би се омогућило смањење негативног утицаја за животну средину производа кроз њихов животни циклус. Чисти производи добијају се бољим искоришћењем ресурса, редукцијом емисије из производње и управљањем отпадом. У Директивама Европске уније се наводи више могућих начина којима би се подстакла производња 'чистих' производа, а један од тих начина ће, управо, и бити обрађен у овом раду – постизање затвореног циклуса производње.

#### **4.3 Разлике у управљању отпадом од електронске и електричне опреме у Републици Србији у Европској унији**

Као посебно важну за поље истрживања у овом раду, можемо навести Директиву 2002/95/ЕЦ о ограничавању коришћења неких опасних супстанци у електричној и електронској опреми и Директиву 2002/96/ЕЦ о отпаду од електричне и електронске опреме које имају за циљ да ограниче коришћење неких опасних супстанци у електричној и електронској опреми, односно да промовишу активности поновне употребе, рециклаже и искоришћења електричне и електронске опреме, а са крајњим циљем редукције отпада. Законима у ЕУ прописана је и забрана употребе опасних материја у производњи електричне и електронске опреме како би се омогућио једноставији и лакши просец рециклаже. Земље чланице ЕУ морају успоставити систем прикупљања при чему произвођачи и дистрибутери електричне и електронске опреме могу бесплатно примити назад овакву опрему из домаћинства. Дана 01.01.2008. године прописана је обавеза да неки материјали, као што су олово, жива, кадмијум, шестовалентни хром, полибромовани бифеноли о полибромовани дифенили у електричној и електронској опреми морају бити замењени другим материјалима.

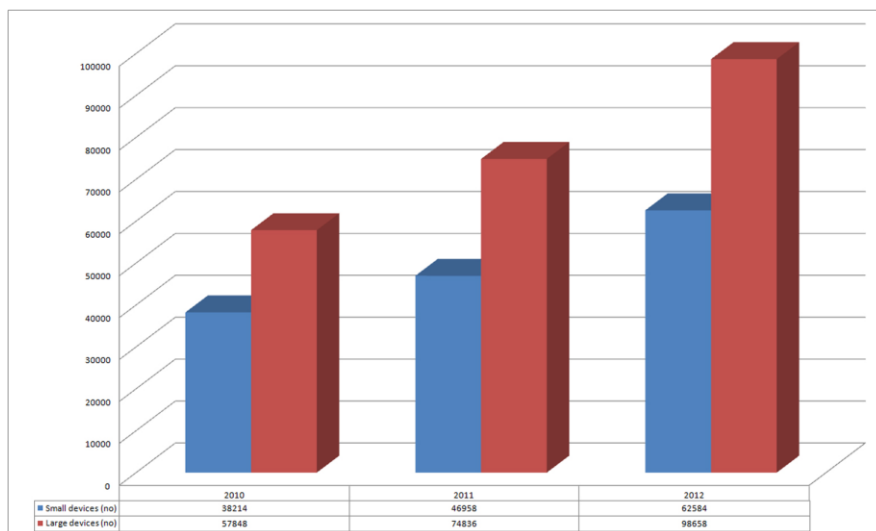


У Републици Србији не постоје јединствени подаци о количини ЕЕ отпада, али је у Стратегији [146] наведено да се у периоду од једне године генерише количина од 30.000 тона, док се око 40.000 тона заосталог отпада налази на сметлиштима, у разним складиштима, или на дивљим депонијама. Такође, У Стратегији [146] је процењено да је количина нових електричних и електронских уређаја који се годишње увезу и ставе на тржиште у Републици Србији око 85.600 тона. Скупљање рачунарске опреме је у Стратегији дефинисано као најзаступљеније, иако је у Републици Србији забрањен увоз половних компјутера, осим за сопствене потребе. У Републици Србији постоје само три оператера која врше организовано прикупљање и рециклажу електричне и електронске опреме. Рециклажа се врши мануелним растављањем и одвајањем засебних врста отпада или машински, са мануелном селекцијом. Оператери који врше претходно издвајање расхладних флуида из отпада од електричних и електронских уређаја из домаћинства не постоје. Овакав вид активности који претходи рециклажи се користи за неке уређаје као што су клима-уређаји, фрижидери, замрзивачи, односно они производи који током времен раде имају функцију да хладе. Такође, у Републици Србији недостаје систем управљања отпадом од електричне и електронске опреме. Само неколико процената електронског отпада се рециклира, део опреме се поправља и, на тај начин, враћа на тржиште. У свету отпад од рачунарске опреме расте по стопи од 5% годишње и то га чини најбрже растућим отпадом на планети.

## **5 РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ИЗБОРА ЛОКАЦИЈЕ ПРИМЕНОМ ФАЗИ АНР МЕТОДЕ – МОД.\_ФАЗИ\_АНР\_1**

У овом делу дисертације, разматраће се две потенцијалне локације центра за разврставање и класификацију (А1 и А2) и три потенцијалне локације центра за одстрањивање из даље производње, односно депоније (В1, В2 и В3), што представља укупно шест алтернатива (А1В1, А1В2, А1В3, А2В1, А2В2 and А2В3). Модел представљен у овој студији случаја назваће се: *МОД.\_ФАЗИ\_АНР1* и у даљем тексту ће се тако означавати. У овој студији случаја, разматрано је шест критеријума одлучивања: трошкови изградње објеката у повратном току, транспортни трошкови, укупне уштеде од отварања локације, загађење, усклађеност са регулативама које се односе на област управљања *ЕЕ* отпадом и стопа повраћаја производа. Детаљније објашњење дефинисаних критеријума дато је у поглављу 5.3.

Како је већ поменуто, у Србији постоји свега неколико локација на којима се депонује отпад. Предузеће проучавано у оквиру ове студије случаја намерава да отвори једну депонију, коју би користило за сопствене потребе или је издавало другим произвођачима кућних уређаја или произвођачима који у својим производним процесима користе исте или сличне материјале. У овој фази, експерти не могу да процене потенцијални профит од коришћења или издавања депоније, те би ово могао бити предмет посебне студије. Производни капацитет предузећа представљеног у овој студији је око 60.000 производа малих кућних апарата годишње и око 100.000 производа велики кућних апарата, што чини око 9.8% од укупне производње кућних апарата у Србији. Број кућних апарата произведен у периоду од 2010-2012 представљен је на слици 5.1.



Слика 5.1. Број производа у периоду 2010 – 2012

## 5.1 *AHP* метода

Идејну и математичку поставку *AHP* метода дао је Thomas Saaty осамдесетих година прошлог века. Основни циљ ове методе је решавање проблема који су слабо структурирани. Једну од првих фази *AHP* метода развили су Van Laarhoven и Pedrych (1983).

*AHP* је један од најпознатијих метода вишекритеријумске анализе који се заснива на разлагању сложеног проблема у више међусобно зависних хијерархијски организованих делова. Са методолошког становишта, *AHP* је метода вишекритеријумске анализе у којој се процес налажења резултата заснива на декомпозицији сложеног проблема. Декомпозија представља разлагање усмерено од општег проблема ка подпроблемима. *AHP* методу карактерише висок ниво флексибилности, који омогућује доносиоцима одлуке да дефинишу везе и доминацију једног критеријума или атрибута над осталима, те, стога, овај метод може бити коришћен за решавање проблема са великим бројем критеријума и атрибута. *AHP* метода се заснива на концепту баланса, који се користи за одређивање релативног значаја атрибута, активности и критеријума. Након дефинисања хијерархије, потребно је дефинисати матрице поређења за сваки хијерархијски ниво.

У овој методи, матрица одлучивања представља матрицу поређења која описује релативни значај једног атрибута у односу на остале и овај процес се понавља за све хијерархијске нивое.

## 5.2 Фази скуп и фази број

Фази скуп не дозвољава потпуну припадност елемента скупу. Из тог разлога дефинише се функција припадности која описује степен припадности елемента фази скупу.

**Дефиниција 5.1.** Фази скуп је класа објеката окарактерисана функцијом припадности, у коме се сваком објекту додељује степен припадности на интервалу  $[0,1]$ . Фази скуп се, најчешће, представља ознаком " $\tilde{M}$ " и дефинише се подскупом  $\tilde{M}$  са функцијом припадности  $\tilde{U}(x|\tilde{M})$ .

**Дефиниција 5.2.** Тространи фази бројеви се означавају као:

$$\tilde{d}_{ij}^k = (a, b, c)$$

где је  $a \leq b \leq c$ .

Параметри  $(a, b, c)$  представљају најмању могућу вредност, најпреспективнију вредност и највећу могућу вредност која описује неки догађај, респективно.

## 5.3 Фази АНР метода

Истраживањем литературе, може се закључити да постоји велики број радова у којима је фази логика коришћена за решавање проблема повратне логистике. Међутим, у већем броју радова у којима је проучаван избор локације коришћењем метода вишекритеријумске анализе (енгл. *multi criteria decision making – MCDM*) или фази метода вишекритеријумске анализе (енгл. *fuzzy multi criteria decision making – fuzzy MCDM*), разматран је проблем избора логистичких провајдера или добављача (енгл. *third party logistics supplier*). Alves и остали (2009) су представили проблем

избора локације за депонију комуналног отпада. Barker и остали (2011) развили су модел повратне логистике заснован на *AHP* методи. Они су представили три студије случаја и предложили три критеријума које су класификовали на трошковне и критеријуме пословних перформанси. Затим су, у даљој хијерархијској подели, представили шест подкритеријума и осам алтернатива. Фази *AHP* метода представља надградњу традиционалне *AHP* методе. Фази бројеви се укључују у оригиналну *AHP* методу и они се користе за одређивање фази тежина алтернатива и критеријума. Фази *AHP* метода има исту процедуру као и традиционална, али се у фази *AHP* методи користе фази бројеви, од Сатијаве скале и вредновања у паровима, до свих матричних операција. У табели 5.1 представљено је поређење између оригиналне и фази скале. Различите верзије *AHP* методе, међусобно се разликују у начину фазификације скале или примењују различите методе дефазификације резултата. За дефазификацију резултата, најчешће, се користе методе центроида, различите врсте геометријског поређења троугаоних фази бројева или методе интеграције комбиноване са тзв.  $\alpha$ -скаларизацијом, или коришћењем  $\lambda$  – индекса оптимизма доносиоца одлуке.

Табела 5.1. Оригинална и фази Сатијева скала

Стандардни Saaty бројеви	Дефиниција	Фази бројеви
1	Једнако значајни / пожељни	(1,1,1)
3	Умерено значајнији / пожељнији	(2,3,4)
5	Веома значајнији / пожељнији	(4,5,6)
7	Изузетно значајнији / пожељнији	(6,7,8)
9	Екстремно много значајнији / пожељнији	(9,9,9)
2	Средње вредности	(1,2,3)
4		(3,4,5)
6		(5,6,7)
8		(7,8,9)

Матрица поређења  $\tilde{A}^k$  може се представити као:

$$\tilde{A}^k = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11}^k & \dots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & \dots & \tilde{a}_{2n}^k \\ \dots & & \\ \tilde{a}_{n1}^k & \dots & \tilde{a}_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

Овакава матрица представља преференције  $k$ -тог доносиоца одлуке, којим он исказује преференцију критеријума  $i$  над критеријумом  $j$ . Сваки члан матрице  $\tilde{a}_{ij}^k$  представља троугаони фази број.

Фази *АНР* алгоритам који ће бити представљен у овој дисертацији је представио Аућан (2013). Алгоритам садржи следеће кораке:

- Доносилац одлуке пореди критеријуме узимајући у обзир фази бројеве представљене у табели 5.1.

Троугаони фази бројеви представљени у табели 5.1 могу бити интерпретирани као лингвистичке променљиве, где важи: критеријум  $C1$  је 'значајно више важан' у односу на критеријум  $C2$ , што описује релацију важности између два критеријума и тада лингвистичка променљива 'значајно више важан' може бити предстаљена фази бројем (4,5,6). Такође, у *АНР* методологији, важи и обрнуто, те поређење критеријума  $C2$  у односу на критеријум  $C1$ , може бити представљено као (1/6,1/5,1/4).

- Уколико постоји више доносилаца одлуке, њихове преференције се сабирају, а затим деле бројем доносилаца одлуке. На овај начин, добија се нова матрица поређења.
- У следећем кораку, израчунава се вредност  $\tilde{r}_i$ . Вредност  $\tilde{r}_i$  представља геометријску средину фази вредности  $\tilde{a}_{ij}$ .

$$\tilde{r}_i = \left( \prod_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} \right)^{1/n}, i = 1, 2, \dots, n$$

- Фази тежине  $\tilde{w}_i$  израчунавају се на следећи начин:
  - Израчунавају се вредности  $r_i = \sum \tilde{r}_i$ , за свако  $i$ ,
  - Након тога, израчунавају се инверзне вредности  $\tilde{r}_i$  за свако  $i$ ,
  - Инверзне вредности се сортирају у растући редослед и множе са  $r_i$

$$\tilde{w}_i = r_i * (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (l * w_i, m * w_i, u * w_i)$$

- Тежине су још увек фазификоване и дефазификација се врши израчунавањем аритметичке средине фази бројева. Овај метод су представили Chou и остали (2008).

$$M_i = \frac{l * w_i + m * w_i + u * w_i}{3}$$

- Након дефазификације, тежине се нормализују.

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

Алгоритам се понавља за сваки критеријум и сваку алтернативу. Све алтернативе се међусобно пореде по сваком критеријуму како би се израчунале нормализоване тежине. Крајња вредност са сваку алтернативу се добија множењем тежине сваке алтернативе са тежином одређеног критеријума. Критеријуми и алтернативе које имају највише вредности су и најбоље рангиране.

#### 5.4 Примена фази АНР методе на студији случаја - МОД\_ ФАЗИ\_ АНР1

Основни научни циљ развоја модела избора локације применом фази АНР методе је:

- Избор одговарајуће локације депоа за класификацију враћених производа,
- Избор локације центра за одстрањивање.

Споредни циљеви су:

- Анализа утицаја расположивих финансијских чинилаца приликом доношења одлуке са малим бројем егзактних података.
- Анализа различитих критеријума који се узимају у обзир приликом доношења одлуке о избору локација у повратним токовима, на основу важећих закона и прописа.

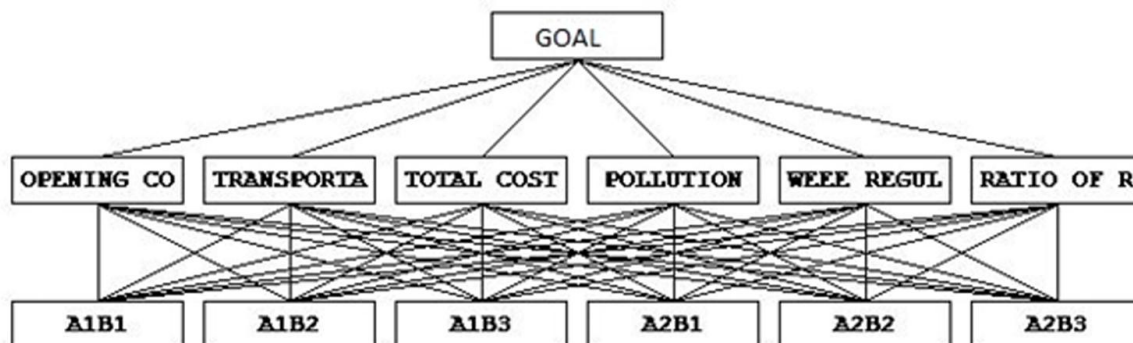
У овој дисертацији, разматрају се две врсте локација у повратном току. Кућни уређаји који се враћају од потрошача прикупљају се у корисничком центру. Корисници који поседују кућне уређаје које више не желе да користе, доносе те производе у кориснички, односно продајни центар. Предузеће из кога су прикупљени подаци за ову студију случаја, има петнаест продајних центара и већина њих има велика складишта. Ово је један од главних разлога зашто је менаџмент предузећа одлучио да нема потребе за посебним центрима за прикупљање производа који су враћени од потрошача. С друге стране, разврставање и класификација враћених производа не може бити извршена у продајним центрима, те, стога, постоји потреба за отварањем депоа за враћене производе. Ови депои би требало да буду адекватно опремељени, а нарочито узимајући у обзир да отпад од електричних и електронских уређаја садржи штетне материјале и хемијске елементе као што су олово, кадмијум, берилијум, жива и остали племенити и тешки метали. Након разврставања и класификације, један део ових уређаја може бити враћен у производне центре, како би се поново укључили у процес производње. Материјале и делове уређаја који не могу више бити коришћени, потребно је испоручити центру за одстрањивање. Друга врста локације која ће бити разматрана у овом делу дисертације је локација центра за одстрањивање.

### **5.5 Критеријуми одлучивања за *МОД\_ФАЗИ\_АНР1***

*АНР* је метода вишекритеријумског одлучивања која се заснива на декомпозицији комплексних проблема. Проблема се декомпонује хијерархијски, при чему се на врху хијерархије налази циљ. Циљ следе критеријуми и подкритеријуми, док се на



најнижем нивоу хијерархије налазе алтернативе. Слика 5.2 представља АНП хијерархијски модел који се састоји од циља, шест критеријума и шест алтернатива.



Слика 5.2. АНП хијерархија за МОД\_ ФАЗИ\_ АНП1

У овој студији случаја разматрано је шест критеријума одлучивања: трошкови изградње објеката у повратном току, транспортни трошкови, укупне уштеде од отварања локације, загађење, усклађеност са регулативама које се односе на област управљања *EE* отпадом и стопа повраћаја производа.

Трошкови изградње С-1 представљају трошкове улагања у отварање депоа или центра за одлагање на одређеној локацији. Они обухватају укупне трошкове изградње нових или реновирања и адаптације постојећих објеката. Укупни трошкови отварања локације 'А' укључују трошкове изградње нових или реновирања постојећих објеката и трошкове инсталирања одговарајуће опреме. Трошкови отварања локације 'В' обухватају трошкове консултантских услуга у вези припреме пројектних задатака, трошкове геодетског снимања, изградњу електричне мреже, мреже наводњавања и инсталације заштитних ограда, као и трошкове надгледања извођења радова. Имајући у виду да не постоји прецизна калкулација ових трошкова, доносиоци одлуке су базирали своја мишљења на апроксимативним вредностима и њиховом утицају на главни циљ истраживања.

Транспортни трошкови С-2 представљају укупне трошкове дистрибуције и преноса производа који су враћени од стране корисника. Ови трошкови обухватају и остале

економске факторе који утичу на висину трошкова транспорта. У овој студији случаја, транспортни трошкови укључују трошкове горива, административне и еколошке таксе, трошкове царина, путарина и сл. Такође, и трошкови паковања могу бити знатно високи, јер они нису исти за све производе. Врсте производа које могу бити враћане од стране корисника се могу знатно разликовати и припадати различитим асортиманима, те и трошкови паковања производа који улазе у повратни ток могу бити јако високи. Стога су укупни трошкови који се јављају у ланцу повратне логистике знатно виши у односу на трошкове у ланцу снабдевања и они представљају значајан део укупних трошкова предузећа.

Укупне уштеде C-3 представљају укупна средства која предузеће може да уштеди имплементацијом повратног тока у ланац снабдевања. Основни разлог поређења укупних трошкова изградње и транспортних трошкова са укупним уштедама је у дефинисању мишљења доносица одлуке у смислу односа између трошкова и ефективности у повратном току. Укупне уштеде су у овом истрживању дефинисане као квалитативни критеријум, јер оне представљају само предвиђање доносиоца одлуке и не заснивају се на реалним подацима, јер предузеће за овај критеријум не располаже историјским подацима.

Критеријум загађења C-4 укључује предвиђено смањење загађења животне средине отварањем објеката у повратном току. Осим наведеног, овај критеријум обухвата и смањење загађења узрокованог емисијом штетних гасова током транспорта производа.

WEEE регулатива – C5 представља критеријум усклађености са регулативама које су већ успостављене или то треба да постану у скорој будућности. Европска унија прописује стриктне регулативе у области пословања са *EE* отпадом, њиховим прикупљањем и рециклажом. *WEEE* директиве имају строге принципе који се заснивају на одговорности сваког појединачног произвођача и оне се дефинишу као *IPR* принципи (енгл. *Individual Producer Responsibility* – одговорност индивидуалног произвођача).

Стопа повраћаја производа - С6 представља стохастичку вредност која треба бити разматрана веома пажљиво и која је процењена од стране доносиоца одлуке.

За прикупљање података у овом делу истраживања коришћене су методе интервјуа и упитника. Ове технике су коришћене за прикупљање процена и мишљења експерата, а у вези критеријума и алтернатива. Експерти који су учествовали у овом делу истраживања су одговарајући менаџери из предузећа које је предмет студије случаја.

## **5.6 Резултати АНР анализе и дискусија за МОД\_ФАЗИ\_АНР1**

Имајући у виду да предузеће које је разматрано у овој студији нема повратни логистички ток, експерти су своје оцењивање једним делом базирали и на предлозима и препорукама државе за имплементацију концепта повратног тока. Критеријуми који су већ представљени у претходном поглављу, имају различите тежине, те ће, стога, одговарајуће нормализоване тежине бити израчунате за сваки критеријум.

Проблем овог истраживања је рангирање алтернатива према унапред датим критеријумима. Алтернативе су рангиране множењем нормализованих тежина критеријума нормализованим вредностима тежина алтернатива, према сваком критеријуму.

Рангирање је извршено на основу мишљења и информација које су експерти представили ради формирања матрица поређења. Скала која је коришћена је фази Сатијева скала где ознаке (1,1,1) представљају најмање пожељну алтернативу или критеријум, док ознаке (9,9,9) представљају изузетну значајност једног критеријума или алтернативе над другом. Средње вредности у скали се додељују када не постоји знатна важност једног критеријума или алтернативе над другом. У табели 5.2. су представљене матрице поређења по паровима за критеријуме и алтернативе.

Табела 5.2. Матрице поређења по паровима за *МОД\_ ФАЗИ\_ АНР1*

КРИТЕРИЈУМИ		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	C1	(1,1,1)	(2,3,4)	(1/2,1/3,1/4)	(2,3,4)	(1,1,1)	(2,3,4)
	C2	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)	(5,6,7)	(1/2,1/3,1/4)	(1,1,1)
	C3	(4,3,2)	(4,3,2)	(1,1,1)	(1/4,1/5,1/6)	(2,3,4)	(1,1,1)
	C4	(1/4,1/3,1/2)	(1/7,1/6,1/5)	(6,5,4)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)	(3,4,5)
	C5	(1,1,1)	(4,3,2)	(1/4,1/3,1/2)	(4,3,2)	(1,1,1)	(1/4,1/5,1/6)
	C6	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(6,5,4)	(1,1,1)
АЛТЕРНАТИВЕ		A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3
C1	A1B1	(1,1,1)	(6,7,8)	(1/2,1/3,1/4)	(1,2,3)	(1/3,1/4,1/5)	(5,6,7)
	A1B2	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(7,8,9)	(1/7,1/8,1/9)
	A1B3	(4,3,2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(3,4,5)	(1/4,1/5,1/6)	(1/6,1/7,1/8)
	A2B1	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(1,1,1)	(5,6,7)	(1/2,1/3,1/4)
	A2B2	(5,4,3)	(1/9,1/8,1/7)	(6,5,4)	(1/7,1/6,1/5)	(1,1,1)	(7,8,9)
	A2B3	(1/7,1/6,1/5)	(9,8,7)	(8,7,6)	(4,3,2)	(1/9,1/8,1/7)	(1,1,1)
C2	A1B1	(1,1,1)	(3,4,5)	(1/2,1/3,1/4)	(1/6,1/7,1/8)	(7,8,9)	(1/5,1/6,1/7)
	A1B2	(1/5,1/4,1/3)	(1,1,1)	(5,6,7)	(1/7,1/8,1/9)	(6,7,8)	(1,1,1)
	A1B3	(4,3,2)	(1/7,1/6,1/5)	(1,1,1)	(1/9,1/9,1/9)	(1,2,3)	(3,4,5)
	A2B1	(8,7,6)	(9,8,7)	(9,9,9)	(1,1,1)	(1/9,1/8,1/7)	(1/2,1/3,1/4)
	A2B2	(1/9,1/8,1/7)	(1/8,1/7,1/6)	(1/3,1/2,1/1)	(9,8,7)	(1,1,1)	(5,6,7)
	A2B3	(7,6,5)	(1,1,1)	(1/5,1/4,1/3)	(4,3,2)	(1/7,1/6,1/5)	(1,1,1)
C3	A1B1	(1,1,1)	(4,5,6)	(1/2,1/3,1/4)	(1/9,1/9,1/9)	(6,7,8)	(5,6,7)
	A1B2	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(7,8,9)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/7,1/8,1/9)
	A1B3	(4,3,2)	(1/9,1/8,1/7)	(1,1,1)	(9,9,9)	(4,5,6)	(1/9,1/9,1/9)
	A2B1	(9,9,9)	(1/4,1/3,1/2)	(1/9,1/9,1/9)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)	(1,2,3)
	A2B2	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(4,3,2)	(1,1,1)	(9,9,9)
	A2B3	(1/7,1/6,1/5)	(9,8,7)	(9,9,9)	(1/3,1/2,1/1)	(1/9,1/9,1/9)	(1,1,1)
C4	A1B1	(1,1,1)	(1/7,1/8,1/9)	(1/9,1/9,1/9)	(7,8,9)	(1/2,1/3,1/4)	(5,6,7)
	A1B2	(9,8,7)	(1,1,1)	(7,8,9)	(1/7,1/8,1/9)	(5,6,7)	(1/4,1/5,1/6)
	A1B3	(9,9,9)	(1/9,1/8,1/7)	(1,1,1)	(1/5,1/6,1/7)	(1/2,1/3,1/4)	(1/2,1/3,1/4)
	A2B1	(1/9,1/8,1/7)	(9,8,7)	(7,6,5)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1/2,1/3,1/4)
	A2B2	(4,3,2)	(1/7,1/6,1/5)	(4,3,2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(3,4,5)
	A2B3	(1/7,1/6,1/5)	(6,5,4)	(4,3,2)	(4,3,2)	(1/5,1/4,1/3)	(1,1,1)
C5	A1B1	(1,1,1)	(9,9,9)	(2,3,4)	(1/3,1/4,1/5)	(2,3,4)	(1/7,1/8,1/9)
	A1B2	(1/9,1/9,1/9)	(1,1,1)	(5,6,7)	(2,3,4)	(1/2,1/3,1/4)	(1,1,1)
	A1B3	(1/4,1/3,1/2)	(1/7,1/6,1/5)	(1,1,1)	(7,8,9)	(1/2,1/3,1/4)	(4,5,6)
	A2B1	(5,4,3)	(1/4,1/3,1/2)	(1/9,1/8,1/7)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)
	A2B2	(1/4,1/3,1/2)	(4,3,2)	(4,3,2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1/1,1/2,1/3)
	A2B3	(9,8,7)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(1/3,1/2,1/1)	(3,2,1)	(1,1,1)
C6	A1B1	(1,1,1)	(1/9,1/9,1/9)	(1/4,1/5,1/6)	(2,3,4)	(7,8,9)	(4,5,6)
	A1B2	(9,9,9)	(1,1,1)	(1/4,1/5,1/6)	(4,5,6)	(1/4,1/5,1/6)	(1/2,1/3,1/4)
	A1B3	(6,5,4)	(6,5,4)	(1,1,1)	(1/9,1/8,1/7)	(1/2,1/3,1/4)	(1,1,1)
	A2B1	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(9,8,7)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1/7,1/8,1/9)
	A2B2	(1/9,1/8,1/7)	(6,5,4)	(4,3,2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)
	A2B3	(1/6,1/5,1/4)	(4,3,2)	(1,1,1)	(9,8,7)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)

Како се може закључити, не постоје значајнија одступања између фази вредности критеријума и не постоји ниједан критеријум који је рангиран са (9,9,9) у односу на

остале критеријуме. Већина критеријума показује умерену значајност у односу на остале и такве релације су представљене фази бројем (2,3,4). Можемо закључити да су експерти доделили значајније разлике између вредности алтернатива. Ове разлике се могу запазити у матрици поређења по паровима и оне се односе на поређење по свим критеријумима. Сходно корацима представљеног алгоритма, у табели 5.3 приказане су фази тежине сваког критеријума и алтернативе ( $W_i$ ), дефазификоване вредности ( $M_i$ ) и нормализоване вредности ( $N_i$ ).

Значајности критеријума су представљене у првом делу табеле. Можемо закључити да су 'трошкови изградње' најзначајнији критеријум, с обзиром на извесна улагања која су потребна за успостављање мреже повратне логистике. Трошкови изградње су критеријум који је најзначајнији и имајући у виду да предузеће које се разматра у овој студији случаја није лидер ни на локалном тржишту кућних уређаја. Све инвестиције предузеће мора да разматра веома пажљиво, а посебно имајући у виду чињеницу да се ради о предузећу средње величине у коме свака одлука мора бити донета адекватно, како би се обезбедио опстанак на тржишту.

'Укупне уштеде' су, такође значајан критеријум, док су остала четири критеријума рангирана као критеријуми са ниским приоритетима у поређењу са 'трошковима изградње' и 'укупним уштедама'. Други критеријум није рангиран као веома важан, из разлога што транспортни трошкови предузећа нису значајно високи. Критеријуми 'WEEE регулатива' и 'загађење' су рангирани веома ниско. Може се очекивати да ранг ових критеријума буде виши у веома блиској будућности, јер ће предузећа на локалном тржишту почети да обрађају много већу пажњу на овакве врсте критеријума, због директива и регулатива Европске уније.

Други део табеле приказује фази тежине, дефазификоване тежине и нормализоване вредности за сваку алтернативу по сваком критеријуму.

Табела 5.3. фази тежине ( $W_i$ ), дефазификоване вредности ( $M_i$ ) и нормализоване вредности ( $N_i$ ) за *МОД\_ФАЗИ\_АНР1*

КРИТЕРИЈУМИ		$w_i$	$M_i$	$N_i$
	<b>C1</b>	(0.19, 0.5, 6.19)	2.31	0.73
	<b>C2</b>	(0.02, 0.01, 0.08)	0.04	0.01
	<b>C3</b>	(0.39, 0.33, 1.03)	0.58	0.18
	<b>C4</b>	(0.02, 0.02, 0.19)	0.08	0.02
	<b>C5</b>	(0.05, 0.04, 0.13)	0.07	0.02
	<b>C6</b>	(0.01, 0.03, 0.26)	0.1	0.03
<b>ТРОШКОВИ ИЗГРАДЊЕ</b>	<b>A1B1</b>	(0.33, 0.48, 0.63)	0.478	0.48
	<b>A1B2</b>	(0.02, 0.03, 0.05)	0.032	0.03
	<b>A1B3</b>	(0.01, 0.01, 0.01)	0.008	0.01
	<b>A2B1</b>	(0.01, 0.02, 0.04)	0.024	0.02
	<b>A2B2</b>	(0.22, 0.23, 0.23)	0.225	0.22
	<b>A2B3</b>	(0.30, 0.24, 0.18)	0.239	0.24
<b>ТРАНСПОРТНИ ТРОШКОВИ</b>	<b>A1B1</b>	(0.01, 0.01, 0.01)	0.009	0.01
	<b>A1B2</b>	(0.02, 0.05, 0.11)	0.061	0.07
	<b>A1B3</b>	(0.01, 0.02, 0.04)	0.019	0.02
	<b>A2B1</b>	(0.93, 0.84, 0.58)	0.781	0.84
	<b>A2B2</b>	(0.01, 0.02, 0.06)	0.028	0.03
	<b>A2B3</b>	(0.02, 0.03, 0.04)	0.028	0.03
<b>УКУПНЕ УШТЕДЕ</b>	<b>A1B1</b>	(0.46, 0.65, 0.93)	0.679	0.65
	<b>A1B2</b>	(0.02, 0.05, 0.10)	0.058	0.06
	<b>A1B3</b>	(0.12, 0.16, 0.17)	0.15	0.14
	<b>A2B1</b>	(0.01, 0.02, 0.04)	0.022	0.02
	<b>A2B2</b>	(0.05, 0.06, 0.08)	0.064	0.06
	<b>A2B3</b>	(0.03, 0.06, 0.14)	0.075	0.07
<b>КРИТЕРИЈУМ ЗАГАЂЕЊА</b>	<b>A1B1</b>	(0.01, 0.01, 0.01)	0.012	0.01
	<b>A1B2</b>	(0.49, 0.48, 0.49)	0.486	0.49
	<b>A1B3</b>	(0.01, 0.00, 0.01)	0.001	0
	<b>A2B1</b>	(0.30, 0.30, 0.30)	0.301	0.3
	<b>A2B2</b>	(0.07, 0.10, 0.12)	0.098	0.1
	<b>A2B3</b>	(0.12, 0.09, 0.06)	0.092	0.09
<b>WEEE РЕГУЛАТИВА</b>	<b>A1B1</b>	(0.17, 0.36, 0.58)	0.369	0.33
	<b>A1B2</b>	(0.06, 0.09, 0.14)	0.097	0.09
	<b>A1B3</b>	(0.05, 0.10, 0.24)	0.133	0.12
	<b>A2B1</b>	(0.03, 0.14, 0.46)	0.211	0.19
	<b>A2B2</b>	(0.10, 0.07, 0.06)	0.077	0.07
	<b>A2B3</b>	(0.15, 0.23, 0.32)	0.231	0.21
<b>СТОПА ПОВРАЋАЈА ПРОИЗВОДА</b>	<b>A1B1</b>	(0.16, 0.33, 0.52)	0.337	0.34
	<b>A1B2</b>	(0.11, 0.08, 0.05)	0.079	0.08
	<b>A1B3</b>	(0.25, 0.13, 0.06)	0.146	0.15
	<b>A2B1</b>	(0.01, 0.03, 0.05)	0.029	0.03
	<b>A2B2</b>	(0.13, 0.23, 0.29)	0.22	0.22
	<b>A2B3</b>	(0.15, 0.20, 0.22)	0.192	0.19

Ранг алтернатива, који је у крајњи резултат овог дела истраживања, је приказан у табели 5.4.

Табела 5.4. Ранг алтернатива за *МОД\_ФАЗИ\_АНР1*

	<b>WEIGHT</b>	<b>A1B1</b>	<b>A1B2</b>	<b>A1B3</b>	<b>A2B1</b>	<b>A2B2</b>	<b>A2B3</b>
<b>C1</b>	<b>0.73</b>	0.48	0.03	0.01	0.02	0.22	0.24
<b>C2</b>	<b>0.01</b>	0.01	0.07	0.02	0.84	0.03	0.03
<b>C3</b>	<b>0.18</b>	0.65	0.06	0.14	0.02	0.06	0.07
<b>C4</b>	<b>0.02</b>	0.01	0.49	0.00	0.3	0.1	0.09
<b>C5</b>	<b>0.02</b>	0.33	0.09	0.12	0.19	0.07	0.21
<b>C6</b>	<b>0.03</b>	0.36	0.08	0.13	0.03	0.22	0.19
<b>РАНГ АЛТЕРНАТИВА</b>		<b>0.48</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.19</b>	<b>0.2</b>

Како се може видети из табеле 5.4, најбоље рангирана је алтернатива А1В1. Ову алтернативу следе А2В3 и А2В2, док алтернативе А1В2, А1В3 и А2В1 нису пожељне.

Имајући у виду да предузеће које је разматрано у овој студији случаја нема повратни ток, осим повремених повраћаја производа у току гарантног рока, предложен је метод који узима у обзир неизвесност и неодређеност.

Развој концепта повратне логистике и усвајање идеје одрживаог развоја су, такође, веома важни и то не само на нивоу предузећа, већ и на националном нивоу. Овим концептима последњих година придаје се све већа пажња, а посебно имајући у виду тежњу Србија да постане чланица Европске уније. Модели слични овом могу бити развијени и решени за потребе одређивања локације депонија на националном нивоу.

Будуће истраживање и рад могу разматрати коришћење других метода вишекритеријумске анализе, или комбинација више *MCDM* метода за евалуацију валидности предложеног модела.

## **6 ХЕУРИСТИЧКИ ПРИСТУП РЕШАВАЊУ ПРОБЛЕМА ЛОКАЦИЈЕ И РУТИРАЊА ВОЗИЛА**

Развој хеуристика у решавању оптимизационих проблема нарочито је изражен у последњих 50-ак година и условљен је развојем комбинаторне оптимизације, теорије алгоритама и развојем рачунара. Примена хеуристике је значајна у решавању стандардних теоријских проблема, али и великог броја тешких реалних проблема комбинаторне и глобалне оптимизације. Педесетих година двадесетог века проблеми су решавани применом ‘интелигентних’ и ‘ефективних’ хеуристика. Шездесетих година формулисани су приближни математички модели реалних проблема и покушано је њихово решавање егзактним методама. Међутим, овакав приступ није давао жељене резултате за велики број проблема. Тада су се решавали само мали проблеми локације и рутирања, који су укључивали 10 до 20 корисника. Седамдесетих година уводи се теорија комплексности, односно временске сложености, па се комбинаторни задаци деле на класу релативно лако решивих и на класу тешко решивих проблема. Седамдесетих година прошлог века развијени су алгоритми који су решавали проблеме који су укључивали од 30 до 100 корисника. Такође, током седамдесетих година прошлог века, неки проблеми са мањим бројем корисника (25-30 корисника) решавају се оптимално. Осамдесетих година долази до убрзаног развоја егзактних метода заснованих на линераном програмирању и проблеми који имају до 50 корисника решавају се оптимално. Почетком XXI века почињу да се развијају и користе методе које, у савременим условима пословања, могу дати решење. Пре свега, то су хеуристичке методе, док је примена егзактних метода, због своје ограничености на решавање проблема са малим бројем корисника, све мања.

Осим у решавању слабо структурираних проблема, хеуристике се користе и у решавању проблема за које постоје егзактни алгоритми, али нису ефикасни за решавање проблема великих димензија. У проблемима који су NP тврди не постоје егзактни алгоритми полиномијалне сложености који их решавају. Осим наведених



случајева, хеуристике се користе и за тражење задовољавајућег решења проблема у случају ограниченог времена, простора и новчаних средстава.

Појам хеуристике се, према (Крчевинац и др, 2006), може дефинисати на следећи начин:

Хеуристика је техника која покушава да нађе нека 'добра' решења проблема (тј. Таква допустива решења проблема која су довољно блиска његовом оптимуму) у оквиру разумног времена, при чему се не гарантује да ће нађена решења бити оптимална, нити се може одредити њихова блискост оптималном решењу.

За неке хеуристике се може пронаћи горња граница релативне грешке њеног решења у односу на оптимално решење. У неким случајевима могуће је експерименталним путем закључити да је нека таква метода боља од свих до тада познатих метода. За разлику од егзактних метода, хеуристичке методе представљају правила избора, филтрирања и одбацивања решења, а користе се за смањење броја могућих рута у поступку решавања проблема.

Класичне хеуристике развијане су у циљу решавања појединачних проблема и веома су везане за карактеристике самог проблема. Развој рачунара, а самим тим и чувања и структурирања података, условио је и надградњу класичних хеуристика. Док су класичне хеуристике намењане решавању неких конкретних, појединачних проблема и користиле су познате особине датог проблема при његовом решавању, метахеуристике се састоје од уопштених скупова правила која се могу применити за решавање разноврсних проблема оптимизације. Метахеуристички приступи у решавању оптимизационих проблема засновани су на општим алгоритмима оптимизације који подразумевају примену итеративних поступака у циљу поправљања неког постојећег решења. Метахеуристичке методе се могу успешно применити на скоро све класичне проблеме нелинеарног програмирања, комбинаторне оптимизације и на велики број реалних проблема. Метахеуристичке

методе, најчешће, користе општи приступ решавању проблема, могуће их је прилагодити специфичностима реалног проблема који се решава и релативно лако их је имплементирати. Поред добрих страна, метахеуристике имају и неке недостатке, међу којима се најзначајније односе на ефикасност алгоритма који зависи од стратешких избора (нпр. од дефинисања околине), на коришћење великог броја параметара, као и на осетљивост промене вредности параметара чије и мале промене изазивају значајне разлике у претраживању простора допустивих решења. Према (Крчевинац и др, 2006), хеуристичке методе се могу класификовати на:

- Конструктивне хеуристике – генеришу само једно допустиво решење проблема које, применом одговарајућих интелигентних правила, треба да буде блиско оптимуму. При томе се могу користити два принципа:
  - Принцип 'прождрљивости' (енгл. greedy) код кога се у свакој итерацији од тренутно могућих избора бира онај који је 'најбољи' по неком локалном критеријуму, и
  - Принцип 'гледања унапред' који у свакој итерацији међу тренутно могућим изборима препознају оне који могу да доведу до формирања лошег крајњег решења, па се зато овакви избори избегавају.
- Методе локалног претраживања (или секвенцијалне методе) – итеративно генеришу читав низ допустивих решења, тежачи да она буду све боља и боља. При томе се у свакој итерацији претражује 'околина' тренутног решења и у њој бира, према неком локалном критеријуму, следеће решење у овом низу. Почетно допустиво решење низа може се узети из праксе, генерисати случајно или формирати применом неке конструктивне методе.
- Еволутивне методе – у свакој итерацији генеришу, не једно, него више допустивих решења проблема, која чине тзв. 'популацију, при чему се тежи да свака следећа формирана популација буде у просеку боља од претходне.
- Методе декомпозиције – на хеуристички начин разбијају проблема на више подпроблема мањих димензија. Ови подпроблеми се затим одвојено,

хеуристички или егзактно, решавају, при чему се води рачуна о њиховој међусобној корелацији.

- Индуктивне методе – решавају веће и сложеније проблеме користећи принципе метода развијених за мање и једноставније проблеме истог типа. Такве методе се често изводе из егзактних метода које успешно решавају само упрошћене моделе малих димензија.

Неке од највише применљиваних хеуристичких метода су (Крчевинац и др. 2006):

- Симулирано каљење (енгл. *Simulating annealing*) – симулира термодинамичке процесе каљења
- Табу претраживање (енгл. *Tabu search*) – имитира логику интелигентног људског претраживања са памћењем
- Метода променљивих околина (енгл. *Variable neighborhood search*) – током процеса претраживања мења структуру околине у којој тражи решење
- Генетски алгоритми (енгл. *Genetic algorithms*) – симулира процесе природне селекције врста

При решавању неког проблема дозвољено је, а често и неопходно, комбиновање различитих приступа. На пример, почетно решење се може добити конструкцијом, а затим се побољшати локалним претраживањем. Постоји још један приступ класификацији хеуристика (Крчевинац и др. 2006):

- Специјалне хеуристике – дизајнирају се за посебне врсте оптимizacionих проблема поштујући, при томе, својства и специфичности ових проблема. Зато се њима могу решавати само они проблеми за које су дизајниране. У првој фази развоја хеуристичког приступа интензивно су развијане само методе овог типа, тако да данас за сваки проблем са листе NP-тврдих проблема постоји бар једна специјална хеуристика која га решава.

- Опште хеуристике – хеуристичке методологије општег карактера које се могу применити на било које проблем комбинаторне оптимизације, без обзира на специфичност његове структуре. Ове хеуристике карактерише широка примена и велика прилагодљивост различитим врстама проблема.

Хеуристичке методе се могу класификовати и у зависности од тога да ли алгоритам који оне примењују памти претходна решења или не. Методе које не користе меморију, у току претраживања не користе информације које су добијене у његовом ранијим фазама.

Табела 6.1. Класификација хеуристичких метода 1

С коришћењем меморије	Без коришћења меморије
Табу претраживање; <i>VNS</i>	Локално претраживање
Краткорочно памћење	Похлепни случајни прилагодљиви алгоритам претраге (енгл. <i>The Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP</i> )
Дугорочно памћење	Симулирано каљење

Такође, све хеуристичке методе се могу поделити у односу на то да ли су стохастичке или динамичке:

Табела 6.2. Класификација хеуристичких метода 2

Стохастичке	Детерминистичке
Симулирано каљење	Локално претраживање
Еволуцијски алгоритми <i>GRASP</i>	Табу претраживање

Стохастичке методе приликом претраживања примењују решења која су случајно изабрана и за њих је карактеристично да се може доћи до различитих коначних

решења, иако се крене од истог почетног решења. Детерминистичке методе, насупротив стохастичким, оптимизицијски проблем решавају детерминистичким доношењем одлука и применом ових метода једно почетно решење увек доводи до истог коначног решења.

Принцип локалног претраживања полази од раније добијеног допустивог решења и у околини тренутног решења налази допустиво решење које је боље од тренутног и у њега прелази. Уколико се у околини не налази решење које је боље од претходно утврђеног решења, претраживање се зауставља. Принцип локалног претраживања карактерише могућност 'заглављивања' у локалним минимумима. Метахеуристике које користе принцип локалног претраживања, стога, морају имати и развијене технике превазилажења заглављивања у локалним минимумима.

Заједничка карактеристика свих хеуристичких метода је да у претраживању простора полазе од једног или више решења, а затим, на основу тог почетног решења, генеришу нова решења. Простор решења у коме се врши претраживање могућих решења је довољно велик, те стога није могуће спровести претрагу над свим могућим решењима у реалном времену. Функција циља, најчешће, уз глобални оптимум има и много различитих локалних оптимума. Како би се оптимизацијски процес адекватно спровео у оваквим условима, поступак претраживања изводи се у две фазе:

- Груба претрага. У овој фази претраживања, алгоритам насумично бира решења из читавог простора претраживања. Циљ грубе претраге је проналажење подпростора који садржи решења која би могла бити потенцијални глобални оптимуми.
- Фина претрага. Након лоцирања простора у коме би се могао наћи глобални оптимум, врши се фина претрага. Циљ fine фазе је да се претрага усресреди на истраживање околине у којој би се могао наћи глобални оптимум.

Проблем који се може јавити приликом спровођења алгоритма односи се на време које је потребно за грубу и фину претрагу. Један од највећих проблема примене хеуристичких алгоритама је у вези лоцирања подпростора у фази грубе претраге, јер у случају да се у овој фази лоцира погрешан подпростор, у финој фази се може наћи само субоптимално решење. Локални минимуми се називају и субоптималним решењима.

Неки хеуристички алгоритми, као што су, на пример, алгоритми који су засновани на популацији решења, немају поступак претраживања који се изводи у две наведене фазе, већ домен претраживања зависи од тренутног стања алгоритма.

Према (Hansen и Mladenovic, 2003) основне особине метахеуристичких метода су:

- Једноставност. Треба да буду једностане и лако применљиве
- Прецизност. Кораци алгоритма који се примењује треба да буду јасни, математички изражени и у складу са правилима на којима је одређена метахеуристика заснована
- Доследност. Сви кораци методе треба да буду у складу са правилима на којима се заснива метахеуристика
- Ефикасност. Потребно је да метода омогући налажење оптималног или решења блиског оптималном, а посебно за званичне тест примере (енгл. benchmarks) расположиве у одређеној области
- Ефективност. За сваки конкретан проблем, метода треба да обезбеди налажење оптималног или субоптималног решења у реалном времену.
- Робусност. Метода треба да, осим адекватних резултата за тест примере из одређене области, даје подједнако добре резултате и за широк спектар реалних проблема из те области
- Јасноћа. Метода треба да буде описана тако да је лако разумљива и једноставна за примену

- Универзалност. Принципи на којима се заснива метода треба да буду општег карактера како би омогућили њену примену на нове проблеме.

Усложњавањем ланца снабдевања, али и изградњом инфраструктуре, број могућих рута за *VRP* проблеме расте, те није могуће очекивати да примена егзактних метода генерише решења употребљива у реалном времену. Ипак, у неким случајевима, када је скуп могућих решења мали, често се користе егзактни алгоритми. Хеуристички алгоритми заснивају се на таквом дефинисању рута где се конструисање и побољшавање рута у односу на функцију циља врши низом итерација. Примери хеуристичких метода су Кларк-Рајтова метода и метода пребрисавања. Сложени проблеми са великим бројем корисника захтевали су развој таквих сложених приступа решавања *NP* тврдих проблема, као што су метахеуристике.

Табела 6.3. Приступи решавању *LRP*

егзактни	хеуристички	метахеуристички
ГРАНАЊЕ И ОГРАНИЧАВАЊЕ; ГЕНЕРИСАЊЕ КОЛОНА; ЛАГРАНЖОВА РЕЛАКСАЦИЈА.	КЛАРК-РАЈТОВА МЕТОДА; МЕТОДА ПРЕБРИСАВАЊА.	СИМУЛИРАНО КАЉЕЊЕ ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТМИ КОЛОНИЈА МРАВА

Осим три наведена приступа решавању локацијских – рутинг проблема, користе се и апроксимативни алгоритми који обезбеђују решење за које се може гарантовати да не одступа од оптималног за више од унапред задатог критеријума.

### 6.1.1 Дефинисање околине решења и појам растојања између двеју тачака

Како би се дефинисала околина неког решења мора се увести појам растојања између две тачке.

Дефиниција 6.1. Нека је  $X$  произвољан скуп тачака. Ако се сваком уређеном пару  $(x, y)$  тачака из  $X$  придружи реалан број  $d(x, y)$  који има следеће особине:

$$0 \leq d(x, y) < +\infty$$

$$d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$$

$$d(x, y) = d(y, x)$$

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$$

тада се за скуп  $X$  каже да је снабдевен метриком  $s$ . Овакав скуп  $X$ , односно уређени пар  $(X, d)$  назива се метричким простором. Вредност  $d(x, y)$  представља растојање између тачака  $x$  и  $y$ .

Дефиниција 6.2. Скуп тачака  $N^h(x) \subseteq X$  за које важи  $d(x, y) \leq \tilde{\chi}, x \in X, y \in N_k(x), \tilde{\chi} \in R^+$ , назива се околином тачке  $x$ .

Околину тачке  $x$  представља скуп  $N_d(x) \subseteq X$  који је придружен решењу  $x$  по неком правилу.

Дефиниција 6.3. Решење  $x \in X$  назива се локални минимум оптимизационог проблема  $(\min) f(x) \ x \in X$  уколико не постоји  $x' \in N(x) \subseteq X$  такво да важи  $f(x') < f(x)$ .

Дефиниција 6.4. Решење  $x \in X$  назива се глобални минимум оптимизационог проблема  $(\min) f(x) \ x \in X$  уколико не постоји  $x' \in X$  такво да важи  $f(x') < f(x)$ .

## 6.2 Метода променљивих околина

Методу променљивих околина (енгл. *Variable Neighbourhood Search - VNS*) предложили су Младеновић и Hansen (1997). Метода се заснива на систематској промени околина унутар локалног претраживања, при чему се простор допустивих решења претражује на случајан начин применом принципа локалног претраживања. Ова метода је до сада успешно примењена на велики број проблема комбинаторне оптимизације и вештачке интелигенције, а до сада је предложено и више њених



модификација. Хеуристика методе променљивих околина заснована је на три доказане чињенице:

- Локални минимум једне околина не мора бити локални минимум и у некој другој околина,
- Глобални минимум је локални минимум у односу на све околина,
- У већини проблема, локални минимума у односу на разне околина су међусобно блиски.

Прва чињеница оправдава увођење више околина. Друга чињеница не гарантује да решење које је локални минимум у односу на сваку од изабраних околина, представља и глобални минимум. Ако решење није локални минимум у односу на неку околина, онда такво решење сигурно није глобални минимум, те се на тај начин, оправдава увођење више околина. Трећа чињеница, која је више емпиријска него теоријска, указује да је потребно истраживати најближу околина локалног минимума, јер се ту очекује поправљање текућег најбољег решења. Дакле, метода променљивих околина заснива се на побољшавању случајно изабране тачке из околина тренутног решења, а побољшавање се врши неком техником локалног претраживања. Уколико се не добије тачка која је 'боља' од тренутне, структура околина тренутне тачке се мења, а поступак се понавља.

Употреба више околина поставља додатна питања на која треба одговорити у оквиру конкретне имплементације методе променљивих околина:

- Избор околина које ће се користити зависи од тога које се метрике могу дефинисати и применити у датом случају.
- Уређење (редослед) околина дефинисано је усвојеном метриком и треба да буде такво да у односу на ту метрику растојање међу решењима расте.

- Величине околина. Ово питање односи се на смањења околина уочавањем и разматрањем само оних суседа који потенцијално могу да обезбеде побољшање.
- Стратегије претраживања. Приликом претраживања потребно је усвојити одговарајућу стратегију. Стратегије могу бити нпр. наћи прво побољшање или наћи најбоље решење у околини.
- Смер претраживања. Одређује редослед којим ће се околине претраживати .
- Интензификација и диверзификација претраживања представљају начине како ће се претраживање концентрисати у околинама у којима се очекује побољшање, као и начине за усмеравање претраге ка новим и неистраженим деловима простора. На овај начин се повећава вероватноћа налажења глобалног минимума.

Алгоритам методе променљивих околина може се представити на следећи начин:

- Почетни корак:
  - Изабрати скуп структура суседстава  $N^h (h=1, \dots, h_{max})$ , које ће бити коришћене у претрази.
  - Изабрати почетно допустиво решење  $x_{kp}$ .
  - Изабрати критеријум заустављања.
  - Поставити  $h \leftarrow 1$ .
- Понављати следеће кораке до  $h = h_{max}$ :
  - Размрдавање (енгл. *shaking*). Генерисати тачку  $x_{kp}'$  из  $h$ -тог суседства тачке  $x_{kp}$ ,  $x_{kp}' \in N^h(x_{kp})$
  - Локално претраживање. Примена неке од метода локалног претраживања, где је  $x_{kp}'$  почетно решење; означити са  $x_{kp}''$  тако добијени локални оптимум.

- Померање или не. Ако је локални оптимум  $x_{kp}''$  бољи у односу на претходно решење, извршити померање ( $x_{kp} \leftarrow x_{kp}''$ ), и наставити претрагу у околини  $N_I(x_{kp})$  ( $h \leftarrow 1$ ), у супротном  $h \leftarrow h + 1$ .

Почетно решење у околини  $h$  се генерише на случајан начин како би се обезбедило претраживање различитих делова приликом следећег разматрања те исте околине. ОкоLINE се могу разликовати на више начина:

- По основу растојања,
- По основу метрике.

Такође, потребно је напоменути да околине за тзв. ‘размрдавање’, односно избор случајног решења и околине за локално претраживање, не морају бити истог типа. Метода променљивих околина у току примене алгоритма за њено решавање увек прелази у прво боље решење на које наиђе. Важно је и напоменути да је приликом примене ове методе неопходно утврдити  $h_{max}$  - максимални број околина. Критеријум заустављања може бити максимално дозвољено време извршавања, максимални број итерација, тј, колико пута се достигне  $h_{max}$ , или број итерација између два побољшања тренутно најбољег решења. Метода променљивих околина се, осим комбиновања са Редукованом методом променљивих околина, може комбиновати и са Методом променљивог спуста. Комбиновање ове две методе би подразумевало да се процедура локалног претраживања замени са методом променљивог спуста. При томе, околине у којима се бира почетно решење и околине у оквиру којих се извршава процедура методе променљивог спуста, могу бити дефинисане на различите начине.

Неке сложеније модификације основних верзија Методе променљивих околина могле би бити:

- Метода променљивих околина са декомпозицијом (енгл. *Variable Neighbourhood Decomposition Search - VNDs*),
- Адаптивна метода променљивих околина (енгл. *Skewed VNS - SVNS*) и сл.

### 6.2.1 Метода променљивог спуста

У коришћењу методе променљивог спуста, околине не морају бити индуковане из исте метрике. Ова метода заснива се на претраживању околине  $N^l(x^k)$  и ова околина се претражује док год постоји могућност да у њој постоји решење које је боље од тренутног. Када се одреди локални минимум  $x^{k'}$  у односу на околинину  $N^l(x^k)$ , ажурира се текуће најбоље решење, односно постави се да је  $x_{opt} = x^{k'}$  и покрене се процедура локалног претраживања у односу на околинину  $N^2(x_{opt})$ . Ако се у овој околини нађе решење које је боље од решења  $x_{opt}$ , претраживање се враћа у околинину  $N^l(x^k)$  тог новог решења. Уколико се решење не поправи, претраживање се усмерева на следећу неиспитану околинину  $N^k(x_{opt})$ . Када тренутно најбоље решење није могуће поправити ни у једној околини, процедура претраживања се зауставља. Тада је  $x_{opt}$  локални минимум у односу на све претражене околине  $N^1, N^2, \dots, N^{hmax}$ .

Алгоритам методе променљивог спуста може се приказати на следећи начин:

- Почетни корак. Изабрати почетно решење  $x^k$  и поставити да је  $x^k = x_{opt}, f_{opt} = f(x^k)$
- Итеративни корак.
  - $h=1$
  - Применити процедуру локалног претраживања почев од решења  $x^k$  у околини  $N^h$ 

Ако је  $f(x^{k'}) < f(x_{opt})$ , онда је  $x_{opt} = x^{k'}, f_{opt} = f(x^{k'})$

Ако је  $f(x^{k'}) \geq f(x_{opt})$ , онда  $h = h+1$
  - Процедура локалног претраживања се понавља све док је  $h \leq h_{max}$  и док се решење побољшава.

### 6.3 Основе планирања пута и возила

Како је већ раније у раду наведено, транспортни трошкови чине значајан део укупне цене производа. У операционим истраживањима транспортни трошкови представљају посебну област изучавања и применом оптимизационих метода они се могу значајно смањити, те, стога, оптимизација у дистрибуцији производа има значајну улогу. Проблеми смањења транспортних трошкова који се, углавном, везују за процесе испоруке или прикупљања производа називају се проблеми рутирања возила (енгл. *Vehicle Routing Problem – VRP*). Под проблемом рутирања возила подразумева се сваки проблем који се укључује у генерисање рута или група рута, у мрежи или делу мреже, са задатим скупом ограничења и са циљем оптимизације једне или више функција циља. Мрежа путева која се користи за транспорт производа, углавном се описује помоћу графа где везе (лукови) представљају изабране деонице, а чворови представљају спојеве путева, складишта или локације потрошача. Везе, а самим тим и граф, могу бити усмерени или неусмерени, у зависности од тога да ли је деоница једносмерна или не. Неусмереним графом се, најчешће, приказују мреже у урбаним срединама. Свака веза између чворова узрокује одређене трошкове у зависности од дужине деонице, типа возила, или временског периода у коме возила саобраћају. Основне карактеристике у транспортним и дистрибуционим мрежама су:

- Локација чвора у графу,
- Количина и врста производа, најчешће различитих типова, која се испоручује или прикупља,
- Временски оквир у коме се корисник може опслужити (нпр. корисник се може услужити само у одређеним деловима дана због радног времена),
- Време које је потребно за испоруку или прикупљање производа на одређеној локацији, јер активности истовара и утовара зависе и од врсте транспортног средства које се користи.

Карактеристике возила су:

- Позиција депоа у коме се возила налазе,
- Капацитет возила који се изражава као максимална тежина, запремина или број палета, а у зависности од врсте производа, који се могу утоварити у возило,
- Трошкови везани за коришћење возила (по јединици пређеног пута, у јединици времена, по рути и сл.).

Приликом решавања проблема рутирања возила јавља се низ ограничења, а решење се добија оптимизацијом једне или више функција циља. У оваквим проблемима, функција циља може бити:

- укупни транспортни трошкови, који су у функцији дужине руте и фиксних трошкова коришћења возила,
- број возила са циљем опслуживања свих корисника,
- трошкови пенала који се јављају при делимичном услуживању корисника.

Проблеми рутирања возила су веома сложени и стога, не постоји јединствен алгоритам који се примењује за решавање ових проблема, већ постоје групе алгоритама које су развијане за решавање појединих врста проблема. За решавање оваквих проблема често се користе и специјалне хеуристике које поштују својства и специфичности проблема.

#### **6.4 Проблеми рутирања возила – *VRP***

Развој *VRP* модела условљен је, пре свега, потребом предузећа за повећањем ефикасности, јер се густина саобраћаја и број возила на улицама повећава брже него

саобраћајна инфраструктура. Услед рапидног развоја рачунарске снаге, софистициране методе оптимизације се могу развијати и користити како би се повећала ефикасност транспота и побољшало решавање проблема узрокованих њиме. Такође, веће коришћење географског информационог система прати и посвећеност предузећа да побољшају своје транспортне мреже како би трошкове што је могуће више смањили.

Проблем рутирања возила се може моделирати као проблем линеарног целобројног програмирања. *VRP* је општи назив дат класи проблема у којима се потрошачи посећују возилима. Проблем се састоји у пројектовању рута за возила све док се не задовољи потражња купаца и циљеви минимизације дате функције циља. Проблеми локација и рутирања представљају проширење класичног проблема рутирања возила – *VRP*. Типична примена решења оваквих проблема је у одређивању рута нпр. возила градске чистоће, возила за превоз радника, такси возила, или рутирања возила продаваца и лица која се баве одржавањем објеката који се налазе на различитим локацијама. У случају примене проблема рутирања возила на концепт повратне логистике, производи се, ради поправке, сервиса или рециклаже, отпремају од корисника до одговарајућих складишта или депоа за поправку, при чему, својим кретањем, креирају одговарајуће руте.

## **6.5 Проблеми локација и рутирања - *LRP***

Проблеми локација и рутирања (*LRP*) подразумевају да су, у избор оптималне локације, укључене и разматране руте које возила праве док обилазе чворове. *LRP* моделима бавио се велики број истраживача и аутора. Неки аутори своја истраживања везана за *LRP* заснивају на уопштавању класичног транспортно-локацијског проблема који укључује избор оптималне локације објекта уз минимизацију трошкова транспорта између потенцијалне локације и чворова који обилазе возила и која при томе опслужују иста. У зависности од локације корисника, њега је потребно доделити одређеном услужном подручју, те је стога, потребно да

менаџери доносе и одлуке које се односе на алокацију корисника. Осим наведеног, потребно је да менаџери доносе и одлуке које се односе на план транспортних рута које повезују кориснике, сирове материјале, фабрике, складишта и сл. Ове одлуке сматрају се веома важним за пословање предузећа и целокупног ланца снабдевања у коме оно послује, јер оне директно утичу на услугу која се пружа корисницима и на укупно произведене трошкове.

Чињеница да више корисника може бити услужено у оквиру једне руте и да укупна количина производа коју треба транспортовати у оквиру те руте није већа од капацитета возила, указује да је неопходно да проблеми локација и рутирања буду уједињени. На међузависност ових проблема први пут је указано осамдесетих година прошлог века (Perl и Daskin, 1985). Проблеми локација и рутирања могу бити дефинисани као проблеми рутирања возила (*VRP*) у којима оптималан број и локације депоа треба да буду одређени симултано у оквиру распореда возила и дистрибутивних рута како би се минимизирали укупни трошкови система (Wu и остали, 2002). *VRP* проблеми представљају NP-тврде проблеме, јер је у њих 'уграђен' проблем трговачког путника, који сам, представља NP-тврд проблем. До седамдесетих година XX века, било је тешко да се проблеми рутирања возила уграде у локацијске проблеме.

Такође, *LRP* проблеми су утолико сложенији, јер промене података који се односе на, нпр. капацитет возила, капацитет депоа, број потенцијалних локација, захтевају понављање решавања целокупног проблема. Стога се за решавање оваквих проблема чешће користе апроксиматвне методе, док је употреба егзактних метода веома ретка.

У литератури постоји велики број математичких модела за решавање одвојених проблема избора локација и проблема рутирања, као и интегрисаних проблема избора локација и рутирања. Иако постоји велики број истраживања о различитим аспектима теорије локације, ови проблеми су у јако малом броју радова проучавани заједно са још неким проблемом, као што су проблеми рутирања, залиха,



распоређивања и сл. Bruns (2000) дефинише локацијске – рутинг проблеме као проблеме планирања локација који узимају у обзир и планирање рута. Такође, и Balakrishnan и остали (1987) запажају да су локацијски – рутинг проблеми пре свега проблеми доношења стратешких одлука који узимају у обзир локације објеката. Rand (1976) истиче да многи практичари који се баве локацијским – рутинг проблемима постају свесни опасности која постоји уколико се проблем подели да два подпроблема оптимизације. Ипак, многи теоретичари и практичари често не узимају у обзир међузависност између ова две врсте проблема и решавају проблеме локације не узимајући у обзир проблем транспорта и утицај који он има на укупне трошкове ланца снабдевања.

У случају када се фиксира локација депоа, проблем локација и рутирања се своди на класичан проблем рутирања возила – *VRP*. Проблеми локација и рутирања представљају NP тврде проблеме, који се састоје од два, такође, NP тврда проблема (проблем одређивања локација и проблем рутирања возила).

## **6.6 *LRP* у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике**

Основни научни циљеви развоја локацијских - рутинг модела за решавање интегрисаног модела логистике снабдевања и повратне логистике су:

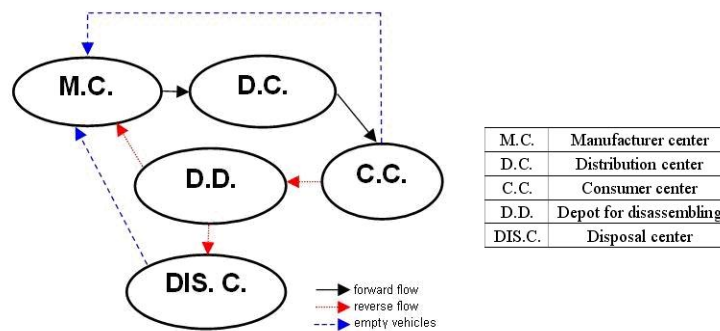
- Одређивање локација и рута у интегрисаним ланцима логистике снабдевања и повратне логистике (енгл. *Integrated forward and reverse logistics – IFRL*) моделима,
- Анализа и поређење оптималних резултата и резултата добијених применом хеуристике,
- Анализа осетљивости на промену одређених параметара модела,

- Анализа резултата добијених за сва три развијена модела, како би се сагледао утицај и потреба за додатним критеријумима који се односе на еколошке факторе, задовољење потреба корисника и сл.

У овом делу дисертације биће представљен затворени ланац снабдевања са следећим скуповима у *'forward'* току: производни центри, дистрибутивни центри и кориснички центри. Производни центри производе нове производе и преправљају производе који су већ коришћени. Најпре се производи испоручују из производних центара дистрибутивним центрима. Након тога се производи транспортују у корисничке центре. Кориснички центри су организовани као малопродајни центри у којима корисници могу купити нове или вратити производе који су већ коришћени. У повратном току су разматрана два скупа: депои за разврставање и центри за одлагање отпада. У депое за разврставање производа транспортују се производи који су враћени од стране корисника. У депоима се враћени производи демонтирају и класификују у две групе: оне који ће бити транспортовани у центре за одлагање отпада и производне центре. Други скуп у повратном току представљају центри за одлагање отпада. У овом делу рада је представљен проблем мешовитог целобројног програмирања (енгл. *mixed integer linear programming model - MILP*) са више нивоа (енгл. *multi-echelon*). Проблем који ће бити представљен је локацијски – рутинг проблем у интегрисаном ланцу логистике снабдевања и повратне логистике. Циљ овог модела је оптимизација три функције циља које су представљене математичким моделом. Прва функција циља је економски оријентисана. Сврха ове функције циља је максимизација профита у интегрисаном ланцу логистике снабдевања и повратне логистике. У оквиру ње су разматрана улагања у следеће објекте (локације):

- Дистрибутивне центре – *'forward'* ток,
- Депое за разврставање производа који су враћени од стране корисника – повратни ток,
- Центре за одлагање отпада (депои за одстрањивање) у које се испоручују производи и делови производа који се не могу поправити или поново користити.

Улагања у објекте (локације) су разматрана како би се утврдило колико дистрибутивних центара, депоа за разврставање и центара за одлагање отпада треба да буде отворено и који су то објекти. Такође, у оквиру прве функције циља разматара се и који производни центри треба да снабдеју које дистрибутивне центре, и након тога, који дистрибутивни центри треба да снабдеју који потрошачки центар, и у којим количинама. Затим се, израчунавају и количине производа које ће бити транспортоване из корисничких центара ка објектима у повратном току. Прва функција циља обухвата и транспортне трошкове, као и оперативне трошкове по јединици производа. Друга функција циља оптимизује ниво задовољења потреба корисника (*service level*). Трећа функција циља представља минимизацију коришћења материјала и технологија који су штетни за околину. У овој функцији циља разматрају се материјали и технологије које се користе у производним центрима. Проблем се решава методом епсилон ограничења (енгл.  $\epsilon$  - *constraint method*). На слици 6.1 представљен је затворени ланац логистичке мреже за моделе *LRP\_MOD\_1*, *LRP\_MOD\_2* и *LRP\_MOD\_3*.



Слика 6.1. Затворени ланац логистичке мреже за моделе *LRP\_MOD\_1-3*

### 6.6.1 Развој модела – *LRP\_MOD\_1*

Претпоставке модела су следеће:

- Модел се односи на један временски период.
- Капацитети дистрибутивних центара, депоа за одстрањивање и центара за одлагање отпада су унапред познати.
- Капацитети производних центара нису ограничени.
- Сви објекти исте намене имају исту величину и капацитет.
- Процент производа који су прикупљени од корисника је познат.
- Процент производа који су одложени на депонију је познат.
- Сви производи враћени од корисника прикупљају се у корисничким центрима.
- Локације производних центара и корисничких центара су унапред познате.

Параметри, управљачке променљиве, функција циља и ограничења у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике су:

Скупови

$P = \{1, \dots, np\}$  – скуп производа,  $p \in P$

$I = \{1, \dots, ni\}$  – скуп унапред одређених локација производних центара који производе производе и поправљају их,  $i \in I$

$J = \{1, \dots, nj\}$  – скуп потенцијалних локација дистрибутивних центара у које су нови производи транспортовани из производног центра,  $j \in J$

$K = \{1, \dots, nk\}$  – скуп унапред одређених локација корисничких центара  $k \in K$

$L = \{1, \dots, nl\}$  - скуп потенцијалних локација депоа за разврставање у којима се производи враћени из корисничких центара  $k$  класификују на оне који се могу поправити и оне који се одлажу у центар за сакупљање отпада,  $l \in L$

$M = \{1, \dots, nm\}$  - скуп потенцијалних локација центара за одлагање отпада (депои за одстрањивање) у који се испоручују производи и делови производа који се не могу поправити или поново користити  $m \in M$

## Параметри

$d_k$  - тражња корисничког центра  $k$

$y$  - очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника

$r$  - проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање

$g_j$  – фиксни трошкови отварања дистрибутивних центара  $j$

$a_l$  - фиксни трошкови отварања депоа за разврставање враћених производа  $l$

$b_m$  - фиксни трошкови отварања центара за одлагање отпада  $m$

$D_{ij}^1$  - трошкови транспорта између производних центара  $i$  и дистрибутивних центара  $j$

$D_{jk}^2$  - трошкови транспорта између дистрибутивних центара  $j$  и корисничких центара  $k$

$D_{kl}^3$  - трошкови транспорта између корисничких центара  $k$  и депоа за разврставање  $l$

$D_{li}^4$  - трошкови транспорта између депоа за разврставање  $l$  и производних центара  $i$

$D_{lm}^5$  - трошкови транспорта између депоа за разврставање  $l$  и центара за одлагање отпада  $m$

$D_{ki}^6$  – трошкови празних возила која се крећу између корисничких центара  $k$  и производних центара  $i$

$D_{mi}^7$  - трошкови празних возила која се крећу између центара за одлагање отпада  $m$  и производних центара  $i$

$T_m^2$  – капацитет центара за одлагање отпада  $m$

$T_j^1$  – максимални проток производа кроз дистрибутивни центар  $j$

$T_l^2$  - максимални проток производа кроз депо  $l$

$\theta_p$  – јединична цена производа  $p$

$\lambda_p$  - зарада по јединици враћених производа  $p$

$\tau_{ip}$  – цена коштања по јединици производа  $p$  у производном центру  $i$

$\varphi_{jp}$  – јединични трошкови процесуирања производа  $p$  у дистрибутивном центру  $j$

$\gamma_{kp}$  - јединични трошкови процесуирања производа  $p$  у корисничком центру  $k$

$\eta_{lp}$  – јединични трошкови демонтаже и разврставања производа  $p$  у депоу за разврставање  $l$

$\mu_{mp}$  – трошкови одлагања отпада по јединици производа  $p$  у центру за одлагање отпада  $m$

$\alpha$  – тежински коефицијент за ниво задовољења потреба корисника ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$v_{ip}$  - индикатор коришћења материјала који су мање штетни за околину, у производном центру  $i$  како би се произвео производ  $p$ . Пример оваквих материјала су материјали који су рециклабилни.  $v_{ip} = [0,1]$

$w_{ip}$  - индикатор коришћења технологија које мање загађују животну средину, у производном центру  $i$  како би се произвео производ  $p$ . Примери оваквих технологија су технологије које користе обновљиве изворе као што је сучнева енергија.  $w_{ip} = [0,1]$

#### Управљачке променљиве

$X^1_{ijp}$  - Количина производа  $p$  транспортована од производног центра  $i$  до дистрибутивног центра  $j$

$X^2_{jkp}$  - Количина производа  $p$  транспортована од дистрибутивног центра  $j$  до корисничког центра  $k$

$X^3_{klp}$  - Количина производа  $p$  транспортована од корисничког центра  $k$  до депоа за разврставање  $l$

$X^4_{lip}$  - Количина производа  $p$  транспортована од депоа  $l$  до производног центра  $i$

$X^5_{lmp}$  - Количина производа  $p$  транспортована од депоа за разврставање  $l$  до центра за одлагање отпада  $m$

$X^6_{kip}$  – променљива која се користи за израчувавање трошкова возила која се празна враћају из потрошачког центра  $k$  у производни центар  $i$

$X^7_{mip}$  – променљива која се користи за израчувавање трошкова возила која се празна враћају из депоа за разврставање  $m$  у производни центар  $i$

$S_j$  – индикатор који показује да ли је дистрибутивни центар отворен на локацији  $j$ ,  $S_j=1$ , ако је дистрибутивни центар отворен на локацији  $j$ ,  $S_j=0$  у супротном

$L_l$  – индикатор који показује да ли је депо за одстрањивање отворен на локацији  $l$ ,  $L_l=1$ , ако је депо за одстрањивање отворен на локацији  $l$ ,  $L_l=0$  у супротном

$V_m$  - индикатор који показује да ли је центар за одлагање отпада отворен на локацији  $m$ ,  $V_m=1$ , ако је центар за одлагање отпада отворен на локацији  $m$ ,  $V_m=0$  у супротном

Математички модел: *LRP\_MOD\_1*

$$\begin{aligned}
\max f_1 = & \sum_j \sum_k \sum_p \theta_p \cdot X_{jkp}^2 + \sum_l \sum_i \sum_p \lambda_p \cdot X_{lip}^4 - (\sum_j g_j \cdot S_j + \sum_l a_l \cdot L_l + \sum_m b_m \cdot V_m + \\
& + \sum_i \sum_j \sum_p \tau_{ip} \cdot X_{ijp}^1 + \sum_j \sum_k \sum_p \varphi_{jp} \cdot X_{jkp}^2 + \sum_j \sum_k \sum_p \gamma_{kp} \cdot X_{jkp}^2 + \sum_k \sum_l \sum_p \gamma_{kp} \cdot X_{klp}^3 + \\
& + \sum_k \sum_l \sum_p \eta_{lp} \cdot X_{klp}^3 + \sum_l \sum_m \sum_p \mu_{mp} \cdot X_{lmp}^5 + \sum_i \sum_j \sum_p D_{ij}^1 \cdot X_{ijp}^1 + \\
& + \sum_j \sum_k \sum_p D_{jk}^2 \cdot X_{jkp}^1 + \sum_k \sum_l \sum_p D_{kl}^3 \cdot X_{klp}^3 + \sum_l \sum_i \sum_p D_{li}^4 \cdot X_{lip}^4 + \\
& + \sum_l \sum_m \sum_p D_{lm}^5 \cdot X_{lmp}^5 + \sum_k \sum_i \sum_p D_{ki}^6 \cdot X_{kip}^6 + \sum_m \sum_i \sum_p D_{mi}^7 \cdot X_{mip}^7)
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\min f_2 = \alpha \cdot \sum_k (\sum_p d_{kp} - \sum_j \sum_p X_{jkp}^2) + (1-\alpha) \cdot \sum_k (\sum_p y \cdot d_{kp} - \sum_l \sum_p X_{klp}^3) \tag{2}$$

$$\min f_3 = \sum_i \sum_j \sum_l \sum_p v_{ip} \cdot (X_{ijp}^1 - X_{lip}^4) + \sum_i \sum_j \sum_p w_{ip} \cdot X_{ijp}^1 \tag{3}$$

При ограничењима

$$\sum_j X_{jkp}^2 \leq d_{kp}, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{4}$$

$$\sum_m X_{mip}^7 + \sum_l X_{lip}^4 + \sum_k X_{kip}^6 = \sum_j X_{ijp}^1, \forall i \in I, \forall p \in P \tag{5}$$

$$\sum_i X_{ijp}^1 - \sum_k X_{jkp}^2 = 0, \forall j \in J, \forall p \in P \tag{6}$$

$$\sum_i X_{kip}^6 + \sum_l X_{klp}^3 = \sum_j X_{jkp}^2, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{7}$$

$$\sum_i X_{lip}^4 + \sum_m X_{lmp}^5 = \sum_k X_{klp}^3, \forall l \in L, \forall p \in P \tag{8}$$

$$\sum_i X_{mip}^7 = \sum_l X_{lmp}^5, \forall m \in M, \forall p \in P \tag{9}$$

$$\sum_l X_{klp}^3 = y \cdot \sum_j X_{jkp}^2, \forall k \in K, \forall p \in P \quad (10)$$

$$\sum_m X_{lmp}^5 = \frac{r}{y} \cdot \sum_k X_{klp}^3, \forall p \in P, \forall l \in L \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_p X_{ijp}^1 \leq T_j^1 \cdot S_j, \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_k \sum_p X_{klp}^3 \leq T_l^2 \cdot L_l, \forall l \in L \quad (13)$$

$$\sum_l \sum_p X_{lmp}^5 \leq T_m^2 \cdot V_m, \forall m \in M \quad (14)$$

$$S_j, L_l, V_m \in \{0,1\} \quad (15)$$

Прва функција циља (1) је укупни профит као разлика укупног прихода умањен и укупних трошкова. Укупан приход обухвата приход од продаје нових производа и приход од враћених производа. Укупни трошкови обухватају следеће: трошкове отварања дистрибутивних центара, депоа за разврставање и центара за одлагање отпада, трошкове извођења операција у производним центрима, дистрибутивним центрима, депоима за разврставање и центрима за одлагање отпада, као и укупне трошкове транспорта. Друга функција циља (2) је количина производа који нису испоручени корисничким центрима и количине производа који нису враћени од корисника (ниво задовољења потреба корисника у интегрисаном ланцу логистике снабдевања и повратне логистике). Трећа функција циља (3) је еколошки оријантисана и њена сврха је минимизација коришћења не-еколошких материјала и технологија у производним центрима. Ограничење (4) показује да нису задовољене све потребе корисника. Ограничења (5-9) обезбеђују да постоји баланс токова у производним центрима, дистрибутивним центрима, корисничким центрима, депоима за разврставање и центрима за одлагање отпада, респективно. Ограничење (10) обезбеђује да су сви производи враћени од корисника испоручени депоима за разврставање. Ограничење (11) обезбеђује да су сви враћени производи који не могу бити поправљени – испоручени центрима за одлагање отпада. Ограничења (12) и (13) представљају капацитатна ограничења за дистрибутивне центре и депое за



разврставање, док ограничење (14) представља капацитетно ограничење за центре за одлагање отпада. Ограничење (15) представља бинарно ограничење за све управљачке променљиве.

#### **6.6.1.1 Методологија вишециљног програмирања са применом VNS и методе променљивих околина**

За решавање проблема вишециљног програмирања коришћена је метода епсилон ограничавања. Namies и остали (1971) су предложили ову математичку методу за решавање проблема вишециљне оптимизације генерисањем Парето оптималних решења. Ова техника је заснована на трансформацији вишециљног проблема у проблем са једном функцијом циља тако што се функција која има највиши приоритет поставља као једина функција, док се остале функције циља трансформишу у ограничења. Математичка формулација вишециљног проблема дефинисаног у претходном поглављу у примени методе  $\varepsilon$  - ограничавања може се представити на следећи начин:

***LRP\_MOD\_1:***

$$\max f_1(x)$$

при ограничењима

*Eqs.(4–15)*

$$f_2(x) \leq \varepsilon_2 \tag{13}$$

$$f_3(x) \leq \varepsilon_3$$

Вредност  $\varepsilon_2$  представља максималну вредност коју може имати друга функција циља. Вредност  $\varepsilon_3$  представља максималну вредност коју може имати трећа функција циља.

Метода епсилон ограничавања омогућује генерисање подскупа Парето оптималних решења мењањем граничних вредности за сваку од функција циља.

Дефиниција 6.5. Допустиво решење  $\hat{x} \in X$  је ефикасно или Парето оптимално ако не постоји ниједно допустиво решење  $x \in X$  такво да је  $F(x) \leq F(\hat{x})$

где је

$x = (x_1, \dots, x_n)$  – вектор управљачких променљивих,

$X$  – допустиви скуп који се дефинише као  $X = \{x \in R^n \mid e_i(x) \leq \varpi, i = 1, \dots, v; x_j \geq 0, j = 1, \dots, n\}$ ,

$e_i(x)$  - функције ограничења,

$\varpi$  - десне стране ограничења.

Наведена дефиниција важи за минимизацију свих функција циља у Еуклидском  $n$ -димензионалном простору.

Дефиниција 6.6. Ако је решење  $\hat{x}$  ефикасно, тачка  $\hat{y} = F(\hat{x})$  зове се недоминирана тачка критеријумског скупа  $Y$ .

Критеријумски скуп  $Y$  је скуп свих вредности у које се допустиви скуп  $X \subset R^n$  пресликава и  $Y \subset R$ .

Дефиниција 6.7. Скуп свих ефикасних решења зове се ефикасан скуп и означава са  $X_E$ . Скуп свих недоминираних тачака се зове недоминирани скуп и означава са  $Y_N$ .

Дакле, допустиво решење је ефикасно ако не постоји ниједно друго допустиво решење које га доминира, односно ако не постоји ниједно друго допустиво решење које је по свим критеријумима бар једнако добро, а бар по једном критеријуму боље од њега.

## 6.7 Примена хеуристике на решавање проблема *LRP\_MOD\_1*

Претраживање локација и рута спроводи се за сваки кориснички центар појединачно. Циљ претраживања је да се за сваки производ захтеван од одређеног корисничког центра, одреди добављач, фабрика, дистрибутивни центар, депо за разврставање и депо за одстрањивање тако да добијено решење буде што ближе најоптималнијем. Дистрибутивни центри, депои за разврставање и депои за одстрањивање имају ограничене капацитете, те резултат зависи и од редоследа производа при претраживању. Из тог разлога претраживање се састоји из два корака:

- формирање редоследа производа (*VNS1* алгоритам),
- претраживање локација и рута за сваки производ захтеван од стране одређеног корисничког центра (*VNS2* алгоритам).

### 6.7.1 Формирање редоследа производа

Формирање редоследа производа извршено је коришћењем методе *VNS* са детерминистичким одабиром решења. Циљ претраге је одређивање таквог редоследа производа за који ће се добити решење које је ближе оптималном. Решења  $z$  су низови индекса производа и корисничких центара (нпр. за  $nk = 3$ ,  $np = 2$ :  $z = [k2p1 k1p2 k1p1 k3p1 k2p2 k3p2]$ ).

Почетно решење представља низ индекса одређен сортирањем производа према критеријуму тражње корисничког центра. Сортирање је извршено од већих ка мањим тражњама корисничких центара. На почетно решење је примењен алгоритам *VNS2* који ће бити објашњен у 6.7.2. Резултати су вредности  $f0l_{ijklmp}$  ( $i=1, \dots, ni$ ,  $j=1, \dots, nj$ ,  $k = 1, \dots, nk$ ,  $l=1, \dots, nl$ ,  $m=1, \dots, nm$ ,  $p=1, \dots, np$ ) које су добијене на следећи начин:

$$\begin{aligned}
f01_{ijklmp} = & \theta_p \cdot d_{kp} + \lambda_p \cdot (y-r) \cdot d_{kp} - \\
& - (g_j \cdot \frac{d_{kp}}{dj_j} + a_l \cdot \frac{y \cdot d_{kp}}{dl_l} + b_m \cdot \frac{r \cdot d_{kp}}{dm_m} + \tau_{ip} \cdot d_{kp} + \varphi_{jp} \cdot d_{kp} + \gamma_{kp} \cdot (1+y) \cdot d_{kp} + \\
& + \eta_{lp} \cdot y \cdot d_{kp} + \mu_{mp} \cdot r \cdot d_{kp} + D_{ij}^1 \cdot d_{kp} + D_{jk}^2 \cdot d_{kp} + D_{kl}^3 \cdot y \cdot d_{kp} + D_{li}^4 \cdot (y-r) \cdot d_{kp} + \\
& + D_{lm}^5 \cdot r \cdot d_{kp} + D_{ki}^6 \cdot (1-y) \cdot d_{kp} + D_{mi}^7 \cdot r \cdot d_{kp} )
\end{aligned} \tag{14}$$

Једначина (14) представља профит добијен од корисничког центра  $k$  за производ  $p$  коме је додељен производни центар  $i$ , дистрибутивни центар  $j$ , депо за разврставање  $l$  и центар за одлагање отпада  $m$ .

У наставку је дат алгоритам *VNS1* хеуристике. Суседство  $N^h$  је формирано у окружењу тренутно најбољег решења  $z$ . У сваком кораку  $h$  из суседства  $N^h$  се врши одабир  $smax(h)$  решења  $z'$ . Након тога се, на сваки производ у сваком корисничком центру, примењује алгоритам *VNS2*. Као резултат, добијају се вредности  $f01'_{ijklmp}$ . Сума свих вредности  $f01'_{ijklmp}$  представља износ  $f1(z')$ . Низ индекса производа  $zp'$  добија се сортирањем износа  $f01'_{ijklmp}/d_{kp}$  од најмањег ка највећем. Вредности  $f01'_{ijklmp}/d_{kp}$  представљају профит по јединици сваког производа. Производи са негативним вредностима  $f01'_{ijklmp}/d_{kp}$  се искључују из разматрања док друга функција циља не достигне вредност  $\varepsilon_2$ . Ово искључивање се изводи почевши од првог елемента низа  $zp'$ . У свакој итерацији, вредности  $f1(z')$  и  $f2(z')$  се ажурирају. Затим се израчунава вредност треће функције циља  $f03'_{ijklp}$ . Израчунавање се врши на следећи начин:

$$f03_{ijklp} = \sum_i \sum_j \sum_l v_{ip} \cdot (d_{kp} - (1-y+r) \cdot d_{kp}) + \sum_i \sum_j w_{ip} \cdot d_{kp} \tag{15}$$

Вредности  $f03'_{ijklp}$  се израчунавају за све производе који нису искључени. Вредност треће функције циља  $f3(z')$  представља суму вредности  $f03'_{ijklp}$ . Претраживање *VNS2\** се врши за сваки производ, док функција  $f3(z')$  не достигне границу  $\varepsilon_3$ . Претраживањем *VNS2\** обухваћени су само производни центри који имају ниже

еколошке параметре у односу на производне центре који су додељени производу у претходној итерацији. Вредности  $f1^*(z')$  и  $f3^*(z')$  представљају измењене вредности прве и треће функције циља. Вредности  $df1_{ijklmp1}$  и  $df3_{ijklp1}$  представљају разлике између  $f1(z')-f1^*(z')$  и  $f3(z')-f3^*(z')$ . Вредности  $df1_{ijklmp2}$  и  $df3_{ijklp2}$  представљају промене у вредностима функција  $f1(z')$  и  $f3(z')$ , ако је производ  $p$  искључен разматрања. Низ индекса производа  $ze'$  добија се сортирањем вредности  $df3_{ijklp1} / df1_{ijklmp1}$  и  $df3_{ijklp2} / df1_{ijklmp2}$  од највеће ка најмањој. Минимизација треће функције циља извршава се заменом решења добијених алгоритмом VNS2 решењима добијеним алгоритмом VNS2\* или искључивањем производа из ланца снабдевања. Производи могу бити искључени из ланца снабдевања, ако гранична вредност друге функције циља није достигнута. Замена и искључивање се извршавају почевши од првог елемента низа  $ze'$ . У свакој итерацији, вредности  $f1(z')$ ,  $f2(z')$  и  $f3(z')$  се ажурирају.

Ако је  $f1(z') > f1(z)$ , решење  $z$  се ажурира и алгоритам се враћа у суседство  $N^l$ . Такође, ажурирају се и вредности  $f1$ ,  $f2$ ,  $f3$ ,  $x_{kp}$ ,  $ze$  и  $zp$ . У супротном, алгоритам прелази на следеће решење из суседства  $N^h$ , ако максимални број решења  $smax_h$  није достигнут. Ако је максимални број решења  $smax_h$  достигнут, алгоритам прелази у следеће суседство  $N^{h+1}$ . Алгоритам се завршава када је достигнуто суседство  $N^{hmax}$  и  $smax_{hmax}$ , и није пронађено боље решење.

### **Algorithm 1: Хеуристика VNS1 – Формирање редоследа производа**

**Input:** Скуп структура суседстава  $N^h$  за  $h = 1:hmax$

$z \leftarrow$  почетно решење (производи су сортирани према захтевима корисничких центара)

#### **Initialization**

$h \leftarrow 1$ ;

**while**  $h \leq hmax$

$s \leftarrow 1$ ;  $found \leftarrow 0$ ;

**while**  $(s \leq smax_h) \wedge (found = 0)$

$z' \leftarrow$  neighbor in  $N^h(z)$

**for**  $i = 1:nk \cdot np$

$k, p = z'$ ;

$x_{kp}, f01_{ijklmp} \leftarrow$  VNS2 search (i,j,k,l,m,p);

*/Провера  $smax_h$  решења у  $N^h$ /*

*/Размрдавање/*

*/Претраживање локација и рута за сваки производ/*

**end**

```

f1(z') = sum(f01ijklmp); /Профит за испоручене све
количине производа/
sort f01ijklmp /dkp; /Сортирање профита по
јединици производа/
zp' ← k, p индекси корисничких центара и производа у сортираном f01ijklmp/dkp;
f2(z') = 0; e1 = 0; k, p = zp'1;
while f2(z') + α · dkp + (1-α) · y · dkp < ε2 ^ f01ijklmp <= 0 /Искључивање производа са
негативним профитом/
    e1 = e1 + 1; k, p = zp'e;
    f1(z') = f1(z') - f01ijklmp;
    f2(z') = f2(z') + α · dkp + (1-α) · y · dkp;
end
for i = e1+1:nk · np
    k, p = zp'i;
    calculate f03ijklp(xkp)
end
    f3(z') = sum(f03kp); /Израчунавање вредности треће
функције циља/
if f3(z') > ε3
    for i = (e1+1):nk · np
        k, p = zp'i;
        xkp*, f1ijklmp* ← VNS2* search (i,j,k,l,m,p); /Претраживање локација и рута које
укључује производне центре са нижим
еколошким параметрима у односу на
претходну итерацију/
        df1ijklmp1 = f1(z') - f1*(z'); /Промена профита/
        df3ijklp1 = f3(z') - f3*(z'); /Промена вредности треће функције
циља/
        df1ijklmp2 = f1(z') - f01ijklmp; /Промена профита уколико су
производи искључени/
        df3ijklp2 = f3(z') - f03ijklp; /Промена вредности треће функције
циља ако су производи искључени/
    end
    sort (df3ijklp1 / df1ijklmp1, df3ijklp2 / df1ijklmp2) /Сортирање производа са промењеним
f3 и f1/
    ze' ← kp индекси корисничких центара и производа у сортираном dfijklmp;
    e2=0;
    while f3(z') > ε3 /Смањење вредности треће функције
циља/
        e2 = e2 + 1;
        k, p = ze'e2;
        if df3kp1 / df1kp1 /Замена решења/
            f1(z') = f1*(z');
            f3(z') = f3*(z');
            xkp = xkp*;
        end
    if df3ijklp2 / dfijklmp2 ^ f2(z') + α · dkp + (1-α) · y · dkp < ε2 /Искључивање производа/

```

```

    f1(z') = f1(z) - f01ijklmp';
    f2(z') = f2(z) + α · dkp + (1-α) · y · dkp;
    f3(z') = f3(z) - f03ijklp';
  end
end
end
if f1(z') > f1(z)                               /Move or Not/
  z ← z';
  f1(z) ← f1(z'); f2(z) ← f2(z'); f3(z) ← f3(z');
  for k = 1:nk and p = 1:np
    xkp ← x'kp
  end
  zp ← zp'; ze ← ze';
  h ← 1; s ← 1; found ← 1;
else
  s ← s + 1;                                     /Следеће решење из истог суседства/
end
end
if found = 0
  h ← h + 1;                                     /Промена суседства/
end
end
return f1, f2, f3, xkp;

```

Прво суседство  $N^l$  укључује решења добијена заменом позиција елемената одабраних у тренутно најбољем решењу  $z$ . Одабирају се она решења са замењеним позицијама производа додељених одређеном дистрибутивном центру, депоу за разврставање и центру за одлагање отпада. Укупан број решења  $max(1)$  изабаран из суседства  $N^l$  представља број отворених центара ( $j, 1, m$ ) у тренутно најбољем решењу. Пример решења  $z'$  за три корисничка центра ( $nk=3$ ) и два производа ( $np=2$ ) је представљен на слици 6.2.

assigned to j1:	k1p2	k1p1	k3p1	k2p2									
z:	k1p1	k1p2	k2p1	k2p2	k3p1	k3p2	→	k3p1	k2p2	k2p1	k1p2	k1p1	k3p2

Слика 6.2. Пример прве структуре суседства за моделе  $LRP\_MOD\_1-3$

Остала суседства су добијена заменом  $n, 2 \cdot n, \dots, max \cdot n$  елемената у тренутно најбољем решењу  $z$  на прво место у низу. Укупан број ових суседстава  $max$  рачуна се као  $tn/n$ . Вредност  $tn$  представља број производа код којих је вредност  $f01_{ijklmp}/d_{kp}$  нижа од

максималне вредности  $(f0I_{ijklmp}/d_{kp})/2$ . Избор по једног решења  $z'$  из суседства  $N^h$  врши се у свакој итерацији  $h$  ( $smax(h)=1$ ). Суседство  $N^2$  обухвата решења добијена премештањем  $n$  елемената тренутно најбољег решења  $z$  на првих  $n$  места у низу. Број  $n$  представља проценат од укупног броја производа ( $nk \cdot np$ ). Решења добијена премештањем првих  $n$  елемената у низу  $z_p$  се бирају из суседства  $N^2$ . Суседство  $N^3$  обухвата решења добијена премештањем  $2 \cdot n$  елемената тренутно најбољег решења  $z$  на првих  $2 \cdot n$  места у низу. Решења добијена премештањем првих  $2 \cdot n$  елемената у низу  $z_p$  се бирају из суседства  $N^3$ . Последње суседство  $N^{max+1}$  обухвата решења добијена премештањем  $max \cdot n$  елемената тренутно најбољег решења  $z$ . Решења добијена премештањем првих  $max \cdot n$  елемената у низу  $z_p$  се бирају из суседства  $N^{max+1}$ . Пример структуре суседстава за три корисничка центра ( $nk=3$ ) и два производа ( $np=2$ ) је представљен на слици 6.3.

z <sub>p</sub> :	k <sub>2p1</sub>	k <sub>1p2</sub>	k <sub>1p1</sub>	k <sub>3p1</sub>	k <sub>2p2</sub>	k <sub>3p2</sub>		h <sub>max</sub> =2	n=2				
z:	k <sub>1p1</sub>	k <sub>1p2</sub>	k <sub>2p1</sub>	k <sub>2p2</sub>	k <sub>3p1</sub>	k <sub>3p2</sub>	→	k <sub>2p1</sub>	k <sub>1p2</sub>	k <sub>1p1</sub>	k <sub>2p2</sub>	k <sub>3p1</sub>	k <sub>3p2</sub>
z:	k <sub>1p1</sub>	k <sub>1p2</sub>	k <sub>2p1</sub>	k <sub>2p2</sub>	k <sub>3p1</sub>	k <sub>3p2</sub>	→	k <sub>1p1</sub>	k <sub>3p1</sub>	k <sub>1p2</sub>	k <sub>2p1</sub>	k <sub>2p2</sub>	k <sub>3p2</sub>

Слика 6.3. Пример осталих структура суседства за моделе *LRP\_MOD\_1-3*

Укупан број суседстава је  $hmax=1+max$ : прво суседство (слика 6.2) и  $max$  број суседстава (слика 6.3).

### 6.7.2 Претраживање локација и рута – алгоритам *VNS2*

У наставку је приказан *VNS2* алгоритам. У алгоритму *VNS2*, допуштено решење  $x_{kp}$  је представљено као секвенца  $R_{kp}$  која садржи индексе производних центара  $i$ , дистрибутивних центара  $j$ , депоа за разврставање  $l$  и центара за одлагање отпада  $t$  ( $R_{kp} = [i j l t]$ ) додељених производу  $p$  у корисничком центру  $k$ . Почетно решење  $x_{kp}$  бира се случајним избором. За локално претраживање користи се *VND* метода. У фази размрдавања, решење  $x_{kp}'$  се бира случајно из суседства  $N^h$ . Суседство  $N^h$  формира се у околини тренутно најбољег решења  $x_{kp}'$ . У свакој итерацији  $h$ , из



суседства  $N^h$  случајним избором се врши одабир  $(ni + nj + nl + nm) / ((nc+1)-h)$  решења  $x_{kp}'$ . Број врста локација које се налазе у решењу означен је са  $nc$  ( $nc=4$ ). Ако је  $f01_{ijklmp}(x_{kp}') > f01_{ijklmp}(x_{kp})$ , решење  $x_{kp}$  се ажурира и алгоритам се враћа у структуру суседства  $N^l$ . У супротном, алгоритам прелази у ново суседство  $N^h$ , ако максимални број решења  $max_h$  није достигнут. Ако је максимални број решења  $max_h$  достигнут, алгоритам прелази у суседство  $N^{h+1}$ . Алгоритам се завршава када је достигнуто суседство  $N^{hmax}$  и  $max_{hmax}$ , и није пронађено боље решење.

**Алгоритам 2: VNS2 хеуристика за претрагу локација и рута по сваком производу**

**Input:** Скуп структура суседстава  $N^h$  за  $h = 1, \dots, hmax$   
 $x_{kp} \leftarrow$  почетно решење (изабрано случајним избором)  
 $h \leftarrow 1$ ;  
**while**  $h \leq hmax$   
     $s \leftarrow 1$ ;  $found \leftarrow 0$ ;  
    **while**  $(s \leq (ni+nj+nl+nm)/((nc+1)-h)) \wedge (found = 0)$       /Избор решења из  $N^h$ /  
         $x_{kp}' \leftarrow$  neighbor in  $N^h(x_{kp})$  randomly selected      /Размрдавање/  
         $x_{kp}'' \leftarrow$  VND local search ( $x_{kp}'$ )      /Локално претраживање/  
        **if**  $f01_{kp}(x_{kp}'') > f01_{ijklmp}(x_{kp})$       /Move or Not/  
             $x_{kp} \leftarrow x_{kp}''$ ;  
             $h \leftarrow 1$ ;  $s \leftarrow 1$ ;  $found \leftarrow 1$ ;  
        **else**  
             $s = s + 1$ ;      /Следеће решење из истог суседства/  
    **end**  
    **end**  
    **if**  $found = 0$   
         $h \leftarrow h + 1$ ;      /Промена суседства/  
    **end**  
**end**  
**return**  $x_{kp}, f01_{ijklmp}$

### 6.7.2.1 Размрдавање

Коришћена VNS хеуристика користи четири структуре суседстава у фази размрдавања. Суседства се формирају на основу секвенце  $R_{kp}$ . Пример структура суседстава коришћених у фази размрдавања за пети кориснички центар и четврти производ ( $k=5, p=4$ ) представљен је на слици 6.4.

$R^{54}$ :	i4	j8	l7	m9	→	i9	j8	l7	m9	$N^1$
$R^{54}$ :	i4	j8	l7	m9	→	i10	j7	l7	m9	$N^2$
$R^{54}$ :	i4	j8	l7	m9	→	i12	j4	l9	m9	$N^3$
$R^{54}$ :	i4	j8	l7	m9	→	i15	j3	l12	m4	$N^4$

Слика 6.4. Пример структуре суседстава за фазу размрдавање за моделе  
*LRP\_MOD\_1-3*

Прво суседство  $N^1$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају три заједничке и једну различиту тачку. Друго суседство  $N^2$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају две заједничке и две различите тачке. Треће суседство  $N^3$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају једну заједничку и три различите тачке. Четврто суседство  $N^4$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају све различите тачке. Решења са дистрибутивним центрима, депоима за разврставање и центрима за одстрањивање којима не може да се додели производ за који се врши претраживање због прекорачења капацитета - не улазе ни у једно суседство.

### 6.7.2.2 Локално претраживање – VND метода

У наставку је дат алгоритам VND методе. Примењена VND хеуристика користи четири структуре суседстава. Алгоритам проверава сва решења  $stax_h$  у суседству  $N^h$  и прелази у суседство  $N^{h+1}$ , уколико у суседству  $N^h$  није пронађен нови локални оптимум. У супротном, алгоритам се враћа на суседство  $N^1$  и ажурира решење  $x_{кр}$ . Алгоритам се завршава када стигне до суседства  $N^{hmax}$  и у њему не може да пронађе нови локални оптимум.

**Algorithm 3: VND метод – локално претраживање за VNS2 хеуристику**

**Input:** Скуп структура суседстава  $N^h$  за  $h = 1, \dots, hmax$

$x_{кр}$  ← почетно решење (изабрано у фази размрдавања за VNS2)

$h \leftarrow 1$ ;

```

while h ≤ hmax
  xkp ← solution in Nh(xkp" )
  s ← 1; found ← 0;
  while (s ≤ smaxh) ^ (found = 0)
    if f01ijklmp(xkp) > f01ijklmp(xkp" )
      xkp" ← xkp;
      h ← 1; s ← 1; found ← 0;
    else
      s ← s + 1;
    end
  end
  if found = 0
    h ← h + 1;
  end
end
return xkp" ;

```

/Провера решења из N<sup>h</sup>/  
/Move or Not/

/Следеће решење из истог  
суседства/

/Промена суседства/

Пример структура суседстава које су коришћене приликом локалног претраживања за пети кориснички центар и четврти производ ( $k=5, p=4$ ), је представљен на слици 6.5.

R <sup>54</sup> :	i4	j8	l5	m2	→	i5	j8	l5	m2	N <sub>1</sub>
R <sup>54</sup> :	i4	j8	l5	m2	→	i4	j10	l5	m2	N <sub>2</sub>
R <sup>54</sup> :	i4	j8	l5	m2	→	i4	j10	l7	m2	N <sub>3</sub>
R <sup>54</sup> :	i4	j8	l5	m2	→	i4	j10	l7	m4	N <sub>4</sub>

Слика 6.5. Пример структуре суседства за локално претраживање за моделе

*LRP\_MOD\_1-3*

Прво суседство  $N^1$  обухвата сва решења која, у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим производних центара. Друго суседство  $N^2$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим дистрибутивних центара. Она решења која обухватају дистрибутивне центре код којих је капацитет прекорачен, не улазе у суседство. Треће суседство  $N^3$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим депоа за разврставање. Она решења која обухватају депое за разврставање код којих је капацитет прекорачен, не улазе у суседство.

Четврто суседство  $N^4$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим депоа за одстрањивање. Она решења која обухватају центре за одлагање отпада код којих је капацитет прекорачен, не улазе у суседство.

### 6.7.3 Резултати за модел *LRP\_MOD\_1*

Модел који је предложен у овом делу рада је илустрован примерима. Оптимално решење за мали број чворова је израчунато користећи солвер *GLPK* како би се извршила евалуација предложеног модела. *GLPK* је солвер који користи методу гранања и ограничавања. Метода гранања и ограничавања заснива се на принципу поделе сложених проблема на мање делове. Простор решења се дели тако што се вредности појединих променљивих ограничавају, док се проценом максималне вредности решења у поједином делу могу одбацити делови простора решења које даје најбоље вредности функције циља. Метода гранања и ограничавања садржи три основна корака: гранање (енгл. *branch*), ограничавање (енгл. *bound*) и процењивање (енгл. *fathoming*).

Алгоритам за *VNS* хеуристику је кодиран у *MATLAB* језику. Сва тестирања су извршена на процесору *AMD Triple Core Processor 2.10 GHz*. Параметри и за мале и за велике проблеме су представљени у табели 6.4. За велике проблеме, трошкови транспорта су генерисани. Вредности  $\lambda_p$  и  $\phi_{ip}$  су израчунате као проценти јединичне цене производа  $\theta_p$ .

Табела 6.4. Параметри за мале и велике тест проблеме за модел *LRP\_MOD\_1*

$y=0.4$	$g_j = \text{uniform}(110.000;140.000)$	$\theta_p = \text{uniform}(200;2.800)$	$\phi_{jp} = \text{uniform}(3;5)$
$r=0.1$	$a_l = \text{uniform}(40.000;70.000)$	$\lambda_p = 30\%$	$\gamma_{kp} = \text{uniform}(2;4)$
$d_{kp}=18.000$	$b_m = \text{uniform}(25.000;40.000)$	$\phi_{ip} = \text{uniform}(50\%;70\%)$	$\eta_{ip} = \text{uniform}(3;5)$
	$N_j^1 = \text{uniform}(350.000;3.000.000)$	$\alpha = 70\%$	$\mu_{mp} = \text{uniform}(2;4)$
	$N_l^2 = \text{uniform}(270.000;2.000.000)$	$v_{ip} = \text{uniform}(0,6;1)$	
	$N_m^3 = \text{uniform}(80.000;1.000.000)$	$w_{ip} = \text{uniform}(0,5;1)$	

Најпре је представљено поређење између оптималних решења и VNS хеуристике. Ово поређење је представљено за мале тест проблеме са највише до четрдесет корисничких центара. Резултати су представљени у табелама 6.5-6.6. Величина 'gap' представља проценат одступања решења добијених хеуристиком у поређењу са оптималним решењем. 'Gap' је израчунат само за мале проблеме.

Табела 6.5. Оптимална решења је тест примере са малим бројем чворова за модел

*LRP\_MOD\_1*

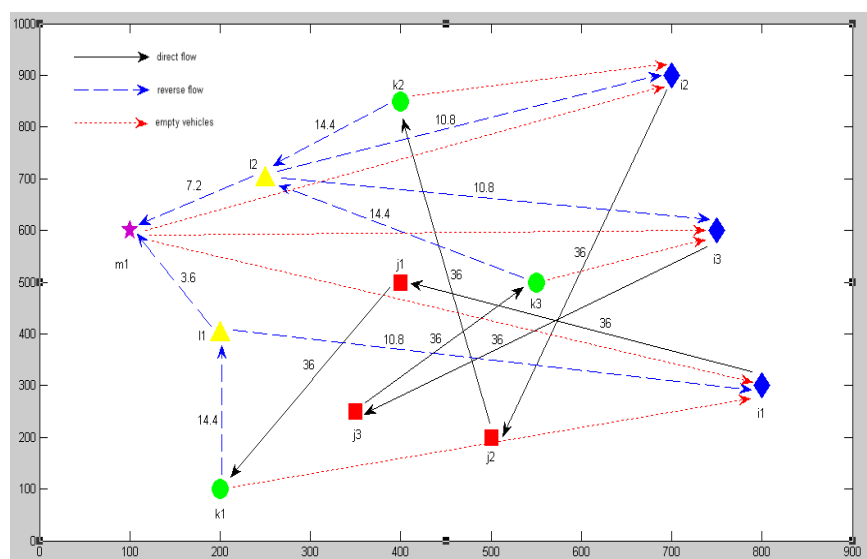
P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	f1	f2	f3	CPU (s)
2	3	3	3	2	1	17,712	130,000	65,923,387	17,712	106,108	1.000
						8,856	130,000	62,410,409	8,856	119,884	1.000
						0	130,000	56,326,571	0	130,000	0.000
						17,712	140,000	65,923,387	17,712	106,108	0.000
						8,856	140,000	62,410,409	8,856	119,884	0.000
						0	140,000	57,478,129	0	133,280	0.000
3	3	4	10	4	2	3,283,200	625,000	112,330,948	88,560	546,620	1.000
						1,641,600	625,000	100,233,999	44,280	617,290	1.000
						0	625,000	41,753,085	0	625,000	1.000
						3,283,200	670,000	112,330,948	88,560	546,620	1.000
						1,641,600	670,000	100,233,999	44,280	617,290	1.000
						0	670,000	71,985,096	0	655,000	1.000
3	4	6	20	5	3	6,566,400	1,250,000	323,388,725	177,120	1,046,320	3.000
						3,283,200	1,250,000	308,892,735	88,560	1,180,750	2.000
						0	1,250,000	251,208,128	0	1,250,000	3.000
						6,566,400	1,300,000	323,388,725	177,120	1,046,320	2.000
						3,283,200	1,300,000	308,892,735	88,560	1,180,750	2.000
						0	1,300,000	275,964,327	0	1,300,000	2.000
4	6	11	40	8	4	17,510,400	3,250,000	699,358,406	472,320	2,875,150	10.000
						8,755,200	3,250,000	687,066,652	236,160	3,245,190	10.000
						0	3,250,000	341,349,491	0	3,250,000	11.000
						17,510,400	3,500,000	699,358,406	472,320	2,875,150	10.000
						8,755,200	3,500,000	687,066,652	236,160	3,245,190	10.000
						0	3,500,000	613,084,812	0	3,500,000	10.000

Граница  $\epsilon_2$  има три вредности у зависности да ли је корисничким центрима испоручено 80%, 90% и 100% производа. Граница  $\epsilon_3$  има две вредности у зависности од нивоа примене еколошких материјала и технологија. За мали број чворова, разлика између оптималног решења и решења добијених коришћењем хеуристике је до 18.30%, али су решења добијена за знатно краће време коришћењем хеуристике. Графички приказ урађен је за тест проблем чије су димензије [2 3 3 3 2 1]. Резултати за овај тест пример су приказани у Табели 6.5. Локације, руте и количине испоручених производа на свакој рути (бројеви изнад стрелица) представљени су на

слици 6.8. Количине производа приказане су у размери 1/1000. Резултати за проблеме великих димензија су приказани у табели 6.7-6.8.

Табела 6.6. VNS хеуристика за тест примере са малим бројем чворова - *LRP\_MOD\_1*

P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	f1	f2	f3	CPU (s)	Gap
2	3	3	3	2	1	17,712	130,000	65,854,328	17,712	106,728	0.039	0.10
						8,856	130,000	62,059,716	8,856	120,564	0.010	0.56
						0	130,000	54,716,099	0	127,840	0.012	2.86
						17,712	140,000	65,854,328	17,712	106,728	0.010	0.10
						8,856	140,000	62,059,716	8,856	120,564	0.011	0.56
						0	140,000	56,784,390	0	134,100	0.010	1.21
3	3	4	10	4	2	3,283,200	625,000	110,093,399	3,283,200	544,560	0.034	1.99
						1,641,600	625,000	97,375,097	1,641,600	615,840	0.031	2.85
						0	625,000	34,113,195	0	625,000	0.099	18.30
						3,283,200	670,000	110,093,399	3,283,200	544,560	0.031	1.99
						1,641,600	670,000	97,375,097	1,641,600	615,840	0.033	2.85
						0	670,000	70,389,638	0	662,520	0.036	2.22
3	4	6	20	5	3	6,566,400	1,250,000	318,890,040	6,566,400	1,049,445	0.225	1.39
						3,283,200	1,250,000	300,715,100	3,283,200	1,179,540	0.203	2.65
						0	1,250,000	239,506,981	0	1,250,000	0.215	4.66
						6,566,400	1,300,000	318,890,040	6,566,400	1,049,445	0.202	1.39
						3,283,200	1,300,000	300,715,100	3,283,200	1,179,540	0.212	2.65
						0	1,300,000	264,118,637	0	1,300,000	0.300	4.29
4	6	11	40	8	4	17,510,400	3,250,000	645,718,363	17,510,400	2,883,310	3.059	7.67
						8,755,200	3,250,000	633,781,259	8,755,200	3,250,000	2.340	7.76
						0	3,250,000	317,573,523	0	3,250,000	1.738	6.97
						17,510,400	3,500,000	645,718,363	17,510,400	2,883,310	2.952	7.67
						8,755,200	3,500,000	634,627,958	8,755,200	3,253,380	2.280	7.63
						0	3,500,000	547,581,017	0	3,500,000	3.143	10.68



Слика 6.6. Руте и број возила на свакој руте за модел *LRP\_MOD\_1*

Табела 6.7. VNS хеуристика за већи број чворова (80-400 корисничких центара) за

модел *LRP\_MOD\_1*

TEST	dimensions						f2 limits	f3 limits	f1	f2	f3	CPU
	P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^9$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	(s)
1							0,88	6,00	0,96	0,64	5,79	1.77
2							0,44	6,00	0,94	0,44	6,00	2.91
3							0	6,00	0,24	0	6,00	18.33
4	5	7	20	80	15	7	0,88	6,40	0,96	0,64	5,79	1.72
5							0,44	6,40	0,96	0,44	6,12	1.80
6							0	6,40	0,74	0	6,40	7.01
7							2,06	13,50	3,75	2,06	12,47	43.05
8							1,03	13,50	3,53	1,03	13,50	43.44
9							0	13,50	1,44	0	13,50	46.98
10	7	8	23	100	17	8	2,06	14,50	3,75	2,06	12,47	42.93
11							1,03	14,50	3,59	1,03	13,99	55.17
12							0	14,50	3,08	0	14,50	43.46
13							4,72	31,00	10,58	4,72	27,77	173.09
14							2,36	31,00	10,34	2,36	30,95	189.16
15							0	31,00	5,53	0	31,00	176.82
16	8	10	26	200	20	9	4,72	33,00	10,58	4,72	27,77	171.68
17							2,36	33,00	10,28	2,36	31,20	116.78
18							0	33,00	9,00	0	33,00	280.11
19							7,08	46,00	15,46	7,08	41,52	220.09
20							3,54	46,00	14,69	3,54	46,00	202.96
21							0	46,00	8,16	0	46,00	289.55
22	8	10	26	300	21	9	7,08	49,50	15,46	7,08	41,52	220.12
23							3,54	49,50	14,82	3,54	46,75	167.30
24							0	49,50	12,30	0	49,50	419.65
25							9,44	60,00	18,04	9,44	55,06	293.54
26							4,72	60,00	16,54	4,72	60,00	368.52
27							0	60,00	5,29	0	60,00	362.19
28	8	11	30	400	22	10	9,44	64,00	18,04	9,44	55	293.25
29							4,72	64,00	16,84	4,72	61,95	190.81
30							0	64,00	11,59	0	64,00	608.76

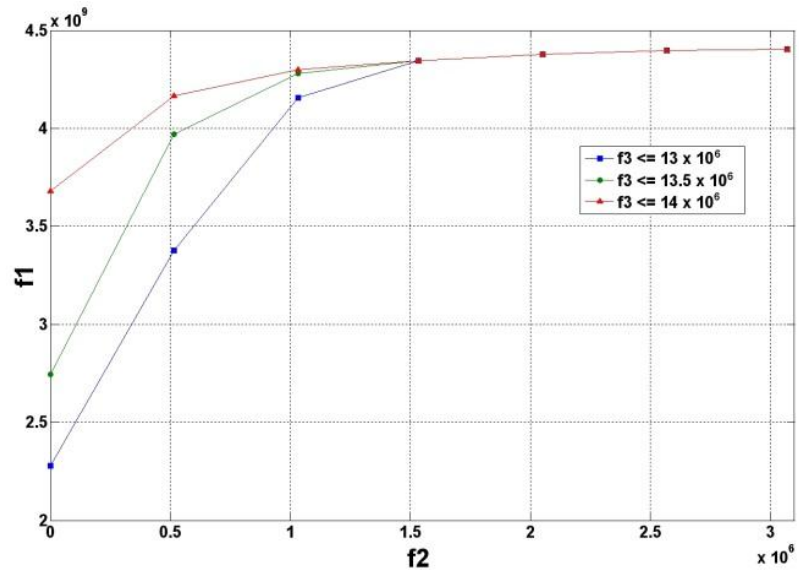
Табела 6.8. VNS хеуристика за већи број чворова (500 корисничких центара) за модел *LRP\_MOD\_1*

TEST	dimensions						f2 limits	f3 limits	f1	f2	f3	CPU
	P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	x10 <sup>6</sup>	x10 <sup>6</sup>	x10 <sup>9</sup>	x10 <sup>6</sup>	x10 <sup>6</sup>	(s)
31							11,80	78,00	23,44	11,80	69,45	267.47
32							5,90	78,00	20,10	5,90	77,99	290.29
33							0	78,00	2,99	0	78,00	549.80
34	8	11	31	500	24	10	11,80	83,00	23,44	11,80	69,45	265.47
35							5,90	83,00	20,10	5,90	78,10	235.48
36							0	83,00	10,37	0	83,00	1,195.53

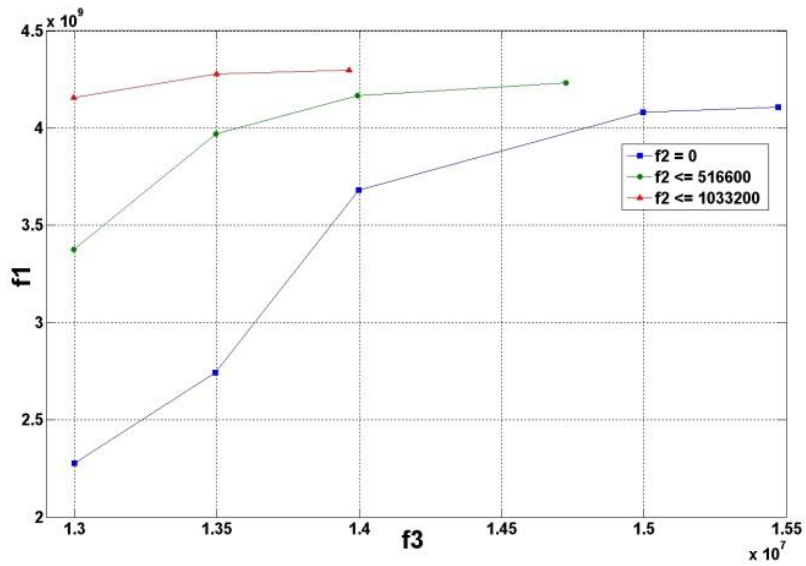
Парето криве за профит и ниво задовољења потреба корисника, и профит и коришћење нееколошких материјала и технологија су приказане на сликама 6.9 и 6.10. Први график приказује Парето криву за очекивани профит у односу на ниво задовољења потреба корисника где је величина 'Коришћење нееколошких материјала и технологија' фиксна. Профит се повећава када ниво задовољења потреба корисника опада, зато што се у ланцу снабдавања у том случају налази мање производа који не доносе профит (производи са негативним профитом). Када су сви производи са негативним профитом искључени из ланца снабдевања, профит достиже максималну вредност. Максимални прфот износи  $4,4038 \times 10^9$ . Ако ниво задовољења потреба корисника настави да пада, профит ће се, такође, смањивати.

Други график приказује Парето криву за очекивани профит у односу на коришћење нееколошких материјала и технологија где је величина ниво задовољења потреба корисника фиксна. Профит се смањује када повећавају улагања у коришћење нееколошких материјала и технологија, како је и приказано на сликама 6.9 и 6.10. Графици приказани на сликама 6.7 и 6.8 приказују и да се три наведене функције циља конфронтирају.





Слика 6.7. Ниво задовољења потреба корисника у односу на профит за модел *LRP\_MOD\_1*



Слика 6.8. Коришћење неколошких материјала и технологија у односу на профит за модел *LRP\_MOD\_1*

#### 6.7.4 Анализа осетљивости за модел *LRP\_MOD\_1*

У пракси постоји неколико параметара који показују карактеристике неизвесности. У овој дисертацији, разматраће се анализе осетљивости два параметра. Метода која ће бити коришћена за анализу осетљивости је 'One-at-a-time (OAT)'. Ово је један од најједноставнијих и најраспрострањенијих приступа у коме се врши промена по једног параметра у једном извршавању, како би се видели ефекти овог одређеног параметра на излазни резултат. 'One-at-a-time' метода се заснива на:

- Промени вредности једног параметра или променљиве, док су остали на номиналним, базичним вредностима
- Враћање промењене вредности променљиве на номиналну вредности, уз мењање вредности друге променљиве.

Анализа осетљивости се може мерити посматрањем промена у вредностима излаза. Излазне вредности добијене на овај начин недвосмислено указују да је до промене вредности излаза дошло управо због промене вредности одређеног параметра или променљиве. Такође, променом вредности само једне променљиве у одређеном тренутку, остале варијалбе задржавају своје номиналне вредности, што повећава могућност поређења резултата. 'One-at-a-time' метода се веома често користи због својих практичних разлога. У случају појаве одређених недостатака, коришћењем *OAT* методе, може се препознати због вредности ког параметра је дошло до тог недостатка.

Недостатак ове методе је што она не узима у обзир симулатане промене вредности више параметара у исто време, те она не може да утврди интеракције које постоје између улазних параметара.

У првој анализи осетљивости, разматран је очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника и проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање. Вредности ових параметара су следеће:

$$y = 0.4$$

$$r = 0.1$$

У табели 6.9. представљени су резултати четрнаест тестова са променљивим вредностима  $y$  и  $r$ . Претпоставка је да очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника варира између 15% и 40%, и стога, проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање варира између 5% и 15% од укупног броја производа. Анализа осетљивости извршена је за пример чије су димензије следеће: [8 10 26 300 21 9]. Анализе осетљивости су урађене за примере у којима се испоручена количина производа 80%.

Табела 6.9. Анализа осетљивости за различите вредности  $y$  и  $r$  за модел *LRP\_MOD\_1*

$y$	$r$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	gap
15.00%	5.00%	6,436,800	52,000,000	13,833,740,198	6,436,800	46,629,939	0.00%
	10.00%	6,436,800	53,500,000	12,730,328,307	6,436,800	47,843,244	7.98%
20.00%	5.00%	6,566,400	50,500,000	14,345,666,593	6,566,400	45,408,324	0.00%
	10.00%	6,566,400	52,000,000	13,324,365,831	6,566,400	46,588,992	7.12%
	15.00%	6,566,400	53,500,000	12,201,588,238	6,566,400	47,885,610	14.95%
30.00%	5.00%	6,825,600	47,500,000	15,530,168,464	6,825,600	42,738,525	0.00%
	10.00%	6,825,600	49,000,000	14,338,213,613	6,825,600	44,112,288	7.68%
	15.00%	6,825,600	50,500,000	13,179,909,632	6,825,600	45,427,137	15.13%
35.00%	5.00%	6,955,200	46,000,000	15,938,792,013	6,955,200	41,617,392	0.00%
	10.00%	6,955,200	47,500,000	14,913,167,008	6,955,200	42,734,580	6.43%
	15.00%	6,955,200	49,000,000	13,764,702,776	6,955,200	44,053,707	13.64%
40.00%	5.00%	7,084,800	44,500,000	16,472,067,018	7,084,800	40,262,643	0.00%
	<b>10.00%</b>	<b>7,084,800</b>	<b>46,000,000</b>	<b>15,466,822,289</b>	<b>7,084,800</b>	<b>41,524,659</b>	<b>6.10%</b>
	15.00%	7,084,800	47,500,000	14,287,584,088	7,084,800	42,844,935	13.26%

Циљ ове анализе је да покаже како промене у количинама производа који су враћени од стране корисника и који су одстрањени из даље употребе утичу на вредност функције циља. Вредност 'gap' је израчуната као проценат од најбоље вредности функције циља за одређену вредност  $u$  и променљиве вредности  $r$  (нпр.  $(100\% - (10,384,849,626/11,624,646,773))$ ). Сврха ове анализе је да покаже како промене у количинама враћених производа које су одстрањене из даље производње, а не враћене у производни ток, утичу на смањење профита. Вредност прве функције циља варира до 15.13%, ако количина производа који су одстрањени из даље употребе варира од 5-15%, а проценат враћених производа износи 30%.

Такође, вредност прве функције циља знатно варира уколико се мења количина производа који су враћени од стране корисника. При промени количине производа који су враћени од стране корисника од 15% до 40%, вредност функције циља варира и до 16.02% (нпр.  $(100\% - (13,833,740,198/16,472,067,018))$ ).

У овом делу дисертације ће бити представљена анализа осетљивости вредности функције циља у односу на тражњу. Промена вредности функције циља у зависности од промене тражње, представљена је у табели 6.10. Анализа осетљивости извршена је за пример чије су димензије следеће: [8 10 26 300 21 9].

Табела 6.10. Анализа осетљивости за различите вредности тражње за модел

*LRP\_MOD\_I*

$d_{kp}$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	%
5000	1,968,000	13,000,000	4,757,608,351	1,968,000	11,589,369	69.24%
10000	3,936,000	26,000,000	9,303,931,604	3,936,000	23,152,407	39.85%
15000	5,904,000	38,500,000	13,372,285,537	5,904,000	34,606,978	13.54%
<b>18000</b>	<b>7,084,800</b>	<b>46,000,000</b>	<b>15,466,822,289</b>	<b>7,084,800</b>	<b>41,524,659</b>	<b>0.00%</b>
20000	7,872,000	51,500,000	16,744,537,151	7,872,000	46,061,840	7.63%
25000	9,840,000	64,000,000	18,255,816,732	9,840,000	58,042,100	15.28%

Вредност функције циља варира од 4,757,608,351 када је тражња пет хиљада производа до 18,255,816,732 када је тражња двадесетипет хиљада производа. Такође,

представљен је и проценат промене вредности функције циља у односу на базични случај када је тражња 18,000 производа. Резултати анализе осетљивости показују да је вредности функције циља веома осетљива на промену тражње. Повећање и смањење тражње знатно увећавају и смањују вредност функција циља. Промене у вредности функције циља су рачунате у односу на 'case-base' случај у коме је тражња 18.000 производа. Смањење тражње од 18.000 до 5.000 производа узрокује смањење профита за 69.24%. Такође, повећање тражње од 18.000 до 25.000 производа узрокује повећање профита за 15.28%.

Можемо закључити да промене у тражњи имају већи утицај на промену вредности функције циља у односу на промене количина враћених производа. Иако мањи, утицај враћених производа треба да се разматра као веома значајан и његов удео у планирању активности развоја мреже интегрисане логистике не би требало да буде занемарен.

## **6.8 Метода променљивих околина за *LRP* са једном функцијом циља**

У овом делу рада ће бити представљен локацијски-рутинг проблем са једном функцијом циља. Затворени ланац логистичке мреже је приказан на слици 6.6. и он је исти као у претходно приказаном моделу. Функција циља је иста као прва функција из претходног модела. Циљ овог дела истраживања је провера колико додатне функције циља приказане у претходном моделу утичу на вредност прве функције циља.

### **6.8.1 Развој модела *LRP\_MOD\_2***

Претпоставке модела су исте као и у претходно приказаном моделу. Такође, скупови, параметри и управљачке променљиве су исте као и у претходно приказаном моделу,

осим што су у овом моделу изузети следећи параметри који се у претходном моделу налазе у другој и трећој функцији циља. То су  $\alpha$ ,  $v_{ip}$  и  $w_{ip}$ .

Функција циља и ограничења у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике су:

Математички модел *LRP\_MOD\_2*

$$\begin{aligned}
\max f_1 = & \sum_j \sum_k \sum_p \theta_p \cdot X_{jkp}^2 + \sum_l \sum_i \sum_p \lambda_p \cdot X_{lip}^4 - (\sum_j g_j \cdot S_j + \sum_l a_l \cdot L_l + \sum_m b_m \cdot V_m + \\
& + \sum_i \sum_j \sum_p \tau_{ip} \cdot X_{ijp}^1 + \sum_j \sum_k \sum_p \varphi_{jp} \cdot X_{jkp}^2 + \sum_j \sum_k \sum_p \gamma_{kp} \cdot X_{jkp}^2 + \sum_k \sum_l \sum_p \gamma_{kp} \cdot X_{klp}^3 + \\
& + \sum_k \sum_l \sum_p \eta_{lp} \cdot X_{klp}^3 + \sum_l \sum_m \sum_p \mu_{mp} \cdot X_{lmp}^5 + \sum_i \sum_j \sum_p D_{ij}^1 \cdot X_{ijp}^1 + \\
& + \sum_j \sum_k \sum_p D_{jk}^2 \cdot X_{jkp}^1 + \sum_k \sum_l \sum_p D_{kl}^3 \cdot X_{klp}^3 + \sum_l \sum_i \sum_p D_{li}^4 \cdot X_{lip}^4 + \\
& + \sum_l \sum_m \sum_p D_{lm}^5 \cdot X_{lmp}^5 + \sum_k \sum_i \sum_p D_{ki}^6 \cdot X_{kip}^6 + \sum_m \sum_i \sum_p D_{mi}^7 \cdot X_{mip}^7)
\end{aligned} \tag{1}$$

при ограничењима

$$\sum_j X_{jkp}^2 \leq d_{kp}, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{2}$$

$$\sum_m X_{mip}^7 + \sum_l X_{lip}^4 + \sum_k X_{kip}^6 = \sum_j X_{ijp}^1, \forall i \in I, \forall p \in P \tag{3}$$

$$\sum_i X_{ijp}^1 - \sum_k X_{jkp}^2 = 0, \forall j \in J, \forall p \in P \tag{4}$$

$$\sum_i X_{kip}^6 + \sum_l X_{klp}^3 = \sum_j X_{jkp}^2, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{5}$$

$$\sum_i X_{lip}^4 + \sum_m X_{lmp}^5 = \sum_k X_{klp}^3, \forall l \in L, \forall p \in P \tag{6}$$

$$\sum_i X_{mip}^7 = \sum_l X_{lmp}^5, \forall m \in M, \forall p \in P \tag{7}$$

$$\sum_l X_{klp}^3 = y \cdot \sum_j X_{jkp}^2, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{8}$$

$$\sum_m X_{lmp}^5 = \frac{r}{y} \cdot \sum_k X_{klp}^3, \forall p \in P, \forall l \in L \tag{9}$$

$$\sum_i \sum_p X_{ijp}^1 \leq T_j^1 \cdot S_j, \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_k \sum_p X_{klp}^3 \leq T_l^2 \cdot L_l, \forall l \in L \quad (11)$$

$$\sum_l \sum_p X_{lmp}^5 \leq T_m^2 \cdot V_m, \forall m \in M \quad (12)$$

$$S_j, L_l, V_m \in \{0,1\} \quad (13)$$

Функција (1) је укупни профит као разлика укупног прихода и укупних трошкова. Укупан приход обухвата приход од продаје нових производа и приход од враћених производа. Укупни трошкови обухватају следеће: трошкове отварања дистрибутивних центара, депоа за разврставање и центара за одлагање отпада, трошкове извођења операција у производним центрима, дистрибутивним центрима, депоима за разврставање и центрима за одлагање отпада, као и укупне трошкове транспорта. Ограничење (2) показује да нису задовољене све потребе корисника. Ограничења (3-7) обезбеђују да постоји баланс токова у производним центрима, дистрибутивним центрима, корисничким центрима, депоима за разврставање и центрима за одлагање отпада, респективно. Ограничење (8) обезбеђује да су сви производи враћени од корисника испоручени депоима за разврставање. Ограничење (9) обезбеђује да су сви враћени производи који не могу бити поправљени – испоручени центрима за одлагање отпада. Ограничења (10) и (14) представљају капацитатна ограничења за дистрибутивне центре и депое за разврставање, док ограничење (12) представља капацитетно ограничење за центре за одлагање отпада. Ограничење (13) представља бинарно ограничење за све управљачке променљиве.

### 6.8.2 Формирање редоследа производа

Претраживање редоследа корисничких центара је реализовано применом модификоване VNS методе са детерминистичким одабиром решења. Циљ претраживања је да се одреди најповољнији редослед производа при претраживању локација и рута коришћењем алгоритма VNS2. Решења  $z$  представљају низове

индекса производа и корисничких центара, нпр.  $nk = 3, np = 2: z = [k2p1\ k1p2\ k1p1\ k3p1\ k2p2\ k3p2]$ . За све верзије алгоритма *VNS1*, почетно решење је низ индекса добијен сортирањем производа према критеријуму тражње. Сортирање се врши од највећих ка најмањим потребама корисничких центара. На почетно решење се примењује алгоритам *VNS2*. Резултати су вредности  $f_{ijklmp}$  ( $i=1,\dots,ni, j=1,\dots,nj, k = 1,\dots,nk,l=1,\dots,nl,m=1,\dots,nt, p=1,\dots,np$ ), које се рачунају на следећи начин:

$$\begin{aligned}
f_{ijklmp} = & \theta_p \cdot d_{kp} + \lambda_p \cdot (y-r) \cdot d_{kp} - \\
& -(g_j \cdot (1-S_j^*) + a_l \cdot (1-L_l^*) + b_m \cdot (1-V_m^*) + \phi_{ip} \cdot d_{kp} + \varphi_{jp} \cdot d_{kp} + \gamma_{kp} \cdot (1+y) \cdot d_{kp} + \\
& + \eta_{lp} \cdot y \cdot d_{kp} + \mu_{mp} \cdot r \cdot d_{kp} + D_{ij}^1 \cdot d_{kp} + D_{jk}^2 \cdot d_{kp} + D_{kl}^3 \cdot y \cdot d_{kp} + D_{li}^4 \cdot (y-r) \cdot d_{kp} + \\
& + D_{lm}^5 \cdot r \cdot d_{kp} + D_{ki}^6 \cdot (1-y) \cdot d_{kp} + D_{mi}^7 \cdot r \cdot d_{kp})
\end{aligned} \tag{14}$$

$S_j^*, L_l^*, V_m^* = 1$ , ако локација није већ додељена током претраге, у супротном је  $S_j^*, L_l^*, V_m^* = 0$ . У наставку је дат алгоритам *VNS1* хеуристике. Суседство  $N^h$  је формирано у окружењу тренутно најбољег решења  $z$ . У сваком кораку  $h$  из суседства  $N^h$  се врши одабир  $smax(h)$  решења  $z'$ . Након тога се, на сваки производ у сваком корисничком центру, примењује алгоритам *VNS2*. Ако је  $f(z') < f(z)$ , решење  $z$  се ажурира, израчунава се нови низ  $z0$ , и алгоритам се враћа у суседство  $N^l$ . У супротном, алгоритам прелази у следеће суседство  $N^{h+1}$ . Алгоритам се завршава када је достигнуто суседство  $N^{hmax}$  и није пронађено ниједно боље решење у том суседству.

**Algorithm 1: VNS1 хеуристка – Формирање редоследа производа**

**Input:** Скуп структура суседстава  $N^h$  за  $h = 1,\dots,hmax$

$z \leftarrow$  почетно решење (производи су сортирани према захтевима корисничких центара)

**for**  $i = 1:nk \cdot np$

$k,p = z(i)$ ;

$x_{kp}, f_{ijklmp} \leftarrow$  **VNS2 search** ( $i,j,k,l,m,p$ );

**end**

$f(z) = \text{sum}(f_{kp})$ ;

**Input:** Скуп структура суседстава  $N^h$  за  $h = 1:hmax$

$h \leftarrow 1$ ;

**while**  $h \leq hmax$

$s \leftarrow 1$ ;



```

found ← 0;
while (s ≤ smax(h)) ^ (found = 0)           /Check smax(h) solutions from Nh/
  z' ← neighbor in Nh(z)                   /Shaking/
  for i = 1:nk*np
    k,p = z'(i);
    xkp, fkp ← VNS2 search (i,j,k,l,m,p);
  end
  f(z) = sum(fijklmp), i=1:ni; j=1:nj; k = 1:nk, l=1:nl; m=1:nm;p=1:np;
  if f(z') < f(z)                           /Move or Not/
    z ← z';
    h ← 1;
    s ← 1;
    found ← 1;
  else
    s ← s + 1;
  end
end
if found = 0
  h ← h + 1;                                 /Neighborhood Change/
end
end
return xkp;

```

Претраживање локација и рута (алгоритам VNS2) је описан у 6.5.3. Размрдавање је описано у 6.5.3.2. Локално претраживање (VND метода) је описана у 6.5.3.2.

### 6.8.3 Резултати за модел *LRP\_MOD\_2*

Улазни параметри тест проблеме су представљени у табели 6.11. С обзиром на велике димензије проблема, трошкови транспорта између чворова су генерисани. Вредности  $\lambda_p$  и  $\phi_p$  су израчунате као проценти јединичне цене производа  $\theta_p$ . Резултати су представљени у табели 6.12.

Табела 6.11. Параметри за тест проблеме за модел *LRP\_MOD\_2*

$y=0.4$	$g_j = \text{uniform}(110.000;140.000)$	$\theta_p = \text{uniform}(200;2.800)$	$\phi_{jp} = \text{uniform}(3;5)$
$r=0.1$	$a_i = \text{uniform}(40.000;70.000)$	$\lambda_p = 30\%$	$\gamma_{kp} = \text{uniform}(2;4)$
$d_{kp}=18.000$	$b_m = \text{uniform}(25.000;40.000)$	$\phi_{ip} = \text{uniform}(50\%;70\%)$	$\eta_{ip} = \text{uniform}(3;5)$
	$N_j^1 = \text{uniform}(350.000;3.000.000)$	$\alpha = 70\%$	$\mu_{mp} = \text{uniform}(2;4)$
	$N_i^2 = \text{uniform}(270.000;2.000.000)$		
	$N_m^3 = \text{uniform}(80.000;1.000.000)$		

Табела 6.12. Резултати *VNS* хеуристике за модел *LRP\_MOD\_2*

nr.	P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	f	CPU (s)
1	3	3	2	2	2	2	50,433,200	0.01
2	2	3	3	3	2	1	56,784,390	0.03
3	3	3	4	10	4	2	74,980,573	0.10
4	3	4	6	20	5	3	264,089,190	0.39
5	4	6	11	40	8	4	577,449,057	3.75
6	5	6	19	60	12	5	1,503,733,546	5.18
7	5	7	20	80	15	7	2,075,099,561	5.19
8	7	8	23	100	17	8	3,309,631,966	27.96
9	8	10	26	200	20	9	9,748,736,897	169.15
10	8	10	26	300	21	9	13,093,936,646	163.86
11	8	11	30	400	22	10	13,332,394,247	228.93
12	8	11	31	500	24	10	11,752,885,754	277.52

Резултати представљени у табели 6.12. исти су као и резултати вишециљног модела у којима је испоручено 100% производа.

#### 6.8.4 Анализа осетљивости за модел *LRP\_MOD\_2*

Као и у претходном поглављу, приказаћемо резултате тестирања за примере у којима се вредности неких параметара мењају. Анализе осетљивости ће бити извршене на исти начин као и у претходном поглављу: у првој анализи варираће очекивани

процент производа који ће бити враћени од стране корисника и проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање, а у другој анализи варираће укупна тражња. Метода која ће бити примењена за анализу осетљивости је 'One-at-a-time (OAT/OFAT)'. У табели 6.13. представљени су резултати четрнаест тестова са променљивим вредностима  $y$  и  $r$ . Анализа осетљивости извршена је за пример чије су димензије следеће: [8 10 26 300 21 9].

Табела 6.13. Анализа осетљивости за различите вредности  $y$  и  $r$  за модел *LRP\_MOD\_2*

$y$	$r$	VNS	gap
15.00%	5.00%	11,624,646,773	0.00%
	10.00%	10,384,849,626	10.67%
20.00%	5.00%	12,205,044,300	0.00%
	10.00%	11,043,523,948	9.52%
	15.00%	9,501,358,549	22.15%
30.00%	5.00%	13,347,392,930	0.00%
	10.00%	12,217,441,326	8.47%
	15.00%	10,628,038,833	20.37%
35.00%	5.00%	13,941,391,504	0.00%
	10.00%	12,806,174,337	8.14%
	15.00%	11,251,953,397	19.29%
40.00%	5.00%	14,301,407,435	0.00%
	<b>10.00%</b>	<b>13,093,936,646</b>	<b>8.44%</b>
	15.00%	11,622,827,301	18.73%

Циљ ове анализе је да покаже како промене у количинама производа који су враћени од стране корисника и који су одстрањени из даље употребе утичу на вредност функције циља. Метода анализе осетљивости, начин израчунавања вредности 'gap' и сврха ове анализе детаљније су објашњени у поглављу 6.5.5.

Вредност функције циља варира до 22.15%, ако количина производа који су одстрањени из дање употребе варира од 5-15%, а проценат враћених производа износи 20%. Такође, вредност функције циља знатно варира уколико се мења количина производа који су враћени од стране корисника. При промени количине

производа који су враћени од стране корисника од 15% до 40%, вредност функције циља варира и до 18.72% (нпр.  $(100\% - (11,624,646,773/14,301,407,435))$ ).

У овом делу дисертације ће бити представљена анализа осетљивости вредности функције циља у односу на тражњу. Промена вредности функције циља у зависности од промене тражње, представљена је у табели 6.14. Анализа осетљивости извршена је за пример чије су димензије следеће: [8 10 26 300 21 9].

Табела 6.14. Анализа осетљивости за различите вредности тражње за модел *LRP\_MOD\_2*

$d_{kp}$	VNS	%
5000	4,438,898,104	66.10%
10000	8,519,925,229	37.64%
15000	11,625,828,186	27.10%
<b>18000</b>	<b>13,093,936,646</b>	<b>0.00%</b>
20000	13,662,588,742	4.16%
25000	15,946,589,475	14.32%

Вредност функције циља варира од 4,438,898,104 када је тражња пет хиљада производа до 15,946,589,475 када је тражња двадесетипет хиљада производа. Такође, представљен је и проценат промене вредности функције циља у односу на базични случај када је тражња 18,000 производа. Резултати анализе осетљивости показују да је вредности функције циља веома осетљива на промену тражње. Повећање и смањење тражње знатно увећавају и смањују вредност функције циља. Промене у вредности функције циља су рачунате у односу на 'case-base' случај у коме је тражња 18.000 производа. Смањење тражње од 18.000 до 5.000 производа узрокује смањење профита за 66.10%. Такође, повећање тражње од 18.000 до 25.000 производа узрокује повећање профита за 14.32%.

Као и у претходној анализи осетљивости (модел са три функције циља), можемо закључити да промене у тражњи имају већи утицај на промену вредности функције

циља у односу на промене количина враћених производа. Иако мањи, утицај враћених производа треба да се разматра као веома значајан и његов удео у планирању активности развоја мреже интегрисане логистике не би требало да буде занемарен.

## **6.9 Модел са две функције циља за *LRP* са минимизацијом количине производа које нису враћене у повратни ток**

У овом делу рада ће бити представљен локацијски-рутинг проблем са две функције циља. Затворени ланац логистичке мреже је приказан на слици 6.6. Прва функција циља је слична првој функцији из претходног модела, али она укључује и пенале који се плаћују у следећа два случаја: уколико нису испоручене све тражене количине сваком корисничком центру, и уколико нису сви производи враћени од корисника испоручени депоу за разврставање, односно уколико нису преузети од корисника. Друга функција циља представља минимизацију количине производа који нису враћени у повратни ток.

### **6.9.1 Развој модела *LRP\_MOD\_3***

Претпоставке модела су исте као и у претходно приказаном моделу. Такође, скупови, параметри и управљачке променљиве су исте као и у претходно приказаном моделу. У овај модел је укључен и следећи параметри:

$\delta$  - пенали који се плаћају за производе који нису испоручени кориснику

$\beta$ - пенали који се плаћају за производе који су враћени од стране корисника, али нису преузети од њих

Функција циља и ограничења у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике су следећи:

Математички модел: **LRP\_MOD\_3**

$$\begin{aligned}
\max f_1 = & \sum_j \sum_k \sum_p \theta_p \cdot X_{jkp}^2 + \sum_l \sum_i \sum_p \lambda_p \cdot X_{lip}^4 - (\sum_j g_j \cdot S_j + \sum_l a_l \cdot L_l + \sum_m b_m \cdot V_m + \\
& + \sum_i \sum_j \sum_p \tau_{ip} \cdot X_{ijp}^1 + \sum_j \sum_k \sum_p \varphi_{jp} \cdot X_{jkp}^2 + \sum_j \sum_k \sum_p \gamma_{kp} \cdot X_{jkp}^2 + \sum_k \sum_l \sum_p \gamma_{kp} \cdot X_{klp}^3 + \\
& + \sum_k \sum_l \sum_p \eta_{lp} \cdot X_{klp}^3 + \sum_l \sum_m \sum_p \mu_{mp} \cdot X_{lmp}^5 + \sum_i \sum_j \sum_p D_{ij}^1 \cdot X_{ijp}^1 + \\
& + \sum_j \sum_k \sum_p D_{jk}^2 \cdot X_{jkp}^1 + \sum_k \sum_l \sum_p D_{kl}^3 \cdot X_{klp}^3 + \sum_l \sum_i \sum_p D_{li}^4 \cdot X_{lip}^4 + \\
& + \sum_l \sum_m \sum_p D_{lm}^5 \cdot X_{lmp}^5 + \sum_k \sum_i \sum_p D_{ki}^6 \cdot X_{kip}^6 + \sum_m \sum_i \sum_p D_{mi}^7 \cdot X_{mip}^7) - \\
& - \delta \cdot \sum_k (\sum_p d_{kp} - \sum_j \sum_p X_{jkp}^2) - \beta \cdot \sum_k (\sum_p y \cdot d_{kp} - \sum_l \sum_p X_{klp}^3)
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\min f_2 = y \cdot \sum_k \sum_p d_{kp} - \sum_k \sum_l \sum_p X_{klp}^3 \tag{2}$$

при ограничењима

$$\sum_j X_{jkp}^2 \leq d_{kp}, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{3}$$

$$\sum_m X_{mip}^7 + \sum_l X_{lip}^4 + \sum_k X_{kip}^6 = \sum_j X_{ijp}^1, \forall i \in I, \forall p \in P \tag{4}$$

$$\sum_i X_{ijp}^1 - \sum_k X_{jkp}^2 = 0, \forall j \in J, \forall p \in P \tag{5}$$

$$\sum_i X_{kip}^6 + \sum_l X_{klp}^3 = \sum_j X_{jkp}^2, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{6}$$

$$\sum_i X_{lip}^4 + \sum_m X_{lmp}^5 = \sum_k X_{klp}^3, \forall l \in L, \forall p \in P \tag{7}$$

$$\sum_i X_{mip}^7 = \sum_l X_{lmp}^5, \forall m \in M, \forall p \in P \tag{8}$$

$$\sum_l X_{klp}^3 \leq y \cdot \sum_j X_{jkp}^2, \forall k \in K, \forall p \in P \tag{9}$$

$$\sum_m X_{lmp}^5 = \frac{r}{y} \cdot \sum_k X_{klp}^3, \forall p \in P, \forall l \in L \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_p X_{ijp}^1 \leq T_j^1 \cdot S_j, \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_k \sum_p X_{klp}^3 \leq T_l^2 \cdot L_l, \forall l \in L \quad (12)$$

$$\sum_l \sum_p X_{lmp}^5 \leq T_m^2 \cdot V_m, \forall m \in M \quad (13)$$

$$S_j, L_l, V_m \in \{0,1\} \quad (14)$$

Прве функција циља (1) је укупни профит као разлика укупаног прихода и укупних трошкова. Укупан приход обухвата приход од продаје нових производа и приход од враћених производа. Укупни трошкови обухватају следеће: трошкови отварања дистрибутивних центара, депоа за разврставање и центара за одлагање отпада, трошкове извођења операција у производним центрима, дистрибутивним центрима, депоима за разврставање и центрима за одлагање отпада, као и укупне трошкови транспорта. Друга функција циља (2) је количина производа који нису враћени у повратни ток. Ограничење (3) показује да нису задовољене све потребе корисника. Ограничења (4-8) обезбеђују да постоји баланс токова у производним центрима, дистрибутивним центрима, корисничким центрима, депоима за разврставање и центрима за одлагање отпада, респективно. Ограничење (9) обезбеђује да нису сви производи враћени од корисника испоручени депоима за разврставање. Ограничење (10) обезбеђује да су сви враћени производи који не могу бити поправљени – испоручени центрима за одлагање отпада. Ограничења (11) и (12) представљају капацитатна ограничења за дистрибутивне центре и депоа за разврставање, док ограничење (13) представља капацитетно ограничење за центре за одлагање отпада. Ограничење (14) представља бинарно ограничење за све управљачке променљиве. Претраживање локација и рута (алгоритам VNS2) је описан у 6.5.3. Размрдавање је описано у 6.5.3.2. Локално претраживање (VND метода) је описана у 6.5.3.2.

### 6.9.2 Резултати за модел *LRP\_MOD\_3*

Модел који је предложен у овом делу рада је илустрован примерима. Оптимално решење за мали број чворова је израчунато користећи солвер *GLPK* како би се извршила евалуација предложеног модела. Алгоритам за *VNS* хеуристику је кодиран у *MATLAB* језику. Тестирања су извршена на процесору *AMD Triple Core Processor 2.10 GHz*. Параматри и за мале и за велике проблеме су представљени у табели 6.11 и они су исти подацима који су коришћени за претходни пример. Нови параметри у овом моделу су  $\alpha$  и  $\beta$ , и њихове вредности су следеће:

$$\delta = 100$$

$$\beta = 50$$

Најпре је представљено поређење између оптималних решења и *VNS*. Ово поређење је представљено за мале тест проблеме са највише до четрдесет корисничких центара. Резултати су представљени у табелама 6.15-6.16. Величина 'gap' представља проценат одступања решења добијених хеуристикама у поређењу са оптималним решењем. 'Gap' је израчунат само за мале проблеме. Граница  $\epsilon_2$  има три вредности у зависности да ли је корисничким центрима испоручено 80%, 90% и 100% производа.

Табела 6.15. Оптимална решења је тест примере са малим бројем чворова за модел *LRP\_MOD\_3*

nr.	P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	$\epsilon_2$	$f_1$	$f_2$	CPU (s)
1							8,640	50,433,202	0	0.00
2	3	3	2	2	2	2	4,320	50,433,202	0	0.00
3							0	50,433,202	0	0.00
4							8,640	64,646,781	8,640	0.00
5	2	3	3	3	2	1	4,320	61,114,409	4,320	0.00
6							0	57,478,129	0	0.00
7							43,200	99,370,948	43,200	1.00
8	3	3	4	10	4	2	21,600	93,753,999	21,600	1.00
9							0	79,255,465	0	1.00
13							86,400	300,195,153	86,400	2.00
14	3	4	6	20	5	3	43,200	295,932,735	43,200	2.00
15							0	277,525,580	0	2.00
16							230,400	661,510,503	230,400	6.00
17	4	6	11	40	8	4	115,200	655,963,398	115,200	6.00
18							0	631,125,488	0	6.00

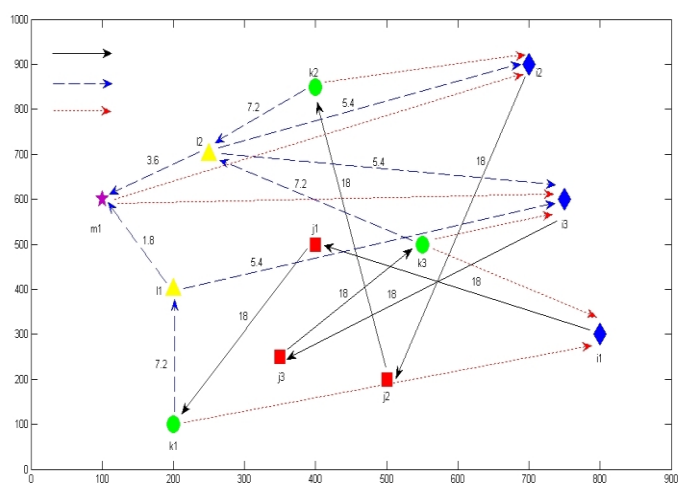


Табела 6.16. VNS хеуристика за тест примере са малим бројем чворова за модел

*LRP\_MOD\_3*

nr.	P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	$\epsilon_1$	$f_1$	$f_2$	CPU (s)	gap (%)
1							8,640	50,433,200	0	0.01	0
2	3	3	2	2	2	2	4,320	50,433,200	0	0.01	0
3							0	50,433,200	0	0.01	0
4							8,640	64,591,269	8,640	0.02	0.09
5	2	3	3	3	2	1	4,320	60,763,716	4,320	0.01	0.57
6							0	56,784,390	0	0.01	1.21
7							43,200	97,128,703	43,200	0.07	2.26
8	3	3	4	10	4	2	21,600	90,890,401	21,600	0.05	3.05
9							0	74,980,573	0	0.05	5.39
13							86,400	295,735,637	86,400	0.17	1.49
14	3	4	6	20	5	3	43,200	288,671,935	43,200	0.17	2.45
15							0	264,089,190	0	0.17	4.84
16							230,400	609,197,372	230,400	1.85	7.91
17	4	6	11	40	8	4	115,200	597,372,042	115,200	1.55	8.93
18							0	577,449,057	0	1.39	8.50

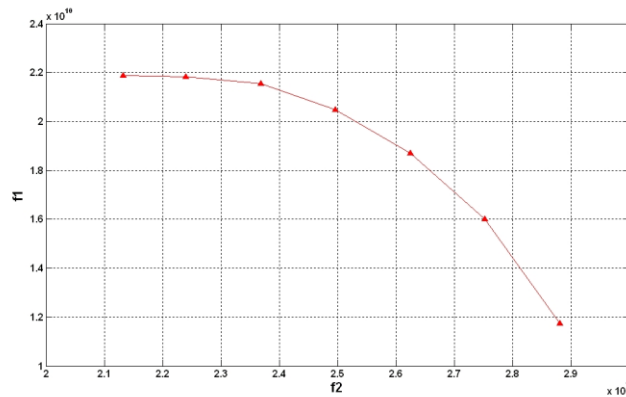
За мали број чворова, разлика између оптималног решења и решења добијених коришћењем хеуристика је до 8.93%, али су решења добијена за знатно краће време коришћењем хеуристика. За тест пример чије су димензије [2 3 3 3 2 1] представљен је графички приказ локација и руте возила. Резултати овог теста су представљени у табели 6.15. Локације, руте и количине производа на свакој рути су представљени на слици 6.9. Бројеви изнад стрелица представљају количине производа на свакој рути и оне су приказане у размери 1/1000. Резултати за тест проблеме већих диманзија дати су у табели 6.17. Парето крива приказана је на слици 6.10.



Слика 6.9. Локације, руте и број возила на свакој руте за модел *LRP\_MOD\_3*

Табела 6.17. *VNS* хеуристика за тест примере са већим бројем чворова (60-500 к.ц) за модел *LRP\_MOD\_3*

пр.	P	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.	$\epsilon_2$	$f_1$	$f_2$	CPU (s)
1							432,000	1,519,174,704	223,200	5.66
2	5	6	19	60	12	5	216,000	1,519,171,596	216,000	5.53
3							0	1,503,733,546	0	5.52
4							576,000	2,076,999,803	576,000	8.94
5	5	7	20	80	15	7	288,000	2,076,999,803	288,000	9.72
6							0	2,075,099,561	0	6.49
7							1,008,000	3,469,369,795	1,008,000	48.57
8	7	8	23	100	17	8	504,000	3,443,376,766	504,000	55.84
9							0	3,309,631,966	0	31.74
10							2,304,000	10,007,404,430	2,304,000	169.96
11	8	10	26	200	20	9	1,152,000	10,028,866,601	1,152,000	162.15
12							0	9,748,736,897	0	182.70
13							3,456,000	14,538,243,258	3,456,000	253.63
14	8	10	26	300	21	9	1,728,000	14,358,708,790	1,728,000	221.58
15							0	13,093,936,646	0	177.27
16							4,608,000	16,767,172,387	4,608,000	365.04
17	8	11	30	400	22	10	2,304,000	16,156,279,538	2,304,000	205.23
18							0	13,332,394,247	0	237.59
19							5,760,000	21,556,828,033	5,760,000	369.45
20	8	11	31	500	24	10	2,880,000	18,710,224,198	2,880,000	250.56
21							0	11,752,885,754	0	289.15



Слика 6.10. Парето крива за модел *LRP\_MOD\_3*

График приказује Парето криву за очекивани профит у односу на количину производа који нису враћени у повратни ток. Профит се смањује када се количина производа који нису враћени у повратни ток повећава. Парето крива указује да се две приказане функције циља конфронтирају.

### 6.9.3 Анализа осетљивости за модел *LRP\_MOD\_3*

Као и у претходним поглављима, и за модел са две функције циља приказаћемо резултате тестирања за примере у којима се вредности неких параметара мењају. Анализе осетљивости ће бити извршене на исти начин као и у претходним поглављима: у првој анализи варираће очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника и проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање, а у другој анализи варираће укупна тражња. Анализе осетљивости су урађене за примере у којима се испоручена количина производа 80%. У табели 6.18. представљени су резултати четрнаест тестова са променљивим вредностима  $u$  и  $r$ . Претпоставка је да очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника варира између 15% и 40%, док проценат производа који ће бити испоручени центру за одлагање варира између 5% и 15% од укупног броја производа. Анализа осетљивости извршена је за пример чије су димензије следеће: [8 10 26 300 21 9].

Табела 6.18. Анализа осетљивости за различите вредности  $y$  и  $r$  за модел*LRP\_MOD\_3*

$y$	$r$	$\epsilon_1$	$f_1$	$f_2$	gap
15.00%	5.00%	3,456,000	13,018,061,967	3,456,000	0.00%
	10.00%	3,456,000	12,022,186,676	3,456,000	7.65%
20.00%	5.00%	3,456,000	13,488,168,190	3,461,400	0.00%
	10.00%	3,456,000	12,497,753,367	3,456,000	7.34%
	15.00%	3,456,000	11,254,279,078	3,456,000	16.56%
30.00%	5.00%	3,456,000	14,700,864,325	3,456,000	0.00%
	10.00%	3,456,000	13,478,977,347	3,456,000	8.31%
	15.00%	3,456,000	12,362,217,188	3,456,000	15.91%
35.00%	5.00%	3,456,000	15,204,068,537	3,484,800	0.00%
	10.00%	3,456,000	14,028,213,816	3,456,000	7.73%
	15.00%	3,456,000	12,920,586,313	3,456,000	15.02%
40.00%	5.00%	3,456,000	15,582,823,922	3,605,400	0.00%
	<b>10.00%</b>	<b>3,456,000</b>	<b>14,538,243,258</b>	<b>3,456,000</b>	6.70%
	15.00%	3,456,000	13,251,548,401	3,456,000	14.96%

Циљ ове анализе је да покаже како промене у количинама производа који су враћени од стране корисника и који су одстрањени из даље употребе утичу на вредност функције циља. Метода анализе осетљивости, начин израчунавања вредности 'gap' и сврха ове анализе детаљније су објашњени у поглављу 6.5.5.

Вредност функције циља варира до 16.56%, ако количина производа који су одстрањени из даље употребе варира од 5-15%, а проценат враћених производа износи 20%. Такође, вредност функције циља знатно варира уколико се мења количина производа који су враћени од стране корисника. При промени количине производа који су враћени од стране корисника од 15% до 40%, вредност функције циља варира и до 16.46% (нпр.  $(100\% - (13,018,061,967/15,582,823,922))$ ). У обом делу анализе, представљен је утицај промене вредности тражње на функцију циља.

Табела 6.19. Анализа осетљивости за различите вредности тражње за модел *LRP\_MOD\_3*

$d_{kp}$	$\varepsilon_2$	$f_1$	$f_2$	%
5000	3,456,000	4,561,330,346	4,225,500	68.63%
10000	3,456,000	8,870,321,351	4,065,000	38.99%
15000	3,456,000	12,555,919,979	3,772,500	13.64%
<b>18000</b>	<b>3,456,000</b>	<b>14,538,243,258</b>	<b>3,456,000</b>	<b>0.00%</b>
20000	3,456,000	15,529,908,840	3,456,000	6.39%
25000	3,456,000	17,284,404,388	3,456,000	15.89%

Вредност функције циља варира од 4,561,330,346 када је тражња пет хиљада производа до 17,284,404,388 када је тражња двадесетипет хиљада производа. Као и у претходном поглављу, представљен је и проценат промене вредности функције циља у односу на базични случај када је тражња 18,000 производа. Резултати анализе осетљивости показују да је вредности функције циља веома осетљива на промену тражње. Повећање и смањење тражње знатно увећавају и смањују вредност функције циља. Промене у вредности функције циља су рачунате у односу на 'case-base' случај у коме је тражња 18.000 производа. Смањење тражње од 18.000 до 5.000 производа узрокује смањење профита за 68.63%. Такође, повећање тражње од 18.000 до 25.000 производа узрокује повећање профита за 15.89%.

### 6.10 Упоредни приказ резултата добијених применом различитих модела

Модели који су разматрани у овом делу дисертације су модели избора локације и рутирања возила (енгл. *location-routing problem – LRP*) у интегрисаном ланцу логистике снабдевања и повратне логистике. Математички модели представљају оригиналне моделе у затвореном ланцу снабдевања (енгл. *closed-loop supply chain*). Такође, представљене су и оригиналне хеуристике засноване на методи променљивих околина (*VNS*), како би се решили проблеми великих димензија. Проблеми мањих диманзија решени су оптимално коришћењем *GLPK* солвера. Функционалност предложених алгоритама процењене су у бројним нумеричким примерима и

експериментисањем на рачунару. Експерименти извршени у овом истраживању показују да представљени алгоритми могу бити успешно коришћени у и примерима из праксе. Представљена су три различита модела:

- Модел са три функције циља: *LRP\_MOD\_1*
- Модел са једном функцијом циља: *LRP\_MOD\_2*
- Модел са две функције циља: *LRP\_MOD\_3*

Сви модели имају исте улазне податке, како би се у овом делу рада могла извршити упоредивост њихових резултата.

Поређење модела са једном функцијом циља за модел *LRP\_MOD\_2* и модела са две функције циља за модел *LRP\_MOD\_3*:

- Може се закључити да је вредност функције циља најнижа у моделу са једном функцијом циља. Увођењем функције која се односи на минимизацију количине производа који нису враћени у повратни ток (модел са две функције циља), вредност прве функције циља се повећава за 9.93% ( $100\% - (13.093.936.646/14.538.243.258)$ ) за тест са улазним подацима [8 10 26 300 21 9].

Поређење модела са једном функцијом циља *LRP\_MOD\_2* и модела са три функције циља *LRP\_MOD\_1*:

- Вредност прве функције циља виша је у моделу са три функције циља. Иако су у трећу функцију циља укључени еколошки фактори, те би се могао очекивати пад профита, минимизација количине производа који нису испоручени корисничким центрима и количине производа који нису враћени од корисника, који су презентовани у другој функцији циља, обезбеђују пораст вредности прве функције циља (укупног профита). Вредност прве

функције циља је виша за 15.34% ( $100\% - (13.093.936.646/15.466.822.289)$ ) за тест са улазним подацима [8 10 26 300 21 9].

Поређење модела са две функцијом циља *LRP\_MOD\_3* и модела са три функције циља *LRP\_MOD\_1*:

- Вредност прве функције циља виша је у моделу са три функције циља. Поређењем модела са две функцијом циља и модела са три функције циља можемо закључити да увођење еколошких фактора не мора довести до смањења профита, већ да се, увођењем пенала којим се минимизује количина производа који нису испоручени корисничким центрима (што је приказано у моделу са две функције циља), вредност прве функције циља (профита) може повећати. Вредност прве функције циља је виша за 6.00% ( $100\% - (14.538.243.258/15.466.822.289)$ ) за тест са улазним подацима [8 10 26 300 21 9].

### **6.11 VNS за VRP у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике**

Основни научни циљеви развоја модела рутирања возила за решавање интегрисаног модела логистике снабдевања и повратне логистике су:

- Одређивање рута возила у *IFRL* моделу
- Анализа и поређење оптималних резултата и резултата добијених применом хеуристике
- Анализа и поређење резултата добијених развојем више варијанти Методе променљивих околина

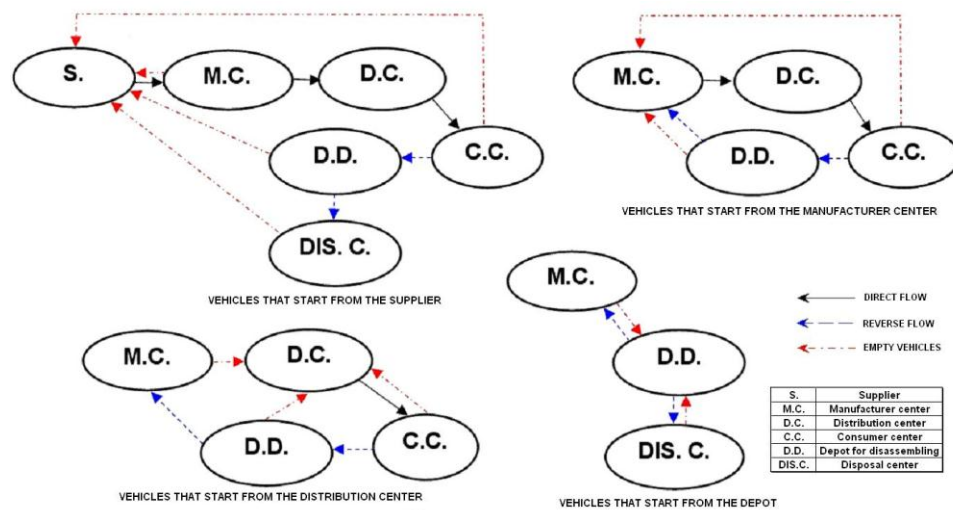
У овом моделу, претраживање рута возила извршено је за сваки појединачни потрошачки центар. У сваком кораку одрђена локација (добављач, произвођач,

дистрибутивни центар, депо за разврставање и депо за одстрањивање) се додељује одређеном потрошачком центру. На овај начин се одређују руте возила. Такође, руте и број возила зависе и од тражње потрошачког центра ( $d_k$ ), процента укупне тражње, који представља производе који су враћени од стране корисника ( $y$ ), броја производа који су одложени ( $r$ ), капацитета возила ( $q_v$ ) и доступног капацитета у возилима која су већ додељена оним потрошачким центрима за које је претраживање завршено.

У 'forward' току, разматра се растојање између добављача, произвођача, дистрибутивног центра и потрошачког центра. У повратном току, постоје две врсте локација: депо за разврставање и депо за одстрањивање. Провера да ли је потребно ново возило извршена је на свакој рути. Такође, на свакој појединачној рути, проверено је и да ли постоје таква возила која се могу вратити на своју оригиналну локацију. Провера је заснована на доступним капацитетима возила која су додељена оним потрошачким центрима за које је претраживање завршено. Ако је број потребних возила нижи од броја возила на претходној рути, празна возила се враћају на своје оригиналне локације. Ако је број потребних возила већи од броја возила на претходној рути, додају се нова возила.

Кретање возила је представљено на слици 6.11. Кретања возила која транспортују производе су представљена пуним стрелицама, кретања возила у повратном току представљена су испрекиданим плавим стрелицама, док су кретања празних возила представљена испрекиданим црвеним стрелицама.





Слика 6.11. Кретање возила за модел *VRP\_MOD\_1*

### 6.11.1 Развој модела *VRP\_MOD\_1*

Претпоставке модела су следеће:

- Све поруџбине од добављача до произвођачког центра су извршене
- Капацитети свих објеката, осим добављача и произвођачких центара су познати
- Капацитети објеката добављача и произвођачких центара нису ограничени
- Сва возила имају исте капацитете и они су познати унапред
- Сви објекти исте намене имају исту величину и капацитет
- Процент производа који су прикупљени од корисника је познат
- Процент производа који су одложени на депонију је познат

Параметри, управљачке променљиве, функција циља и ограничења у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике су:

## Скупови

$S = \{1, \dots, ns\}$  - скуп локација добављача  $s \in S$

$I = \{1, \dots, ni\}$  - скуп локација произвођачких центара који производе и поправљају производе  $i \in I$

$J = \{1, \dots, nj\}$  - скуп локација дистрибутивних центара у које су допремљени производи које треба транспортовати до корисничких центара  $j \in J$

$K = \{1, \dots, nk\}$  - скуп локација корисничких центара  $k \in K$

$L = \{1, \dots, nl\}$  - скуп локација депоа за разврставање у којима се производи враћени од из корисничких центара  $k$  класификују на оне који се могу поправити о оне који се одлажу у центер за сакупљање отпада  $l \in L$

$M = \{1, \dots, nm\}$  - скуп центара за одлагање отпада (депои за одстрањивање) у који се испоручују производи и делови производа који се не могу поправити или поново користити  $m \in M$

$U^k = \{1, \dots, nu^k\}$  - скуп возила додељених корисничком центру  $k$   $u^k \in U^k$

## Параметри

$d_k$  - тражња корисничког центра  $k$

$y$  - очекивани проценат производа који ће бити враћени од стране корисника

$r$  - проценат производа који ће бити испоручени центер за одлагање

$D_{s,i}^0$  - растојање између добављача  $s$  и производног центра  $i$

$D_{i,j}^1$  - растојање између производног центра  $i$  и дистрибутивног центра  $j$

$D_{l,i}^2$  - растојање између депоа  $l$  и производног центра  $i$

$D_{j,k}^3$  - растојање између дистрибутивног центра  $j$  и корисничког центра  $k$

$D_{k,s}^4$  - растојање између корисничког центра  $k$  и добављача  $s$

$D_{i,k}^5$  - растојање између производног центра  $i$  и производног центра  $k$

$D_{k,l}^6$  - растојање између корисничког центра  $k$  и депоа  $l$

$D_{l,j}^7$  - растојање између депоа  $l$  и дистрибутивног центра  $j$

$D_{l,m}^8$  - растојање између депоа  $l$  и центра за одлагање отпада  $m$

$D_{l,s}^9$  - растојање између депоа  $l$  и добављача  $s$

$D_{m,s}^{10}$  - растојање између центра за одлагање отпада  $m$  и добављача  $s$

$T_m^2$  - капацитет центра за одлагање отпада  $m$

$T_j^1$  - максимални проток производа кроз дистрибутивни центар  $j$

$T_l^2$  - максимални проток производа кроз депо  $l$

$q_v$  - капацитет возила

Управљачке променљиве

$X_{s,i}^0$  - Количина материјала транспортована од добављача  $s$  до производног центра  $i$

$X_{i,j}^1$  - Количина производа транспортована од производног центра  $i$  до дистрибутивног центра  $j$

$X_{j,k}^2$  - Количина производа транспортована од дистрибутивног центра  $j$  до корисничког центра  $k$

$X_{k,l}^3$  - Количина производа транспортована од корисничког центра  $k$  до депоа  $l$

$X_{l,i}^4$  - Количина производа транспортована од депоа  $l$  до производног центра  $i$

$X_{l,m}^5$  - Количина производа транспортована од депоа  $l$  до центра за одстрањивање  $m$

$Y_{s,i}^{0,k,u^k}$  - Индикатор коришћења возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од добављача,

$Y_{s,i}^{0,k,u^k} = 1$ , ако се возило креће од добављача  $s$  до производног центра  $i$ ,  $Y_{s,i}^{0,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{i,s}^{1,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од производног центра,  $Y_{i,s}^{1,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од производног центра  $i$  до добављача  $s$ ,  $Y_{i,s}^{1,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{i,j}^{2,k,u^k}$  - Индикатор коришћења возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од производног центра,  $Y_{i,j}^{2,k,u^k} = 1$ , ако се возило креће од производног центра  $i$  до дистрибутивног центра  $j$ ,  $Y_{i,j}^{2,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{i,l}^{3,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од производног центра,  $Y_{i,l}^{3,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од производног центра  $i$  до депоа  $l$ ,  $Y_{i,l}^{3,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{j,k}^{4,k,u^k}$  - Индикатор коришћења возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од дистрибутивног центра,  $Y_{j,k}^{4,k,u^k} = 1$ , ако се возило креће од дистрибутивног центра  $j$  до корисничког центра  $k$ ,  $Y_{j,k}^{4,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{k,s}^{5,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од корисничког центра,  $Y_{k,s}^{5,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од корисничког центра  $k$  до добављача  $s$ ,  $Y_{k,s}^{5,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{k,j}^{6,k,u}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од корисничког центра,  $Y_{k,j}^{6,k,u} = 1$ , ако се возило креће од корисничког центра  $k$  до дистрибутивног центра  $j$ ,  $Y_{k,j}^{6,k,u} = 0$  у супротном

$Y_{k,i}^{7,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од корисничког центра,  $Y_{k,i}^{7,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од корисничког центра  $k$  до производног центра  $i$ ,  $Y_{k,i}^{7,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{k,l}^{8,k,u^k}$  - Индикатор коришћења возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од корисничког центра,  $Y_{k,l}^{8,k,u^k} = 1$ , ако се возило креће од корисничког центра  $k$  до депоа  $l$ ,  $Y_{k,l}^{8,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{l,i}^{9,k,u^k}$  - Индикатор коришћења возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од депоа  $Y_{l,i}^{9,k,u^k} = 1$ , ако се возило креће од депоа  $l$  до производног центра  $i$ ,  $Y_{l,i}^{9,k,u^k} = 0$  у супротном  $Y_{l,j}^{10,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од депоа,  $Y_{l,j}^{10,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од депоа  $l$  до дистрибутивног центра  $j$ ,  $Y_{l,j}^{10,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{l,m}^{11,k,u^k}$  - Индикатор коришћења возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од депоа,  $Y_{l,m}^{11,k,u^k} = 1$ , ако се возило креће од депоа  $l$  до центра за одлагање  $m$ ,  $Y_{l,m}^{11,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{l,s}^{12,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од депоа,  $Y_{l,s}^{12,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од депоа  $l$  до добављача  $s$ ,  $Y_{l,s}^{12,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{m,s}^{13,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од центра за одлагање,  $Y_{m,s}^{13,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од центра за одлагање  $m$  до добављача  $s$ ,  $Y_{m,s}^{13,k,u^k} = 0$  у супротном

$Y_{m,l}^{14,k,u^k}$  - Индикатор коришћења празног возила  $u^k$  додељеног корисничком центру  $k$  од центра за одлагање,  $Y_{m,l}^{14,k,u^k} = 1$ , ако се возило враћа празно од центра за одлагање  $m$  до депоа  $l$ ,  $Y_{m,l}^{14,k,u^k} = 0$  у супротном

Секвенце

$X$  - секвенца која садржи променљиве  $[X^0 \dots X^5]$ .

$Y^k$  - секвенca која садржи променљиве  $[Y^{0,k,1} \dots Y^{0,k,nu^k} \dots Y^{14,k,1} \dots Y^{14,k,nu^k}]$  додељене корисничком центру  $k$ .

Вектор одлучивања

$x$  - скуп секвенци  $X$  и  $Y^k$  за  $k = 1 \dots nk$ .

Оптимизациони проблем је пронаћи  $x$  тако да се минимизује укупно растојање између локација:

$$\begin{aligned}
 f(x) = \sum_k f^k(X, Y^k) = & \sum_k (\sum_{u^k} \sum_{i^k} \sum_{s^k} D_{s,i}^0 \cdot Y_{s,i}^{0,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{i^k} \sum_{s^k} D_{s,i}^0 \cdot Y_{i,s}^{1,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{i^k} \sum_{j^k} D_{i,j}^1 \cdot Y_{i,j}^{2,k,u^k} + \\
 & + \sum_{u^k} \sum_{l^k} \sum_{i^k} D_{l,i}^2 \cdot Y_{l,i}^{3,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{j^k} \sum_{k^k} D_{j,k}^3 \cdot Y_{j,k}^{4,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{k^k} \sum_{s^k} D_{k,s}^4 \cdot Y_{k,s}^{5,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{k^k} \sum_{j^k} D_{j,k}^3 \cdot Y_{k,j}^{6,k,u^k} + \\
 & + \sum_{u^k} \sum_{k^k} \sum_{i^k} D_{i,k}^5 \cdot Y_{k,i}^{7,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{k^k} \sum_{l^k} D_{k,l}^6 \cdot Y_{k,l}^{8,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{l^k} \sum_{i^k} D_{l,i}^2 \cdot Y_{l,i}^{9,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{l^k} \sum_{j^k} D_{l,j}^7 \cdot Y_{l,j}^{10,k,u^k} + \\
 & + \sum_{u^k} \sum_{l^k} \sum_{m^k} D_{l,m}^8 \cdot Y_{l,m}^{11,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{l^k} \sum_{s^k} D_{l,s}^9 \cdot Y_{l,s}^{12,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{m^k} \sum_{s^k} D_{m,s}^{10} \cdot Y_{m,s}^{13,k,u^k} + \sum_{u^k} \sum_{l^k} \sum_{m^k} D_{l,m}^8 \cdot Y_{m,l}^{14,k,u^k} )
 \end{aligned} \tag{1}$$

При ограничењима

$$\sum_l X_{k,l}^3 = yd_k, \forall k \in K \tag{2}$$

$$\sum_j X_{j,k}^2 = d_k, \forall k \in K \tag{3}$$

$$(\sum_s X_{s,i}^0 + \sum_l X_{l,i}^4) - \sum_j X_{i,j}^1 = 0, \forall i \in I \tag{4}$$

$$\sum_i X_{i,j}^1 - \sum_k X_{j,k}^2 = 0, \forall j \in J \tag{5}$$

$$\sum_i X_{l,i}^4 - \sum_k (1-r)X_{k,l}^3 = 0, \forall l \in L \tag{6}$$

$$\sum_m X_{l,m}^5 - \sum_k rX_{k,l}^3 = 0, \forall l \in L \tag{7}$$

$$\sum_i X_{i,j}^1 \leq T_j^1, \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_k X_{k,l}^3 \leq T_l^2, \forall l \in L \quad (9)$$

$$\sum_l X_{l,m}^5 \leq T_m^2, \forall m \in M \quad (10)$$

$$X_{s,i}^0 \leq q_v \cdot \sum_k \sum_{u^k} Y_{s,i}^{0,k,u^k}, \forall s \in S, \forall i \in I \quad (11)$$

$$X_{i,j}^1 \leq q_v \cdot \sum_k \sum_{u^k} Y_{i,j}^{2,k,u^k}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (12)$$

$$X_{j,k}^2 \leq q_v \cdot \sum_k \sum_{u^k} Y_{j,k}^{4,k,u^k}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (13)$$

$$X_{k,l}^3 \leq q_v \cdot \sum_k \sum_{u^k} Y_{k,l}^{8,k,u^k}, \forall k \in K, \forall l \in L \quad (14)$$

$$X_{l,i}^4 \leq q_v \cdot \sum_k \sum_{u^k} Y_{l,i}^{9,k,u^k}, \forall l \in L, \forall i \in I \quad (15)$$

$$X_{l,m}^5 \leq q_v \cdot \sum_k \sum_{u^k} Y_{l,m}^{11,k,u^k}, \forall l \in L, \forall m \in M \quad (16)$$

$$\sum_{u_k} \sum_s (Y_{s,i}^{0,k,u^k} - Y_{i,s}^{1,k,u^k}) - \sum_{u_k} \sum_j Y_{i,j}^{2,k,u^k} + \sum_{u_k} Y_{k,i}^{7,k,u^k} + \quad (17)$$

$$\sum_{u_k} \sum_l (Y_{l,i}^{9,k,u^k} - Y_{i,l}^{3,k,u^k}) = 0, \forall i \in I, \forall k \in K$$

$$\sum_{u_k} \sum_i Y_{i,j}^{2,k,u^k} - \sum_{u_k} (Y_{j,k}^{4,k,u^k} - Y_{k,j}^{6,k,u^k}) + \sum_{u_k} \sum_l Y_{l,j}^{10,k,u^k} = 0, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{u_k} \sum_i (Y_{i,s}^{1,k,u^k} - Y_{s,i}^{0,k,u^k}) + \sum_{u_k} Y_{k,s}^{5,k,u^k} \quad (19)$$

$$+ \sum_{u_k} \sum_l Y_{l,s}^{12,k,u^k} + \sum_{u_k} \sum_m Y_{m,s}^{13,k,u^k} = 0, \forall s \in S, \forall k \in K$$

$$\sum_{u_k} \sum_i (Y_{i,l}^{3,k,u^k} - Y_{l,i}^{9,k,u^k}) + \sum_{u_k} Y_{k,l}^{8,k,u^k} - \sum_{u_k} \sum_m (Y_{l,m}^{11,k,u^k} - Y_{m,l}^{14,k,u^k}) - \quad (20)$$

$$\sum_{u_k} \sum_s Y_{l,s}^{12,k,u^k} - \sum_{u_k} \sum_j Y_{l,j}^{10,k,u^k} = 0, \forall l \in L, \forall k \in K$$

$$\sum_{u_k} \sum_l (Y_{l,m}^{11,k,u^k} - Y_{m,l}^{14,k,u^k}) - \sum_{u_k} \sum_s Y_{m,s}^{13,k,u^k} = 0, \forall m \in M, \forall k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{u_k} \sum_j (Y_{j,k}^{4,k,u^k} - Y_{k,j}^{6,k,u^k}) - \sum_{u_k} \sum_s Y_{k,s}^{5,k,u^k} - \sum_{u_k} \sum_i Y_{k,i}^{7,k,u^k} - \sum_{u_k} \sum_l Y_{k,l}^{8,k,u^k} = 0, \forall k \in K \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & Y_{s,i,u}^0, Y_{i,s,u}^1, Y_{i,j,u}^2, Y_{i,l,u}^3, Y_{j,k,u}^4, Y_{k,s,u}^5, Y_{k,j,u}^6, Y_{k,i,u}^7, Y_{k,l,u}^8, Y_{l,i,u}^9, Y_{l,j,u}^{10}, Y_{l,m,u}^{11}, \\ & Y_{l,s,u}^{12}, Y_{m,s,u}^{13}, Y_{m,l,u}^{14} \in \{0,1\} \forall (i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, s \in S, m \in M, u \in U) \end{aligned} \quad (23)$$

Функција циља (1) представља укупно растојање између локација. Ограничење (2) показује да је количина производа, која није враћена из корисничког центра, испоручена од стране добављача. Ограничење (3) показује да су све потребе корисника задовољене. Ограничење (4) обезбеђује да је укупна количина испоручена од добављача и враћена од корисника једнака количини производа једнака количини производа која је испоручена дистрибутивном центру. Ограничења (5-7) обезбеђују балансе токова између производних центара и дистрибутивних центара, корисничких центара и депоа за разврставање и депоа за разврставање и центара за одлагање отпада, респективно. Ограничења (8) и (9) представљају капацитетна ограничења за дистрибутивне центре и депое за разврставање, док ограничење (10) представља капацитетно ограничење центара за одлагање отпада у који се испоручују производи и делови производа који се не могу поправити или поново користити. Ограничења (11-16) представљају капацитетна ограничења за возила. Ограничења (17-22) обезбеђују да се сва возила враћају на своје оригиналне локације. Ограничење (23) представља бинарно ограничење за све управљачке променљиве.

### 6.11.2 Претраживање рута возила применом VNS алгоритма

Претраживање рута возила се спроводи за сваки кориснички центар појединачно. Циљ претраживања је да се за сваки кориснички центар одреди добављач, фабрика, дистрибутивни центар, депо за разврставање и депо за одстрањивање тако да добијено решење буде што ближе оптималном. Возила, дистрибутивни центри, депои за разврставање и депои за одстрањивање имају ограничене капацитете, те добијени



результат зависи и од редоследа корисничких центара при претраживању. Из тог разлога претраживање се састоји из два корака:

- формирање редоследа корисничких центара (*VNS1* алгоритам),
- претраживање рута возила за сваки кориснички центар појединачно (*VNS2* алгоритам).

### 6.11.3 Формирање редоследа корисничких центара

Претраживање редоследа корисничких центара је реализовано применом модификоване *VNS* методе без локалног претраживања са детерминистичким одабиром решења. Анализиране су четири верзије *VNS* методе. Циљ претраживања је да се одреди најповољнији редослед корисничких центара при претраживању рута возила за сваки кориснички центар појединачно. Сврха одређивања редоследа корисничких центара је претрага рута за сваки кориснички центар појединачно коришћењем алгоритма *VNS2*. Решења  $z$  представљају низове индекса корисничких центара, нпр.  $nk = 5$ :  $z = [k_4 k_2 k_1 k_3 k_5]$ . За све верзије, претраживање се, најпре, врши за сваки кориснички центар појединачно, без ограничења капацитета дистрибутивних центара, депоа за разврставање и центара за одлагање отпада, применом *VNS2* алгоритма. Резултати су вредности  $f_u^k$  ( $k = 1, \dots, nk$ ) и они представљају тотална растојања која треба да пређу возила додељена неком корисничком центру. Претрага без узимања у обзир капацитета врши се само једном и добијени резултати се користе касније у алгоритму.

Након тога, руте возила се претражују узимајући у обзир капацитетна ограничења за дистрибутивне центре, депое за разврставање и центре за одлагање отпада. Ово претраживање врши се коришћењем *VNS2* алгоритма. У свим верзијама *VNS1*, почетно решење представља низ индекса добијених сортирањем корисничких центара према критеријуму тражње. Сортирање се врши од највеће ка најмањој тражњи. На почетно решење примењује се *VNS2* алгоритам. Резултати су вредности

$f^k$  ( $k = 1, \dots, nk$ ).

Вредности  $df^k$  се добијају као  $f^k - fu^k$  и представљају разлику у укупном растојању добијену са и без узимања у обзир капацитета. Низ индекса корисничких центара  $kz$  је добијен сортирањем вредности  $df^k$  од највеће ка најмањој. Овај низ се користи како би се одредио укупан број суседстава и селектовало решење у фази размрдавања. Решења су селектована на следећи начин: проиритет се даје корисничким центрима који имају вишу вредности  $df^k$ . Када се пронађе ново најбоље решење, формира се нови низ  $kz$ .

Такође, у две верзије *VNS1*, решења се одабирају из суседстава на основу возила која су заједничка за два или више корисничка центра. Руте са заједничким возилима су укључене у функцију  $f^k$  само за корисничке центре са нижим индексима у секвенци  $z$ . На овај начин кориснички центри са вишим индексима у секвенци  $z$  добијају предност. Одабирају се решења са замењеним позицијама корисничких центара са најмање једним заједничким возилом.

У наставку је дат алгоритам *VNS1* хеуристике. Решење  $z'$  је одабрано на основу низа  $kz$  или заједничких возила у суседству  $N^h$ . Суседство  $N^h$  је формирано у окружењу тренутног најбољег решења  $z$ . У сваком кораку  $h$  из суседства  $N^h$  се врши одабир  $imax(h)$  решења  $z'$ . Након тога се, на сваки кориснички центар, примењује алгоритам *VNS2*. Ако је  $f(z') < f(z)$ , решење  $z$  се ажурира, израчунава се нови низ  $kz$  и врши се повратак на суседство  $N^h$ . У супротном, алгоритам прелази у суседство  $N^{h+1}$ . Алгоритам се завршава када стигне до суседства  $N^{hmax}$  и у њему не може да пронађе ново најбоље решење.

*Алгоритам 1: VNS1 хеуристика – Одређивање секвенци корисничких центара*

**for**  $k = 1:nk$

$fu^k \leftarrow$  **VNS2 search** ( $k$ ) without capacity limit;

**end**

$z \leftarrow$  initial solution (customer centers sorted by demand)

```

for i = 1:nk
    k = z(i);
     $x^k, f^k \leftarrow \text{VNS2 search (k) with capacity limit;}$ 
end
f(z) = sum( $f^k$ );
for k = 1:nk
     $df^k = f^k - fu^k$ ;
end
sort  $df^k$ ;
kz  $\leftarrow$  indexes of customer centers in sorted  $df^k$ ;
Input: The set of neighborhood structures  $N^h$  for  $h = 1, \dots, hmax$ 
h  $\leftarrow$  1;
while  $h \leq hmax$ 
    i  $\leftarrow$  1;
    found  $\leftarrow$  0;
    while ( $i \leq imax(h)$ ) ^ (found = 0) /Check imax(h) solutions from  $N^h$ /
        z'  $\leftarrow$  neighbor in  $N^h(z)$  selected using kz array or common vehicles /Shaking/
        for i = 1:nk
            k = z'(i);
             $x^k, f^k \leftarrow \text{VNS2 search (k);}$ 
        end
        f(z') = sum( $f^k$ ), ( $k = 1, \dots, nk$ );
        if  $f(z') < f(z)$  /Move or Not/
            z  $\leftarrow$  z';
            h  $\leftarrow$  1;
            i  $\leftarrow$  1;
            found  $\leftarrow$  1;
            for k = 1:nk
                 $df^k = f^k - fu^k$ ;
            end
            sort  $df^k$ ;
            zk  $\leftarrow$  indexes of customer centers in sorted  $df^k$ 
            hmax  $\leftarrow$  number of  $df^k$  elements greater than zero
        else
            i  $\leftarrow$  i + 1;
        end
    end
    if found = 0
        h  $\leftarrow$  h + 1; /Neighborhood Change/
    end
end
return x;

```

VNS1.1: Пример структуре суседстава за VNS1.1 за пет корисничких центара ( $nk=5$ ) је приказан на слици 6.12.

kz:	4	5	2	3	1	→	hmax=2					
z=	1	2	3	4	5	→	4	5	1	2	3	$N^1$
z=	1	2	3	4	5	→	4	5	2	3	1	$N^2$

Слика 6.12. Пример структуре суседства за модел *VRP\_MOD\_1* за VNS1.1

У сваком кораку  $h$  из суседства  $N^h$  врши се одабир једног решења  $z'$  ( $imax(h)=1$ ). Прво суседство  $N^1$  обухвата решења која се добијају премештањем два елемента тренутно најбољег решења  $z$  на прво место у низу. Решење добијено премештањем прва два елемента у низу  $kz$  добијено је из суседства  $N^1$ . Друго суседство  $N^2$  обухвата решења која се добијају премештањем четири елемента тренутно најбољег решења  $z$  на прво место у низу. Решење добијено премештањем прва четири елемента у низу  $kz$  добијено је из суседства  $N^2$ . Последње суседство  $N^{hmax}$  обухвата решења која се добијају премештањем  $2 \cdot hmax$  елемената тренутно најбољег решења  $z$  на прво место у низу. Решење добијено премештањем  $2 \cdot hmax$  елемената у низу  $kz$  добијено је из суседства  $N^{hmax}$ . Укупан број суседстава  $hmax$  представља број корисничких центара код којих је  $df^k > 0$  подељено са 2.

VNS1.2: Пример структуре суседстава за VNS1.2 за пет корисничких центара ( $nk=5$ ) је приказан на слици 6.13.

kz:	4	5	2	3	1	→	hmax=2					
z=	1	2	3	4	5	→	4	5	1	2	3	$N^1$
z=	1	2	3	4	5	→	2	3	1	4	5	$N^1$

Слика 6.13. Пример структуре суседства за модел *VRP\_MOD\_1* за VNS1.2

VNS1.2 користи једно суседство  $N^1$  ( $hmax = 1$ ) које обухвата решења добијена премештањем два елемента у тренутно најбољем решењу  $z$ , на прво место у низу.

Укупан број решења  $imax(1)$  изабран из суседства  $N^l$  представља број корисничких центара за које је  $df^k > 0$  подељено са 2. Прво изабрано решење је добијено премештањем прва два елемента у низу  $kz$ . Друго изабрано решење је добијено премештањем друга два елемента у низу  $kz$ . Последње изабрано решење је добијено премештањем последња два елемента у низу  $kz$ .

$VNS1.3$  користи исто суседство као и прва верзија увећано за још једно суседство. То суседство обухвата решења добијена заменом позиција два корисничка центра у тренутно најбољем решењу  $z$ . Одабрана су решења са замењеним позицијама оних корисничких центара која имају најмање једно заједничко возило. Број решења  $imax(hmax)$  која су одабрана из овог суседства једнак је половини броја корисничких центара која користе иста возила.

$VNS1.4$  користи исто суседство као и друга верзија. За разлику од друге верзије,  $VNS1.4$  садржи и суседство у коме је одабир решења заснован на заједничким возилима, као у верзији  $VNS1.3$ .

$z=$	1	2	3	4	5	→	1	5	3	4	2	$N^{hmax}$
$z=$	1	2	3	4	5	→	<del>1</del>	<del>2</del>	<del>4</del>	<del>3</del>	<del>5</del>	$N^{hmax}$

Слика 6.14. Пример  $N^{hmax}$  структуру суседства за модел  $VRP\_MOD\_1$  за  $VNS1.3$  и  $VNS1.4$

Слика 6.14. представља  $VNS$  верзије 1.3 и 1.4 у којима кориснички центри имају заједничка возила (први ред) и у којима кориснички центри немају заједничка возила (други ред).

### 6.11.4 Претраживање руте возила за сваки кориснички центар појединачно (VNS2 алгоритам)

У наставку је дат алгоритам VNS2 хеуристике. У VNS2 алгоритму допуштено решење  $x^k$  је представљено као низ секвенце  $R^k$  која садржи индексе добављача 's', производног центра 'i', дистрибутивног центра 'j', депоа за разврставање 'l' и депоа за одстрањивање 'm' ( $R^k = [s\ i\ j\ l\ m]$ ) додељених корисничком центру  $k$ .  $X$  и  $Y^k$  су одређени секвенцом  $R^k$  и улазним параметрима. Почетно решење  $x^k$  је одабрано случајним избором (енгл. *randomly*). Метода променљивог спуста (енгл. *Variable Neighborhood Descend - VND*) је коришћена за локално претраживање. У фази размрдавања, решење  $x^{k'}$  је изабрано случајно из суседства  $N^h$ . Суседство  $N^h$  је формирано у околини тренутно најбољег решења  $x^k$ . Локални оптимум  $x^{k''}$  је добијен локалним претраживањем околине решења  $x^{k'}$ . У сваком кораку  $h$ , врши се случани одабир  $(ns + ni + nj + nl + nm) / ((nc+1)-h)$  решења  $x^{k'}$  из околине  $N^h$ . Број врста локација које су коришћене у решењу означен је са  $nc$ . Ако је  $f^k(x^{k''}) < f^k(x^k)$ , решење се ажурира и врши се повратак на структуру суседства  $N^1$ . У супротном, након локалног претраживања, алгоритам прелази у ново суседство  $N^{h+1}$ . Алгоритам се завршава када стигне до суседства  $N^{hmax}$  и у њему не може да пронађе ново најбоље решење.

**Алгоритам 2: VNS2 хеуристика за претраживање рута возила за сваки кориснички центар  $k$**

**Input:** The set of neighborhood structures  $N^h$  for  $h = 1, \dots, hmax$

$x^k \leftarrow$  **initial solution** (randomly selected)

$h \leftarrow 1$ ;

**while**  $h \leq hmax$

$i \leftarrow 1$ ;

  found  $\leftarrow 0$ ;

**while**  $(i \leq (ns+ni+nj+nl+nm)/((nc+1)-h)) \wedge (found = 0)$          /Check  $(ns+ni+nj+nl+nm)$   
   / $((nc+1)-h)$  solutions from  $N^h$ /

$x^{k'} \leftarrow$  neighbor in  $N^h(x^k)$  randomly selected         /Shaking/

$x^{k''} \leftarrow$  VND local search ( $x^{k'}$ )                                 /Local search/

**if**  $f^k(x^{k''}) < f^k(x^k)$    /Move or Not/

$x^k \leftarrow x^{k''}$ ;

$h \leftarrow 1$ ;

```

    i ← 1;
    found ← 1;
  else
    i = i + 1;
  end
end
end
if found = 0
  h ← h + 1;
end
end
return xk, fk, X, Yk;

```

*/Neighborhood Change/*

#### 6.11.4.1 Размрдавање

Примењене VNS хеуристике користе пет структура суседстава за фазу размрдавања. Суседства су формирана на основу секвенци  $R^k$ . Пример структуре суседства коришћене у фази размрдавања за пети кориснички центар ( $k=5$ ) је приказан на слици 6.15.

$R^5$ :	s2	i4	j8	l7	m9	→	s2	i9	j8	l7	m9	$N^1$
$R^5$ :	s2	i4	j8	l7	m9	→	s2	i10	j7	l7	m9	$N^2$
$R^5$ :	s2	i4	j8	l7	m9	→	s2	i12	j4	l9	m9	$N^3$
$R^5$ :	s2	i4	j8	l7	m9	→	s2	i15	j3	l12	m4	$N^4$
$R^5$ :	s2	i4	j8	l7	m9	→	s3	i14	j5	l15	m2	$N^5$

Слика 6.15. Пример структуре суседства у фази размрдавања за модел  $VRP\_MOD\_1$

Прво суседство  $N^1$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају четири заједничке и једну различиту тачку. Друго суседство  $N^2$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају три заједничке и две различите тачке. Треће суседство  $N^3$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају две заједничке и три различите тачке. Четврто суседство  $N^4$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају једну заједничку и четири различите тачке. Пето суседство  $N^5$  обухвата сва решења која, у односу на тренутно најбоље решење, имају свих пет различитих тачака. Решења са

дистрибутивним центрима, депоима за разврставање и центрима за одстрањивање којима не може да се додели кориснички центар за који се врши претраживање због прекорачења капацитета - не улазе ни у једно суседство.

#### 6.11.4.2 Локално претраживање – VND метода

У наставку је дат алгоритам VND методе. Примењена VND хеуристика користи пет структура суседстава. Алгоритам проверава сва решења у суседству  $N^h$  и прелази у суседство  $N^{h+1}$ , уколико у суседству  $N^h$  није пронађен нови локални оптимум. У супротном, алгоритам се враћа на суседство  $N^l$  и ажурира решење  $x^{k''}$ . Алгоритам се завршава када стигне до суседства  $N^{hmax}$  и у њему не може да пронађе нови локални оптимум.

*Алгоритам 3: VND метода – локално претраживање рута возила за кориснички центар k*

**Input:** The set of neighborhood structures  $N^h$  for  $h = 1, \dots, hmax$   
 $x^k \leftarrow$  initial solution (selected in shaking phase of VNS2)  
 $h \leftarrow 1$ ;  
**while**  $h \leq hmax$   
     $x^{k'} \leftarrow$  solution in  $N^h(x^k)$   
    **if**  $f^k(x^{k'}) < f^k(x^k)$  */Move or Not/*  
         $x^k \leftarrow x^{k'}$ ;  
         $h \leftarrow 1$ ;  
    else  
         $h \leftarrow h + 1$ ; */Neighborhood Change/*  
**end**  
**end**  
**return**  $x^k$ ;

Пример структура суседстава које су коришћене приликом локалног претраживања за четврти кориснички центар ( $k=4$ ), је представљен на слици 6.16.



$R^1$ :	s3	i4	j8	l5	m2	→	s5	i4	j8	l5	m2	$N_1$
$R^2$ :	s3	i4	j8	l5	m2	→	s3	i5	j8	l5	m2	$N_2$
$R^3$ :	s3	i4	j8	l5	m2	→	s3	i4	j10	l5	m2	$N_3$
$R^4$ :	s3	i4	j8	l5	m2	→	s3	i4	j10	l7	m2	$N_4$
$R^5$ :	s3	i4	j8	l5	m2	→	s3	i4	j10	l7	m4	$N_5$

Слика 6.16. Пример структуре суседства за локално претраживање за модел *VRP\_MOD\_1*

Прво суседство  $N^1$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим добављача. Друго суседство  $N^2$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим производних центара. Треће суседство  $N^3$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим дистрибутивних центара. Она решења која обухватају дистрибутивне центре код којих је капацитет прекорачен, не улазе у суседство. Четврто суседство  $N^4$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке, осим депоа за разврставање. Она решења која обухватају депое за разврставање код којих је капацитет прекорачен, не улазе у суседство. Пето суседство  $N^5$  обухвата сва решења која у односу на тренутни локални оптимум, имају све остале заједничке тачке осим депоа за одстрањивање. Она решења која обухватају депое за одстрањивање код којих је капацитет прекорачен - не улазе у суседство. Такође, вредности  $u$  и  $r$  се узимају у обзир у свим случајевима.

### 6.11.5 Резултати за модел *VRP\_MOD\_1*

Модел који је предложен у овом делу дисертације, илустрован је примерима. Алгоритми су кодирани у MATLAB језику. Тестирања су извршена на процесору AMD Triple Core Processor 2.10 GHz. Оптимално решење је добијено егзактним алгоритмима. Најпре је представљено поређење између оптималног решења и решења добијених коришћењем *VNS* хеуристике. Ово поређење је представљено за примере са малим бројем чворова који садрже до 10 корисничких центара. Резултати

су представљени у табелама 6.20-6.22. Оптимално решење је представљено ради процене и потврде решења добијених коришћењем хеуристика. Величина 'gap' представља проценат одступања решења добијених хеуристикама у поређењу са оптималним решењем.

Табела 6.20. Оптимално решење за мали број чворова за модел *VRP\_MOD\_1*

No.	димензије						Оптимално решење	CPU (s)
	S	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.		
1	2	2	2	3	2	2	31.614	3.93
2	2	3	3	5	3	2	32.989	4.14
3	3	3	4	7	3	2	38.742	45,39
4	4	3	3	8	3	2	62.181	279,87
5	4	2	3	9	3	2	84.840	1.760,11
6	4	2	3	10	3	2	97.079	18.883,30

Табела 6.21. Хеуристике 1.1 и 1.2 за мали број чворова за модел *VRP\_MOD\_1*

No.	димензије						VNS1.1	gap (%)	CPU (s)	VNS1.2	gap (%)	CPU (s)
	S	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.						
1	2	2	2	3	2	2	31.614	0,00	0,51	31.614	0,00	0,48
2	2	3	3	5	3	2	33.846	2,53	0,63	33.006	0,05	0,65
3	3	3	4	7	3	2	38.770	0,07	0,78	38.770	0,07	0,78
4	4	3	3	8	3	2	67.275	7,57	0,82	67.295	7,59	0,82
5	4	2	3	9	3	2	87.997	3,58	0,84	88.003	3,59	0,84
6	4	2	3	10	3	2	97.732	0,67	0,75	97.732	0,67	0,73

Табела 6.22. Хеуристике 1.3 и 1.4 за мали број чворова за модел *VRP\_MOD\_1*

No.	димензије						VNS1.3	gap (%)	CPU (s)	VNS1.4	gap (%)	CPU (s)
	S	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D.						
1	2	2	2	3	2	2	31.614	0,00	0,49	31.614	0,00	0,49
2	2	3	3	5	3	2	33.846	2,53	0,63	33.006	0,05	0,65
3	3	3	4	7	3	2	38.770	0,07	0,80	38.757	0,04	0,83
4	4	3	3	8	3	2	67.238	7,52	0,85	67.238	7,52	0,85
5	4	2	3	9	3	2	87.997	3,58	0,87	87.974	3,56	0,90
6	4	2	3	10	3	2	97.732	0,67	0,85	97.732	0,67	0,87

За мали број чворова, разлика између оптималног решења и решења добијених коришћењем хеуристика је до 7.59%, али су решења добијена за знатно краће време

коришћењем хеуристика. У примеру чије су димензије [2 2 2 3 2 2] проналажење оптималног решења траје око осам пута дуже. Пример [2 2 2 3 2 2] је коришћен за графички приказ кретања возила. Улазни подаци су представљени у табели 6.23.

Табела 6.23. Улазни подаци за пример са три корисничка центра за модел

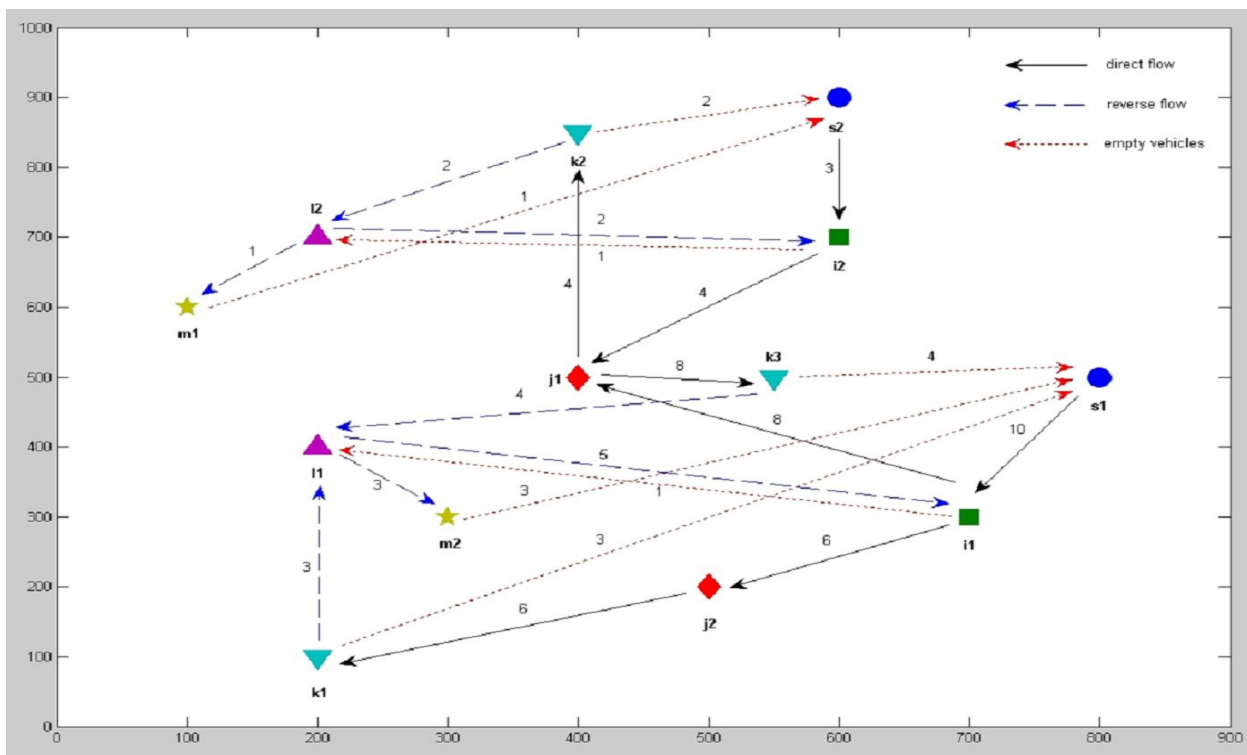
<i>VRP_MOD_1</i>								
Улазни подаци								
y=40%	r=50%	N <sub>j</sub> =2500	N <sub>i</sub> =1500	N <sub>m</sub> =1500	q <sub>v</sub> =200	d <sub>k1</sub> =1200	d <sub>k2</sub> =800	d <sub>k3</sub> =1600

Излазни подаци испоручених количина на свакој рути су представљени у табели 6.24. Оптимално решење и решење добијено коришћењем хеуристика имају исте вредности.

Табела 6.24. Испоручене количине за

модел <i>VRP_MOD_1</i>			
X <sub>si</sub>	i1	i2	
s1	1960	0	
s2	0	560	
X <sub>ij</sub>	j1	j2	
i1	1600	1200	
i2	800	0	
X <sub>jk</sub>	k1	k2	k3
j1	0	800	1600
j2	1200	0	0
X <sub>kl</sub>	l1	l2	
k1	600	0	
k2	0	400	
k3	800	0	
X <sub>li</sub>	i1	i2	
l1	840	0	
l2	0	240	
X <sub>lm</sub>	m1	m2	
l1	0	560	
l2	160	0	

Руте возила и број возила на свакој рути су (бројеви изнад стралица) су приказани на слици 6.17.



Слика 6.17. Руте и број возила на свакој рути за модел *VRP\_MOD\_1*

На крају овог дела рада, презентовани су резултати за четири различите варијанте VNS хеуристике. За примере са великим бројем чворова, чији су резултати представљени у табелама 6.25 – 6.26., улазни подаци су следећи:

- Тражња корисничких центара варира од 900 – 4.000,00 производа
- $y = 0.30$ ;  $r = 0.15$ ;
- $N_j^1$  варира од 25.000 – 38.500 производа
- $N_l^2$  варира од 10.000 – 16.500 производа
- $N_m^2$  варира од 5.000 – 5.500 производа
- $q_v = 400$
- Због великих димензија проблема који су разматрани, растојања између тачака су генерисана

Табела 6.25. Резултати хеуристика 1.1 – 1.2 за модел *VRP\_MOD\_1*

No.	dimensions						<i>VNSI.1</i>	CPU	<i>VNSI.2</i>	CPU
	S	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D		(s)		(s)
1	12	3	4	10	4	2	49.477	0,94	49.477	1,03
2	14	4	6	20	5	3	129.475	0,94	123.373	1,16
3	19	6	11	40	8	4	194.642	2,11	194.686	2,57
4	20	6	19	60	12	5	267.316	3,49	270.952	3,56
5	22	7	20	80	15	7	321.543	9,71	326.484	8,98
6	22	8	22	100	16	7	474.428	11,25	476.591	26,27
7	25	10	25	200	20	9	716.319	56,31	725.137	51,28
8	25	10	26	300	21	9	1.210.520	157,08	1.224.612	270,01
9	27	11	30	400	22	10	1.869.137	591,74	1.874.686	286,74
10	28	11	32	500	24	11	3.033.602	736,09	3.123.883	870,73
11	28	12	33	600	25	12	4.501.674	812,61	4.527.108	1.127,73
12	28	13	34	700	25	12	6.496.589	1.141,41	6.558.899	1.154,85
13	29	14	34	800	26	12	8.493.187	1.290,19	8.591.609	1.677,77
14	30	14	35	900	27	12	11.355.388	2.630,99	11.621.579	2.327,21
15	30	15	35	1000	28	12	13.866.563	2.447,60	13.996.870	2.712,88

Табела 6.26. Резултати хеуристика 1.3 – 1.4 за модел *VRP\_MOD\_1*

No.	dimensions						<i>VNSI.3</i>	CPU	<i>VNSI.4</i>	CPU
	S	M.C.	D.C.	C.C.	D.D.	DIS.D		(s)		(s)
1	12	3	4	10	4	2	49.028	1,05	49.022	1,11
2	14	4	6	20	5	3	121.524	1,57	120.947	1,62
3	19	6	11	40	8	4	193.613	3,45	194.63	4,02
4	20	6	19	60	12	5	266.907	8,03	265.903	8,96
5	22	7	20	80	15	7	320.249	24,52	321.587	23,90
6	22	8	22	100	16	7	467.988	31,71	460.111	39,10
7	25	10	25	200	20	9	696.314	150,90	725.083	90,86
8	25	10	26	300	21	9	1.180.346	445,33	1.194.800	472,27
9	27	11	30	400	22	10	1.830.119	589,47	1.851.656	1.055,73
10	28	11	32	500	24	11	2.976.617	1.080,44	3.058.638	1.026,96
11	28	12	33	600	25	12	4.399.102	1.167,98	4.481.589	1.339,31
12	28	13	34	700	25	12	6.386.439	1.513,42	6.477.977	1.450,76
13	29	14	34	800	26	12	8.413.728	1.729,21	8.554.275	1.912,32
14	30	14	35	900	27	12	11.224.140	3.296,33	11.451.959	2.966,31
15	30	15	35	1000	28	12	13.728.129	3.299,11	13.875.346	3.262,39

У вези резултата хеуристика са великим бројем чворова, може се закључити следеће:

- Хеуристика *VNS1.3* даје боља решења од свих осталих варијанти *VNS* хеуристике. Ова хеуристике даје боље решење у 73,33%.
- Хеуристика *VNS1.1* има најкраће CPU време у 73,33% од свих извршених тестова, али су решења добијена овом хеуристиком лошија од решења добијених коришћењем осталих хеуристика за 1,89% у просеку.
- Хеуристика *VNS1.3* даје боље решење за 1,39% у просеку, у поређењу са варијаном *VNS1.1*, која је најефикаснија хеуристика. Хеуристика *VNS1.1* има краће време од хеуристике *VNS1.3* за 34,88% у просеку.
- Хеуристика *VNS1.2* има најкраће CPU време у 26,67% од свих извршених тестова. Ова хеуристика даје боља решења у примерима са мањим бројем чворова.
- Хеуристика *VNS1.4* даје најбоље решење у 26,67% случајева. Ова хеуристика даје боља решења у примерима са већим бројем чворова.
- Хеуристике *VNS1.1* и *VNS1.3* су сличне, али додавање једног новог суседства омогућује хеуристици *VNS1.3* да даје боље резултате. Хеуристика *VNS1.1* има ниже просечно CPU време за 34,88% у поређењу са хеуристиком *VNS1.3*. С друге стране, хеуристика *VNS1.3* даје боље просечно решење за 1,39%.
- Хеуристике *VNS1.2* и *VNS1.4* су сличне, али додавање једног новог суседства омогућује хеуристици *VNS1.4* да даје боље резултате. Хеуристика *VNS1.2* има ниже просечно CPU време за 29,77% у поређењу са хеуристиком *VNS1.4*. С друге стране, хеуристика *VNS1.4* даје боље просечно решење за 1,13%.

У овом делу рада, изучавана је једнокритеријумска функција. Модел који је разматран је *VRP* модел у интегрисаном ланцу логистике снабдевања и повратне логистике. Математички модел представља оригинални модел у затвореном ланцу снабдевања (енгл. *closed-loop supply chain - CLSC*). Најпре је представљен *VRP* модел чији је циљ минимизација укупног растојања између локација (чворова). Такође, представљене су и четири оригиналне хеуристике засноване на *VNS* методи, како би се решили проблеми великих димензија. Проблем мањих диманзија решени су оптимално егзактним алгоритмима. Функционалност предложеног алгоритма процењена је у бројним нумеричким примерима и експериментисањем на рачунару.

Примена хеуристика у решавању проблема рутирања возила је област истраживања која ће се развијати и у будућности, а посебно узимајући у обзир да тржишта постају све више отворена и без граница које би лимитирале транспорт производа и материјала. Експерименти извршени у овом истраживању показују да представљени алгоритми могу бити успешно коришћени у и примерима из праксе.

## 7 ЗАКЉУЧАК

С обзиром на повећану конкурентност, промовисање корисничких услуга и рециклажу материјала, повратна логистика доживљава све бржи развој. Најважнији проблем и подручје доношења одлука којима се бави повратна логистика односе се на изналажење могућности за опоравак производа, делова производа и материјала, интеграцију активности повратне логистике у продукционе и дистрибутивне системе, као и рационализацију укупних логистичких трошкова, како са економског, тако и са еколошког становишта.

Циљ ове дисертације је био да се развију интегрисани модели логистике снабдевања и повратне логистике. Циљ истраживања спроведеног у овој дисертацији је да се предложи адекватни и оригинални модели који обухватају активности и процесе логистике снабдевања и повратне логистике. Процеси и активности посматрани су у интегрисаној мрежи. Намера је била да се развију интегрисани модели логистике снабдевања, који би укључивањем активности повратне логистике, омогућили бољи финансијски резултат за све учеснике ланца снабдевања. Такође, циљеви модела односе се и на задовољење потреба корисника, уз испуњење унапред дефинисаних вредности еколошких параметара. С обзиром на сложеност критеријумских функција, модели који су представљени у овој дисертацији су NP тврди проблеми. Такође, циљ дисертације је и развој оригиналних хеуристика за решавање презентованих модела.

Оригиналност дисертације огледа се у презентованим моделима, као и у развијеним хеуристичким методама за њихово решавање. Конкретније, у овој дисертацији представљени су оригинални модели избора локације коришћењем метода вишекритеријумске анализе, као и математички модели рутирања возила, *LRP* модели, и интегрисани модели логистике снабдевања и повратне логистике. Предложени модели разматрају и економске и еколошке факторе у интегрисаној мрежи снабдевања.



У оквиру дисертације, урађено је следеће:

- Развијено је пет модела:
  - Модел избора локације у повратном току логистике снабдевања решен коришћењем фази *AHP* методе. Модел је конципиран као студија случаја и заснован на реалним подацима.
  - Локацијски – рутинг проблем у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике представљен моделом са три функције циља (максимизација укупног профита, минимизација неиспорчене количине производа и минимизација коришћења не-еколошких материјала и технологија у производним центрима).
  - Локацијски – рутинг проблем у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике представљен моделом са две функције циља (максимизација укупног профита и минимизација количине производа који нису враћени у повратни ток).
  - Локацијски – рутинг проблем у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике представљен моделом са једном функцијом циља (максимизација укупног профита).
  - Проблем рутирања возила у интегрисаном моделу логистике снабдевања и повратне логистике представљен моделом са једном функцијом циља (минимизација укупног растојања између локација).

- Модели приказани у дисертацији су решени оптимално за мали број чворова. За решавање проблема са великим бројем чворова коришћене су хеуристичке методе.
- За решавање презентованих математичких модела, развијена су оригинална хеуристичка решења. Осим модела, који је решен коришћењем фази *АНР* методе, сви остали презентовани модели су решени коришћењем методе променљивих околина. За локално претраживање коришћена је метода променљивог спуста. Такође, развијене су и оригиналне хеуристичке и метахеуристичке методе којима су наведени модели решени.
- За проблеме локација и рутирања са једном и више функција циља урађене су анализе осетљивости. Резултати анализа осетљивости указују на изузетну осетљивост вредности функција циља у односу на параметре повратне логистике и тражњу производа.
- На крају, дата су поређења и разматрања резултата добијених решавањем локацијских – рутинг проблема са различитим бројем функција циља, како би се показало како додатне функције циља утичу на промену укупног профита затвореног ланца снабдевања.
- Осим *NP* тврдих проблема, приказан је и модел који је решен коришћењем меке оптимизационе методе - фази *АНР* методе. Циљ овог дела истраживања био је да се покаже да се мрежа повратне логистике може моделовати и у случају када не постоји довољно информација о критеријумима истраживања. Развој и имплементација закона који се односе на заштиту животне средине у Србији је још увек у повоју и развој ових закона прати токове интеграције Србије у Европску унију. Стога се и вредности критеријума за дефинисање локација у повратном ланцу логистике не могу прецизно дефинисати.

Резултати истраживања које је спроведено у овој дисертацији доприносе бољем разумевању области повратне логистике, као и интегрисаних модела логистике снабдевања и повратне логистике. Такође, с обзиром на то да је у дисертацији имплементиран оригиналан приступ методи променљивих околина, закључује се да спроведено истраживање даје и могућности за развој нових хеуристичких и метахеуристичких метода. Показано је да се хеуристике успешно могу применити за решавање интегрисаних модела логистике снабдевања и повратне логистике. Интегрисани проблеми логистике снабдевања и повратне логистике су NP тврди проблеми великих димензија, са великим бројем променљивих и, углавном, више критеријумских функција. С обзиром на наведено, за њихово решавање се у практичној примени користе хеуристике. Показано је да различите функције циља које се односе на повратне логистику могу да доведу повећања профита на нивоу целокупног ланца снабдевања. Анализама осетљивости указано је на изузетну осетљивост профите функције циља на параметре повратне логистике и тражњу.

На основу прегледа научне и стручне литературе из области проучавања модела повратне логистике и проблема локација и рутирања у затвореном ланцу снабдевања, може се уочити пораст броја радова и истраживања у међународним часописима у последњој деценији. У овој дисертацији разматрано је 200 литерарних навода. Највећи број радова представљају публикације у часописима који имају међународни значај. С обзиром на актуелност теме ове докторске дисертације, највећи број објављених радова из предметне области је у последњој деценији.

Анализом прегледне литературе дефинисани су и назначени кључни проблеми у изучаваној области. Такође, анализом литературе утврђено је да су *LRP* модели све сложенији, као и да се све више развијају модели у којима су традиционални ланци снабдевања интегрисани са повратним токовима. Један од основних проблема је интегрисање логистике снабдевања и повратних токова у ланцу, те је, назначени проблем изучаван у овој дисертацији. Такође, анализом литературе утврђено је да се

*IFRL* проблеми, који због својих карактеристика припадају NP тврдим проблемима, решевају коришћењем хеуристика.

Методе истраживања које су коришћене у прва четири поглавља су опште методе (методe сакупљања и критичке обраде расположиве литературе у вези са предметом истраживања, анализа садржаја сакупљеног материјала, систематизација и анализа постојећих приступа и знања у области истраживања). У поглављима 5 и 6. коришћене су методе математичког моделирања. За тестирање резултата истраживања коришћене су методе експериментисања на рачунару. Ради тестирања модела који је решен коришћењем фази *ANP* методе, коришћен је Microsoft Excel, док су за све проблеме који су дефинисани као NP тврди, алгоритми кодирани у MATLAB језику. Тестирања су извршена на процесору AMD Triple Core Processor 2.10 GHz. За тестирање малих проблема коришћен је GLKP солвер, док је у последњем моделу оптимално решење добијено егзактним алгоритмима.

Научни и стручни доприноси докторске дисертације односе се на унапређење система одлучивања у интегрисаним мрежама ланца снабдевања које обухватају активности логистике снабдевања и активности повратне логистике. Основни мотив развоја оригиналних интегрисаних модела логистике снабдевања и повратне логистике и хеуристичких метода за решавање NP тврдих проблема је у изналажењу могућности њихове примене у савременим логистичким мрежама.

Истраживањем које је спроведено доказане су општа и посебне хипотезе.

На основу претходно наведеног, може се закључити да резултати добијени у овој докторској дисертацији представљају оригиналан научни допринос досадашњем фонду истраживања из предметне области. Такође, остварени резултати дају могућности за нова научна истраживања.

Будућа истраживања биће усмерена ка развоју интегрисаних модела логистике снабдевања и повратне логистике који ће укључивати додатне захтеве и циљеве, као што је нпр. увођење и разматрање правних регулатива. У овој дисертацији приказана је *VNS* хеуристичка метода, те ће правци будућег истраживања бити посвећени развоју нових хеуристичких решења, којима би се могли решити модели приказани у овој дисертацији. Такође, проблем избора локације у овој дисертацији решен је и коришћењем фази *АНР* методе, те ће правци будућег истраживања бити усмерени и ка решавању проблема коришћењем комбинованих метода класичне и фази вишекритеријумске анализе.

## Литература:

1. Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch., Moussiopoulos, N., Baniyas, G. (2010). Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece, *Waste Management*, 30, 870–879.
2. Agencija za zaštitu životne sredine. (2012): Posebni tokovi otpada u Republici Srbiji u 2012. [http://www.sepa.gov.rs/download/NRIZ\\_podaci/PTO\\_2012.pdf](http://www.sepa.gov.rs/download/NRIZ_podaci/PTO_2012.pdf) [11.02.2014]
3. Akcali E., Cetinkaya, S., Uster H. (2009). Network Design for Reverse and Closed-Loop Supply Chains: An Annotated Bibliography of Models and Solution Approaches, *Networks*, 53, 231-248.
4. Alfonso-Lizarazo, E.H., Montoya-Torres, J.R, Gutiérrez-Franco, E. (2013). Modeling reverse logistics process in the agro-industrial sector: The case of the palm oil supply chain, *Applied Mathematical Modelling*, 37(23), 9652–9664.
5. Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm for multi-objective optimization of supply chain networks' *Computers & Industrial Engineering*, 51, 197–216.
6. Alves, M.C.M., Lima, B.S.L.P., Vieira, A.G.E. (2009). Developing a fuzzy decision support system to determine the location of a landfill site, *Waste Management and Research*, 27, 641-651.
7. Ambrosino, D., Scutella, M.G. (2005). Distribution network design: New problems and related models, *European Journal of Operational Research*, 165, 610–624.

8. Amin, S.H., Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return, *Applied Mathematical Modeling*, 37, 4165–4176.
9. Ammons, J., Realf, M., Newton, D. (1997). Reverse Production System Design and Operation for Carpet Recycling, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
10. Archetti, C., Speranza, M.G. (2008). The Split Delivery Vehicle Routing Problem: A Survey. The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, 43, 103-122.
11. Ayhan, M.B. (2013). A fuzzy AHP approach for supplier selection problem: a case study in a gear motor company, *International Journal of Managing Value and Supply Chains*, 4(3), 11-23.
12. Azi, N., Gendreau, M., Potvin, J.Y. (2014). An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem with multiple routes, *Computers & Operations Research*, 41, 167–173.
13. Babazadeh, R., Tavakkoli-Moghaddam, R., Razmi, J. (2012). A Complex Design of the Integrated Forward-Reverse Logistics Network under Uncertainty, *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 23(2), 113-123.
14. Balakrishnan, A., Ward, J.E., Wong, R.T. (1987). Integrated facility location and vehicle routing models: Recent work and future prospects, *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 7, 35–61.
15. Barker, J.T., Zabinsky, Z.B. (2011). A multi criteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process, *Omega*, 39, 558-573.

16. Barros, A. I., R. Dekker, V. Scholten. (1998). A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research* 110, 199-214.
17. Barreto, S., Ferreira, C., Paixão, J., Santos, B.S. (2007). Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem, *European Journal of Operational Research*, 179(3), 968–977.
18. Belenguer, J.M., Benavent, E., Prins, C., Prodhon, C., R. Calvo, R. (2011). A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem, *Computers & Operations Research*, 38, 931-941.
19. Berger, T., Debaillie, B. (1996). Location of disassembly centers for re-uses to extend an network, University of Leuven, Belgium.
20. Bernon, M., Cullen, J. (2007). An integrated approach to managing reverse logistics, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 10, 41-56.
21. Bianchessi, N., Righini, G. (2007). Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery, *Computers and Operations Research*, 34, 578-594.
22. Bing, X., Keizer, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., van der Vorst, J.G.A.J., (2014). Vehicle-routing for the eco-efficient collection of household plastic waste, *Waste management*, Vol. 34, No. 4, pp. 719-729.
23. Bruns, A., Klose, A., Stahly, P. (2000). Restructuring of Swiss parcel delivery services, *OR Spektrum*, 22, 285–302.



24. Bostel, N., Dejax, P., Lu, Y. (2005). The design, planning and optimization of reverse logistics systems: a review, A.Langevin and D.Riopel (eds), *Logistics System: Design and optimization*, Springer.
25. Bowman, R. J. (1995). Green logistics, *Distribution*, 94 (6), 48-52.
26. Buhrkal, K., Larsen, A., Ropke, S. (2012). The Waste Collection vehicle-routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254.
27. Caballero, R., González, M., Ma Guerrero, F., Molina, J., Paralera, 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), 1751–1763.
28. Cao, E., Lai, M. (2010). The open vehicle routing problem with fuzzy demands, *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2405–2411.
29. Cardoso, S.R., Paula, A., Barbosa-Póvoa, F.D., Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 226(3), 436–451.
30. Carter, C.R., Ellram, L.M. (1998). Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation, *Journal of Business Logistics*, 19, 85–102.
31. Castillo-Villar, K.K., Gonzalez-Ramirez, R.G., Gonzalez, M.P., Smith, N.R. (2014). A heuristic procedure for a ship routing and scheduling problem with variable speed and discretized time windows, *Mathematical Problems in Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/750232>

32. Castillo-Villar, K.K., Smith, N.R., Herbert-Acero, J.F. (2014). Design and Optimization of Capacitated Supply Chain Networks Including Quality Measures, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2014, Article ID 218913, 17 pages
33. 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.
34. Chen, J.F., Wu, T.H. (2006), Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups, *Journal of Operational Research Society*, 57, 579-587.
35. Chen, P., Huang, H.K., Dong, X.Y. (2010). Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem, *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1620–1627.
36. Chou, S.W., Chang, Y.C. (2008). The implementation factors that influence the ERP (Enterprise Resource Planning) Benefits, *Decision Support Systems*, 46(1),149-157.
37. Christopher, M., (1998). Logistics and Supply Chain Management Strategies for Reducing Cost and Improving Service. *Second ed. London*.
38. Contardo, C., Hemmelmayr, V., Crainic, T.G. (2012). Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem, *Computers & Operations Research*, 39(12), 3185–3199.

39. Contardo, C., Martinelli, R. (2014). A new exact algorithm for the multi-depot vehicle routing problem under capacity and route length constraints, *Discrete Optimization*, 12, 129–146.
40. Cooper, M.C., Lambert, D., Path, J. D. (1997). Supply Chain Management: More than a new name for logistics, *International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1-14.
41. Copado-Méndez, P.J., Blum, C., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L. (2013). Large neighbourhood search applied to the efficient solution of spatially explicit strategic supply chain management problems, *Computers & Chemical Engineering*, 49, 114–126.
42. Cruz, R.C., Silva, T.C.B., Souza, M.J.F., Coelho, V.N., Mine, M.T., Martins, A.X. (2012). GENVNS-TS-CL-PR: A heuristic approach for solving the vehicle-routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 217-224.
43. Cruz-Rivera, R., Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico, *European Journal of Operational Research*, 196(3), 930–939.
44. Cupic, M., Rao Tummala, V.M., Suknović, M., (2003). Odlučivanje: formalni pristup, FON, Beograd.
45. Dat, L.Q., Linh, D.T.L., Chou, S.Y., Yu, V.F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products, *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6380–6387.

46. Das, K., Chowdhury, A.H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning, *International Journal of Production Economics*, 135(1), 209–221.
47. 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), 2865–287.
48. Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up, *OR Spektrum*, 23, 79–96.
49. Devika, K., Jafarian, A., Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques, *European Journal of Operational Research*, Vol. 235, pp. 594-615.
50. Diabat, A., Abdallah, T., Henschel, A. (2013). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration, *Computers & Operations Research*, DOI: 10.1016/j.cor.2013.08.023.
51. Ding, S. (2010). Reverse Logistics Optimization Based on Parallel Genetic Algorithm, *International Conference on E-Business and E-Government*, 3275-3278.
52. Du, F., Evans, G. W. (2008). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service, *Computers and Operations Research*, 35, 2617 – 2634.
53. Easwaran, G., Üster, H. (2010). A Closed-Loop Supply Chain Network Design Problem with Integrated Forward and Reverse Channel Decisions, *IIE Transactions*, 42/11, 779-792.

54. El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk, *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423–431.
55. Escobar, J.W., Linfati, R., Toth, P. (2013), A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem, *Computers & Operations Research*, 40(1), 70–79.
56. Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., Zegordi, S.H. (2014a). Variable neighborhood search for the bi-objective post-sales network design problem: A fitness landscape analysis approach, *Computers & Operations Research*, 52, 300-314.
57. Eskandarpour, M., Zegordi, S.H., Nikbakhsh E. (2013). A parallel variable neighborhood search for the multi-objective sustainable post-sales network design problem, *Int. J. Production Economics* Vol. 145, pp. 117-131.
58. Fleischmann, M. (2000). Quantitative models for reverse logistics, PhD thesis, Erasmus University Rotterdam.
59. Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M., van Wassenhove, L.N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design, *Production & Operations Management*, 10(2), 156–173.
60. Fleischmann, M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Numen, J., Van Wassenhove, L., Ruwaard J. (2004), Quantitative models for reverse logistics: a review, *European Journal of Operational Research*, 103. 1-17.

61. Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.D.P. (2000). A characterization of logistics networks for product recovery, *Omega* 28(6), 653–666.
62. Fleszar, K., Osman, I.H., Hindi, K.S. (2009). A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, 195(3), 803–809.
63. Gehin, A., Zwolinski, D., Brissaud, D. (2008). A tool to implement sustainable end of life strategies in the product development phase, *Journal of Cleaner Production*, 16, 566-576.
64. Geyer, R., Jackson, T. (2004). Supply loops and their constraints: The industrial ecology of recycling and reuse. *California Management Review*, 46 (2), 55-73.
65. Goel, A., Gruhn, V. (2005). Solving a Dynamic Real-Life Vehicle Routing Problem, *Operations Research Proceedings*, 1(1), 367-372.
66. Gomes, M.I., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q. (2011). Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal, *Waste Management*, 31(7), 1645–1660.
67. Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food, *Int. J. Production Economics*, Vol. 152, pp. 9-28.
68. Govindan, K., Popiuc, M.N. (2014). Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry, *European Journal of Operational Research*, 233(2), 326–336.

69. Gribkovskaia, I., Halskau, O., Laporte, G., Vlcek, M. (2007). General solutions to the single vehicle routing problem with pickups and deliveries, *European Journal of Operational Research*, 180(2), 568-584.
70. Guerrero, W.J., Prodhon, C., Velasco, N., Amaya, C.A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand, *International Journal of Production Economics*, 146(1), 359–370.
71. Hamies, Y.Y., Lasdon L.S., Wismer D.A. (1971), On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization, *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1(3), 296-297.
72. Hansen, P., Mladenovic, N. (2003). Variable neighbourhood search, *Handbook of Metaheuristics*, 145-184, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
73. Hansen, P., Mladenovic, N., Perez, J.M. (2010). Variable neighbourhood search: methods and applications, *Annals of Operations Research*, 175(1), 367-407.
74. Hatefi, S.M., Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions, *Applied Mathematical Modelling*, 38(9), 2630–2647.
75. Hemmelmayr, V.C., Cordeau, J.F., Crainic, T.G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problems arising in city logistics, *Computers & Operations Research*, 39(12), 3215–3228.

76. Hishamuddin, H., Sarker, R.A., Essam, D. (2014). A recovery mechanism for a two echelon supply chain system under supply disruption, *Economic Modelling*, 38, 555–563.
77. Husakova, N. (2008). Obrnuta logistika I pohabane gume, *The Interantional Journal of Transport and Logistics*, 74-80.
78. Imran, A., Salhi, S., Wassan, N.A. (2009). A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, 197(2), 509–518.
79. Jamshidi, M. (2011). *Logistics Operations and Management*, Elsevier Inc, 2011.
80. Jarboui, B., Derbel, H., Hanafi, S., Mladenović, N. (2013), Variable neighborhood search for location routing, *Computers & Operations Research*, 40(1), 47–57.
81. Javid, A.A., Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582–597.
82. Jayaraman, V., Guide Jr, V., Srivastata, R. (1999). A closed loop logistics model for remanufacturing, *Journal of Operational Research Society*, 50, 497-508.
83. Johnson, P. F. (1998). Managing value in reverse logistics systems, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34 (3), 217-27.
84. Jung, K.S., Dawande, M., Neil Geismar, H., Daniel, V., Guide Jr, R., Sriskandarajah, C. (2014). Supply planning models for a remanufacturer under



- just-in-time manufacturing environment with reverse logistics, *Annals of Operations Research*, doi 10.1007/s10479-014-1569-7.
85. Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K. (2010). A genetic algorithm approach for solving closed supply chain model: a case of battery recycling, *Applied Mathematical Modeling*, 34, 650-670.
  86. Kanthavel, K., Prasad, P. S. S., Vignesh, K. P. (2012). Optimization of Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup using Nested Particle Swarm Optimization, *European Journal of Scientific Research*, 73(3), 331-337.
  87. 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.
  88. Keyvanshokoh, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S.M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 10182–10202.
  89. Khajavi, L.T., Seyed-Hosseini, S.M., Makui, A. (2011). An Integrated Forward/Reverse Logistics Network Optimization Model for Multi-Stage Capacitated Supply Chain, *iBusiness*, 3, 229-235.
  90. Kim, H., Yang, J., Lee, K.D. (2009). Vehicle-routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (5), 291-299.

91. Kim, K., Song, I., Kim, J., Jeong, B. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment, *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 279–287.
92. Kim, T., Glock, C.H, Kwon, Y. (2014). A closed-loop supply chain for deteriorating products under stochastic container return times, *Omega*, 43, 30–40.
93. Klausner, M., Hendrickson, C.T. (2000), Reverse-logistics strategy for product take-back, *Interfaces*, 30(3), 156–65.
94. Ko, H.J., Park, B.I. (2005).The impacts of an integrated solution on the logistics networks of third-party logistics providers, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 2762–2777.
95. Krikke, H.R., Van Harten, A. (1999). Reverse logistics network re-design for copiers, *Operational Research Spectrum*, 21(3), 381-409.
96. Kristianto, Y., Gunasekaran, A., Helo, P., Hao, Y. (2014). A model of resilient supply chain network design: A two-stage programming with fuzzy shortest path, *Expert Systems with Applications*, 41(1), 39–49.
97. Kroon, L., Vrijens, G. (1995). Returnable containers: an example of reverse logistics, *International journal of physical distribution and logistics management*, 25(2), 56-68.
98. Kuo, Y., Wang, C.C. (2012). A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost, *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6949–6954.

99. Kytöjoki, J., Nuortio, T., Braysy, O., Gendreau, M. (2007). An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems, *Computers & Operations Research*, 34(9), 2743–2757.
100. Krčevinac, S., Čangalović, M., Kovačević-Vujičić, V., Martić, M., Vujošević, M. Operaciona istraživanja 2, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 2006.
101. Laporte, G. (1989). Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problems, *European Journal of Operational Research*, 39(1), 71–78.
102. Le Blanc, L., van Krieken, M., Krikke, H., Fleuren, H. (2006). Vehicle-routing concepts in the closed-loop container network of ARN—a case study, *Operations Research-Spektrum*, 28(1), 53-71.
103. Lee, C., M. Epelman, A., White, C.C., Bozer, Y.A. (2006). A Shortest Path Approach to the Multiple-Vehicle Routing Problem with Split Pick-Ups, *Transportation Research Part B*, 40(4), 265-284.
104. Lee, D. H., Dong, M. (2008). A Heuristic Approach to Logistics Network Design for End-of Lease Computer Products Recovery, *Transportation Research Part 3*, 455-474.
105. Lee, D.H., Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61–71.

106. Lee J.E., Lee, K.D. (2012). Integrated forward and reverse logistic model: A case study in distilling and sale Company in Korea, *International Journal of Innovative, Computing, Information and Control*, 8(7) 4483-4495.
107. Li, R.C., Jenelle, T., Tee, C. (2012). A Reverse Logistics Model For Recovery Options Of E-waste Considering the Integration of the Formal and Informal Waste Sectors, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 788–816.
108. Li, X., Li, Y, Cai, X. (2014). Remanufacturing and pricing decisions with random yield and random demand, *Computers & Operations Research*, DOI: 10.1016/j.cor.2014.01.005.
109. Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H., Lam H.Y. (2014). Survey of Green vehicle-routing Problem: Past and future trends, *Expert Systems with Applications*, 41 (4), 1118-1138.
110. Liu, S.C., Lee, S.B. (2003). A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into considerations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22, 941–950.
111. Lu, Z., Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities, *Computers & Operations Research*, 34(2), 299–323.
112. Macedo, R., Hanafi, S., Jarboui, B., Mladenovic, N., Alves, C., de Carvalho, J.M.V. (2013). Variable neighborhood search for the location routing problem with multiple routes, *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Proceedings of 2013 International Conference Oct. 2013*.

113. Makajić, D. (1998). Primena tehnike mrežnog planiranja u procesu operativnog planiranja i realizacije operativnog plana', SYMP-OP-IS 98, Herceg Novi.
114. Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon, *International Journal of Production Economics*, 136(1), 218–230.
115. Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management – A review, *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401–412.
116. Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C. D. Zacharia, Z. G. (2001). Defining Supply Chain Management, *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.
117. Milosevic, I., Naunovic, Z. (2013). The application of a multi-parameter analysis in choosing the location of a new solid waste landfill in Serbia, *Waste Management and Research*, 31(10), 1019-1027.
118. Min, H., Ko, H. J., Ko, C. S. (2006). A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, *Omega*, 34, 56 – 66.
119. Min, H., Jayaraman, V., Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions, *European Journal of Operational Research*, 108(1), 1–15.
120. Minis, I., Tatarakis, A. (2011). Stochastic single vehicle routing problem with delivery and pick up and a predefined customer sequence, *European Journal of Operational Research*, 213(1), 37–51.

121. Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine: Posebni tokovi otpada u Republici Srbiji u 2012. godini, Republika Srbija 2012.
122. Mladenović, N. (1988). Nove metode u matematičkom programiranju sa primenom u lokacijskom, alokacijskom i transportnom problemu, doktorska disertacija, Fakultet organizacionih nauka, Beograd.
123. Mladenovic, N., Hansen, P., 1997. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research* 24(11), 1097-1100.
124. Mladenović, N., Urošević, D., Hanafi, S., Ilić, A. (2012). A general variable neighborhood search for the one-commodity pickup-and-delivery travelling salesman problem, *European Journal of Operational Research*, 220(1), 270–285.
125. Mohammadi, M., Ramzi, J., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). Multi-Objective Invasive Weed Optimization for Stochastic Green Hub Location Routing Problem with Simultaneous Pick-Ups and Deliveries, *Economic computation and economic cybernetics studies and research*, 47(3), 247-267.
126. Monczka, R.M., Trent, R.J., Handfield, R.B. (1998), *Purchasing and Supply Chain Management*, Cincinnati, OH: South-Western College Publishing.
127. Montane, F.A.T., Galvao, R.D. (2006). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service, *Computers & Operations Research*, 33(3), 595–619.
128. Mousavi, S.M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain, *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), 335–347.

129. Mutha, A., Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules, *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 334–346.
130. Nadizadeh, A., Nasab, H.H. (2014). Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm, *European Journal of Operational Research*, 238(2), 458–470.
131. Nagy, G., Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods, *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649–672.
132. Niknejad, A., Petrovic, D. (2014). Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes, *European Journal of Operational Research*, 238(1), 143–154.
133. Pagell, M., Wu, Z., Nagesh, N. (2007). The supply chain implications of recycling, *Business Horizon*, 50, 133-143.
134. Perl, J., Daskin, M.S. (1985). A warehouse location problem, *Transportation Research Quarterly*, 19, 381-96.
135. Pirkwieser, S., Raidl, G. R. (2010). Variable Neighborhood Search Coupled with ILP-Based Very Large Neighborhood Searches for the (Periodic) Location-Routing Problem, *Hybrid Metaheuristics*, 6373, 174-189.

136. Pishvae, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A. (2011). A Robust Optimization Approach to Closed-Loop Supply Chain Network Design Under Uncertainty, *Applied Mathematical Modelling*, 35, 637–649.
137. Pohlen, T.L., Farris, M. (1992). Reverse logistics in plastic recycling, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 22(7), 35-47.
138. Pokharel, S., Mutha, A. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 175-182.
139. Prodhon, C. (2011). A hybrid evolutionary algorithm for the periodic location-routing problem, *European Journal of Operational Research*, 210(2), 204–212.
140. Prodhon, C., Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems, *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17.
141. Rahim, F., Sepil, C. (2014). A location-routing problem in glass recycling, *Annals of Operations Research*, doi 10.1007/s10479-014-1621-7.
142. Ramos, T.R.P., Gomes, M.I., Barbosa-Póvoa, A.P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems, *Waste Management*, 33(8), 1691–1703.
143. Ramos, T.R.P., Gomes, M.I., Barbosa-Póvoa, A.P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns, *Omega*, 48, 60–74.
144. Rand, G.K. (1976). Methodological choices in depot location studies. *Operational Research Quarterly*, 27, 241–249.



145. Rath, S., Gutjahr, W.J. (2014). A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief, *Journal of Computers and Operations Research*, 42, 25-39.
146. Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D., Bräysy, O., Ioannou, G. (2010). A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 37(3), 443–455.
147. Republika Srbija. (2010a). Zakon o upravljanju otpadom. Službeni glasnik RS, br.36/09, 88/10. <http://www.ekoplan.gov.rs/src/upload-centar/dokumenti/zakoni-inacrti-zakona/zakoni/zu.pdf> [15.03.12]
148. Republika Srbija. (2010b). Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine.[http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2010%20Maj/sstrategija\\_upravljanja\\_otpadom\\_konacno.pdf](http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2010%20Maj/sstrategija_upravljanja_otpadom_konacno.pdf) [15.03.12]
149. Rogers, D., Tibben-Lembke, R. (1998). Going Backwards: Reverse logistics trends and practices, University of Nevada, Reno, Center of logistics management.
150. Roghanian, E., Pazhoeshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm, *Journal of Manufacturing Systems*, 33(3), 348–356.
151. Roman, E. (2012). Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook, Woodhead Publishing.
152. Rubio, S., Chamorro, A., Miranda, F.J. (2008). Characteristics of the research on reverse logistics' *International Journal of Production Research*, 46, 1099-1120.

153. Saaty, T. L. (1994). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytical hierarchy process*, RWS Publications, Pittsburgh.
154. Safaei, M. (2014). An integrated multi-objective model for allocating the limited sources in a multiple multi-stage lean supply chain, *Economic Modelling*, 37, 224–237.
155. Salema, M.I.G., Barbosa-Pavoa, A.P., Novais, A.Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 179, 1063-1077.
156. Salhi, S., Imran, A., Wassen, N.A. (2013). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation, *Computers & Operations Research*, DOI: 10.1016/j.cor.2013.05.011.
157. Sbihi, A., Eglese, R.W. (2010). Combinatorial optimization and Green Logistics, *Annals of Operations Research*, 175(1), 159-175.
158. Sheu, J.B., Chou, Y.H. Hu, C.C. (2005). An integrated logistics operational model for green-supply chain management, *Transportation Research Part E*, 41(4), 287–313.
159. Službeni glasnik Republike Srbije (2003) Nacionalna strategija za upravljanje otpadom, Vlada Republike Srbije, Beograd, Srbija.
160. Soleimani, H., Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk, *European Journal of Operational Research*, 237(2), 487–497.

161. Spengler, T., Duckert, H., Penkhun, T., Rentz, O. (1997). Environmental integrated production and recycling management, *European Journal of Operational Research*, 97, 308-326.
162. Srivastava, S.K. (2008). Network design for reverse logistics, *Omega*, 36(4), 535–548.
163. Srivastava, S.K. (2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9, 53–80.
164. Stanivuković, D. (2003). Logistika, organizacija I menadžment, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
165. Stanojević, M., Vujošević M., Stanojević, B. (2008). Computation results of finding all efficient points in multi objective combinatorial optimization, *International Journal of Computers, Communications & Control*, 3(4), 374-383.
166. Stanojević, M., Vujošević, M., Stanojević, B. (2008). Number of efficient points in some multi objective combinatorial optimization problems, *International Journal of Computers, Communications & Control*, 3, 497-502.
167. Stock, J.R. (1998). Development and Implementation of Reverse Logistics Programs, Council of Logistics Management, Oak Brook, IL.
168. Stock, J.R. (1992). Reverse Logistics, Council of Logistics Management, Oak Brook, IL.

169. Surekha, P., Sumathi, S. (2011). Solution to multi-depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms, *World Applied Programming*, 1(3), 118-131.
170. Tan, A., Kumar, A. (2008). A decision making model to maximise the value of reverse logistics in the computer industry, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 4(3), 297-312.
171. Tasan, A.S., Gen, M. (2012). A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries, *Computers & Industrial Engineering*, 62(3), 755–761.
172. Thierry, M., Salomon, M., Van de Numen, J., Van Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in product recovery management, *California Management Review*, 37(2), 79-85.
173. Ting, C.J., Chen, C.H. (2013). A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem, *International Journal of Production Economics*, 141(1), 34–44.
174. Tlili, T., Faiz, S., Krichen, S. (2014). A Hybrid Metaheuristic for the Distance-constrained Capacitated Vehicle Routing Problem, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2nd World Conference on Business, Economics and Management, 109, 779–783.
175. Tuzun, D., Burke, L.I. (1999). A two-phase tabu search approach to the location routing problem, *European Journal of Operational Research*, 116(1), 87–99.
176. Van Laarhoven, P.J.M., Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory, *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 229–241.

177. Vasiljević, D., Jovanović, B. (2008). Menadžment logistike i lanaca snabdevanja, FON, Beograd.
178. Vasiljević, D. (2001). Рачунарски интегрисана логистика – модели и трендови, FON, Beograd.
179. Vasiljević, D. (2009). Logistika i implementacija štedljive proizvodnje, *Tehnika - Menadžment*, 59(2), 1-6.
180. Vidal, T., Crainic, T.G., Gendreau, M., Prins, C. (2013). Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis, *European Journal of Operational Research*, 231(1), 1–21.
181. Vidovic, M., Hwang, H., Kim, K.H. (2003). Location depots for empty containers as a probabilistic location-routing problem with balancing demand, *The International Journal of Transport and Logistics*, 71-87.
182. Vlachos, D., Georgiadis, P., Iakovou, E.(2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains, *Computers & Operations Research*, 34(2), 367–394.
183. Vlajić, J., Vidovic, M., Miljuš, M. (2005). Lanci snabdevanja – definisanje i performanse, *Transport i logistika*, 9, 85-112.
184. Vlajić, J., Vudović, M., Miljuš, M. (2009). Supply Chins – defining and performances, *T&L*, 9(5), 85-113.

185. Vujošević, M., Panić, B., Stanojević, M. (2005). Rešavanje problema lokacije u lancima snabdevanja primenom softverskog paketa OPL STUDIO, *Tehnika*, 3, 13-18.
186. Vujošević, M., Panić, B. (2006). Mrežni modeli lokacije i njihove primene, *Tehnička dijagnostika*, 5(3-4), 32-39.
187. Vujošević, M. (2003). Optimizacija u upravljanju savremenim lancima snabdevanja, *Management – časopis za teoriju i praksu menadžmenta*, 8(32), 8-13.
188. Wang, H.F., Hsu, H.W. (2010). A Closed-loop Logistic Model with a Spanning-tree Based Genetic Algorithm, *Computers & Operations Research*, 37, 376-389.
189. Wisner, J.D., Keong Leong, G., Tan, K.C. (2004). Supply Chain Management: A Balanced Approach', Mason, OH: Thomson South-Western.
190. Wu, T.H., Chinyao, L. Bai, J.W. (2002), Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems, *Computers & Operations Research*, 29, 1393-1415.
191. Xu, Y., Wang, L., Yang, Y. (2012). A New Variable Neighborhood Search Algorithm for the Multi Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 289–296.
192. Yao, Z., He, W., Li, G., Huand, J. (2013). The integrated design and optimization of a WEEE collection network in Shanghai, China, *Waste Management and Research*, 31 (9), 910-919.

193. You, P.S., Hsieh, Y.C. (2014). A hybrid heuristic approach to the problem of the location of vehicle charging stations, *Computers & Industrial Engineering*, 70, 195–204.
194. Yu, F.V., Lin, S.W., Lee, W., Ting, C.J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 58(2) 288–299.
195. Yu, P.L. (1985). *Multi-criteria Decision Making: Concepts, Techniques, and Extensions*, Plenum, New York.
196. Yu, S., Ding, C., Zhu, K. (2011). A hybrid GA–TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material, *Expert Systems with Applications*, 38(8), 10568–10573.
197. Zachariadis, E.E, Tarantilis, C.D, Kiranoudis, C.T. (2009). A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service, *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1070–1081.
198. Zarandi, M.H.F., Hemmati, A., Davar, S. (2011). The multi-depot capacitated location-routing problem with fuzzy travel times, *Expert Systems with Applications*, 38(8), 10075–10084.
199. Zhang, Z.H., Li, B.F., Qian, X., Cai, L.N. (2014). An integrated supply chain network design problem for bidirectional flows, *Expert Systems with Applications*, 41(9), 4298–4308.

200. Zhao, L., Liu, M., Qu, L. (2009). Disruption coordination of closed-loop supply chain network – models and theorems, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 5(2), 511-520.
201. Zikmund, W. G., Stanton, W. J. (1971), Recycling solid wastes: A channels-of-distribution problem, *Journal of Marketing*, 35 (3), 34-9.
202. Zolfagharinia, H., Hafezi, M., Farahani, R. Z., Fahimnia, B. (2014). A hybrid two-stock inventory control model for a reverse supply chain, *Transportation Research Part E*, Vol. 67, 141-161.



## Биографија

Рођена је 21.08.1982 у Приштини у Републици Србији. Завршила је основну школу у Приштини са одличним успехом. Обзиром на просечну оцену за време основног образовања која је износила 5.00, добитник је и Вукове дипломе. Од учешћа на различитим такмичењима, пре свега, из области природних наука, може се истаћи освајање првог места на покрајинском такмичењу из предмета 'Физика', током школске 1994/95. године. Средње образовање стекла је у Земунској гимназији, на природно – математичком смеру. Просечна оцена током средњег образовања износила је 5.00.

Факултет организационих наука уписала је 2001. године, а смер Управљање квалитетом на наведеном факултету завршила је 2007. године. Дипломирала је са оценом 10. Током основних студија посећивала је релевантне семинаре из области Управљања квалитетом, као што су, 'Дани квалитета' одржани у Београду, 2005. године и 'Систем квалитета – услов за успешно пословање и конкурентности', организованог од стране Асоцијације за квалитат и стандардизацију Србије у Крушевцу, 2005. године. Такође, током основних студија, похађала је професионалне праксе и то у следећим предузећима:

- Апотекарска установа 'Београд'
  - Пракса у Сектору за развој – део за Управљање квалитетом
  - Асистирање у активностима у оквиру пројекта увођења система квалитета
- Галеника а.д.
  - Пракса у Сектору технологије квалитета
  - Асистирање у активностима у оквиру пројекта обезбеђења квалитета према ГМП нормама

Наведене праксе је похађала у току 2005. И 2006. године.

На постдипломским Мастер студијама била је стипендиста ФОН-а и Мастер диплому стекла је 2008. године. Мастер рад одбранила је са оценом 10.

У току 2008 стекла је диплому сертифициваног традер-а на ФОРЕХ-у (Међународном девизном тржишту).

Током 2007. и 2008. године радила је хонорарне послове у маркетиншким агенцијама, као што је 'Стратегиц маркетинг', 'Суновате' и 'JWT', а од новембра 2008. године запослена је у Војвођанској банци а.д. Нови Сад, где је, најпре, била радила на пословима Координатора пројеката у Функцији Некретнине банке (2008-2010). У току обављања посла Координатора пројеката, стекла је искуство у вођењу тимова средњих величина, при чему је водила и по више оваквих тимова истовремено. Осим вођења тимова, радни задаци на наведеном радном месту укључивали су и примену специфичних грађевинских стандарда, вођење рачуна о роковима извођења радова, адекватности и безбедности уграђених материјала, као и да су материјали у складу са стандардима прихваћеним од стране Банке, организовање и извршавање административних послова у току извођења и завршетка радова, контрола привремених и окончаних ситуација, припрема захтеваних докумената Банке и сл.

Школске 2009/10 године уписала је докторске студије на Факултету организационих наука на студијском програму 'Информациони системи и менаџмент', изборно подручје: 'Менаџмент'. У периоду 2010-2012 положила је девет испита предвиђених студијским планом и програмом са просечном оценом 9.89.

Од јула 2010. године запослена је у Одељењу Касне наплате потраживања од становноштва у Функцији Управљање ризицима. Послови и одговорности на овом радном месту односе се на праћење портфолија потрошачких и стамбених кредита, кредитних картица и текућих рачуна који су у доцњи и управљање истима, праћење рада Агенција за наплату потраживања које су ангазоване као екстерна лица и сарадња са нима како би се оптимизовао њихов учинак и услови сарадње, израда извештаја о деликвентном портфолију становноштва, припрема и предаја предмета по производима који касне у отплати, интерним или екстерним адвокатима, ради

покретања судских поступака, развој интерних процедура и радних током, као и праћење развој локалних ИТ апликација за ефикасно управљање портфолиом становништва, учествује у припремама репрограма производа, предлаже отписе потраживања, проверава фактуре за плаћање Агенцијама за наплату дугова и адвокатима, и сл.

У току 2010. Године учетовала је на међубанкарском такмичењу АБФ КУП 2010 у организацини Академије за банкарство и финансије.

#### Списак објављених радова кандидата

1. Ђикановић, Ј., *Примена метода вишекритеријумске анализе у банкарском сектору*, Економски сигнали Волумен 7 број 1 2012, Висока економска школа струковних студија Лепосавић, јун 2012, стр: 123-132.
2. Ђикановић Јасенка, *Модели вишекритеријумске анализе и могућности њиховог коришћења у банкарском сектору*, SYM-OP-IS, XXXXIX Симпозијум о операционим истраживањима, Тара, 25-28.09.2012.
3. Ђикановић Јасенка, Вујошевић Мирко, *MULTI CRITERIA ANALYSIS MODELS IN DEFINING COLLECTION STRATEGIES IN BANKING SYSTEM*, XI Балканска конференција о операционим истраживањима, Београд-Златибор, Зборник радова, 07-11.09.2013.
4. Ђикановић Јасенка, Вујошевић Мирко, *Транспорт у ланцима снабдевања са применом у софтверу АИММС'*, SYM-OP-IS, XXXXX Симпозијум о операционим истраживањима, Златибор, 09-11.09.2013.
5. Ђикановић Јасенка, Јоксимовић Душан, Вујошевић Мирко. (2015). *Application of Variable Neighbourhood Search Method for Vehicle Routing Problem in an Integrated Forward and Reverse Logistics Chain*, Acta Polytechnica Hungarica, DOI:10.12700/APH.12.5.2015.5.3, ISSN 1785-8860 IF (2014): 0.471 (M23)

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а \_\_\_\_\_ Јасенка Ђикановић \_\_\_\_\_

број индекса \_\_\_\_\_ 04/2009 \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

”Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике заснован на вишекритеријумском одлучивању”

- 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, 02.11.2015.

Јасенка Ђикановић

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора                    Јасенка Ђикановић  
Број индекса                                04/2009  
Студијски програм                        Информациони системи и менаџмент

Наслов рада

”Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике заснован на вишекритеријумском одлучивању”

Ментор

др Мирко Вујошевић, ред. проф. Факултета организационих наука, Универзитета у Београду

Потписани/а    Јасенка Ђикановић

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.

Потпис докторанда

У Београду, 02.11.2015

 \_\_\_\_\_

### Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

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

”Интегрисани модел логистике снабдевања и повратне логистике заснован на вишекритеријумском одлучивању”

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, 02.11.2015.

Јасна Зинковић