

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Vlado J. Popović

**OPTIMIZACIJA LOGISTIČKIH PROCESA U  
DISTRIBUCIJI PROIZVODA**

doktorska disertacija

Beograd, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Vlado J. Popović

**OPTIMIZATION OF LOGISTICS PROCESSES  
IN PRODUCT DISTRIBUTION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024.

Mentor:

Redovni profesor **dr Milorad Kilibarda**,  
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Članovi komisije:

Redovni profesor **dr Milorad Kilibarda**,  
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Vanredni profesor **dr Milan Andrejić**,  
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Redovni profesor **dr Svetlana Nikoličić**,  
Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka

Datum odbrane:

# OPTIMIZACIJA LOGISTIČKIH PROCESA U DISTRIBUCIJI PROIZVODA

## REZIME

Stalni rast upotrebe informaciono-komunikacionih tehnologija učinio je da ljudi, ali i privreda, očekuju da robu i usluge dobiju što brže i na što jednostavniji način. Zahvaljujući tome, privlačnost i kvalitet nekog privrednog subjekta danas se ne mjere samo na osnovu cijene i kvaliteta njegovih usluga i proizvoda, nego i na osnovu fleksibilnosti i mogućnosti da brzo reaguje na zahtjeve tržišta. Od logistike se očekuje da pronade rješenja koja će omogućiti privrednicima da obezbijede takvu uslugu korisniku, a da im poslovanje ne bude ugroženo. Stoga, pred logistikom su značajni izazovi u pronalaženju racionalnih rješenja prihvatljivih za sve u lancu snabdijevanja. Najveći izazovi su pred dijelom logistike zaduženim za dostavu proizvoda, tj. distribucijom, prije svega, zbog njene uske povezanosti sa trgovinom i direktne veze sa naručiocem proizvoda. Distribucija treba da izađe u susret krajnjim korisnicima, prodajnim objektima i pošiljaocima proizvoda. Prodajni objekti, slično ljudima, sve češće kupuju i naručuju proizvode od njihovih distributera. Njihove porudžbine su sve manje, a sve frekventnije. To dovodi do povećanja učestalosti niza aktivnosti i troškova u distribuciji. Posljedica toga je potreba za većim kapacitetima distributera, koja rezultuje povećanjem njegovih troškova i smanjenjem efikasnosti. Kako su prodajni objekti i dalje završne tačke distribucije najvećeg broja proizvoda, predmet ove disertacije jesu distribucija od distributivnih skladišta do prodajnih objekata i izazovi koji su danas pred njom.

S ciljem prevazilaženja problema koji su se našli pred distribucijom, u okviru ove disertacije sprovedeno je istraživanje čiji rezultati su pristup, koncept i modeli za optimizaciju logističkih procesa. Predloženi pristup podrazumijeva optimizaciju logističkih procesa uz prethodnu racionalizaciju u polju poručivanja proizvoda. Proces realizacije porudžbine je u disertaciji prepoznat kao ključan za efikasnost drugih procesa u distribuciji, ponajprije, skladišnog i transportnog. Njegov uticaj se ogleda kroz generisanje dinamike i količine posla koju treba obaviti kroz druge

procesu, a posleđično i na potrebne resurse. S druge strane, uočena je praznina u literaturi koja se bavi optimizacijom logističkih procesa. U proučenim radovima, uglavnom je cilj matematički što bolje riješiti probleme vezane za ove procese, dok se manje pažnje poklanja pristupu rješavanju.

U pogledu optimizacije, u disertaciji je fokus na skladišnom i transportnom procesu. Pokazalo se da su to procesi koji prouzrokuju veliki dio troškova distribucije i procesi od kojih značajano zavisi zadovoljstvo klijenta. Uz to, njihova realizacija je nemoguća bez ljudi, što ih čini još važnijim zbog sve većeg nedostatka radne snage. Za optimizaciju skladišnog procesa predložen je model za raspoređivanje radnika, kojim se minimizira trošak radne snage, kao dominantni trošak u skladištu. Dodatno, model predviđa i mogućnost raspoređivanja izvršenja aktivnosti u skladištu. Za optimizaciju transportnog procesa predložen je model za određivanje ruta vozila prilagođen distribuciji proizvoda do prodajnih objekata. Model uključuje i mogućnost preuzimanja povratnih pošiljki iz prodajnih objekata. Ovim modelom se minimizira trošak transporta pošiljki od distributivnog skladišta do prodajnih objekata i od prodajnih objekata do distributivnog skladišta. Da bi se ispitalo kako uslovi isporuke utiču na troškove distribucije, razvijeni modeli su testirani za različite uslove isporuke u realnom sistemu. U tu svrhu razvijen je simulacioni model. Analiza dobijenih rezultata pokazuje moguću praktičnu korist i primjenljivost predloženog pristupa, koncepta i razvijenih modela za optimizaciju logističkih procesa.

**Ključne riječi:** logistika, distribucija, optimizacija, procesi, trgovina

**Naučna oblast:** Saobraćajno inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Poslovna logistika i špedicija

**UDK broj:**

## **OPTIMIZATION OF LOGISTICS PROCESSES IN PRODUCT DISTRIBUTION**

The widespread adoption of information and communication technologies has led both individuals and economies to expect swift and straightforward access to goods and services. Consequently, the evaluation of a business entity's attractiveness and quality now extends beyond price and product quality to include flexibility and responsiveness to consumer demands. Logistics, therefore, faces significant challenges in devising solutions that allow businesses to meet these expectations without jeopardizing their operations. These challenges are particularly acute in the domain of product distribution, which is intricately linked to trade and direct customer interaction. Distribution must cater to the needs of end-users, sales outlets, and goods suppliers, all of whom are demanding increasingly frequent and smaller-scale orders. This trend towards smaller and more frequent orders has escalated the frequency and cost of distribution activities, necessitating greater capacities and, consequently, higher costs and reduced efficiency for distributors. As sales outlets remain crucial distribution points for a wide array of goods, this dissertation focuses on the distribution process from warehouses to these outlets and the contemporary challenges it confronts.

To address these challenges, this dissertation undertook research resulting in an approach, concept, and models for optimizing logistics processes. The proposed approach emphasizes optimizing logistics processes through rationalized product ordering, recognizing the pivotal role of order fulfillment in enhancing the efficiency of storage and transportation processes. Notably, the reviewed papers on logistics optimization primarily focus on mathematical problem-solving, with less emphasis on solution approaches.

Within the realm of optimization, this dissertation specifically targets transport and storage processes, which account for a substantial portion of distribution costs and significantly influence customer satisfaction. Given the increasing scarcity of workforce, these processes gain further importance. For warehouse optimization, a model for worker scheduling was developed to minimize workforce costs, the

predominant expense in warehouse operations, while also allowing for activity scheduling. To optimize the transport process, a model for determining vehicle routes tailored to product distribution to sales outlets was proposed, encompassing return shipment pickups to minimize transportation costs. To evaluate the impact of delivery conditions on distribution costs, the developed models were tested using a simulation model under various delivery scenarios in a real system. The analysis of these results demonstrates the practical benefits and applicability of the proposed approach, concept, and developed models for optimizing logistics processes.

**Keywords:** logistics, distribution, trade, processes, optimization

**Scientific Field:** Traffic engineering

**Scientific Subfield:** Business logistics and freight forwarding

**UDC:**

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SPISAK SLIKA .....  | xi  |
| SPISAK TABELA.....  | xii |
| SPISAK SKRAĆENICA.....  | xv  |
| 1. UVOD .....   | 1   |
| 1.2. Predmet disertacije .....  | 2   |
| 1.3. Cilj disertacije i očekivani doprinosi.....                        | 5   |
| 1.4. Osnovne hipoteze.....  | 6   |
| 1.5. Sadržaj doktorske disertacije .....                                | 7   |
| 2. OSNOVNA OBILJEŽJA LOGISTIČKIH PROCESA U DISTRIBUCIJI PROIZVODA ..... | 8   |
| 2.1. Logistički procesi .....   | 8   |
| Logistički procesi u poslovnom sistemu .....                            | 9   |
| Značaj logističkih procesa.....   | 9   |
| Proces realizacije porudžbine .....                                     | 10  |
| Transport .....   | 10  |
| Skladištenje .....  | 11  |
| Pakovanje .....   | 12  |
| Upravljanje zalihama .....  | 13  |
| 2.2. Distribucija proizvoda.....  | 14  |
| Pojmovi i definicije .....  | 14  |
| Distribucija i trgovina.....  | 15  |
| Distributivni kanali.....   | 16  |
| Distribucija kao usluga.....  | 18  |
| Značaj distribucije.....  | 18  |
| Distribucija i logistika.....   | 19  |



|   |    |
|---|----|
| 2.3. Razvoj odnosa između distribucije i njenih korisnika.....  | 21 |
| Epoha 1: Do industrijske revolucije (veletrgovci i agenti kontrolišu distribuciju).....                     | 22 |
| Epoha 2: Od industrijske revolucije do 1960. godine (proizvođač i proizvodnja kontrolišu distribuciju)..... | 23 |
| Epoha 3: 1960 – 1980. godine (proizvođač i marketing kontrolišu distribuciju) .....                         | 24 |
| Epoha 4: 1980-e (prodavac kontroliše sekundarnu distribuciju) .....   | 27 |
| Epoha 5: 1990-e (prodavac kontroliše i primarnu distribuciju).....  | 28 |
| Epoha 6: Distribucija danas – racionalizacija u distribuciji.....   | 29 |
| 2.4. Operaciona istraživanja i logistika .....  | 31 |
| OR uopšteno.....  | 31 |
| OR u logistici .....  | 31 |
| OR u distribuciji.....  | 32 |
| 3. PREGLED LITERATURE .....   | 33 |
| 3.1. Odlučivanje kao postupak u logistici .....   | 33 |
| Odlučivanje.....  | 33 |
| Nivoi odlučivanja.....  | 33 |
| Strateško odlučivanje .....   | 34 |
| Taktičko odlučivanje.....   | 35 |
| Operativno odlučivanje.....   | 36 |
| Međuzavisnost odluka u planiranju logističkih procesa u distribuciji.....                                   | 36 |
| 3.2. Proces realizacije porudžbine .....  | 37 |
| Obrazac dostave .....   | 39 |
| Sternbeckov i Kuhnov pristup određivanju obrasca dostave.....   | 42 |
| Holzapfelov pristup određivanju obrasca dostave .....   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3. Raspoređivanje radnika.....                             | 47 |
| Uopšteno o problemu raspoređivanja radnika .....             | 47 |
| Raspoređivanje radnika u distributivnim skladištima.....     | 49 |
| 3.4. Rutiranje i raspoređivanje transportnih sredstava.....  | 55 |
| Značaj VRP-a za privredu i društvo.....                      | 55 |
| Značaj VRP-a za naučnu zajednicu .....                       | 56 |
| Definicija VRP-a .....                                       | 57 |
| Istorija VRP-a.....  | 58 |
| VRP i ostali problemi određivanja ruta .....                 | 58 |
| Vrste VRP-a.....   | 60 |
| Metode rješavanja VRP-a .....                                | 61 |
| Uopšteno o VRPDP-u .....                                     | 63 |
| VRPDP sa klijentima koji imaju ili isporuku ili povrat ..... | 65 |
| VRPDP sa klijentima koji imaju i isporuku i povrat.....      | 67 |
| VRP sa balansiranjem opterećenja na rutama.....              | 70 |
| 4. MODELI OPTIMIZACIJE LOGISTIČKIH PROCESA DISTRIBUCIJE..... | 73 |
| 4.1. Koncept optimizacije .....                              | 73 |
| Definisanje obrazaca dostave za strategije distribucije..... | 74 |
| Simulacioni model .....                                      | 76 |
| 4.2. Model optimizacije skladišnog procesa.....              | 77 |
| Metoda rješavanja DS-PRR-a .....                             | 78 |
| DS-PRR model .....   | 79 |
| DS-PRR algoritam.....  | 83 |
| 4.3. Model optimizacije transportnog procesa.....            | 83 |
| Postavka DP-VRP-a.....                                       | 84 |
| Metoda rješavanja DP-VRP-a.....                              | 85 |

|  |     |
|--|-----|
| GRRP heuristika.....   | 85  |
| PR heuristika.....   | 89  |
| NSR model.....   | 89  |
| Testiranje na benčmark instancama .....                          | 90  |
| 5. TESTIRANJE I PRIMJENA MODELA.....                             | 92  |
| 5.1 Efekti optimizacije na distribuciju.....                     | 96  |
| Opšte promjene u funkcionisanju distribucije.....                | 96  |
| Promjene u broju posjeta po periodima .....                      | 98  |
| Promjene u broju jedinica isporuke po periodima .....            | 99  |
| 5.2. Optimizacija skladišnog procesa.....                        | 102 |
| Pretvaranje posla u zahtjeve za radnicima .....                  | 103 |
| Definisanje ostalih ulaznih parametara za DS-PRR model .....     | 107 |
| Rješenje 1 – bez mogućnosti odlaganja izvršenja aktivnosti ..... | 108 |
| Rješenje 2 – uz mogućnost odlaganja izvršenja aktivnosti.....    | 109 |
| 5.3. Optimizacija transportnog procesa.....                      | 112 |
| Rezultat - bez primjene $u-i$ ograničenja .....                  | 113 |
| Rezultat - sa primjenom $u-i$ ograničenja.....                   | 114 |
| 5.4. Analiza dobijenih rezultata .....                           | 115 |
| Analiza promjena u procesu realizacije porudžbine.....           | 115 |
| Efekti na području skladišta .....                               | 118 |
| Efekti na području transporta.....                               | 119 |
| 6. ZAKLJUČAK.....  | 121 |
| 6.1 Naučni doprinosi .....                                       | 122 |
| 6.2 Pravci budućih istraživanja .....                            | 122 |
| LITERATURA .....   | 124 |
| PRILOZI.....   | 137 |

|   |     |
|---|-----|
| Prilog 1. Detaljni opis PR heuristike.....  | 137 |
| Prilog 2. Tabela vrijednosti ulaznih veličina za DS-PRR model.....                          | 141 |
| Prilog 3. Rješenja svih DP-VRP-a.....   | 142 |
| Prilog 4. Rješenja DP-VRP-a sa primjenom $u-i$ ograničenja .....                            | 150 |
| Prilog 5. Detaljno poređenje rješenja DP-VRP-a sa i bez primjene $u-i$ ograničenja<br>..... | 151 |
| BIOGRAFIJA AUTORA.....  | 153 |

## SPISAK SLIKA

|  |     |
|--|-----|
| Slika 2.1. Kanali distribucije (prilagođeno prema Sadjady, 2011) .....   | 17  |
| Slika 2.2. Evolucija logistike (prilagođeno prema Ballou, 2007).....   | 20  |
| Slika 2.3. Razvoj distributivne prakse u maloprodaji (prilagođeno prema Whiteoak, 1999) .....                                      | 21  |
| Slika 3.1. Zastupljenost VRP varijanti među istraživačima u periodu od 2010. do 2020. godine (prilagođeno prema Elatar, 2023)..... | 61  |
| Slika 3.2. Klasifikacija VRPDP modela (prilagođeno prema Wassan i Nagy, 2014).   | 64  |
| Slika 4.1. Osnovni koncept optimizacije procesa distribucije .....   | 74  |
| Slika 4.2. Simulacioni model distribucije.....   | 76  |
| Slika 4.3. Metoda rješavanja DS-PRR-a.....   | 79  |
| Slika 4.4. Metoda rješavanja DP-VRP-a .....  | 85  |
| Slika 4.5. Raspodjela odstupanja dobijenih od benčmark rješenja .....  | 91  |
| Slika 5.1. Mreža gradske distribucije.....   | 95  |
| Slika 5.2. Mreža nacionalne distribucije.....  | 95  |
| Slika 5.3. Proces dobijanja rješenja za jednu strategiju distribucije .....  | 102 |
| Slika 5.4. Postavke rada skladišta.....  | 105 |

## SPISAK TABELA

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.1. Ulazi i izlazi DS-PRR modela.....   | 82  |
| Tabela 5.1. Raspodjela klijenata prema tipu .....   | 93  |
| Tabela 5.2. Raspodjele obrazaca dostave .....   | 93  |
| Tabela 5.3. Raspodjela ukupnog broja klijenata koji imaju povrat po periodima<br>opsluge .....                    | 93  |
| Tabela 5.4. Prosječne vrijednosti parametara distribucije po strategijama.....                                    | 94  |
| Tabela 5.5. Prosječan broj posjeta i prosječan broj jedinica isporuke u jednom<br>obrascu dostave.....            | 96  |
| Tabela 5.6. Procentualna razlika između strategija u raspodjeli posjeta i jedinica<br>isporuke po periodima ..... | 96  |
| Tabela 5.7. Promjene kod klijenata koji su prešli na nove obrasce dostave (u<br>procentima) .....                 | 97  |
| Tabela 5.8. Raspodjela ukupnog broja klijenata prema broju jedinica isporuke koji<br>primaju.....                 | 97  |
| Tabela 5.9. Raspodjela ukupnog broja klijenata prema broju posjeta.....   | 97  |
| Tabela 5.10. Raspodjela ukupnog broja posjeta po tipovima klijenata .....   | 97  |
| Tabela 5.11. Raspodjela ukupnog broja jedinica isporuke po tipovima klijenata ....                                | 97  |
| Tabela 5.12. Raspodjela ukupnog broja klijenata od kojih se roba preuzima.....                                    | 97  |
| Tabela 5.13. Prosječan broj posjeta po klijentu .....   | 98  |
| Tabela 5.14. Razlika u prosječnom broju posjeta po tipu klijenta i periodu između<br>strategija.....              | 99  |
| Tabela 5.15. Raspodjela ukupnog broja posjeta po periodima.....   | 99  |
| Tabela 5.16. Razlika u raspodjeli ukupnog broja posjeta po periodima između<br>strategija.....                    | 99  |
| Tabela 5.17. Prosječan broj jedinica isporuke po klijentu.....  | 100 |
| Tabela 5.18. Razlika u prosječnom broju jedinica isporuke po klijentu između<br>strategija.....                   | 100 |
| Tabela 5.19. Raspodjela ukupnog broja jedinica isporuke po periodima.....   | 100 |
| Tabela 5.20. Razlika u raspodjeli jedinica isporuke po periodima između strategija<br>.....                       | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 5.21. Prosječan broj jedinica isporuke po posjeti.....  | 101 |
| Tabela 5.22. Razlika u prosječnom broju jedinica isporuke po posjeti i period između strategija.....                         | 101 |
| Tabela 5.23. Uporedni prikaz broja jedinica isporuke i zahtjeva za radnicima pri strategiji 1.....                           | 106 |
| Tabela 5.24. Uporedni prikaz broja jedinica isporuke i zahtjeva za radnicima pri strategiji 2.....                           | 106 |
| Tabela 5.25. Potreban broj viljuškarista za istovar po intervalima .....   | 107 |
| Tabela 5.26. Raspoložive smjene.....   | 107 |
| Tabela 5.27. Matrica usklađenosti aktivnosti i radnika .....   | 108 |
| Tabela 5.28. Potreban i raspoređen broj radnika pri strategiji 1 .....   | 110 |
| Tabela 5.29. Potreban i raspoređen broj radnika pri strategiji 2 .....   | 111 |
| Tabela 5.30. Raspored radnika na aktivnosti pri strategiji 1.....  | 111 |
| Tabela 5.31. Raspored radnika na aktivnosti pri strategiji 2.....  | 112 |
| Tabela 5.32. Nosivost vozila kojim se vrši distribucija .....  | 113 |
| Tabela 5.33. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 10-grad .....  | 113 |
| Tabela 5.34. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 12-grad .....  | 113 |
| Tabela 5.35. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 14-grad .....  | 114 |
| Tabela 5.36. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 16-nac .....   | 114 |
| Tabela 5.37. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 bez i sa $u-i$ ograničenjem .....                                  | 114 |
| Tabela 5.38. Razlika između rješenja sa i bez $u-i$ ograničenja pri istim strategijama .....                                 | 115 |
| Tabela 5.39. Promjene kod klijenata koji su prešli na nove obrasce dostave u procentima .....                                | 116 |
| Tabela 5.40. Promjene u pogledu broja posjeta i broja jedinica isporuke (ukršteno) u procentima.....                         | 116 |
| Tabela 5.41. Prosječan broj posjeta po obrascu .....   | 117 |
| Tabela 5.42. Prosječan broj jedinica isporuka po obrascu .....   | 117 |
| Tabela 5.43. Prosječan broj jedinica isporuka po posjeti.....  | 117 |
| Tabela 5.44. Poređenje smanjenja broja jedinica isporuke i posjeta sa smanjenjem pređenog puta za gradsku distribuciju ..... | 120 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 5.45. Poređenje smanjenja broja jedinica isporuke i posjeta sa smanjenjem pređenog puta za nacionalnu distribuciju ..... | 120 |
|---|-----|



## SPISAK SKRAĆENICA

3D-VRP – trodimenzionalni VRP (eng. *three dimensional VRP*)

conVRP – VRP sa dosljednošću (eng. *consistent VRP*)

CVRP – kapacitativni VRP (eng. *Capacitated VRP*)

CW heuristika – Clarke i Wright heuristika

DS-PRR – problem raspoređivanja radnika u distributivnom skladištu

DVRP – dinamički VRP (eng. *Dynamic VRP*)

EOQ – tradicionalni model upravljanja zalihama (eng. *Economic Order Quantity*)

ERP - sistem planiranja resursa kompanije (eng. *Enterprise Resource Planning*)

GRRP heuristika – heuristika za pravljenje gigantskih ruta razvoza i povrata

GVRP – zeleni VRP (eng. *Green VRP*)

HVRP – VRP sa heterogenim voznim parkom (eng. *Heterogenous fleet VRP*)

ILP – cjelobrojno linearno programiranje (eng. *Integer Linear Programming*)

JIT - koncept proizvodnje bez ili sa minimalnim zalihama (eng. *Just – In – Time*)

MDVRP – VRP sa više depoa (eng. *VRP with multiple depots*)

MEVRP - multi-ešalonski VRP (eng. *Multi-Echalon VRP*)

MRP – sistem planiranja materijalnih resursa (eng. *Material Resource Planning*)

MTVRP – VRP sa više pokretanja vozila (eng. *Multi-Trip VRP*)

NP – klasa kompleksnosti problema (eng. *Nondeterministic Polynomial time*)

NSR model – model za izbor najboljeg skupa ruta

OR – operaciona istraživanja (eng. *Operational Research*)

OVRP – otvoreni VRP (eng. *Open VRP*)

PR heuristika – heuristika za kreiranje potencijalnih ruta rješenja

PRR – problem raspoređivanja radnika

PVRP – periodični VRP (eng. *Periodic VRP*)

QR – metoda brzog odziva u poslovanju (eng. *Quick Response*)

SCM – upravljanje lancem snabdijevanja (eng. *Supply Chain Management*)

SDVRP – VRP sa izdijeljenom isporukom (eng. *Split Delivery VRP*)

TDVRP – VRP sa promjenljivim vremenom putovanja (eng. *Time-dependent VRP*)

TQM – potpuno upravljanje kvalitetom (eng. *Total Quality Management*)

TS – metaheuristika (eng. *Taboo Search*)

TTVRP – problem rutiranja kamiona i prikolica (eng. *Truck and Trailer VRP*)

*u-i* – utovar – istovar

*u-i* ograničenje – ograničenje o maksimalnom trajanju utovarno-istovarnih operacija u okviru jedne rute

VMI – koncept upravljanja zalihama od strane snabdjevača (eng. *Vendor Managed Inventory*)

VRP – problem rutiranja vozila

VRPB – VRP sa povratom (eng. *VRP with Backhauling*),

VRPDDP – VRP sa razdvojenom dostavom i povratom (eng. *VRP with Divisible Deliveries and Pickups*)

VRPDP – VRP sa isporukom i prikupljanjem (eng. *VRP with Deliveries and Pickups*)

VRPMDP – VRP sa izmješanom dostavom i povratom (eng. *VRP with Mixed Deliveries and Pickups*)

VRPRMDDP – VRP sa ograničenim miješanjem razdvojenih dostava i povrata (eng. *VRP with Restricted Mixing of Divisible Deliveries and Pickups*)

VRPRMDP – VRP sa ograničenim miješanjem dostava i povrata (eng. *VRP with Restricted Mixing of Deliveries and Pickups*)

VRPSDP – VRP sa istovremenom dostavom i povratom (eng. *VRP with Simultaneous Deliveries and Pickups*)

VRPTW – VRP sa vremenskim prozorima (eng. *VRP with Time Windows*)

# 1. UVOD

Razvoj modernog društva i privrede prati rast zahtjeva za sve bržim dostavljanjem roba i usluga. Logistika, kao djelatnost čiji je zadatak obezbijediti proizvode po konceptu 7P, suočava se sa velikim izazovima zbog toga. Od nje se očekuje da omogući ispunjenje takvih zahtjeva, ali bez povećanja troškova. Najveći teret ovih promjena nosi dio logistike zadužen za dostavu proizvoda, tj. distribucija. Njena uska povezanost sa trgovinom odredila ju je kao mjesto gdje se javljaju najveći izazovi. Mijenjajući se kroz istoriju, trgovina je postavljala sve veće izazove pred distribuciju (Martins i ostali, 2018). Za razliku od nekih ranijih vremena, kada su prodajni objekti bili samo pasivni primaoci robe, a proizvođači generatori tokova, došlo se do vremena u kojem prodajni objekti diriguju lancem snabdijevanja (Fernie i ostali, 2010). Kao posljedica toga, danas se pred distribuciju postavljaju zahtjevi za kratkim vremenom isporuke, malim količinama, čestim dostavama itd. Kratko vrijeme isporuke, zajedno sa cijenom i kvalitetom distribucije, jedan je od najbitnijih faktora za trgovine prilikom odabira distributera (Karki, 2012). Distributeri, u borbi za klijente ili zbog loše postavljenog poslovanja njihovih prodajnih objekata, prihvataju stroge zahtjeve za distribucijom. Međutim, to se odražava na efikasnost njihovih logističkih procesa. Zbog mogućnosti brzog dobijanja robe, klijenti češće poručuju proizvode i u manjim količinama. Sa povećanjem broja isporuka, povećava se obim posla distributera u pogledu obrade porudžbina, odvajanja proizvoda, pakovanja itd. Takođe, povećava se i pređeni put pri distribuciji, trajanje distribucije, oštećenja proizvoda, povrat proizvoda itd. Sva ova povećavanja iziskuju od distributera angažovanje više resursa, prije svih većeg broja radnika i transportnih sredstava. Angažovanjem novih resursa, pri istom obimu isporuke, smanjuje se njegova efikasnost. Posljedica svega toga je povećanje troška distribucije i ugroženo poslovanje distributera. Povećanje troška distribucije može se negativno odraziti i na poslovanje trgovine ili proizvođača proizvoda, ukoliko oni vrše distribuciju do prodajnih objekata. Konačno, povećanje troška distribucije mogu osjetiti i krajnji potrošači, ukoliko se zbog toga poveća cijena proizvoda. Uslijed svega toga, logističari se danas nalaze pred velikim izazovom. Kako

zadovoljiti sve strože zahtjeve tržišta i korisnika, uz bolje korišćenje postojećih resursa, odnosno uz smanjenje logističkih troškova. Da bi se ova u velikoj mjeri konfliktna situacija što uspješnije rješavala, neophodno je kontinualno raditi na optimizaciji logističkih procesa i operacija iz oblasti distribucije. Sve navedeno ukazuje na izuzetnu kompleksnost logističkih procesa na području distribucije, njihov veliki značaj i potrebu za rješenjima kojim će se optimizovati logistički procesi u distribuciji proizvoda i povećati njihova efikasnost.

## **1.2. Predmet disertacije**

U skladu sa gore iznijetim, predmet ove disertacije je distribucija gotovih proizvoda u uslovima kada klijenti poručuju sve češće. Iako je danas aktuelno da se istražuju i traže rješenja za unaprjeđenje distribucije pri tzv. online trgovini, ovdje se posmatra distribucija od distributivnih skladišta do prodajnih objekata. Prodajni objekti su još uvijek završne tačke distribucije većine proizvoda. Online trgovina nije zamijenila klasičnu trgovinu, kako se to očekivalo. Veliki dio trgovine još uvijek se obavlja na klasičan način. U Kini, zemlji koja ima najveći rast online trgovine, još uvijek se 80% trgovine obavlja na klasičan način<sup>1</sup>. Trgovci su uvidjeli da ljudi ipak neće sve kupovati preko interneta i da te dvije vrste trgovine ne isključuju jedna drugu<sup>2</sup>. S druge strane, prema istraživanju Kuhn i Sternbeck (2013), 82% prodajnih objekata dobija proizvode iz distributivnih skladišta. Pod distributerima se u disertaciji podrazumijevaju proizvođači, zastupnici određenih brendova, trgovačke firme i drugi koji vrše distribuciju do prodajnih objekata. Pod prodajnim objektima se podrazumijevaju trgovine svih tipova i veličina, samostalne i one koje su dio lanaca trgovina. Distribucija se odvija tako što prodajni objekat ispostavlja porudžbine, tj. zahtjeve za dostavom proizvoda distributerima. Distributer dostavlja te proizvode u skladu sa dogovorenim uslovima distribucije. Uslove distribucije dogovaraju distributer i prodajni objekat, bez obzira da li je on u vlasništvu distributera ili ne.

Uslovi distribucije proizvoda su važan segment ovog istraživanja, uslijed njihovog velikog uticaja na logističke procese u distribuciji. Od uslova distribucije zavisi

---

<sup>1</sup> <https://qz.com/1244098/alibaba-fuses-online-offline-channels-for-new-retail-experience>

<sup>2</sup> <https://www.forbes.com/sites/annaschaverien/2018/12/29/amazon-online-offline-store-retail/#1b47095e5128>

trošak distributera, ali i zadovoljstvo i poslovanje prodajnog objekta, kao primaoca robe. Među prvim uslovima distribucije koji se ugovaraju su dinamika dostave i vrijeme isporuke. Dinamika dostave predstavlja frekvenciju dostave za nekog klijenta u određenom periodu. Vrijeme isporuke je vrijeme za koje je potrebno dostaviti proizvode od trenutka prijema zahtjeva za njima. U odnosu na vrijeme isporuke, distribucija često nosi naziv kao distribucija „danas za danas“, „danas za sutra“, „danas za prekосуtra“ i sl. Pored vremena isporuke, prema Kuhn i Sternbeck (2013), bitni uslovi distribucije su i minimalna količina svakog proizvoda koja može da se naruči, dani i vrijeme u toku dana kada se porudžbina dostavlja i način na koji se roba slaže na tovarno-manipulativnoj jedinici. Svi ovi uslovi se odražavaju na glavne podsisteme distribucije, tj. na skladište, transport i prodajni objekat (Kuhn i Sternbeck, 2013). Dinamika dostave zajedno sa tačno definisanim terminima dostave (sati, dani ili sedmice) čini obrazac dostave. Vrijeme isporuke kao i količina koja se isporučuje je u sprezi sa dinamikom poručivanja.

U disertaciji se ispituje uticaj uslova distribucije na logističke procese u slučaju lokalne, tj. gradske distribucije i u slučaju nacionalne distribucije. Tema su distributivni sistemi koji u gradskoj mreži vrše isporuku i do nekoliko puta dnevno, dok u nacionalnoj to rade nekoliko puta sedmično. Ideja u disertaciji je da u takvim sistemima ima prostora za racionalizaciju u polju naručivanja koja bi dovela do manjih troškova distribucije, a ne bi ugrozila poslovanje naručioca proizvoda. To će ujedno biti i dio teza koje će se istraživati i potvrđivati kroz disertaciju. Smatra se da je za logističke procese ključno to koliko se puta roba isporučuje naručiocima. Naime, svaka isporuka zahtijeva pokretanje logističkih procesa. Osnovni logistički procesi su proces realizacije porudžbine, skladištenje, upravljanje zalihama, pakovanje i transport (Kilibarda, 2008). Da bi se ovi procesi realizovali potrebno je sprovesti niz aktivnosti koje zahtijevaju upotrebu resursa, a samim tim uzrokuju i određene troškove. Aktivnosti koje pokreće jedna porudžbina su prijem i obrada porudžbine, izrada zahtjeva za izuzimanje proizvoda, komisioniranje, pakovanje, slaganje na tovarno-manipulativnu jedinicu, kontrola, utovar, transport, istovar, povrat robe, obrada vraćene dokumentacije itd. Resursi koji se koriste za njihovu realizaciju su, prije svega, ljudi, energija i transportna sredstva. Iz tih razloga,

neophodno je da optimizacija logističkih procesa obuhvati i definisanje dinamike isporuke i korišćenja pomenutih resursa.

Uslovi isporuke određuju se u okviru procesa realizacije porudžbine. To je logistički proces koji se prvi realizuje u distribuciji i pokreće ostale logističke procese. Od rješenja koja se donose u njemu zavisi efikasnost drugih procesa, prije svih, transporta i skladištenja. U praksi, proces realizacije porudžbine zahtijeva da se napravi raspored isporuke, potom da se roba pripremi u skladištu, izvrši rutiranje i na kraju dostavi do naručioca. Da bi se to ostvarilo potrebno je izvršiti raspoređivanje isporuke pošiljki, raspoređivanje radnika u skladištu i rutiranje vozila (Alajkovic i ostali, 2022). Dakle, kroz proces realizacije porudžbine se definiše dinamika posla i potrebe za resursima u drugim procesima. Stoga, kvalitet rješenja iz ovog procesa se odražava na postignutu efikasnost u drugim logističkim procesima. Planiranje i upravljanje procesom realizacije porudžbine počinje još sa planiranjem i rasporedom distributivnih skladišta, izborom načina dostave, rasporedom robe u distributivnoj mreži itd. Nastavlja se sa pravljenjem planova isporuke, definisanjem dinamike isporuke, obrazaca isporuke itd. Svakodnevno se odvija prenosom i obradom informacija o porudžbinama klijenata, praćenjem kretanja porudžbina, obradom povratnih informacija, reagovanjem na nepredviđene događaje u toku realizacije plana distribucije itd. Ovdje je fokus na dijelu koji se tiče pravljenja planova isporuke.

Pored procesa realizacije porudžbine, u disertaciji je fokus na skladišnim i transportnim procesima, koji zauzimaju centralno mjesto u distribuciji proizvoda. Optimizacija skladišnog procesa se ostvaruje donošenjem strateških, taktičkih i operativnih odluka vezanih za korišćenje skladišnih resursa. Strateške odluke se tiču veličine skladišta, njegovog lejauta, opreme itd. Taktičke odluke se odnose na raspored robe u skladištu, određivanje potrebnog broja radnika i opreme itd. Na operativnom nivou se radnici i oprema raspoređuju na zadatke i aktivnosti u skladištu kao što su prijem robe, odlaganje, skladištenje, komisioniranje, pakovanje, otprema itd. Da bi se skladišni proces optimizovao neophodno je izvršiti optimizaciju korišćenja resursa za njegovu realizaciju. Glavni resursi u skladištu su prostor, oprema, ljudi i energija. S obzirom da postoji veliki broj radova koji se bave

optimizacijom upotrebe opreme u skladišnom procesu, u ovoj disertaciji je odluka da se ovaj proces optimizuje sa aspekta korišćenja ljudi u njemu. Koliko je radna snaga bitan faktor u skladištu, govori i podatak da na komisioniranje pomoću radne snage otpada oko 55% ukupnih troškova koji se javljaju u skladištu (Shukla i ostali, 2017). U tu svrhu razvijen je model za raspoređivanje radne snage u skladištu (Popović i ostali, 2021).

Transportni proces umnogome utiče na efikasnost distribucije, zbog visokih troškova koje prouzrokuje. Kroz pravovremenu isporuku transport utiče na dostupnost proizvoda, zadovoljstvo klijenata i poslovni uspjeh. Pravilnim transportom, čuva se roba od oštećenja i gubitka. Smatra se izvorom konkurentske prednosti u trgovini. Troškovi transporta bi trebalo da budu manji od 2% cijene robe koja se distribuira iz distributivnog skladišta do maloprodaje (Parkhi i ostali, 2014). Distributeri mogu da obavljaju transport sopstvenim voznim parkom ili da ga daju na izvršenje jednom ili više spoljnih saradnika. U oba slučaja, distributer mora voditi računa o troškovima transporta, posebno ukoliko transport obavlja sopstvenim voznim parkom. Tada je potrebno da radi na njegovoj optimizaciji, počevši od planiranja transportnih kapaciteta, izbora vozila i načina distribucije do optimizacije ruta i iskorišćenja tovarnog prostora. U ovoj disertaciji se optimizaciji transportnog procesa pristupa sa taktičkog i operativnog nivoa. Na taktičkom nivou ona podrazumijeva smanjenje broja posjeta klijentima i ukрупnjavanje pošiljki, kao posljedicu racionalizacije u procesu realizacije porudžbine. Na operativnom nivou optimizacija se postiže modeliranjem i rješavanjem problema rutiranja vozila (VRP – eng. *Vehicle Routing Problem*) prilagođenog distribuciji.

### **1.3. Cilj disertacije i očekivani doprinosi**

Cilj disertacije je da sa teorijskog i praktičnog aspekata doprinese rješavanju problema sa kojim se suočava savremena distribucija. Tačnije, da ponudi rješenje koje će pomoći u situaciji kada korisnici zahtijevaju sve učestalije i manje isporuke proizvoda. Osnovni cilj je da se predlože pristup, koncept i model za optimizaciju logističkih procesa koji će obezbijediti ispunjenje više parcijalnih ciljeva, kao što su:

- Racionalizacija procesa poručivanja i isporuke proizvoda;

- Optimizacija logističkih procesa pripreme i otpreme robe iz distributivnog centra i skladišnih sistema;
- Optimizacija procesa transporta i isporuke robe u prodajne objekte.

U skladu sa postavljenim ciljevima očekuju se i konkretni naučni doprinosi istraživanja u okviru ove disertacije:

- Pristup optimizaciji logističkih procesa distribucije proizvoda, kroz racionalizaciju sistema poručivanja i realizacije porudžbine;
- Koncept optimizacije troškova distribucije u funkciji konsolidacije porudžbina i isporuka proizvoda za određene strategije distribucije;
- Model optimizacije transportnog procesa u funkciji različitih strategija poručivanja i isporuke proizvoda;
- Model optimizacije skladišnog procesa baziran na raspoređivanju radne snage u uslovima promjenljivih zahtjeva i naloga za isporuku robe.

Predloženi pristup, koncept i modeli za optimizaciju logističkih procesa primijenjeni su na slučaju realnog distributivnog sistema. Dobijeni rezultati ukazuju na njihovu praktičnu primjenljivost i korisnost u sistemima koji se bave distribucijom i isporukom proizvoda iz distributivnog skladišta do prodajnih objekata. Sa naučnog aspekta, disertacija doprinosi literaturi koja se bavi problemom raspoređivanja radnika (PRR) u skladištu i optimizacijom transportnih procesa u distribuciji proizvoda. Naučni doprinos novog modela optimizacije skladišnog procesa i raspoređivanja radnika potvrđen je radom Popović i ostali (2021), objavljenim u referentnom međunarodnom časopisu.

#### **1.4. Osnovne hipoteze**

U okviru disertacije je sprovedeno istraživanje u kojem su ispitivane sledeće hipoteze.

Hipoteza 1. Različiti modaliteti poručivanja i uslovi distribucije proizvoda direktno utiču na efikasnost i ekonomičnost odvijanja logističkih procesa i racionalno korišćenje resursa, kao što su radna snaga i transportna sredstva. Definisanjem



odgovarajućih uslova isporuke moguće je postići značajne uštede u logističkim procesima na području distribucije proizvoda.

Hipoteza 2. Sveobuhvatnim pristupom problematici raspoređivanja radnika i transportnih sredstava na konkretne zadatke, moguće je razviti odgovarajuće optimizacione modele čijom primjenom se omogućava bolje korišćenje ovih resursa u funkciji različitih uslova distribucije i isporuke proizvoda.

Hipoteza 3. Konsolidacijom porudžbina i isporuka u različitim strategijama distribucije i obrascima dostave, postižu se direktne uštede na području fizičke distribucije, posebno u oblasti transporta i skladištenja robe.

## **1.5. Sadržaj doktorske disertacije**

Istraživanje u disertaciji sprovedeno je kroz nekoliko faza koje su odredile njen sadržaj. Definisano je ukupno šest poglavlja. U **prvom poglavlju** dati su predmet, motivacija, ciljevi i očekivani doprinosi disertacije. Uz to, definisane su osnovne hipoteze istraživanja. U **drugom poglavlju** predstavljeni su logistički procesi, njihovo mjesto i uloga u distribuciji. Zatim, opisani su uloga i značaj distribucije u privredi i nauci, odnos distribucije i korisnika distribucije kroz vrijeme i uloga operacionih istraživanja (OR – eng. *Operational Research*) u tretiranju problema u logistici. U **trećem poglavlju** dat je pregled relevantne literature. U **četvrtom poglavlju** predstavljeni su koncept i modeli za optimizaciju skladišnog i transportnog procesa. Razvijeni koncept i modeli primijenjeni su na realnom primjeru distribucije u **petom poglavlju**. U **šestom poglavlju** su data zaključna razmatranja.

## **2. OSNOVNA OBILJEŽJA LOGISTIČKIH PROCESA U DISTRIBUCIJI PROIZVODA**

### **2.1. Logistički procesi**

Logistički procesi su procesi uz čiju pomoć se realizuju lanci snabdijevanja. Oni povezuju tržišta nabavke sa tržištima potrošnje. To su poslovni procesi koji su najviše povezani sa fizičkim tokom proizvoda. U najopštijem smislu u njih se ubrajaju proces realizacije porudžbine, transport, skladištenje, upravljanje zalihama i pakovanje (Kilibarda, 2008). Jedan logistički proces čini skup logističkih aktivnosti upravljačko - planskog, informacionog, tehnološkog, organizacionog i kontrolnog karaktera (Nikoličić, 2011). U početku, svi logistički procesi su se odvijali odvojeno. Razvojem logističke misli i informacionih tehnologija njima se počelo upravljati jedinstveno, čime se logistika razvila kao naučna disciplina i poslovna funkcija. Da bi se neki od pomenutih procesa mogao označiti kao logistički, on mora biti u sistemu upravljanja koji obuhvata sve logističke procese. Logistički koncept je uveden kao odgovor na rastuću potrebu za integrisanim upravljanjem robnim tokom, od izvora snabdijevanja do tačke potrošnje, umjesto upravljanja serijom nezavisnih zadataka (Sadjady, 2011).

Logistički procesi obezbjeđuju da se prava roba, u pravoj količini i kvalitetu nađe na pravom mjestu, u pravo vrijeme, u odgovarajućem pakovanju i prihvatljivoj cijeni. To je poznati 7P logistički koncept. Logistički procesi su nosioci transformacija robnih tokova. Prije svih to su transformacije u pogledu mjesta, vremena, količine, strukture i vlasništva robe. Svaki logistički proces čine zadaci koji se realizuju u toku transformacija robnog toka. Prema tome, upravljanje logističkim procesima odnosi se i na upravljanje transformacijama robnog toka. Realizatori logističkih procesa su logistički podsistemi. To su podsistem zaliha, pakovanja, transporta, skladištenja i realizacije porudžbine (Kilibarda, 2008). Osnovni elementi logističkih podsistema su ljudi, dobra i energija (Segetlija i Lamza-Maronić, 1994).

Dakle, logistika je ta koja integralno upravlja pomenutim procesima čineći ih logističkim. S druge strane, logistika i logističko upravljanje se realizuju kroz

logističke procese. Prema tome, logistika se može definisati kao nauka i poslovna disciplina koja se bavi upravljanjem logističkim procesima, s ciljem realizacije nabavke, proizvodnje i distribucije proizvoda na što efikasniji način.

### **Logistički procesi u poslovnom sistemu**

Logistički procesi u okviru preduzeća realizuju se od nabavke, preko kretanja i mirovanja proizvoda unutar preduzeća, do njihove distribucije korisnicima. Svrha logistike preduzeća ili poslovne logistike je da ih učini što efikasnijim. Da bi se to postiglo, potrebno je smanjivati zalihe, skraćivati vrijeme protoka robe, smanjivati greške u isporuci itd. (Segetlija i Lamza-Maronić, 1994). Preduslov za to je da se svi logistički procesi posmatraju istovremeno i da se obuhvate svi logistički troškovi i učinci, jer nerijetko smanjenje troškova jednog procesa uzrokuje povećanje troškova u drugom.

Kao dio upravljačkog sistema preduzeća poslovna logistika upravlja logističkim procesima preduzeća. Rezultat odvijanja logističkih procesa je uglavnom usluga, odnosno servis isporuke čije su komponente vrijeme dostave, pouzdanost dostave, njena tačnost, stanje, fleksibilnost itd. (Segetlija i Lamza-Maronić, 1994). Logistička usluga utiče i na visinu prodaje i na visinu troškova, ali svoj najveći doprinos profitu preduzeća ne daje uz svoj maksimalni nivo (Segetlija i Lamza-Maronić, 1994). Upravljanje logističkim procesima treba da dovede do logističke usluge koja će obezbijediti maksimalni profit onome koji je pruža.

### **Značaj logističkih procesa**

Značaj logističkih procesa ogleda se kroz značaj same logistike, a on raste iz godine u godinu. Logistika je disciplina koja se koristi sve više i više (Pečený i ostali, 2020). Koliko su logistika i njeni procesi važni, ljudi i preduzeća najbolje osjete kad se neki od sedam „pravih“ iz logističkog koncepta ne realizuje. Posebno važan je značaj logistike za prilagođavanje privrede promjenama u društvu i ekonomiji. Od logistike se očekuje da nađe rješenje ili pomogne u prevazilaženju problema koje donose neželjena zbivanja u društvu i privredi, kako na lokalnom tako i globalnom nivou. Takođe, od nje se očekuje da prati ubrzani razvoj društva, prati promjene u načinu rada i življenja ljudi i bude aktivni dio tih promjena.

Danas je pred logistikom u poslovnom svijetu prije svega zadatak da obezbijedi nesmetano odvijanje robnih tokova uprkos problemu nedostatka i rastućih cijena resursa, kako energetske tako i ljudske. Racionalizacija u korišćenju tih resursa se sve više nameće kao rješenje. Najveći potencijali za uštede svakako se kriju u logističkim procesima. To posebno važi za logistiku distribucije, u kojoj je angažovan veliki broj ljudi i transportnih sredstava.

### **Proces realizacije porudžbine**

Proces realizacije porudžbine je proces koji obuhvata prijem, obradu i prosleđivanje informacija o potrebama i zahtjevima kupaca (Kilibarda, 2008). To je proces koji povezuje naručioca i isporučiooca robe. Može da se obavlja ručno (usmeno ili pismeno) ili elektronski (Kilibarda, 2008). U firmi koja isporučuje proizvode pokreće mnoge druge procese poput provjere zaliha, komisioniranja, pakovanja, utovara, transporta, izrade logističkih dokumenta, fakturisanja itd. Na taj način generiše i troškove povezane sa realizacijom ovih procesa. S druge strane to je jedan od procesa koji direktno utiču na zadovoljstvo korisnika i poslovanje kompanije (Milojević i ostali, 2021). Stoga, vrlo je važno voditi računa kako se odvija ovaj proces i vršiti njegovo unaprjeđivanje i optimizaciju.

### **Transport**

Transport je proces koji omogućava prostornu transformaciju robnog toka. Jedan je od glavnih logističkih procesa. Dodaje vrijednost proizvodu stavljajući ga na raspolaganje korisniku u pravo vrijeme i na pravom mjestu. Na njega otpada od jedne do dvije trećine ukupnih logističkih troškova (Tseng i ostali, 2005). Shodno tome značajno utiče na efikasnost distribucije i cijelog lanca snabdijevanja. Dizajnira ga, pokreće i realizuje transportni podsistem. Glavni zadatak transportnog procesa je da realizuje transportne naloge u skladu sa zadatim ciljevima, poštujući ograničenja, uz najmanje moguće troškove.

Transportni proces se realizuje uz pomoć transportnih sredstava, puteva, ljudi i energije. Oni se razlikuju u zavisnosti od vida transporta koji se primjenjuje. U distribuciji proizvoda najviše se koristi drumski vid transporta. Prije svega zbog njegove prostorne i vremenske fleksibilnosti. Moguće ga je pokrenuti kad god je

potrebno i pomoću njega pristupiti najvećem broju mjesta. Vremenska fleksibilnost drumskog transporta posljedica je dostupnosti drumskih transportnih sredstava. Preduzeća mogu da kupe drumska transportna sredstva i njima obavljaju transport ili da angažuju drumske prevoznike u terminima koji njima odgovaraju. Prostorna fleksibilnost proističe iz same konfiguracije drumskih transportnih sredstava i činjenice da danas većina ljudi i preduzeća imaju drumske saobraćajnice do njihove adrese. Prednost drumskog transporta pri distribuciji je i to što se najvećim dijelom odvija na putevima čije se korišćenje ne naplaćuje. Drumski transport ima i svoje nedostatke koji direktno štete distribuciji kao što su: razne zabrane i ograničenja pristupa za teretna vozila, nedostatak vozača, energenata, rezervnih dijelova itd.

### **Skladištenje**

Skladištenje je drugi logistički proces čvrsto povezan sa fizičkim tokom robe. Za razliku od transporta, koji se prvenstveno odvija na lukovima, skladištenje se odvija u čvorovima mreže. Označava se i kao „transport sa 0 km na sat“. Odgovoran je za oko 20% ukupnih logističkih troškova distribucije (Sadjady, 2011). Skladištenjem i čuvanjem robe u skladištu omogućava se savlađivanje vremenske razlike između trenutka ponude proizvoda i trenutka potražnje za njim. Na taj način direktno se utiče na prodaju i profit preduzeća, stavljajući proizvod na raspolaganje klijentu u vrijeme kada on to želi. Ukupni logistički troškovi se skladištenjem mogu smanjiti, ukoliko se zalihama upravlja na pravi način. Skladištenjem robe ublažavaju se i količinske i strukturne razlike u robnim tokovima.

Tri su funkcije skladištenja. To su čuvanje zaliha, rukovanje robom i obezbjeđivanje informacija o stanju zaliha. Čuvanje zaliha je ništa drugo do akumulacija zaliha, što se tradicionalno smatra primarnom ulogom skladišta. Skladišta su se posmatrala kao mjesta dugoročnog čuvanja proizvoda, međutim, kako je u novije vrijeme povećan obrt zaliha, sve veći značaj dobija funkcija kretanja proizvoda u okviru skladišta. Kretanje robe u skladištu ili rukovanje robom obuhvata prijem i odlaganje robe, komisioniranje, kros-doking (eng. *cross-docking*) i isporuku robe. Funkcija informisanja svodi se na obezbjeđivanje informacija o statusu, nivou, lokaciji, obrtu, stanju zaliha i drugih informacija o zalihama (Sadjady, 2011).

## **Pakovanje**

Pakovanje je proces kojim se formira i oblikuje pojavni oblik robe (Kilibarda, 2008). Ima zadatak da obezbijedi bezbjedan i efikasan prolazak gotovih proizvoda kroz logističku mrežu, pomogne njihovoj prodaji i minimizuje štetni uticaj pakovanja na okolinu nakon korišćenja proizvoda. Sa logističkog aspekta, važan je doprinos pakovanja efikasnom skladištenju, rukovanju i transportu proizvoda kao i mogućnost njegove ponovne upotrebe. Zbog toga je potrebno da pakovanja proizvoda na svakom nivou budu optimizovana što podrazumijeva korišćenje pakovanja standardnih dimenzija, te da mase i zapremine pakovanja budu pogodne za manipulisanje. Takođe, potrebno je da sadrže neophodne informacije o rukovanju.

Osnovni nivoi pakovanja su jedinica proizvoda, jedinica pakovanja, jedinica rukovanja, tovarno-manipulativna jedinica i transportna jedinica. Korisnici mogu naručiti proizvod na bilo kom nivou pakovanja. Pakovanja treba da omogućе sjedinjavanje proizvoda u jedinice kojima se lakše rukuje, koje se lakše skladište i koje omogućavaju maksimalno iskorišćenje tovarnih kapaciteta. Jedinice proizvoda su pakovanja koja su direktno izložena kupcu te se nazivaju i prodajna pakovanja. Jedinice pakovanje sadrže jedinice proizvoda. Jedinice rukovanja su kutije raznih dimenzija u kojima se nalaze jedinice pakovanja i kojima se obično ručno manipuliše. Tovarno-manipulativne jedinice su obično palete sa naslaganim jedinicama rukovanja. Transportna jedinica je poluprikolica, kontejner, izmjenljivi transportni sud i slično u kojima se prevoze tovarno-manipulativne jedinice. Kod nekih proizvoda može se desiti da su dva ili više nivoa pakovanja svedeni na jedan. Pored paleta, koje su dominantni oblik tovarno-manipulativnih jedinica, u distribuciji se još koriste različiti trgovački kontejneri (eng. *mall containers*) kao što su tote kutije (eng. *tote bins*), kolica (eng. *dollies*), rol palete (eng. *roll-cages*), kavezi (eng. *cages*) i boks (eng. *box*) palete (Sadjady, 2011). Pakovanje je važno u distribuciji i prilikom određivanja minimalne količine koja može da se naruči. Obično se izražava u odnosu na kapacitet tovarno-manipulativne jedinice.

Da bi se obezbijedio bezbjedan put proizvoda od proizvodnje do potrošnje, proizvod mora biti upakovan u materijal koji će da ga zaštiti od okoline. Za određene

proizvode važno je da pakovanje štiti okolinu od njihovog dejstva. Efikasan prolazak kroz mrežu ostvaruje se efikasnim rukovanjem, skladištenjem i transportom proizvoda. Pakovanje može da obezbijedi povećanje prodaje, ako učini proizvod privlačnim i prepoznatljivim kupcu. Na kraju, pakovanje može da smanji neželjeni uticaj na okolinu ako je od ekološki prihvatljivog materijala, ako se može reciklirati i ponovo upotrijebiti i ako omogućava da se proizvod nakon upotrebe u njemu transportuje do mjesta zbrinjavanja. Proces pakovanja se obično jedinom dijelom odvija u sklopu proizvodnje, a dijelom u skladištima. Treba da omogući proizvodima bezbjedno i efikasno rukovanje, skladištenje, prodaju, konzumaciju, odlaganje uz maksimizaciju njihove vrijednosti, prodaje i profita. Skoro svaki gotovi proizvod zahtijeva pakovanje.

### **Upravljanje zalihama**

Upravljanje zalihama podrazumijeva odlučivanje kada i koliko robe naručiti, kako ciljevi poslovanja preduzeća ne bi bili ugroženi i troškovi posjedovanja zaliha visoki. Ključni je proces lanca snabdijevanja koji obezbjeđuje da prava količina robe bude dostupna u pravo vrijeme i na pravom mjestu. Upravljanje zalihama zahtijeva stalno praćenje i analizu potrošnje proizvoda i odgovarajuće reagovanje. Povezan je sa robnim tokom od naručivanja, preko skladištenja, distribucije, prodaje do obnavljanja zaliha. Za upravljanje zalihama koriste se metode kao što su JIT (eng. *Just In Time*), MRP (eng. *Material Resource Planning*) ili QR (eng. *Quick Response*) metoda, modeli kao što je EOQ (eng. *Economic Order Quantity*), markovski i bajesovski način upravljanja zalihama i dr. Koliko će se nekog proizvoda držati na zalihama i da li će uopšte biti na zalihama, prvenstveno zavisi od tri vrste troškova: troškova držanja zaliha, troškova naručivanja i troškova nedostatka zaliha. U troškove držanja zaliha uključeni su troškovi kapitala vezanog u zalihama, skladištenja robe, zaštite, gubitka, osiguranja, pakovanja, administracije itd. Troškovi naručivanja odnose se na troškove dopreme robe do skladišta i povezane administrativne troškove. Troškovi nedostatka zaliha uključuju troškove izgubljene prodaje, izgubljenog kupca, narušenog ugleda firme itd.

Upravljanje zalihama je jedan od ključnih procesa u maloprodaji. Maloprodaja zavisi od toga da li je prava roba dostupna kupcu u pravo vrijeme i po pravoj cijeni. U

prodajnim objektima robe široke potrošnje, svi proizvodi koji se nude moraju biti i dostupni na policama. Samo tako današnji kupac ostaje lojalan trgovini u kojoj kupuje. S druge strane, prodajni objekti teže da smanje zalihe na minimum uslijed čega dolazi do čestih porudžbina i visokih troškova dopreme, čime se direktno utiče i na troškove distribucije do prodajnih objekata.

## **2.2. Distribucija proizvoda**

### **Pojmovi i definicije**

Pojam distribucija (eng. *distribution*) u osnovi znači raspodjela. Na koju vrstu raspodjele se odnosi, zavisi od oblasti u kojoj se termin koristi. U privredi je često vezan za raspodjelu dobara. U tom smislu, odnosi se na aktivnosti koje dovode do raspodjele dobara potrošačima. Ako se posmatraju robni tokovi, distribucija je aktivnost koja treba da izjednači neravnomjernosti između ponude i potražnje. Te neravnomjernosti su prostornog, vremenskog, količinskog i strukturnog karaktera. Distribucija je i oblast marketinga, tj. dio marketing miksa. Funkcija fizičke distribucije u nekoj organizaciji je da obezbijedi proizvod u zahtijevano vrijeme i na zahtijevanom mjestu. U marketing miksu jednaka je elementu „mjesto“. Ako proizvod nije dostupan kada i gdje je potreban, on sigurno neće uspjeti na tržištu (McDonald i ostali, 2003). Distribucija je mnogo više od samog dostavljanja proizvoda naručiocu. Strateški, ona je značajna za kompaniju u pogledu postavljanja kanala distribucije, a isto tako, i kao servis za klijente. Prema tome, distribucija značajno utiče na konkurentsku poziciju kompanije (McDonald i ostali, 2003).

U prošlosti se u okviru marketinga premalo pažnje poklanjalo distribuciji i toku proizvoda uopšte. Posljedica toga su bili visoki troškovi distribucije i osamostaljivanje distribucije kao posebne poslovne funkcije u okviru preduzeća (Ballou, 2007). Na savremenom tržištu distribucija je dio logistike i sa njom dijeli iste principe i ciljeve. Logistički gledano, to je proces stavljanja robe na raspolaganje korisnicima kako i kada žele. Tačnije, po konceptu 7P. Posmatrajući lanac snabdijevanja, distribucija je njegova završna faza. U okviru preduzeća koje ima izlazne robne tokove, to je izlazna logistika preduzeća. Ona povezuje preduzeće sa korisnicima njegovih proizvoda i usluga. Za logistiku je važan fizički tok proizvoda u



toku distribucije. Pored njega u okviru distribucije proizvoda, odvija se i transakcioni tok, koji nije u fokusu ove disertacije. Postoje različite definicije i shvatanja opsega distribucije proizvoda u okviru logistike. U najopštijem smislu, to je svako pomjeranje proizvoda od proizvodnje ka potrošnji (Ballou, 2007). Dominantno se pod distribucijom proizvoda misli na distribuciju gotovih proizvoda, spremnih za upotrebu od strane ljudi. Ipak, ne treba zaboraviti i na distribuciju sirovina, materijala i poluproizvoda koji se koriste u procesu proizvodnje.

Svi osnovni logistički podsistemi sa svojim aktivnostima i procesima su uključeni u realizaciju distribucije. Jedan klasičan proces distribucije sastojao bi se od aktivnosti poručivanja, prijema i obrade porudžbine, komisioniranja, pakovanja, formiranja tovarnih jedinica, izrade prateće dokumentacije, utovara, prevoza, istovara, kontrole, skladištenja i plaćanja. (Kilibarda, 2008). Prema tome, distribucija je skup međusobno povezanih aktivnosti koje se sprovode sa ciljem ispunjenja koncepta 7P. Pored realizacije distribucije proizvoda određenim distributivnim kanalom, bavljenje distribucijom obuhvata i pravljenje opšteg strateškog plana za njezino izvođenje<sup>3</sup> (La Londe i Headen, 1971).

### **Distribucija i trgovina**

Pojam sa kojim se distribucija često miješa i sa kojim je vrlo bliska je trgovina. Uopšteno, distribucija nije isto što i trgovina. Trgovina pokreće distribuciju i završava se nakon završetka distribucije. U tom smislu, ni distributeri nisu isto što i trgovci. U praksi se pod pojmom distributer uglavnom podrazumijevaju organizacije koje se bave distribucijom i prodajom proizvoda trgovačkim firmama. Shodno tome, smatraju se i veletrgovcima. Roba koju distribuiraju je u njihovom vlasništvu, ali je nisu proizveli, nego kupili od dobavljača. Distributeri određene robe mogu da imaju i svoje maloprodajne objekte u kojima prodaju samo svoje proizvode ili i proizvode drugih distributera i proizvođača.

Zadatak distributera je da preuzmu proizvode od dobavljača u većim količinama, drže ih na zalihama u skladištima i distribuiraju naručiocima u traženim količinama. Distributeri mogu biti uključeni i u aktivnosti koje se tiču povećanja prodaje

---

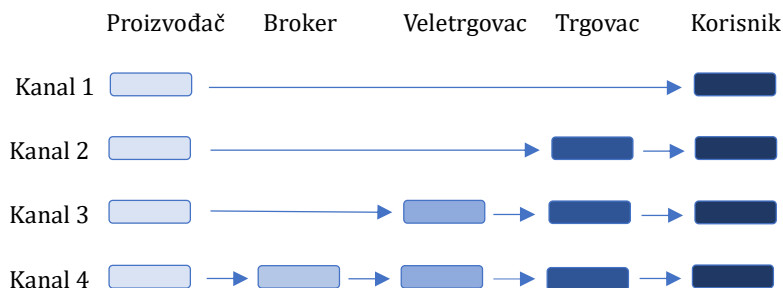
<sup>3</sup> <https://fulltiltlogistics.com/what-is-logistics-and-distribution/>

proizvoda koje distribuiraju i zadovoljstva njihovih korisnika. To su aktivnosti obilaska naručioca proizvoda, pregleda robe na policama, pokretanja procesa u naručivanju robe, uticanja na količine koje se naručuju i dinamiku naručivanja. Nerijetko se bave i promocijom proizvoda koje distribuiraju, postprodajnim aktivnostima i korisničkom podrškom. Ukoliko roba nije u njihovom vlasništvu, za svoj posao bivaju plaćeni od samog dobavljača.

Distributeri mogu biti samo posrednici između dobavljača i naručioca robe, tj. da distribuiraju robu bez preuzimanja vlasništva nad njom. Distribucijom mogu da se bave i proizvodna preduzeća i logistički provajderi. Kako god bilo, roba u većini slučajeva završava u prodajnim objektima. Prodajni objekti skladište dobijenu robu u manjim količinama i prodaju. Ako su u vlasništvu distributera, prate instrukcije oko promocije i prodaje od distributera, a ako nisu, to rade sami. Robu od distributera poručuju sami, uz prisustvo predstavnika distributera ili se snabdijevaju od distributera na osnovnu njihovog uvida u stanje robe u trgovini.

### **Distributivni kanali**

Distributivni kanal je put kojim proizvod ili usluga može da stigne do potrošača ili korisnika. Korisniku proizvoda obezbjeđuje korist od mjesta, vremena i vlasništva. Među osnovne funkcije kanala distribucije ubrajaju se: fizička distribucija, prenos vlasništva, promocija, pregovaranje, informisanje o potencijalnim kupcima, potražnji, konkurenciji itd. Strukturni elementi distributivnog kanala su: mikrologistički sistemi (proizvodna, trgovačka ili uslužna preduzeća), metalogistički sistemi (transportna, špediterska, skladišna, pretovarna preduzeća, distributivni centri, robni terminali, robno transportni centri itd.), i makrologistički sistemi (transportno-saobraćajna infrastruktura, objekti i oprema) (Kilibarda, 2008). Njihov zajednički cilj je olakšati prenos robe i vlasništva od proizvođača do potrošača. Prema tome, uspjeh prodaje umnogome zavisi od postavke kanala distribucije. Pitanje izbora distributivnih kanala povezano je sa strateškim planiranjem distribucije. Strateška odluka firme je koliko će kanala distribucije imati i ko će biti učesnici u njima (Rushton i ostali, 2006). S aspekta različitih stepena trgovine, kanali distribucije imaju četiri osnovna oblika (slika 2.1) (Sadjady, 2011).



**Slika 2.1. Kanali distribucije (prilagođeno prema Sadjady, 2011)**

Direktni kanali distribucije, tj. bez posrednika, realizuju se kada proizvođač direktno isporučuje robu kupcu. Prodaja se tada obavlja pomoću kataloga, oglasa, mreže maloprodajnih objekata proizvođača, televizije ili interneta. Isporuku realizuje sam proizvođač ili brza pošta (Hlača, 2006). Ovaj kanal postoji još uvijek kod nekih vrsta roba poput knjiga, kozmetike ili rukotvorina. Drugi kanal distribucije podrazumijeva slučaj kada proizvođači plasiraju svoje proizvode direktno maloprodajnim objektima, tj. bez učešća veletrgovca. Primjer za to su pekari, mesari, voćari, povrtlari itd. Ukoliko proizvođač prodaje svoje proizvode samo u većim količinama, onda se javljaju veletrgovci koji preuzimaju te količine i preprodaju ih ili ih samo distribuiraju trgovinama. To je karakteristično za prehrambene proizvode proizvedene u fabrikama. Posljednji kanal uključuje još jednog posrednika, tj. agenta ili brokera koji za račun proizvođača prodaje robu veletrgovcima (Sadjady, 2011). Ovaj kanal je karakterističan za odjeću, kao i za žitarice i ostalu berzansku robu.

Distributivni kanal čine kanal fizičke distribucije i transakcioni kanal. Oni se razlikuju po prirodi aktivnosti koje se u njima odvijaju. U transakcionom kanalu distribucije se odvijaju aktivnosti pregovaranja, prenosa vlasništva, prodaje itd. U fizičkom kanalu distribucije odvijaju se aktivnosti koje dovode do fizičke dostave proizvoda do korisnika i mogu se poistovjetiti sa logističkim procesima transporta, skladištenja, pakovanja, upravljanja zalihama i obrade porudžbine. Fizički kanal distribucije je u fokusu logistike. Sa logističkog aspekta on se može odvijati bez ili sa jednim ili više skladištenja na putu do odredišta. To skladištenje može biti u distributivnim skladištima ili kros-doking centrima. Sa tog aspekta, tj. hijerarhijske strukture i stepena distribucije, distributivni kanali se mogu svrstati u pet kategorija. To su direktni kanali distribucije, jednostepeni kanali distribucije,

dvostepeni, trostepeni i kombinovani (Kilibarda, 2008). Pojavom distributivnih skladišta, distributivni tok je podijeljen na primarni (do distributivnog skladišta) i sekundarni (od distributivnog skladišta do prodajnog objekta).

### **Distribucija kao usluga**

Usluga fizičke distribucije se razlikuje od usluga većine drugih uslužnih djelatnosti u pogledu toga ko prima uslugu i kako se ona realizuje (Bienstock i ostali, 1997). Primjenjuje se na proizvode, a ne na ljude. Dobavljač usluge i kupac su fizički odvojeni. Za razliku od drugih uslužnih grana u kojima je usluga nematerijalna, usluga fizičke distribucije je donekle „opipljiva“, kroz stanje i vrijeme prijema proizvoda koji se isporučuju. Mentzer i ostali (1989) definišu njen kvalitet kroz dostupnost proizvoda, pravovremenost isporuke i kvalitet isporuke. Emerson i Grim (1996) su tome dodali komunikaciju kao četvrtu dimenziju, naglašavajući važnost informacija o statusu porudžbine u poboljšanju kvaliteta usluge fizičke distribucije. Mentzer i ostali (2001) proširili su ovaj okvir na nekoliko drugih karakteristika, od kojih je većina vezana za proces naručivanja (Xing i Grant, 2006).

Kako se logistički sistem dizajnira iz perspektive efikasnosti, i distributivni sistem treba da bude vrjednovan na isti način. Distribucija teži da pružanjem usluge kreira vrijednost za korisnika uz minimalne troškove pružanja usluge. Iz logističke perspektive, vrijednost za korisnika se stvara realizacijom usluge isporuke, a ona dobija vrijednost kroz vrijeme isporuke, pouzdanost, kvalitet i fleksibilnost. S druge strane, troškovi distribucije nastaju realizacijom distribucije na mreži i lociraju se na pet ključnih logističkih procesa. To su transport, upravljanje zalihama, skladištenje, obrada porudžbina i pakovanje (Pfohl, 2018; Freichel i Wörtge, 2018).

### **Značaj distribucije**

Mentzer i ostali (1989), Rushton i ostali (2000) su ispitali evoluciju i razvoj fizičke distribucije i složili se da njen značaj raste s vremenom. Tamilia (2019) navodi da bez distribucije proizvoda na tržište ili na mjesta gdje postoji potreba za njima, proizvodnja ne može da uspije koliko god ona bila obimna i tehnološki napredna. Takođe, ističe da je distributivna mreža neophodna da bi se neka ekonomija podigla iz lokalne u regionalnu ili iz regionalne u nacionalnu. Distributivnu mrežu treba da

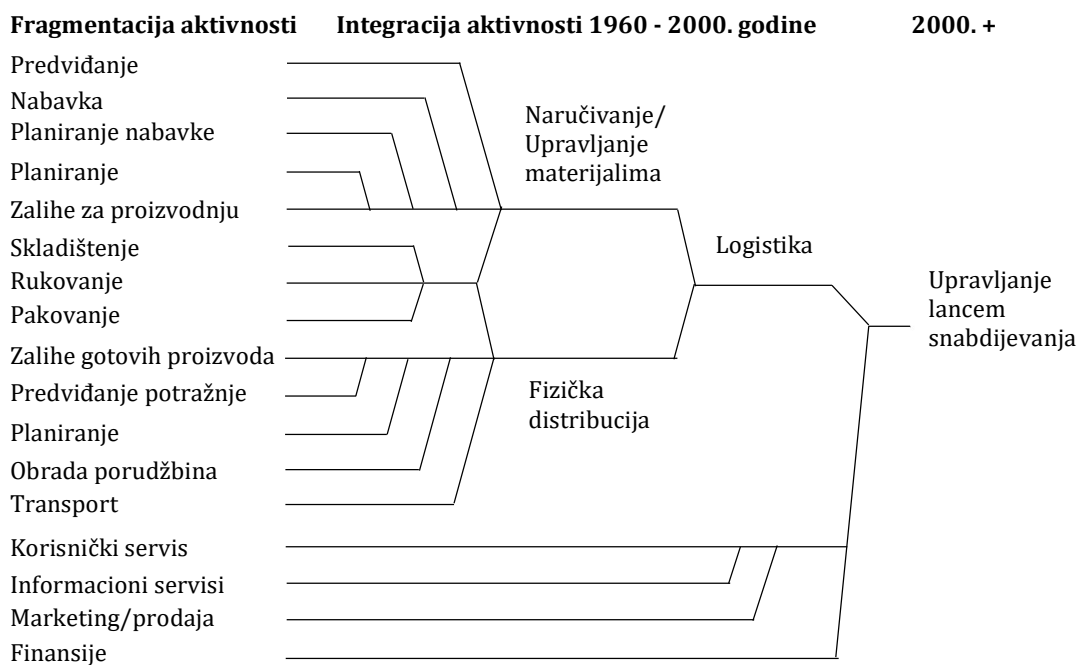
čine različiti veletrgovci, trgovci, transporter i drugi. Schuman (2017) ističe da je danas mnogo važnije kako se neki proizvod brendira i distribuira nego kako se proizvodi, te da je mnogo teže uspjeti u tome nego u pravljenju nečega (Tamilia, 2019). Dugo je sektor proizvodnje držao primat u ekonomiji i bio smatran jedinim koji stvara vrijednost. Međutim, ispostavilo se da on bez koordinacije sa distribucijom ne može uspjeti. Udio troškova distribucije u cijeni proizvoda se stalno povećavao i tako otežavao prodaju. Smatra se da je 1939. godine iznosio i više od polovine cijene proizvoda (Cox i ostali, 1965). Dakle, vrijednost proizvoda se ne dobija samo od njegove upotrebne koristi, nego i od koristi koje proizlaze iz vremena i mjesta u kome se nalazi i od njegovog posjedovanja (Shaw, 1994). Upravo te koristi donose ostali članovi kanala distribucije. Prije uvođenja koncepta korisnosti smatralo se da marketing i distribucija ne dodaju vrijednost proizvodu, jer predstavljaju neproduktivan rad. Pored toga, njihovi realizatori su označavani kao nemoralni, motivisani pohlepom i zaradom (Tamilia, 2019). Danas se pak smatraju ključnim za razvoj ekonomije.

Kako logistika i distribucija imaju za cilj stalno smanjenje troškova distribucije i povećanje efikasnosti, direktno utiču na sticanje konkurentne prednosti i povećanje prodaje (Tamilia, 2019). Posebnu ulogu imaju u očuvanju postojećih korisnika, kroz pružanje kvalitetne usluge. Stoga, savremena distribucija je mnogo više od pukog skladištenja i transporta proizvoda (McDonald i ostali, 2003). Od distribucije korist imaju i proizvođači i trgovci i krajnji potrošači. Proizvođači jer mogu da se usredsrede na proizvodnju i izbjegnu rizik od neefikasne distribucije. Neke proizvodne firme čak izmještaju završne faze svoje proizvodnje u distributivna skladišta. Trgovine imaju korist od distribucije, jer mogu da traže asortiman i količine koje njima odgovaraju. Potrošači dobijaju proizvode u vrijeme i na mjesto koje im je potrebno.

### **Distribucija i logistika**

Često je prisutna nedoumica pri razmatranju odnosa ova dva pojma, pogotovo kod ljudi koji nisu iz svijeta logistike. Tome je doprinijela činjenica da je pojam logistika naslijedio pojam distribucije u mnogim preduzećima i u stručnoj literaturi (Ballou, 2007). U prilog tome govori i preimenovanje Savjeta za upravljanje fizičkom

distribucijom (eng. *the National Council of Physical Distribution Management*) u Savjet za upravljanje logistikom (eng. *the Council of Logistics Management*) 1985. godine u SAD-u (Southern, 2011). Evolucija distribucije u logistiku započela je njenim izdvajanjem iz okrilja proizvodnje i marketinga. Razvojem logističke svijesti o koristima sveobuhvatnoga i jednovremenoga upravljanja svim robnim tokovima preduzeća, razvila se logistika. Smatra se da je logistika nastala dodavanjem dijela upravljanja materijalima distribuciji gotovih proizvoda (slika 2.2) (Ross, 1998; Ballou, 2007). Tako je logistika postala naučna oblast i poslovna funkcija koja se bavi, ulaznim, unutrašnjim i izlaznim robnim tokovima jednog privrednog sistema, odnosno, koja se bavi robnim tokovima pri nabavci, proizvodnji i distribuciji.



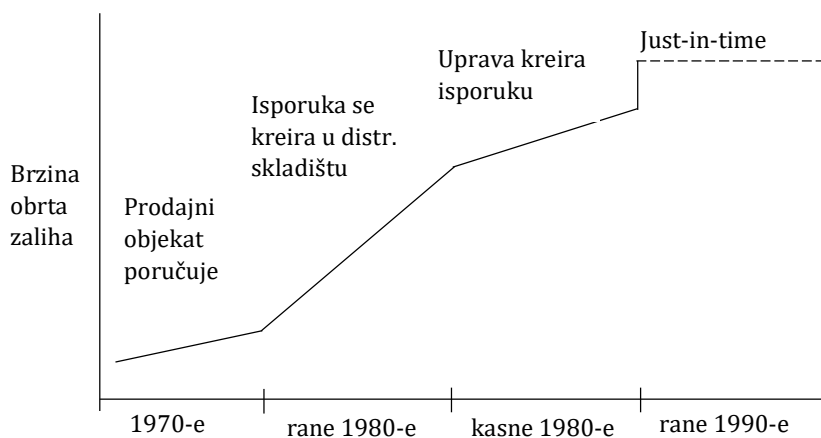
**Slika 2.2. Evolucija logistike (prilagođeno prema Ballou, 2007)**

U evoluiranju iz fizičke distribucije svakako joj je pomogla i pojava, razvoj i primjena informacionih tehnologija u procesima koje obuhvata (Takai, 2009). To je omogućilo efikasniji rad njenih podistema, kao i veći i značajniji doprinos OR unaprjeđenju efikasnosti. Poslovna logistika je povezala aktivnosti poručivanja, proizvodnje i distribucije i učinila ih efikasnijim uz pomoć OR i savremenih tehnologija (što ranije nije bilo izvodljivo). Logističko upravljanje je u suštini proces planiranja i aktivnost bazirana na informacijama (McDonald i ostali, 2003). Bez logističkog upravljanja,

distribucija je samo realizacija pojedinačnih procesa poput transporta, skladištenja, upravljanja zalihama itd, dok sa njim, distribucija podrazumijeva racionalno oblikovanje, upravljanje i realizaciju robnih tokova od proizvodnje do prodaje i potrošnje. Korisnički servis je nit koja povezuje logističke i distributivne procese, jer na kraju, rezultat logističkog sistema je usluga za korisnike. Otuda, distribucija i logistika moraju biti vješto integrisani i vođeni kako bi se maksimizirala korist koju korisnici dobijaju logističkom uslugom i obezbijedili minimalni troškovi<sup>4</sup>.

### 2.3. Razvoj odnosa između distribucije i njenih korisnika

Odnos distributera i korisnika distribucije se mijenjao kroz istoriju. Najveći uticaj na taj odnos su ostavili, i ostavljaju i dalje, razvoj trgovine i marketinga. Iako se u trgovini sve više nastoje izbjeći prodajni objekti, oni su i dalje glavni nosioci prodaje i ostaju i glavni korisnici distribucije i završeci distributivnih lanaca. Ono što se mijenjalo kroz istoriju je to ko ima kontrolu nad robnim tokom do prodajnog objekta i kako se taj robni tok odvija. Whiteoak (1999) je slikovito prikazao promjene u nadležnostima pri poručivanju robe za prodajni objekat, počevši od 1970. godine pa do danas (slika 2.3).



**Slika 2.3. Razvoj distributivne prakse u maloprodaji (prilagođeno prema Whiteoak, 1999)**

U nastavku je dat razvoj distribucije do prodajnih objekata, od početka tržišne proizvodnje do danas. Razvoj je podijeljen na epohe tako da su se na početku svake

<sup>4</sup> <https://uh.edu/~lcr3600/simulation/app-lt.html>

epohe desile značajne promjene u distribuciji. Za svaku epohu je posmatran odnos dobavljač – prodavac, tačnije, posmatrano je ko obavlja koji dio distribucije do prodajnih objekata, ko ima nadležnost da kontroliše nivo zaliha u prodajnim objektima, ko vrši naručivanje itd. Pored toga, prikazane su i društveno-ekonomske prilike tog doba, tehnološki napredak i njihov uticaj na distribuciju proizvoda. Potom je opisan status distribucije i logistike u nauci tog vremena, a sve sa ciljem da bi se stekao što bolji utisak o tome zašto se distribucija tog vremena odvijala na prikazani način. Naravno, kraj jedne epohe ne znači striktno kraj distributivne prakse iz te epohe u narednoj. Takođe, prevashodno se govori o razvoju distribucije na zapadnom tržištu.

### **Epoha 1: Do industrijske revolucije (veletrgovci i agenti kontrolišu distribuciju)**

Prije industrijske revolucije i druge polovine 19. vijeka ljudi su uglavnom sami izrađivali sve što im je bilo potrebno. Eventualni višak proizvedenog nosili su u grad i tu prodavali ili mijenjali za drugu robu<sup>5</sup>. U takvoj situaciji i nije bilo prevelike potrebe za distribucijom. Zadovoljenje potreba za nekim proizvodima na udaljenijim mjestima, obavljali su veletrgovci. Tako da se može smatrati da su oni obavljali i kontrolisali neki oblik distribucije u tom periodu (Tamilia, 2019). Ideja o snabdijevanju robom udaljenih mjesta, tj. distribuciji proizvoda na mjesta udaljena od proizvodnje zaživjela je u 19. vijeku nakon Napoleonovog pokušaja osvajanja Evrope (1804 - 1815). Napoleon je za potrebe ovog pohoda organizovao masovnu proizvodnju oružja i ostalih proizvoda za vojsku i gradio puteve do svojih trupa. Tako je industrija mogla iznova i iznova da snabdijeva vojsku na frontu. Ideja se proširila u SAD gdje se gradila željeznica za potrebe vođenja građanskog rata (1861 - 1865)<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> <https://www.encyclopedia.com/finance/finance-and-accounting-magazines/marketing-historical-perspectives>

<sup>6</sup> <https://davidkigerinfo.wordpress.com/2016/07/21/is-ww2-the-greatest-supply-chain-management-in-the-world/>



## **Epoha 2: Od industrijske revolucije do 1960. godine (proizvođač i proizvodnja kontrolišu distribuciju)**

Poslije industrijske revolucije kreće masovna proizvodnja. Njeni principi bivaju uspostavljeni u SAD-u poslije Američkog građanskog rata. Proizvođači počinju da se grupišu u određenim oblastima, kako bi bili bliži izvorima energije, sirovinama i transportnim sredstvima i tako uštedjeli vrijeme i novac. Međutim, na taj način dodatno su se udaljili od kupaca. Zbog toga se javljaju posrednici među njima, poznati kao merkanti (Tamilia, 2019). Razvoj masovne proizvodnje biva usporen Prvim svjetskim ratom i potom Velikom krizom u SAD-u (1929-1933). Još tada se shvatilo da su promocija i distribucija (snabdijevanje) dvije strane iste medalje (Ballou, 2007). U toku Drugog svjetskog rata proizvodnja biva preorijentisana na proizvodnju za vojsku. Tada se principi distribucije i logistike najviše razvijaju.

Nakon Drugog svjetskog rata, proizvodnja za vojsku se prebacuje na proizvodnju za stanovništvo<sup>7</sup>. Zbog nedostatka svih vrsta roba, glavni akcenat je bio na proizvodnji sve do 1960-ih godina (Vukićević, 1995). Težilo se da ona bude što veća i što efikasnija. Tako je proizvodnja u SAD-u za svega nekoliko godina od kraja rata bila na prijeratnom nivou. Rast proizvodnje pratio je razvoj trgovine. Broj šoping centara u SAD-u porastao je sa par njih na nekoliko hiljada do kraja 1960. godine (Welling, 1994). Tri četvrtine porodica u tom periodu je imalo televizor i bili su izloženi oglasima o proizvodima (Welling, 1994). Tada se nije razmišljalo o distribuciji, zato što je sve što je proizvedeno moglo i da se proda. Kupci su išli po proizvode gdje god da su se nalazili. Mnogo više pažnje se poklanjalo prodaji i kupovini nego fizičkoj distribuciji (Ballou, 2007). Iako je značaj distribucije bio poznat iz rata, nije se prenio na privredu. Važilo je mišljenje da će kupac kupiti robu kad god i gdje god samo da je po pravoj cijeni<sup>8</sup>. Taj period (1945 - 1970) naziva se periodom zlatnih godina kapitalizma i ekonomskog buma. U SAD-u je država kontrolisala kretanje robe i ljudi, te se nije mogla razvijati konkurencija u distribuciji i transportu (Hou, 2015). Mali broj firmi je bio uopšte zainteresovan da se bavi distribucijom, pa se ona nije mogla ni unaprjeđivati (Hou, 2015). U takvoj situaciji, proizvođači su kontrolisali

---

<sup>7</sup> [https://www.scmr.com/article/transportation\\_trends\\_the\\_last\\_mile\\_history\\_repeating](https://www.scmr.com/article/transportation_trends_the_last_mile_history_repeating)

<sup>8</sup> [https://www.scmr.com/article/transportation\\_trends\\_the\\_last\\_mile\\_history\\_repeating](https://www.scmr.com/article/transportation_trends_the_last_mile_history_repeating)

distribuciju proizvoda (Tamilia, 2019). Distribucija je bila neplanska i neformulisana. Proizvođači su proizvodili, prodavci su prodavali, a roba je na neki način stizala do prodajnih objekata. Distribuciju su realizovali proizvođači sa svojom flotom i transportne firme, uz sasvim malo kontrole i povezanosti različitih procesa u okviru distribucije (Rushton i ostali, 2006). Smatralo se da proizvodnja ima ulogu da obezbijedi potrošaču korist i od mjesta i od vremena u okviru proizvoda (Timms i Pohlen, 1970; Ballou, 2007), tako da je proizvodnja polagala pravo na distribuciju, a proizvođači su bili glavni akteri u kanalu distribucije (Tamilia, 2019).

Prema Poist (1986), transport je u ovom periodu bio u fokusu. Cilj je bio osmisliti transportni sistem koji će minimizirati troškove linijskoga transporta. Transportni menadžeri su bili ljudi sposobni da čitaju željezničke tarife i u okviru njih traže minimalne cijene. Od 1920. godine razvijaju se i drugi vidovi transporta, pa se stvara ideja o minimizaciji ukupnih troškova transporta. U takvim uslovima, transportni menadžeri razmišljaju ne samo o minimizaciji troškova transporta od jedne do druge tačke, nego i uslugama i cijenama drugih vidova transporta. Brinu se i za utovar, istovar, pretovar, sprječavanje šteta, pakovanje, vaganje itd. (Poist, 1986). Aktivnosti vezane za transport, zalihe i skladištenje su posmatrane kao posebni entiteti i njima se upravljalo odvojeno. Od 1950. godine javlja se ideja o zajedničkom, tj. sistemskom upravljanju svih aktivnosti vezanih za tok proizvoda. Tih godina javlja se i koncept ukupnih troškova (eng. *the total cost concept*) sa idejom da nije dovoljno smanjiti troškove jednog dijela logistike bez uzimanja u obzir troškova drugih dijelova, nego da je potrebno sagledati ukupne troškove koje će prouzrokovati određene odluke. Kao početak primjene koncepta ukupnih troškova uzima se često 1956. godina i studija „The Role of Air Freight in Physical Distribution“ od Lewis i ostali (1986), gdje se ističe da visoki troškovi vazdušnog transporta mogu biti opravdani zbog smanjenja troškova zaliha i skladištenja (Poist, 1986).

### **Epoha 3: 1960 – 1980. godine (proizvođač i marketing kontrolišu distribuciju)**

U 1960-im i 1970-im uspostavlja se koncept fizičke distribucije i logistike i njima počinju da se bave menadžeri (Rushton i ostali, 2006; Ballou, 2007). To su bile ključne godine za razvoj i implementaciju koncepta distribucije u upravljačke strukture mnogih preduzeća (Rushton i ostali, 2006). Smatra se da je 1960. godine

došlo do revolucije u razvoju logistike. Ona je bila rezultat razvoja infrastrukture lanaca snabdijevanja i poimanja distribucije. Shvatilo se da su distribucija i troškovi distribucije zapostavljeni od menadžmenta, uprkos visokim troškovima, i da distribucija pruža više mogućnosti za smanjenje troškova nego proizvodnja. U tu svrhu propagiran je sistemski pristup upravljanju distribucijom. Razvoju sistemskog pristupa doprinijela je primjena koncepta ukupnih troškova 1960-ih godina (Tamilia, 2019). Shvatilo se da se povezivanjem aktivnosti transporta, skladištenja, pakovanja i drugih može efikasnije upravljati njima, a uz to i poboljšati uslugu. Početno, to su shvatili proizvođači (Rushton i ostali, 2006). Period zlatnih godina kapitalizma završava se recesijom početkom 1970-ih. Tih godina uočavaju se visoke rezerve u procesima transporta, skladištenja, pakovanja i ostalim procesima od pripreme proizvodnje do potrošnje proizvoda (Vukićević, 1995). Opseg fizičke distribucije se 1964. godine proširuje na snabdijevanje i počinje da se zove poslovna logistika (Ballou, 2007). Uz pomoć logistike nastoje se smanjiti svi troškovi povezani sa kretanjem materijala i gotovih proizvoda (Vukićević, 1995).

U periodu od 1960. do 1990. godine akcenat prestaje da bude na efikasnoj proizvodnji. Marketing i prodaja postaju glavne funkcije u preduzeću<sup>9</sup> (Segetlija i Lamza-Maronić, 1993). To je era marketinga kompanije (eng. *marketing company ere*)<sup>10</sup>. Tržište se razvija, a proizvodnja se mijenja i prilagođava rezultatima ispitivanja tržišta. Shvatilo se da fizička distribucija može da kreira novu prodaju (Mentzer i ostali, 1989), tako da od 1970. godine kreće era u kojoj se logistika i distribucija koriste za povećanje prodaje (Vasić, 2020). Stewart (1965) ističe da distribucija može dovesti od povećanja prodaje ako obezbijedi da nema nedostatka proizvoda, ako isporuči proizvode u što kraćem roku od trenutka poručivanja, ako smanji distributivne troškove itd. Samim tim i distribucija prelazi u službu prodaje. Ipak proizvođačima su bile važnije zalihe nego fizička distribucija (Hou i ostali, 2017). Imali su visoke zalihe i visoke troškove zaliha (Segetlija i Lamza-Maronić, 1993). Troškovi logistike i distribucije su bili visoki 1960-ih i 70-ih godina (Hou i ostali, 2017; Ballou, 2007). Marketing teoretičari i praktičari su toliko bili

---

<sup>9</sup> <https://www.guruinabottle.com/the-seven-eras-of-marketing/>

<sup>10</sup> <https://www.trianglemarketingclub.com/the-evolution-of-marketing/?gclid=undefined>

zaokupljeni pregovaranjem i promotivnim akcijama marketinga, da su u potpunosti zanemarili funkciju fizičke distribucije (Tamilia, 2019), tako da dolazi do podjele marketinga na dio koji se bavi pregovaranjem i dio koji se bavi fizičkom dostavom. Uzrok takve podjele bio je taj što marketinški analitičari nisu shvatili funkciju distribucije i koncept ukupnih troškova na pravi način (Bartels, 1976). Oni su obnavljanje zaliha u prodajnim objektima vidjeli kao skladišnu funkciju pomoću koje se stvara vremenska korist za korisnika proizvoda. S druge strane, distributeri su smatrali da se skladištenjem i obnavljanjem zaliha stvara korist od dostupnosti proizvoda korisniku.

Prema McKinnon (1989), do 1970. godine većina trgovina u Velikoj Britaniji je primala robu direktno od proizvođača ili iz jednog ili više njihovih distributivnih skladišta (Ferne, 1997). Menadžeri prodajnih objekata su kontrolisali zalihe sami ili uz pomoć predstavnika dobavljača. Porudžbine su se formirale svake sedmice, sa vremenom dostave od sedam dana i zalihama koje su mogle trajati do pet sedmica (Whiteoak, 1999). U takvoj situaciji bilo je teško postići poboljšanja u obrtu zaliha. Zbog nefleksibilnosti distribucije proizvođača, pojavljivali su se nedostaci robe koja je popunjavana iz drugih prodajnih objekata (Ferne, 1997). Lanac snabdijevanja su kontrolisali snabdjevači, a većina distribucije se odvijala direktno od snabdjevača i/ili veletrgovca do prodajnih objekata. Direktne isporuke nisu bile česte i prodavci su imali veoma malo uticaja na distributivni proces (Mabe, 2016). Moć proizvođača opada 1970-ih godina, a raste moć trgovaca koji formiraju svoje distributivne sisteme i grade distributivna skladišta (Rushton i ostali, 2006; Ferne, 1997). Da bi poboljšali raspoloživost proizvoda i stekli veću kontrolu nad lancem snabdijevanja prodavci počinju da centralizuju njihovu distribuciju gradeći velika skladišta za prijem proizvoda snabdjevača. Tu konsoliduju zalihe, prije njihovog popunjavanja u prodajnim objektima. Preko 80% zaliha britanskih trgovaca centralizuje svoju distribuciju (Ferne, 1997), što im omogućava da imaju znatno kraće vrijeme isporuke. Uz to, počinju ugovarati i popuste na količinu sa snabdjevačima na ex-

works uslovima (Ferne, 1997)<sup>11</sup>. Nosioi ovih i drugih inovacija u logistici trgovine tog vremena su bile trgovine hrane i mješovite robe (Ferne, 1997).

#### **Epoha 4: 1980-e (prodavac kontroliše sekundarnu distribuciju)**

Troškovi distribucije se rapidno povećavaju 1980-ih godina (Rushton i ostali, 2006). Povećava se i profesionalizam u distribuciji i traže mjere za smanjenje troškova<sup>12</sup>. Dolazi do velikog napretka u planiranju, optimizaciji i izvršenju logističkih aktivnosti uslijed pojave računara. Opremljeni sa značajno jačim računarskim alatima, prodavci nastavljaju da centralizuju svoje lance snabdijevanja. Povećavaju kontrolu nad sekundarnom distribucijom, tj. od regionalnih distributivnih skladišta do prodajnih objekata, usmjeravanjem zaliha od dobavljača do sopstvenih distributivnih skladišta i konsolidacijom proizvoda od više dobavljača za isporuku u njihove prodajne objekte. To je omogućilo trgovcima da smanje troškove transporta, vrijeme isporuke i povećaju dostupnost proizvoda u prodajnim objektima (Mabe, 2016).

Uspostavljanjem regionalnih distributivnih skladišta maloprodaje, dolazi i do postepenog prenosa zaliha i njihove kontrole iz prodajnih objekata u distributivna skladišta. Nivoi zaliha su značajno smanjeni ovim procesom konsolidacije. Prodajni objekti su i dalje generisali porudžbine na sedmičnoj bazi, ali je bilo nekoliko isporuka svake sedmice i vrijeme isporuke je počelo da se smanjuje. Roba se skladištala najprije u skladištima, gdje se komisionirala i potom otpremala prodajnim objektima. Komisioniranje je vršeno „po prodajnom objektu“ (eng. *pick-by-store*). U ovom periodu došlo je i do razvoja računarskih sistema koji su se koristili u procesu popunjavanja zaliha prodajnih objekata. Sama kontrola zaliha se premješta iz distributivnog skladišta u upravu, sa daljim smanjenjem vremena isporuke. Zalihe u sistemu su dodatno pale, na period između jedne i tri sedmice. Počelo je da se primjenjuje i naručivanje na osnovu podataka dobijenih od elektronskih skenera na blagajni (Whiteoak, 1999).

---

<sup>11</sup> Ex works - skup pravila kojim se reguliše isporuka proizvoda

<sup>12</sup> <https://www.techgistics.net/blog/2016/6/10/the-evolution-of-retail-distribution>

### **Epoha 5: 1990-e (prodavac kontroliše i primarnu distribuciju)**

Distribuciju ranih 1990-ih godina obilježili su centralizacija zaliha sa trendom popune zaliha nalik na JIT (Whiteoak, 1999). Većina trgovaca je pomjerila zalihe iz skladišta prodajnih objekata u distributivna skladišta, smanjila vrijeme dopreme robe, smanjila ukupne zalihe pomjeranjem dalje u lancu snabdijevanja (Ferne, 1997). Proizvodi se počinju dostavljati u prodajne objekte u manjim količinama, preko distributivnih skladišta. Trgovci oblikuju i vuku robne tokove, na bazi prodaje. U početku je to bilo karakteristično za robu kratkog roka trajanja, a poslije i za određene ambijentalne robe. Od dobavljača se zahtijeva vremenski tačna i brza isporuka u skladište trgovca koja bi se uklopila u plan utovara i isporuke robe prodajnim objektima. Za lako kvarljivu robu zalihe postoje samo u skladištu i u tranzitu. Prodavci povećaju kontrolu kroz lanac snabdijevanja na dio distribucije od snabdjevača do distributivnih skladišta i zahtijevaju manje i frekventnije isporuke (Mabe, 2016). Razvijaju se i primjenjuju različite distributivne strategije kao vid konkurentske borbe među trgovcima (Martins i ostali, 2019).

Za ovu fazu karakteristično je i korišćenje kros-doking sistema pretovara i distribucije. Roba se direktno prenosila od dostavnih vozila snabdjevača do rol paleta u ranžirnim zonama skladišta (Whiteoak, 1999). Sve ovo su pratila velika ulaganja u sofisticirane informacione sisteme (Whiteoak, 1999). Dalji tehnološki napredak doveo je prodavce do implementacije internih sistema kao što je ERP (eng. *Enterprise Resource Planning*), VMI (eng. *Vendor-Managed Inventory*) i sl. (Mabe, 1996). Paralelno sa ovim raste svijest među korisnicama o uticaju logistike na troškove proizvoda i spoznaja da se ove promjene ne mogu efikasno ostvariti bez saradnje sa dobavljačima (Whiteoak, 1999). Prelazak na centralizaciju omogućio je proizvođačima da se koncentrišu na istraživanje, razvoj proizvoda i proizvodnju, pri čemu je distributivna funkcija prepuštena prodavcima ili trećim stranama. Smanjenje troškova je postignuto kroz modernizovani logistički lanac (Ferne, 1997).

Početkom 1990-ih godina javlja se i SCM koncept (eng. *Supply Chain Management*) čiji su se začeci javili još u QR, TQM (eng. *Total Quality Management*) i JIT metodi s kraja 1970-ih i tokom 1980-ih godina (Takai, 2009; Ross, 1998). Pojavom SCM

povećava se povezanost proizvođača i prodavaca u kreiranju efektivnog i efikasnog toka proizvoda od proizvođača do potrošača, uključujući i treće strane u taj proces (Rushton i ostali, 2006). Razvojem tehnologije, SCM kanal se odvaja od prodajnog kanala (Tamilia, 2019). Distribucija se pozicionira u okviru lanca snabdijevanja, a udaljava od prodaje. Ona postaje krajnja karika SCM-a i ključ uspjeha preduzeća 1990-ih godina (Ross, 1998; Tamilia, 2019). Fizička distribucija se odvojila od marketinga kao posebna poslovna funkcija, s obzirom na to da u okviru marketinga nije bila prepoznata važnost fizičkog toka proizvoda (Ballou, 2007).

### **Epoha 6: Distribucija danas – racionalizacija u distribuciji**

Još krajem 1990-ih Whiteoak (1999) je predvidio da će trgovci imati povjerenja u snabdjevače toliko da će i ambijentalnu robu naručivati kao i lako kvarljivu, tj. bez skladištenja i kroz kros-doking. Shodno tome, da će to dovesti do svakodnevnog naručivanja i dostavljanje robe u roku od 24 h uz korišćenja rol paleta. Predvidio je i da će se od distributera tražiti da budu u mogućnosti obraditi porudžbinu i vršiti isporuku sedam dana u nedjelji. Potom, da će biti pritisak da se isporuče tačne količine u tačno vrijeme, što će uticati na iskorišćenje tovarno-manipulativnih jedinica i vozila. Prema toj prognozi, trgovanje bez papira će postati glavni zahtjev. Strategije u fizičkoj logistici pratiće trendove racionalizacije, konsolidacije i centralizacije. Biće potrebno da se investira u automatizaciju u skladištima i informacione sisteme.

Može se reći da su se predviđanja iz 1990-ih obistinila i da faza započeta 1990-ih traje i danas. Prodajni objekti su ostali glavni pokretač i dirigent robinih tokova i danas. Distribucija bazirana na brzom odgovoru postala je praksa i cilj mnogih trgovina danas. Zalihe se nastoje popunjavati po principu „popuni kada se potroši“. Cilj je smanjiti zalihe što je više moguće i povećati kvalitet usluge kupcima. Međutim, to uzrokuje zahtjeve za čestim i brzim isporukama manjih količina, što dovodi do povećanja troškova distribucije (McDonald i ostali, 2003). Jedna od osnovnih mjera kvaliteta logističke usluge u distribuciji je postalo vrijeme isporuke.

Uloga distribucije u modelu upravljanja lancem snabdijevanja se značajno proširila od konvencionalnog bavljenja isključivo transportom i skladištenjem (McDonald i

ostali, 2003). Lanac snabdijevanja, logistika i distribucija nastoje da tokove koje inicira današnji prodavac, učine što efikasnijim. Da bi to postigli potreban je stalni rad na racionalizaciji u distribuciji. Distribucija po principu brzog odgovora je put poboljšanja, ali pod uslovom da je zasnovan na istinskom razumijevanju motivacije i operacija pošiljaoca i primaoca (Whiteoak, 1999). Jedna od ključnih stvari za racionalizaciju je primjena metoda OR (Takai, 2009) Potrebno je iskoristiti sve mogućnosti racionalizacije kako bi se dobila što bolja usluga uz što manje troškove (Vukićević, 1995). Racionalizacija je suština distribucije i logistike još od gradnje prvih distributivnih skladišta 1970-ih godina. Pitanje je samo u kojoj mjeri je mogla da se sprovede zbog različitih prioriteta njenih realizatora u različitom vremenu. Danas je takođe potrebno sprovoditi racionalizaciju, prije svega zbog nedostatka energije i zahtjeva za očuvanjem okoline. Posebno je jak pritisak da se racionalizuje transport koji je nosilac više od 70% troškova povezanih sa distribucijom (Takai, 2009). Racionalizacija se ne zahtijeva samo od logistike nego i od drugih privrednih sektora, društva i pojedinca, tj. postala je svakodnevica današnjice. Od 2022. godine i inflacije od preko 10% u Evropi i SAD-u, krize sa gorivom i energijom nastale uslijed rata u Ukrajini, kompanije i društvo nastoje ili su primorani mjerama vlada da racionalnije koriste energiju i štede.

Racionalizacija u polju distribucije proizvoda se desila poslije Drugog svjetskog rata kao rezultat istraživanja u oblasti ekonomije i tehnike. Takođe, dolazi do pokretanja kurseva i istraživanja u oblasti fizičke distribucije. Zajedno sa razvojem tehnologije i informatike, to je doprinijelo smanjenju troškova distribucije. Pojava informacionih sistema uzrokovala je da se fizička distribucija preoblikuje u logistiku (Takai, 2009). Kao primjer racionalizacije u distribuciji i primjene principa logistike, Takai (2009) navodi smanjenje broja isporuka trgovinama u Japanu. Kada je 1974. godine otvorena prva konvencionalna trgovina u Japanu broj dostava u danu je bio 70, 1987. godine je bio 15, a 2005. godine svega 9. Ključni zadatak racionalizacije i osnova uspješne distribucije danas je upravljanje potražnjom (McDonald i ostali, 2003). U tom pravcu racionalizacija se predlaže i u ovoj disertaciji. Svakako, uz podršku OR.



## **2.4. Operaciona istraživanja i logistika**

### **OR uopšteno**

Prema osnivačima, OR su naučna metoda koja obezbeđuje kvantitativnu osnovu za donošenje odluka. Od početka njihove primjene koriste se u svrhu rješavanja realnih problema. To su problemi smanjenja troškova i povećanja efikasnosti različitih aktivnosti, procesa i operacija, kako onih koji tek treba da se realizuju, tako i onih čija realizacija je u toku (Hrablik i ostali, 2015). U početku je to bilo vezano za vojsku, a nakon Drugog svjetskog rata počinje se vezivati i za privredu. Tako se danas primjenjuje u proizvodnji, trgovini, distribuciji, transportu i mnogim drugim privrednim sistemima.

OR se može smatrati metodologijom prema kojoj se privredne i društvene aktivnosti koje proizvode robe i usluge posmatraju kao sistemi koji daju rezultate kada dobiju ulaze. Takvi sistemi se opisuju matematičkim modelima i problemi vezani za njihovo funkcionisanje se analiziraju matematičkim alatima s ciljem dolaska do optimalnih rješenja. OR su i disciplina koja se bavi primjenom naprednih analitičkih metoda koje pomažu donošenju boljih odluka. Termini upravljačka nauka i analitika se ponekad koriste kao sinonimi za OR (Hrablik i ostali, 2015). OR se mogu definisati kao resurs za pronalaženje optimalnog rješenja ocjenjujući različite faktore (Pečený i ostali, 2020). U potrazi za optimalnim rješenjem u OR se koristi širok spektar metoda i tehnika, kao što su simulacija, matematička optimizacija i dr. (Shukla i ostali, 2017). Cilj OR je obezbijediti najbolje funkcionisanje cijelog sistema (Pečený i ostali, 2020).

### **OR u logistici**

Logistika se smatra sistematičnom disciplinom koja se bavi sveobuhvatnom optimizacijom, koordinacijom i sinhronizacijom svih aktivnosti u lancu snabdijevanja vezanih za realizaciju robnih tokova. Ona se ne odnosi samo na sistemsko razmišljanje u organizaciji nego i na nove oblike organizovanja i upravljanja u kojima se integrišu globalni i individualni pogled na radne procese s ciljem optimizacije svakog od njih. Danas je to možda još veći izazov, jer se od logistike zahtijeva da bude fleksibilna. Logističko organizovanje i upravljanje

zahtijeva donošenje odluka kojim se optimizuju procesi, a koga nema bez upotrebe metoda OR. Upravljanje logistikom je integrativni proces koji nastoji da optimizuje protok materijala i zaliha kroz organizaciju i njene operacije do kupca (McDonald i ostali, 2003).

Predmet optimizacije u logistici je iskorišćenje transportnih sredstava, tehnologije i ljudskih resursa (Pečený i ostali, 2020). Cilj je obezbijediti što manje troškove, što bolji kvalitet usluge ili oboje. Logistika kao integralna disciplina nema svoju metodologiju, te koristi metode i principe tehničkih i ekonomskih nauka (Hrablik i ostali, 2015). Najčešće metode OR koje se primjenjuju u logistici su matematičke metode operacione analize, teorija grafova i mreža, simulacione metode i metode predviđanja. Među metodama operacione analize najviše su u upotrebi matematičko programiranje, masovno opsluživanje, metode upravljanja zalihama. Ove metode mogu da budu značajne za planiranje i upravljanje logističkim procesima (Hrablik i ostali, 2015). Najpoznatija je svakako metoda linearnog programiranja koja se koristi za različite vrste raspoređivanja ograničenih resursa na aktivnosti.

### **OR u distribuciji**

Metode OR se u distribuciji generalno primjenjuju na svim nivoima planiranja i upravljanja. Najčešće se koriste na taktičkom i operativnom nivou, i to za raspoređivanje različitih vrsta ograničenih resursa. Tu se mogu svrstati problemi raspoređivanja radne snage, transportnih i pretovarnih sredstava, raspoređivanja robe u prostoru itd. Većina tih problema vezana je za transportni i skladišni proces. Pored navedenih, za distribuciju su važni i proces realizacije porudžbine i rješenja vezana za dinamiku isporuke, obrasce dostave, minimalnu količinu isporuke itd.

### **3. PREGLED LITERATURE**

Optimizacija logističkih procesa veže se za donošenje odluka kojim se optimizuje upotreba resursa koji se koriste za njihovu realizaciju. To su na prvom mjestu ljudi, sredstva, oprema i prostor. Pored njih u resurse se ubrajaju i energija, znanje, informacije itd. Odluke kojim se optimizuju logistički procesi donose se na strateškom, taktičkom i operativnom nivou. Njihovo donošenje zahtijeva upotrebu metoda poput matematičkog programiranja, simulacije, teorije grafova i sl. Uglavnom se implementiraju kroz programe za podršku odlučivanju. S obzirom da kompleksnost procesa odlučivanja, pregled literature u prvom dijelu je posvećen odlučivanju u logistici. Naredna tri dijela ovog poglavlja su posvećena pregledu literature koja se bavi rješenjima u procesu realizacije porudžbine, rutiranjem vozila i raspoređivanjem radnika u skladištu.

#### **3.1. Odlučivanje kao postupak u logistici**

##### **Odlučivanje**

U ovom radu razmatra se odlučivanje koje se odnosi na planiranje i upravljanje logističkim procesima. Vrlo je teško razgraničiti upravljanje i planiranje (Vidović, 2007). Prema Vidović (2007) planiranjem se definišu ciljevi i metode dostizanja nekog stanja, a upravljanjem se realizuju aktivnosti koje treba da dovedu do željenog stanja. Upravljanje se bazira na informacijama o trenutnom sistemu, ciljevima koji se žele ostvariti i algoritmima koji treba da približe trenutno stanje željenom. Posljednje dvije aktivnosti su iz sfere upravljanja, tako da se može reći da se upravljanje oslanja na planiranje. Riopel i ostali (2005) definišu 48 odluka koje se donose u logistici i uspostavaljaju veze među njima.

##### **Nivoi odlučivanja**

Opšte poznato je da postoje strateški, taktički i operativni nivo odlučivanja, ali postavlja se pitanje kako podijeliti nivoe. Odluke se mogu razvrstati na osnovu jednog ili više kriterijuma. To su kriterijumi poput vremenskog perioda na koji se donose, resursa potrebnih za implementaciju, menadžera koji su odgovorni za njihovo donošenje i sl. (Riopel i ostali, 2005 iz Ballou, 2007, Seifi, 2011). Najčešći

način je u odnosu na vrijeme na koje se donose. Odluke koje se donose na duže vrijeme su strateške, one koje se donose na srednji vremenski period su taktičke, a na kratki operativne. Naravno, ove vremenske odrednice mogu da variraju. Za duži vremenski period se uzima od pola godine do nekoliko godina (najčešće jedna ili više godina), za srednji od sedmice do godine (najčešće mjesečno i kvartalno), a za operativni od trenutnog do jedne sedmice (najčešće sedmično i dnevno) (Seifi, 2011). Drugi čest način podjele je u odnosu na to šta se planira, tj. koliko resursa je potrebno za implementaciju. Ako je to npr. gradnja skladišta, to se smatra strateškom odlukom. Obično u praksi su ove odluke izuzetno povezane i donose se kontinualno uzimajući u obzir sve kriterijume (Riopel i ostali, 2005).

Vrlo je nezahvalno, prema bilo kojem kriterijumu, neku odluku svrstati isključivo u jedan nivo odlučivanja. Opseg i struktura logističkog planiranja se može razlikovati od posla do posla. Npr. odluka o lokaciji objekata i odluka o rutama vozila mogu da budu i strateške i taktičke i operativne. Iako se čini da bi prva trebalo da bude bez dileme strateška, a druga operativna, postoje slučajevi u kojima to nije tako. Npr. gradnja ili iznajmljivanje skladišta, iako značajna investicija, poslije nekoliko godina može da se mijenja i da se sa te strane posmatra kao taktička odluka. Odluka o lociranju novih zaliha u mreži može da se mijenja na dnevnom nivou, u skladu sa promjenama u potražnji. S druge strane, rute u distribuciji mogu da se određuju dan za dan ili čak mijenjaju u realnom vremenu i tada su posljedica operativnog upravljanja. Međutim, rute mogu i da se definišu na godišnjem novu ili sezonski, na par mjeseci za neke ustaljene vrste potražnje (Rushton i ostali, 2006). Izbor vida transporta nekome može biti strateška odluka na globalnom nivou kako dostavljati pošiljke, a nekome samo taktička ili operativna odluka za neku dostavu koja se obavlja (Rushton i ostali, 2006).

### **Strateško odlučivanje**

Strateške odluke su odluke o poslovnim ciljevima, misiji, marketing strategijama i korisničkim uslugama. To su dugoročne odluke koje se donose za jednu ili više godina. Donose ih izvršni administratori, menadžeri i akcionari. Strateški plan obezbjeđuje smjernice i kontrolu taktičkog plana i dnevnih operacija. Neki od alata koji se koriste pri strateškom odlučivanju su benčmarking, optimizaciono

programiranje, simulacija, predviđanje itd. (Seifi, 2011). U logistici strateške odluke uključuju projektovanje logističkih sistema, definisanje radnih strategija, nabavku skupih resursa i sl. To su odluke koje se tiču lokacije, broja i kapaciteta skladišta, lejauta skladišta, veličine flote itd. (Ghiani i ostali, 2004 ). Rushton i ostali (2006) među te odluke ubrajaju i odluke o izboru kanala distribucije i tačaka snabdijevanja, iznajmljivanju ili posjedovanju resursa, nivou zaliha, direktnim isporukama itd. U logistici trgovine, strateške odluke se odnose na planiranje nabavke i dizajn distributivne mreže, konstituišući tako lanac snabdijevanja (Hubner i ostali, 2013). Cilj strateškog odlučivanja je dizajnirati ili rekonfigurirati logističku mrežu tako da se minimiziraju godišnji troškovi sistema, uključujući troškove nabavke, držanja zaliha, postrojenja i transporta (Simchi-Levi i ostali, 2004). Donose se obično na 3 do 5 godina. Mogu se svrstati na različite načine, zavisno od posla. Riopel i ostali (2005) ih svrstavaju u odluke o korisničkom servisu, dizajnu logističke mreže i autorsovanju funkcija. Korisnički servis je prva i najvažnija strateška odluka u logistici, jer predstavlja njen izlaz. Glavno pitanje o kojem se tu odlučuje je odnos troškova i kvaliteta usluge, tj. koji su ciljevi u pružanju usluge. Potom, koji su najbitniji elementi korisničkog servisa i šta će se i kako mjeriti (Riopel i ostali, 2005). Dizajn logističke mreže treba da osigura tok materijala i informacija. Tu se odlučuje o lokacijama i broju objekata za robni tok, informacionom sistemu itd. Treća grupa odluka se odnosi na pitanje da li i koje funkcije prepustiti spoljnim izvršiocima, a koje obavljati unutar sopstvene organizacije (Seifi, 2011).

### **Taktičko odlučivanje**

Taktičko odlučivanje se definiše kao proces razvoja strategija tokom više vremenskih perioda kojim se minimiziraju troškovi transporta, zaliha i skladištenja, a maksimizira zarada. Da bi se to ostvarilo potrebno je efikasno alocirati resurse, poput ljudi, opreme, prostra itd. To može biti izuzetno teško, ako se firma suočava sa tražnjom koja ima izražen sezonski karakter, promocijama i velikim variranjima u predviđanjima tražnje. Važna funkcija taktičkog planiranja je i analiziranje planova potražnje i iskorišćenja resursa s ciljem maksimizacije profita. Taktičke odluke se donose mjesečno, kvartalno ili čak godišnje (Seifi, 2011). Ove odluke donosi najčešće srednji menadžment ili logistički inženjeri (Seifi, 2011). To su

odluke koje se tiču dodjeljivanja skladišnog prostora proizvodima, izbora strategija komisioniranja, izbora vida transporta i strategija konsolidacije (Ghiani i ostali, 2004). U logistici trgovine radi se alokacija proizvoda u logističkoj mreži, njihova segmentacija prema obrascu dostave i ili drugim logističkim parametrima. Definiše se način isporuke korisnicima (direktno, preko kros-dokinga, preko jednog ili više distributivnih skladišta), način isporuke od dobavljača, biraju se prevoznici i određuju nivoi zaliha proizvoda (Hubner i ostali, 2013). Planiraju se radnici i ostali skladišni kapaciteti na bazi dugoročnog plana i sezonskog očekivanog posla. U pogledu distribucije, optimizuje se frekvencija dostave u skladu sa rokom trajanja proizvoda, procesima u skladištu, transportom, prodajom itd. U okviru prodajnog sektora planira se potreban broj radnika i logističke operacije poput popunjavanja zaliha, a na bazi frekvencije dostave i frekvencije dolazaka klijenta itd. (Hubner i ostali, 2013).

### **Operativno odlučivanje**

Operativne odluke se donose u realnom vremenu, dnevno ili sedmično. Ova vrsta odluka se bazira na detaljnim podacima i obično je donose supervizori (Seifi, 2011). Operativno odlučivanje u distribuciji podrazumijeva širok spektar poslova. Među njima su raspoređivanje radnika na zadatke u skladištu, raspoređivanje utovara i istovara, rutiranje dostavnih vozila itd. (Chopra i Meindl, 2013). U distributivnom skladištu prave se nalozi za komisioniranje, određuje se redoslijed njihovog izvršavanja, rutiraju komisioneri itd. U okviru procesa realizacije porudžbine definišu se količine i vrijeme isporuke, uvažavajući kapacitete dostavnih vozila, prijemne kapacitete korisnika distribucije i usvojenu politiku upravljanja zalihama. U prodajnom objektu se vrši raspoređivanje radnika na zadatke, planira popunjavanje polica i ostalih poslova neophodnih za normalno funkcionisanje prodajnog objekta u toku dana (Hubner i ostali, 2013).

### **Međuzavisnost odluka u planiranju logističkih procesa u distribuciji**

Planiranje potražnje i snabdijevanja je osnova za mnoge odluke u lancu snabdijevanja. Ako planovi potražnje i snabdijevanja nisu usklađeni, dolazi do visokih logističkih troškova. Ipak, njihovo planiranje nije jednostavno, mora se voditi

računa o mnogo detalja i apstrahovati realnost. Prodavci imaju tri taktike za uparivanje snabdijevanja sa potražnjom. To su tačno predviđanje, fleksibilnost u snabdijevanju i gomilanje zaliha. Optimalno planiranje kompletnog lanca snabdijevanja nije moguće. Zato je neophodna hijerarhijska struktura, koja je kompromis između praktičnosti i objedinjenog parcijalnog planiranja (Hubner i ostali, 2013). Fleischmann (2002) je razvio opšti okvir za takvo planiranje lanca snabdijevanja. Taj okvir je matrica vodoravno podijeljena na nabavku, skladištenje, distribuciju i prodaju. Vertikalno je podijeljena na dugoročno, srednjoročno i kratkoročno planiranje. Polja matrice su moduli koji su vertikalno i horizontalno povezani tokom informacija. Hubner i ostali (2013) su taj okvir prilagodili lancu snabdijevanja u trgovini, u svrhu podrške donošenju odluka u lancu snabdijevanja u trgovini koje se tiču planiranja operacija na sva tri strateška nivoa. Taj okvir su izgradili na osnovu pregleda relevantne literature i diskusije sa relevantnim stručnjacima iz 28 velikih maloprodajnih trgovačkih lanaca. Okvir pokazuje glavne međuzavisnosti između odluka kojima se planiraju operacije u lancu snabdijevanja maloprodajnih objekata, hijerarhijski i redno.

### **3.2. Proces realizacije porudžbine**

Optimalnost procesa realizacije porudžbine zavisi od postavke i kontrole toka proizvoda kroz mrežu. Postavka toka proizvoda se definiše načinom distribucije, brojem i rasporedom distributivnih skladišta, alokacijom proizvoda u mreži i njihovom segmentacijom. Sam tok proizvoda kontroliše se izborom najmanjeg pakovanja, obrasca dostave, vremena isporuke, vremena dolaska, načina pakovanja, tovarno-manipulativne jedinice itd. (Kuhn i Sternbeck, 2013). Ipak, na optimalnost procesa realizacije porudžbine najviše utiče obrazac dostave (Sternbeck i Kunh, 2014). Martins i ostali (2018) su identifikovali tri glavna načina distribucije kada se roba isporučuje prodajnom objektu. To su direktna isporuka od snabdjevača, direktna isporuka iz distributivnog skladišta, isporuka preko kros-dokinga i isporuka po ugledu na distribuciju mlijeka sa povratnom ambalažom. Kao glavna ograničenja pri izboru načina distribucije navode dizajn distributivne mreže, povezanost distributivnih skladišta, povezanost proizvoda i prodajnih objekata, izabrani vid transporta i obrasce dostave.

Kuhn i Sternbeck (2013) su istraživali dizajn logističke mreže na uzorku od 28 maloprodajnih lanaca iz Evrope. Rezultati ukazuju da je isporuka preko distributivnih skladišta dominantna u odnosu na direktnu isporuku i isporuku preko kros-dokinga. Preko 82% dostavljene količine robe u maloprodajne objekte se dostavi na prvi način. U distributivnom skladištu se drže zalihe i vrši komisioniranje. Distribucija se radi preko centralnog distributivnog skladišta, pored kojeg u većini slučajeva postoje i regionalna distributivna skladišta i konsolidacioni objekti. U većini slučajeva konsolidaciona tačka je i regionalno distributivno skladište. Regionalna distributivna skladišta takođe primaju robu i direktno od snabdjevača. Ukoliko postoji centralno distributivno skladište i regionalno, donose se odluke koje proizvode gdje držati. Najčešći faktori koji se uzimaju obzir u tom slučaju su redom obrt robe, zahtjevi da roba bude svježija, odnos vrijednosti i zapremine robe, greške u prognozi prodaje i uslovi isporuke dogovoreni sa dobavljačem. Ako roba ima veći obrt ili se zahtijeva da bude svježija, bolje je da se isporučuje iz regionalnih distributivnih skladišta. Ukoliko roba ima visok odnos vrijednosti i zapremine i/ili veliku šansu za grešku pri prognozi prodaje, bolje je da se drži u centralnom skladištu. Kombinovanjem fiksnih postavki toka sa upravljačkim odlukama formiraju se segmenti lanca snabdijevanja prodajnih objekata.

Efikasnost distributivnog skladišta, transportnog sektora i prodajnog objekta direktno zavisi od kvaliteta upravljanja tokovima proizvoda (Kuhn i Sternbeck, 2013). Polovina operativnih troškova pri distribuciji se generiše u prodajnim objektima, a okvirno po četvrtina u distributivnom skladištu i transportu (Kuhn i Sternbeck, 2013). Posmatrajući navedena tri podsistema, Kuhn i Sternbeck (2013) su ispitivali menadžere pomenutih maloprodajnih lanaca, koje odluke u okviru taktičkog planiranja utiču na najmanje dva od ova tri podsistema. Odgovore ispitanika sumirali su u odluke o pakovanju jedinice isporuke, obrascu dostave, vremenu isporuke, vremenu u kome vrši dostava, vremenskim prozorima i slaganju proizvoda na tovarno-manipulativne jedinice u skladu sa lejautom prodajnog objekta. Izveli su i sledeće zaključke. Veličina najmanjeg pakovanja koje prodajni objekat može naručiti najviše utiče na zalihe u prodajnom objektu i mogućnost direktnog popunjavanja polica. Najčešća politika upravljanja zalihama u trgovini je



periodična provjera zaliha i naručivanje određenog broja pakovanja proizvoda. Ukoliko su pakovanja prevelika, može doći do prevelikih zaliha i nemogućnosti direktnog popunjavanja polica. U suprotnom, ako su previše mala, onda zahtijevaju veći broj punjenja polica. U pogledu transporta, veličina pakovanja utiče na iskorišćenje tovarno-manipulativne jedinice i popunjenost tovarnog prostora transportne jedinice. Ukoliko je minimalna jedinica poručivanja za određeni proizvod isuviše malo pakovanje, to dovodi do većeg broja manipulacija sa tim proizvodom u skladištu. Optimiziranjem minimalne količine koja može da se poruči, može se poboljšati efikasnost u skladištu. Vrijeme isporuke kod 43% ispitanih kompanija je između 24 i 36 sati, a kod 36% je od 12 do 24 sata. Ostatak kompanija vrši isporuku u roku od 36 do 48 sati i od 48 do 72 sata. U slučaju isporuke mliječnih proizvoda, rok isporuke je 24 sata i manje od toga kod 90% ispitanih kompanija. Za prodajni objekat je korisno da ima kratko vrijeme isporuke, jer mu donosi veću mogućnost prilagođavanja kratkoročnim promjenama u potražnji za proizvodima i smanjenju zaliha. Za transportni sektor je bolje da vrijeme isporuke bude duže, jer se tako povećava mogućnost za sabiranje isporuka i bolje upravljanje sa transportnim resursima. Za skladište je takođe bolje kada je duže vrijeme isporuke, jer se povećava mogućnost za bolje iskorišćenje resursa za manipulisanje robom u skladištu. U pogledu prilagođavanja slaganja pakovanja na tovarno-manipulativne jedinice, 85% kompanija to radi uprkos negativnim efektima na proces komisioniranja. Pored toga, izbor rol palete kao tovarno-manipulativne jedinice može da poskupi transport zbog manje mogućnosti prevoza robe pri povratu.

### **Obrazac dostave**

Jedno od najvažnijih pitanja u srednjoročnom planiranju snabdijevanja prodajnih objekata preko distributivnih skladišta je kako odrediti obrazac dostave. Obrazac dostave definiše za svaki segment proizvoda, broj dostava i tačno vrijeme kada se vrši dostava (Sternbeck i Kuhn, 2014). Obrazac dostave bi se mogao određivati za svaki prodajni objekat posebno, bez obzira na druge objekte, ako se ne bi uzimali u obzir kapaciteti učesnika činioca u lancu distribucije i uštede koje se mogu ostvariti spajanjem pošiljki u transportu (Holzapfel i ostali, 2016). Distributivno skladište, transportni sistem i prodajni objekat imaju ograničene kapacitete u pogledu prijema

i skladištenja robe. Zbog toga je ograničen broj potencijalnih obrazaca dostave (Holzapfel i ostali, 2016). Prema većini studija, obrazac dostave je kombinacija dana u sedmici u kojim se vrši dostava iz distributivnog skladišta u određeni prodajni objekat (Holzapfel i ostali, 2016). Ona se obično ponavlja iz sedmice u sedmicu, obično u periodu od pola godine (Alajkovic i ostali, 2022). Većina objekata prilagođava obrazac dostave tokom vremena, dok manji dio to radi u tačno definisanim datumima (Kuhn i Sternbeck, 2013). Ukoliko je neka sedmica specifična, npr. sadrži državni praznik, onda se standardna sedmica koristi kao osnova za kreiranje specifične (Alajkovic i ostali, 2022).

Primjena obrazaca dostave koji se ponavljaju ima brojne prednosti. U prodajnom objektu se može planirati popuna polica i potrebna radna snaga. U transportu se mogu primjenjivati ciklične rute. U skladištu se može praviti plan smjena i raspored radnika. Ponavljanje obrasca dostave, omogućava i da se nivo ponovnog naručivanja može redovno regulisati. Većina prodajnih lanaca primjenjuje politiku periodične provjere zaliha, a porudžbina se formira kada nivo zaliha padne ispod određenog nivoa (Cachon, 2001; van Donselaar i ostali, 2010).

Obrazac dostave se obično formira na bazi obima prodaje određenog proizvoda i veličine prodajnog objekta (Kuhn i Sternbeck, 2013). Veličina prodajnog objekta ogleda se kroz veličinu njegovog skladišta i prijemni kapacitet. Prodavci koriste različite koncepte za određivanje frekvencija dostave u prodajne objekte. Prema istraživanju Kuhn i Sternbeck (2013), 7% prodavaca dostavlja sav asortiman proizvoda svaki dan, 4% omogućava različite frekvencije za prodajne objekte ali istu frekvenciju za sav asortiman. Kod 18% prodavaca se pravi razlika među grupama proizvoda i za svaku grupu definiše frekvencija dostave koja se primjenjuje na sve objekte. Kod 71% njih postoje različite frekvencije po objektima i po grupama proizvoda, što je svakako najkompleksnije za realizaciju. Grupisanje proizvoda može da se izvrši prema roku trajanja proizvoda, zahtjevima za njegovom svježinom, prosječnoj količini koja se prodaje i kvalitetu prognoze prodaje. Kompanija može da grupiše proizvode i prema obimu prodaje ili prema zapremini (Sternbeck i Kuhn, 2014). Obrasci dostave mogu da se formiraju i na osnovu iskustva. U skladu sa obrascem dostave, prodajni objekti odlučuju koje će proizvode poručiti i u kojoj

količini pregledom svojih zaliha. Alternativa ovom pristupu je definisanje obrazaca uz pomoć nekog modela zaliha. Međutim, tada se treba suočiti sa raznovrsnošću proizvoda, što značajno usložnjava proces. Ako se zalihama upravlja iz distributivnog skladišta onda se govori o VMI i tada se obrazac dostave određuje u okviru problema rutiranja zaliha (Sternbeck i Khun, 2014).

Izabrani obrazac dostave ima veliki uticaj na efikasnost distributivnog skladišta, transporta i logistike u prodajnom objektu. S obzirom da se naručivanje vrši prema postavljenom obrascu dostave, od njega zavise količine proizvoda koje se distribuiraju tokom sedmice. Stoga, izbor obrasca dostave služi i da se izbalansiraju zahtjevi prema distributivnom skladištu, transportu i prodajnom objektu u pogledu angažovanja resursa u određenom periodu. Obrazac dostave utiče na dimenzionisanje kapaciteta komisioniranja u skladištu, transportnog kapaciteta i potrebnog broja radnika u prodajnom objektu (Sternbeck i Khun, 2014). Postoje troškovi koji rastu kako raste frekvencija dostave i troškovi koji opadaju kako ona raste (Holzapfeli ostali, 2016). Prema Sternbeck i Kuhn (2014), troškovi komisioniranja, pakovanja, transporta i popunjavanja polica rastu kako raste frekvencija dostave. Troškovi držanja zaliha u prodajnom objektu opadaju kako raste frekvencija dostave. Pri tom, troškovi ne zavise samo od frekvencije nego i od dana u kojima se vrši dostava.

U distributivnom skladištu performanse komisioniranja zavise od veličine porudžbine, jer priprema i realizacija komisioniranja zavisi od broja izuzimanja sa zaliha (Sternbeck i Khun, 2014). Efikasnost komisioniranja u skladištu zavisi od veličine porudžbine i njene strukture, koji direktno zavise od izabranog obrasca. Što je veća gustina pozicija u komisionoj listi i što je veći broj preuzimanja sa jedne pozicije, to je veća produktivnost. Takođe, i potreban kapacitet skladišta zavisi od obrazaca dostave, ali ne u mjeri kao kapacitet transporta i prodajnog objekta. Stoga, u skladištu je isto važna ravnomjernost opterećenja (Kuhn i Sternbeck, 2013). Broj isporuka utiče i na efikasnost transporta. Transport je efikasan kada je maksimizirana iskorišćenost vozila i smanjen broj skupih ulazaka u grad (Kuhn i Sternbeck, 2013). Da bi se do efikasnosti došlo potrebno je da se količina rasporedi ravnomjerno tokom sedmice i da broj posjeta bude racionalizovan. U slučaju

transporta važno je da se raspored napravi tako da klijenti koji su blizu imaju isti obrazac dostave (Alajkovic i ostali, 2022). Obrazac dostave prodajnim objektima utiče na broj popunjavanja polica, raspored radnika u objektu itd. Menadžerima prodajnih objekata je cilj da se police popunjavaju odmah sa tovarno-manipulativnih jedinica, kako bi bilo što manje rukovanja sa robom. To je moguće ako su isporuke manje i učestalije, pa se ne moraju smještati u skladište prodajnog objekta (Sternbeck i Khun, 2014).

Planiranje dostave u literaturi se najčešće obrađuje kroz problem rutiranja zaliha, koji podrazumijeva zajedničko rješavanje problema upravljanja zalihama i određivanja ruta (Holzapfel i ostali, 2016). Srodnost sa problemom određivanja obrazaca dostave leži u tome što se i kod problema rutiranja sa zalihama rješenje traži u balansu između visokih troškova transporta, čestih isporuka i visokih troškova zaliha uslijed rjeđih i većih isporuka. Glavni nedostatak kod primjene modela za rutiranje sa zalihama za određivanje obrasca dostave je zanemarivanje procesa i troškova u prodajnom objektu (Holzapfel i ostali, 2016). Određivanje obrasca dostave samo pomoću modela zaliha nije dobro, jer ne uzima u obzir troškove rukovanja robom u prodajnom objektu (Van Zelst i ostali, 2009). Prema istraživanju koje su Van Zelst i ostali (2009) sproveli, ti troškovi su znatno veći od troškova držanja zaliha u slučaju proizvoda koji nisu lako kvarljivi. S druge strane, oni smatraju da određivanje obrasca dostave preko periodičnog VRP-a takođe nije dovoljno dobro, jer ne uzima u obzir troškove u distributivnom skladištu i u prodajnom objektu. Zbog toga, Sternbeck i Khun (2014) i Holzapfel i ostali (2016) koriste integrativni pristup za određivanje obrazaca dostave. Oni daju modele i metode za njihovo određivanje koji uzimaju u obzir troškove u distributivnom skladištu, transportu i prodajnom objektu.

### **Sternbeckov i Kuhnov pristup određivanju obrasca dostave**

Sternbeck i Kuhn (2014) su razvili integrativni uopšteni pristup za određivanje obrazaca dostave koji uključuje procese u distributivnim skladištima, transportu i prodajnim objektima. Njegov rezultat je plan dostave. Pristup je razvijen na bazi podataka o distribuciji jednog od najvećih evropskih prodajnih lanaca, a za distribuciju od distributivnog skladišta do prodajnih objekata. Za tu vrstu dostave

oni razlikuju šemu dostave koja se odnosi na dostavu samo jednog segmenta proizvoda, obrazac dostave koji se odnosi na dostavu svih segmenta proizvoda za jedan objekat i plan dostave koji se odnosi na cijelu distributivnu kompaniju. Pretpostavili su da su za svaki prodajni objekat proizvodi isto segmentirani. Na osnovu šema isporuke svakog segmenta proizvoda definisali su obrazac dostave za sve segmente za jedan prodajni objekat. Obrascem dostave se praktično udružuju sve šeme isporuke. Njime se definiše i dinamika dostave i konkretni dani u kojima se roba dostavlja. Cilj im je dodijeliti obrasce dostave za svaki prodajni objekat iz skupa mogućih obrazaca, tako da troškovi dostave budu minimalni.

Model koji je predložen ovim pristupom je model mješovitog linearnog programiranja. Funkcija cilja se sastoji od troškova u distributivnom skladištu, troškova transporta i troškova u prodajnom objektu. Ukupni troškovi predstavljaju troškove jednog ciklusa, jednog objekta i jednog obrasca i računaju se prije rješavanja modela za svaki obrazac i svaki prodajni objekat. Da bi se izračunali potrebno je prvo proračunati količinu koja se dostavlja za svaki prodajni objekat, svaki obrazac dostave, svaki segment proizvoda i svaki dan. Za količinu dostave pretpostavljeno je da se računa pomoću nekog sistema za automatsko naručivanje koji na bazi sezonske potražnje za nekim proizvodom i vremena isporuke računa koliko treba da se poruči. Pri tome se koristi politika upravljanja zalihama koja podrazumijeva periodičnu provjeru nivoa zaliha, a period provjere je izveden iz obrasca dostave. Prema tome, od obrasca dostave zavisi i tačka ponovnog naručivanja. Količina koja se naručuje jednaka je cjelobrojnom broju pakovanja proizvoda koji podiže nivo zaliha do tačke ponovnog naručivanja ili malo iznad nje. Znači, pretpostavljeno je da se šema dostave određuje i potom ugrađuje u model zaliha preko kojeg se onda određuje količina koja se naručuje. Koja će se šema koristiti za koji proizvod zavisi od izabranog obrasca dostave.

Troškove u distributivnom skladištu čine troškovi izdvajanja porudžbina sa zaliha, a troškove transporta njihov prevoz do klijenata. Obe komponente troškova zavise od veličine porudžbine. Troškovi u prodajnom objektu se sastoje od troškova naručivanje po porudžbini, troškova prijema robe u prodajni objekat, troškova popunjavanja polica, troškova obnove zaliha i troškova držanja zaliha. Troškovi

naručivanja i prijema robe zavise od broja naručivanja, tj. koliko puta se roba dostavlja po izabranom obrascu. Prvi se tiču provjere stanja zaliha, a drugi pripreme za prijem robe, obrade dokumenta, kontrole itd. Troškovi popunjavanja polica, obnove i držanja zaliha zavise od veličine porudžbine. Definisan je skup objekta, skup obrazaca dostave, skup segmenta proizvoda, skup distributivnih skladišta, skup dana kada se roba izdvaja i skup dana kada se roba dostavlja. Svaki prodajni objekat može da se snabdje samo jednom u toku dana. Ako se različiti segmenti dostavljaju u istom danu, onda se dostavljaju kroz istu isporuku. Kapaciteti za izdvajanje pošiljki u distributivnom skladištu i za njihov prijem u prodajni objekat su ograničeni. Kapacitet transporta nije ograničen, jer je pretpostavljeno da ga obavlja spoljni saradnik. Stoga, troškovi transporta zavise samo od količine koja se prevozi i razdaljine. Ograničenja u modelu se tiču kapaciteta komisioniranja u skladištu i prijemnog kapaciteta u prodajnom objektu. Promjenljiva odlučivanja pokazuje koji obraz dostave je izabran za koji objekat.

Sternbeck i Kuhn (2014) su model primijenili na razmatranoj kompaniji, koju su nazvali Beta. Beta ima nekoliko hiljada prodajnih objekata širom Evrope. Posjeduje 6 distributivnih skladišta. Za sve prodajne objekte proizvodi su podijeljeni u tri segmenta. Jedan segment se nalazi u centralnom distributivnom skladištu, jedan u dva regionalna i jedan u preostalim. Postoji ukupno 25 konsolidacionih tačaka gdje se sabira roba iz distributivnih skladišta. Menadžeri kompanija su ograničili broj mogućih obrazaca dostave na 26, da bi lakše mogli da isprate distribuciju i da lakše vrše prilagođavanje. Autori su predložili kompaniji šeme dostave za svaki segment proizvoda i integrisali ih u tih 26 obrazaca dostave. To je rađeno po određenoj proceduri, pri čemu su se posmatrale i šeme isporuke drugih segmenata proizvoda. Obrasci se kreću od onih koji svaki segment proizvoda isporučuju u drugom danu, do onih u kojima se svi segmenti isporučuju u svakom danu. Dnevnu potrebu za svakim segmentom proizvoda po prodajnom objektu izračunali su na osnovu očekivane sedmične potražnje i politike upravljanja zalihama.

Dobijeni rezultati upućuju na povećanu konsolidaciju u novom stanju, dobijenu primjenom predloženog modela. Ukupan broj isporuka se smanjuje za 41%, što je smanjenje sa 4.1 na 2.4 isporuke sedmično. Ako se gledaju promjene u frekvenciji

dostave po segmentima i prodajnim objektima, promjene nisu proporcionalne smanjenju broja isporuka. U 27% kombinacija prodajni objekat - segment proizvoda, postoji smanjenje u broju isporuke, u 12% se taj broj povećao, a kod ostatka je ostao nepromijenjen. To znači da je smanjenje broja isporuka i veći obim isporuke posljedica konsolidacije različitih segmenata proizvoda, a ne smanjenja frekvencije isporuke po segmentu. Zato se broj segmenata po isporuci povećao za 50%, na 2.8 segmenta po objektu. Prosječna veličina isporuke je narasla za 11%. Okvirno, kod jedne trećine prodajnih objekata se povećao broj jedinica isporuke, kod jedne ostao isti i kod jedne se smanjio. Smanjenje ukupnih troškova je 5.3%. Najveće smanjenje troškova dogodilo se u transportnom sektoru. Potvrdilo se i da najveći udio u troškovima imaju troškovi rukovanja robom u skladištu.

Autori su na kraju izračunali rješenje uzevši obzir samo troškove koji se javljaju u skladištu i rješenje u slučaju da se uzimaju samo troškovi transporta i distributivnog skladišta. Kada se uporede rješenja vidi se da su broj isporuka i prosječna frekvencija dostave po segmentu proizvoda značajno veći u slučaju rješenja bez troškova transporta. Obrnuto važi u slučaju da se gledaju samo troškovi prodajnog objekta. Uvedena ograničenja kapaciteta ograničavaju prostor rješenja. Ako bi se povećao prijemni kapacitet prodajnog objekta, broj dostava u sedmici i ukupni operativni troškovi bi se smanjili. Ovakva analiza služi pri razmatranju izgradnje i dizajna novih prodajnih objekata u pogledu njihovih skladišta. Ipak, glavni doprinos rada je rješenje koje integriše, transport, skladište i prodajni objekat. Ono leži između dva opisana rješenja. Pomoću njega razmatrana kompanija može da smanji operativne troškove za 5.3%.

### **Holzapfelov pristup određivanju obrasca dostave**

Holzapfel i ostali (2016) unaprjeđuju Sternbeckov i pristup u dijelu koji se tiče transportnog sektora. Zahvaljujući tome dobijaju za 2.5% manje ukupne troškove u odnosu na rješenje koje su dobili Sternbeck i Kuhn (2014) za isti primjer. Holzapfel i ostali (2016) razmatraju efekte udruživanja porudžbina prodajnih objekata koji se snabdijevaju istog dana u jednoj ruti. Pretpostavili su da je distributer odgovoran za optimiziranje kompletne distribucije, pa tako i transporta. U svom pristupu oni iznose ideju koja podrazumijeva grupisanje klijenata. U svakom danu se pravi

onoliko klastera koliko ima i vozila i klijenti se grupišu u klastere. Nastoji se da najbliži klijenti budu opsluženi u istom danu. Riješili su problem na tri načina: pomoću modela mješovitog cjelobrojnog programiranja, pomoću heuristike i pomoću matematičkog modela iz Sternbeck i Kuhn (2014). Uporedili su rješenja i pristupe. U Sternbeckovom i Kuhnovom pristupu troškovi transporta zavise samo od količine robe koja se prevozi. Prema tome, cilj u tom pristupu je da se ostvari što veći obim robe i tako uštedi na troškovima. Zato se gleda da se spoji što više proizvoda iz različitih segmenata. Za troškove transporta uzimaju se samo oni od konsolidacionog centra do prodajnog objekta, pri čemu su konsolidacioni centri fiksni. Shodno tome, visina troškova zavisi samo od količine koja se transportuje od konsolidacione tačke do prodajnog objekta, a ona od toga koliko različitih proizvoda je uklopljeno u dostavu.

U Holzapfelovom pristupu se uzimaju u obzir i efekti uparivanja porudžbina različitih prodajnih objekata u jednu turu. Cilj je da se troškovi transporta smanje uparivanjem porudžbina prodajnih objekata koji su najbliži. Troškovi transporta se računaju i do i od konsolidacionog centra, pri čemu to nije fiksna tačka. Troškovi transporta do centra klastera ne zavise od izabranog obrasca i prodajnih objekata, nego samo od izabranih klastera. Prije rješavanja modela, kojim se za svaki objekat definiše obrazac dostave, proračunavaju se troškovi transporta za svaki objekat od centra klastera koji zavise od izabranog obrasca dostave, tj. od uparivanja sa posjetom drugim objektima. Dakle, prije pokretanja modela potrebno je za svaki objekat izračunati koliki je trošak da on bude dio nekog klastera određenog dana. To opet zavisi i od drugih objekata koji su u tom danu u tom klasteru. Sternbeck i Kuhn (2014) te troškove i ne razmatraju. Logika uparivanja klijenata u klastere preuzeta je iz Fisher i Jaikumar (1981). Oni su rješavali VRP praveći klastere pri čemu svaka tačka kojoj se isporučuje roba može biti centar klastera, odakle se dalje vrši isporuka do ostalih klijenata u klasteru. Stoga, ovdje centar klastera može biti bilo koji objekat na mreži. Ovaj pristup podrazumijeva proračun marginalnih troškova uključivanja nekog objekta u neki klaster. Troškovi transporta su i dalje okvirni, jer se ne zna kojim redoslijedom će se vršiti dostava.



### **3.3. Raspoređivanje radnika**

#### **Uopšteno o problemu raspoređivanja radnika**

Radna snaga je glavna troškovna komponenta u mnogim djelatnostima, pogotovo onim uslužnim. Plate radnika predstavljaju više od 50% ukupnih operativnih troškova u zdravstvu, školstvu, ugostiteljstvu, trgovini itd. U tim djelatnostima planiranje i raspoređivanje radnika je ključno, ne samo zbog troškova, nego i zbog produktivnosti i fluktuacije radne snage (Villarreal i ostali, 2015). Loša organizacija radnika smanjuje efikasnost logističkih procesa u distribuciji (Andrejić, 2015). Radna snaga u logistici je prvi troškovni centar, pogotovo za logističke provajdere. U njihovom slučaju je ključna i za obezbjeđivanje fleksibilnosti, koja im je danas neophodna da bi opstali (Ladier i Alpan, 2015).

Današnji PRR se razlikuje od prvobitnih. Prvi PRR su bili fokusirani na dodjeljivanje radnika poslovima. Danas je sve više fokus na uslovima rada, željama radnika i različitim fleksibilnostima. Glavni cilj raspoređivanja radnika je efikasno iskorišćenje resursa, ravnomjerno raspoređeno opterećenje radnika i zadovoljene želje radnika što je više moguće (Ozder i ostali, 2020). Zbog toga se razmatraju mogućnosti zaposlenja na pola radnog vremena, fleksibilno radno vrijeme i druge pogodnosti poput rada u tačno određenoj smjeni, sa tačno određenom osobom itd. U skladu s tim, pojavili su se modeli koji omogućavaju zaposlenima da izaberu smjene i sa kim će raditi u smjeni.

Raspoređivanje radnika je generalno jedan od najviše obrađivanih problema raspoređivanja u OR. To potvrđuje broj radova koji su se bavili ovom temom. Ernst (2003) je sabrao više od 700 radova iz ove oblasti objavljenih do 2004. godine, a Bergh (2013) njih 273 objavljenih u periodu od 2004. do 2012. godine. U različitim oblastima obrađivane su različite vrste PRR. Prema De Causmaker i ostali (2004) svaki PRR ima tri dimenzije. To su skup radnika, vrijeme za koje se definiše broj radnika i zadaci ili dužnosti koje radnici treba da obave. Na osnovu sprovedenog istraživanja među firmama različitih djelatnosti, oni daju i klasifikaciju PRR. Razlikuju PRR kod kojih je potreban konstantan broj radnika, u kojima se vrši reorganizacija radnika na dnevnom nivou, kod kojih su zahtjevi za radnicima izrazito

promjenljivi i PRR u kojima se radnici raspoređuju na projekte. Pored ove, postoji niz drugih klasifikacija PRR. Ozder i ostali (2020) i De Causmaker i ostali (2004) daju njihov pregled.

Ernst i ostali (2004) dijele sve probleme vezane za raspoređivanje radnika na one koji se bave modeliranjem zahtjeva za radnicima, raspoređivanjem slobodnih dana, raspoređivanjem smjena, definisanjem posla u vremenu, dodjeljivanjem zadataka i osoblja. **Modeliranje zahtjeva za radnicima** je prvi korak pri raspoređivanju radnika. To je proces prevođenja informacija o zahtjevima za obavljanje nekog posla u potrebe za radnicima. Ključna je podjela zahtjeva na zadatke i fleksibilne potrebe za radnicima. **Raspoređivanje slobodnih dana** se odnosi na dodjeljivanje slobodnih dana radnicima u toku više dana, tako da svaka dnevna potreba za radnom snagom iz posmatranog perioda bude zadovoljena. **Raspoređivanje smjena** podrazumijeva problem izbora aktivnih smjena iz skupa ponuđenih i dodjeljivanje određenog broja radnika svakoj izabranoj smjeni s ciljem zadovoljenja tražnje. Pozicija odmora u toku smjene može da bude fiksirana ili se određuje za svakog radnika ili smjenu. **Problem raspoređivanja tura** je spoj prethodna dva problema, uz definisanje i dužnosti za svakog radnika u toku smjene. Kod sve tri vrste problema broj radnika može biti zadat ili je potrebno da se odredi u sklopu rješenja raspoređivanja. Ukoliko je zadat, funkcija cilja je uglavnom da se minimizira višak ili manjak radnika. Ukoliko nije zadat, onda je cilj da troškovi radnika budu minimalni. Pored ciljeva koji se mogu povezati sa troškovima radnika, postoje i oni koji se tiču zadovoljstva radnika. Među njima su minimizacija razlike između dodijeljenih poslova i željenih poslova radnika, minimizacija razlika u opterećenju radnika i maksimizacija zadovoljstva. **Dodjeljivanje zadataka** se obavlja kada su određene smjene. Zadaci se raspoređuju u smjeni u skladu sa profilom radnika, početkom i krajem smjene, i profilom koji se zahtijeva za njegovo obavljanje. Na kraju, **dodjeljivanje radnika** podrazumijeva dodjeljivanje svakog pojedinačnog radnika zadatku, smjeni ili turi.

PRR je NP (eng. *Nondeterministic Polynomial time*) težak problem, čak i u manjim verzijama (Günther i Nissen 2010a). Mnogi PRR imaju prevelik broj ograničenja tako da često kompanije moraju da nađu način da svoj PRR učine rješivim (De

Causmarker i ostali, 2004). Metode za rješavanje PRR se mogu podijeliti na optimalne metode rješavanja, heurističke algoritme i simulacione tehnike. Prema Ozder i ostali (2020), cjelobrojno programiranje je najčešće korišćena metoda za rješavanje PRR. Najčešći cilj rješavanja je minimizacija troškova radne snage, u 44.72% slučajeva. Sledeći ciljevi su balansiranje opterećenja radnika i ispunjavanje zahtjeva radnika. U radovima posvećenim PRR, raspoređivanje medicinskog osoblja u bolnicama je najzastupljenije sa udjelom od 24.6%. Slijedi raspoređivanje radnika u proizvodnji, drugih tipova radnika u zdravstvu, radnika u call centrima itd. Raspoređivanje u trgovinskom sektoru je bila tema oko 1.8% radova (Ozder i ostali, 2020).

Glavni uzrok kompleksnosti kod PRR je neravnomjernost zahtjeva za radnicima i njihova promjenljivost. Ukoliko su zahtjevi poznati, onda su prisutni zadaci koje treba obaviti sa određenim brojem radnika u određenom vremenu. Ako zahtjevi nisu poznati, radi se njihova prognoza i prema tome definiše očekivani potreban broj radnika u nekom periodu. Poslovi mogu biti sa fiksiranim vremenom izvršenja i sa fleksibilnim vremenom izvršenja. U slučaju fleksibilnog izvršenja poslova potrebno je, pored dodjeljivanja radnika poslovima, rasporediti i izvršenje poslova u vremenu. Ukoliko je izvršenje posla podijeljeno na intervale planskog perioda, o poslovima se govori kao o aktivnostima (Rijal i ostali, 2020). Problem raspoređivanja smjena sa poslovima podijeljenim na intervale, u literaturi se naziva raspoređivanje smjena sa više aktivnosti (eng. *multi activity shift scheduling*). Pregled radova u kojima su poslovi podijeljeni na intervale uz fiksno vrijeme izvršenja dato je u Popović i ostali (2021). Među radovima kod kojih je izvršenje poslova fleksibilno su radovi Rijal i ostali (2021) i Popović i ostali (2021).

### **Raspoređivanje radnika u distributivnim skladištima**

Radna snaga je resurs bez koga se ne mogu odvijati logistički procesi. Najveća koncentracija radne snage je u većini slučajeva u skladištu, pa samim tim i u okviru skladišnog procesa. Zato je, možda više nego u drugim logističkim procesima, raspoređivanje radnika bitno za skladišni proces. S druge strane, to je kompleksan zadatak, pogotovo u distributivnoj djelatnosti. U distributivnim skladištima, kao i u mnogim drugim servisnim organizacijama, zahtjevi za radnicima variraju u toku

dana uz postojanje perioda u kojima je potreban znatno veći broj radnika (Wan, 2005). Zato su za skladišni proces karakteristični fleksibilni zahtjevi za radnicima. Jedan radnik često ne obavlja isti posao tokom cijele smjene. Variranje zahtjeva za radnicima dovodi do toga da se radnicima mijenjaju poslovi i odjeljenja kako bi se izbjeglo da ima previše ili premalo radnika u pojedinim dijelovima dana (Günther i Nissen, 2010a). Prema De Causmaker (2004), PRR u skladištu karakteriše sledeće. Pojedini radnici su kvalifikovani za obavljanje različitih poslova, dok drugi obavljaju samo određene aktivnosti. Angažuju se i povremeno zaposleni radnici. Najčešći poslovi su prijem robe u skladište, odlaganje na skladišne lokacije, uzimanje robe sa skladišnih lokacija i priprema za isporuku. Količina posla izuzetno varira. Neke poslove je potrebno stalno obavljati, dok drugi mogu i da sačekaju. Radnici se često rotiraju na poslovima. Ladier i ostali (2014) dodaje da zbog promjenljivog obima posla nije moguće praviti obrasce rada, nego se oni stalno moraju prilagođavati. Iz istog razloga, supervizori u skladištu moraju nekada pojedinim radnicima skraćivati smjene, a nekada produžavati.

U odnosu na PRR u drugim oblastima, PRR u logistici ima veoma izražene varijacije zahtjeva za radnom snagom i veoma različite kvalifikacije radnika. Zbog toga zahtijeva specifična ograničenja i posebnu postavku. Uprkos tome, mali broj radova je obrađivao PRR u logistici (Ladier i Alpan, 2015, Popović i ostali, 2021). Davarzani i Norrman (2015) uočavaju da se istraživanja vezna za upravljanje radnom snagom uglavnom bave ergonomijom skladišnih poslova, tj. kako rukovanje pojedinim robama može negativno uticati na tijelo radnika. Od radova posvećenih PRR i sabranih u preglednom radu Ernst (2004) samo je jedan rad posvećen ovom problemu u skladištu, a u preglednom radu Van den Bergh i ostali (2013) nalaze se četiri takva rada. Prema tome, do 2004. godine nije bilo nijednog rada na ovu temu, a do 2013. tek pet. U periodu od 2014. do 2024. godine uočeno ih je sedam. Za pretragu je tom prilikom korišćena web stranica Scencedirect izdavača, Springer izdavača i Google pretraživača.

Prvi rad u kome se razmatra PRR u skladištu je rad De Causmaecker i ostali (2004). On se bavio klasifikacijom PRR koji se javljaju u različitim belgijskim firmama. Među njima se našla i firma koja se bavi skladištenjem. Radnici u njoj se raspoređuju u

skladu sa svojim kvalifikacijama i iskustvom. Nastoji se napraviti raspored kojim se minimizuje prekovremeni rad i broj povremeno angažovanih radnika. PRR koji se javlja u ovoj firmi svrstan je u grupu PRR sa promjenljivim zahtjevima za radnicima.

Günther i Nissen (2010a, 2010b) su obrađivali problem dnevnog raspoređivanja radnika u skladištu jednog logističkog provajdera. Zbog izrazite promjenljivosti zahtjeva za radnicima, autori su predložili raspoređivanje radnika po intervalima manjima od radnog dana. Na taj način, radnici su mogli da rade na više od jednog radnog mjesta u toku dana. Cilj im je bio da tako smanje vrijeme u kojem ima nedovoljno ili više nego što je potrebno radnika. Pored toga, nastojali su minimizovati i prekomjerno prebacivanje radnika sa jednog na drugo radno mjesto i vrijeme koje radnik provede na radnom mjestu za koje nije kvalifikovan. Generalni zaključak autora je da je uvijek bolje da se radnici raspoređuju na intervale manje od dana, nego na cijeli dan. Pored toga što se tako smanjuju troškovi angažovanja radnika, na ovaj način radnici se dodatno motivišu i povećava se kvalitet usluge.

Ladier i ostali (2014) su pravili sedmični i dnevni raspored radnika jedne kompanije koja se bavila skladištenjem. Kao i u prethodnom navedenom radu, suočili su se izuzetnom promjenljivošću zahtjeva za radnicima. Stoga, radnici su podijeljeni na stalne i povremene. Zadaci su podijeljeni na one koji se rade tokom cijelog dana i one koji su povremeni. Uz to, definisan je skup svih radnih dana u toku sedmice, moguće smjene i radni sati u toku dana. Na osnovu toga formirana su tri modela mješovitog lineranog problema, u kome su izlazni podaci jednog ulazni podaci drugog modela. U prvom modelu se za svaki radni dan sedmice određuje broj povremenih radnika svih profila i broj sati na svakom od zadataka svakog zaposlenog. U drugom modelu se za svakog zaposlenog određuje smjena i udio vremena provedenog na svakom od zadataka u svakom satu. U trećem se dodjeljuju zadaci svakom zaposlenom u svakom intervalu. U svakom modelu cilj je minimizirati različita odstupanja koja se tiču viška ili manjka radnika u nekom periodu, razlike u potrebnoj kvalifikaciji radnika, razlike u opterećenju radnika, promjene smjene ili zadatka itd. Predloženi pristup rješavanju dao je bolje rezultate od dotadašnjeg pristupa u posmatranoj kompaniji, pomogao da se smanji broj povremeno angažovanih radnika i omogućio da se bolje iskoriste radnici u skladu sa njihovim kvalifikacijama.

Bard i ostali (2007) se bave raspoređivanjem radnika u distributivnom skladištu američke pošte u Dalasu. Problem koji su rješavali može da se svrsta u problem raspoređivanja tura. Raspoređivanje radnika po smjenama vršili su u dvije faze. U prvoj fazi se na osnovnu istorijskih podataka radi planiranje potrebnog broja radnika po smjenama za jednu sedmicu. U drugoj fazi se uz pomoć optimizacionog modela radnici dodjeljuju smjenama kada je već poznat obim posla. Cilj modela je da se dobiju minimalni troškovi radne snage. Radni dan je podijeljen na jednočasovne intervale. U skladištu mogu da se angažuju radnici na puno radno vrijeme, na radno vrijeme manje od punog i povremeni radnici. Za svaki tip radnika postoje pravila kako se mogu angažovati u smislu početka rada, trajanja rada, odmora, prekovremenog rada itd. U svom drugom radu Bard i Wan (2008) proširuju isti problem sa ograničenjima koja se tiču premještanja radnika iz jedne u drugu radnu stanicu poštanskog skladišta.

Ladier i Alpan (2015) raspoređuju radnike i kamione u kros-doking centru. Aktivnosti na koje se radnici raspoređuju su istovar, kontrola i skeniranje, direktni transfer, transfer na zalihe, transfer sa zaliha i utovar. Za svakog radnika se definišu dužnosti u svakom satu ili periodu smjene u svakom radnom danu. Cilj je da se što manje odstupi od tog plana. U problemu raspoređivanja kamiona cilj je da se smanji broj jedinica robe koji prolazi kroz skladište umjesto direktno sa kamiona na kamion i nezadovoljstvo prevoznika zbog probijanja željenog termina opsluge. Pokazalo se da se bolje rješenje dobija ukoliko se prvo rasporede kamioni pa onda radnici.

Ganbold i ostali (2020) raspoređuju radnike na aktivnosti u skladištu u kome je rad podijeljen na prijemni i otpremni. U skladu s tim, postoje i prijemne i otpremne aktivnosti i prijemni i otpremni nivo usluge. Predložili su optimizacioni metod baziran na simulaciji. Kroz simulacioni dio simulira se rad prijemnog i otpremnog dijela skladišta i veze između aktivnosti na bazi istorijskih podataka. Optimizacioni dio pomoću metode slučajne pretrage susjednih rješenja (eng. *random neighborhood search*) nalazi najbolji raspored radnika na aktivnosti na bazi izlaznih podataka iz simulacije. Ulazi za optimizacioni model su prognozirani posao za neki period i značaj otpremnog nivoa usluge u odnosu na prijemi. Kvalitet rješenja se ocjenjuje

kroz nivo usluge za prijemni dio i otpremni dio. Testiranjem na primjeru iz realne organizacije, dobili su bolja rješenja od rješenja koje je dala sama organizacija.

Posebna grupa problema povezana sa PRR je raspoređivanje naloga za komisioniranje u toku smjene. U tom problemu se za definisani skup komisionara definiše redoslijed obrade naloga u skladu sa rokom za obradu. Ovaj problem postaje problem paralelnih mašina ukoliko sve porudžbine u nalogu imaju isti rok isporuke ili ukoliko svaki nalog ima samo jednu porudžbinu. U tom slučaju primjenjuju se rješenja za problem paralelnih mašina (Scholz i ostali, 2017). Scholz i ostali (2017) su se bavili ovim problemom pri čemu su prvi nalozi sadržavali porudžbine sa različitim rokom isporuke. Predložili su egzaktnu i heurističku metodu.

Rijal i ostali (2020) dodaju raspoređivanje smjena problemu raspoređivanja naloga za komisioniranje, ističući da se on do tada rješavao samo u okviru jedne smjene. Oni raspoređuju naloge za komisioniranje u okviru smjena i komisionere po smjenama. Komisioneri koji se raspoređuju su povremeni radnici u skladištu sa zagarantovanim brojem plaćenih sati. Modelom se određuje koliko će ovih radnika iz zadatog skupa biti raspoređeno u svakoj od smjena, te koje naloge i kojim redoslijedom će obavljati. Svaki nalog za komisioniranje ima svoje trajanje i vrijeme do kada treba da se odradi. Zajedničkim raspoređivanjem naloga i komisionera uspjeli su da smanje troškove ovih radnika. Dodatno poboljšanje su ostvarili uvođenjem dozvoljenog odstupanja za početak pauze u trajanju od 15 minuta.

Kellermayr-Scheucher (2023) su ispitivali koji se alati koriste za upravljanje radnom snagom u skladištu, koji su vremenski intervali za koje se vrši planiranje radne snage i kako ispitanici zamišljaju idealni alat za upravljanje radnom snagom u skladištu. Ispitivanje su sprovedi među ekspertima uključenim u upravljanje skladištima različitih trgovačkih firmi. Rezultati govore da se za upravljanje radnom snagom u skladištu još uvijek najviše koristi MS Excel. Planiranje radne snage se najčešće vrši za period od tri mjeseca. Idealni alat za upravljanje radnom snagom trebalo bi da uzme u obzir kvalifikacije radnika, produktivnost radnika, da predvidi potrebe za radnicima i da ih optimalno rasporedi. Pored tog, u radu se ističe da je upravljanje radnicima krucijalno za funkcionisanje skladišta danas. Posebno to važi za skladišta

u trgovini, gdje zbog izrazite promjenljivosti zahtjeva tržišta postoji izražena potreba za fleksibilnošću u radu skladišta.

De Leeuw i Wiers (2015) su istraživali kojim strategijama planiranja radnika se mogu poboljšati performanse radnika i poslovanje skladišta. Istraživanje je sprovedeno među logističkim provajderima i trgovačkim kompanijama. Oni su ocjenjivali koliko su pojedine strategije povezane sa poboljšanjem performansi radnika i poslovanja skladišta. Pokazalo se da su fleksibilno planiranje radne snage i balansiranje opterećenja radnika strategije za koje najveći broj ispitanika smatra da najviše utiču na pomenuta poboljšanja.

Derkinderen i ostali (2023) raspoređuju radnike na zadatke u toku dana. S obzirom da je trajanje zadatka unaprijed nepoznato, svakom radniku se dodjeljuje skup zadataka nazvan profil. Profil sadrži sve zadatke koje radnik može da obavlja u posmatranom danu, prioritete u obavljanju među njima i lokacije njihovog odvijanja. Na taj način se obezbjeđuje fleksibilnost pri upotrebi radnika. Ako se neki od zadataka ne pojavi ili traje kraće, radnik odmah prelazi na sledeći po prioritetu. Dodjeljivanje profila radniku se radi na bazi istorijskih podataka o radu skladišta. Ideja je da se nađu najbolji parovi profil-radnik s ciljem minimizacije troškova. Troškovi su proporcionalni vremenu koje svaki radnik provede na svakom od zadataka iz profila. U suštini, cilj je za svakog radnika izabrati profil iz skupa profila tako da se najbolje poklope početak i kraj svakog posla sa onim predviđenim u profilu. Izabrana metoda rješavanja ovog problema dodjeljivanja je iterativna lokalna pretraga (eng. *iterated local search*). Uz pomoć simulacije vrjednuje se kvalitet dobijenog rješenja. Pokazalo se da od tačnosti prognoze trajanja zadataka najviše zavisi kvalitet rješenja.

Popović i ostali (2021) rješavaju PRR u skladištu jednog distributera iz Srbije. Radni dan su podijelili na intervale od jednog sata i definisali skup smjena sa četveročasovnim i punim radnim vremenom. Poslove su definisali kao aktivnosti za koje se u svakom intervalu dana zna koliko radnika je potrebno za njihovo obavljanje. Svaka aktivnost ima rok do kada treba da se završi, u odnosu na koji se zadovoljavaju i zahtjevi za radnicima iz svakog intervala. Cilj je izabrati smjene, definisati potreban broj radnika u svakoj od njih i rasporediti zadovoljenje zahtjeva



za radnicima tako da troškovi radne snage budu minimalni. U tu svrhu je predložen model cjelobrojnog linearnog programiranja (ILP - eng. *Integer Linear Programming*). Dobijeno je da su rješenja za 20% bolja ukoliko se uzme u obzir mogućnost odlaganja ispunjenja zahtjeva za radnicima.

### **3.4. Rutiranje i raspoređivanje transportnih sredstava**

Istraživači raznih profesija bave se optimizacijom transporta, dominantno na operativnom nivou, rješavajući VRP. To je jedan od glavnih problema distribucije i OR. Podrazumijeva određivanje ruta opsluge unaprijed definisanih lokacija, pri čemu svaka lokacija osim polazne ima određeni zahtjev za opslugom. Suma svih zahtjeva je značajno veća od kapaciteta vozila kojim se vrši opsluga. Cilj je naći skup ruta kojim se opslužuju sve lokacije uz optimizaciju postavljenog cilja rutiranja.

#### **Značaj VRP-a za privredu i društvo**

Transport robe do njenog naručioca suština je distributivne aktivnosti i njena najvažnije karika. Od transporta zavisi trošak distribucije i zadovoljstvo korisnika distributivne usluge. Cilj distributivnih kompanija je da smanje trošak distribucije koliko je to moguće, a podignu zadovoljstvo klijenata. Da bi u tome uspjele, između ostalog, neophodno je da optimizuju rute kojima se roba dostavlja. Zbog toga je problem određivanja ruta, u literaturi poznat kao VRP, jedan od najvažnijih problema u logistici (Konstantakopoulos i ostali, 2022).

Optimizovana distribucija je ključna i za uspjeh većine proizvoda na tržištu, zbog visokog udjela troška distribucije u ukupnoj cijeni proizvoda. Osim za logističke, transportne i proizvodne kompanije, VRP je važan i za kompanije drugih djelatnosti, ali i društvo i ekologiju. Kod kompanija iz drugih oblasti, vozilo je više uopšten termin i predstavlja pokretno sredstvo rada za obavljanje zadataka na udaljenim lokacijama. Zadaci se mogu odnositi na neku vrstu prikupljanja, dostave, popravke, provjere i sl. (Labadie i Prodhon, 2006). Uticaj rješenja VRP-a na živote ljudi odražava se kroz različite rasporede, kao što su rasporedi odvoza smeća, dolazaka i polazaka autobusa, vozova, aviona itd. Životna sredina zavisi od rješenja VRP-a u pogledu količine zagađenja koje prouzrokuje neki plan ruta.

## **Značaj VRP-a za naučnu zajednicu**

„Problemi izbora optimalnih ruta predstavljaju, bez sumnje, najviše istraživanu oblast optimizacije transportnih i uopšte logističkih procesa, o čemu svjedoči izuzetno veliki broj radova u okviru kojih se razmatraju kako različiti tipovi zadataka, tako i različiti postupci rješavanja tih zadataka“ (Vidović, 2007). VRP je problem koji se najviše obrađuje u okviru operacionih istraživanja, jedan od osnovnih problema mrežne optimizacije i vrlo popularan kombinatorni problem (Konstantakopoulos i ostali, 2022). Pored toga, veliki broj softvera je namijenjen rješavanju VRP-a .

Svoju popularnost VRP duguje značaju koji ima za privredu i društvo, ali i izazovnoj složenosti. Veliki broj radova posljedica je i raznolikosti VRP-a u praksi. Skoro da se ne mogu naći dva slučaja iz prakse u kojima se javljaju identični VRP-i. To dovodi do formulisanja mnoštva različitih VRP-a. Većina modela VRP-a javlja se iz želje za efikasnim rješavanjem praktičnog problema (Osaba i ostali, 2020). Faktori koji utiču na distribuciju i donose specifičnost nekom VRP-u se transformišu u ograničenja ili u promjenljive što na kraju dovodi do novih oblika VRP-a (Konstantakopoulos i ostali, 2022). VRP literaturu dodatno obogaćuju i radovi koji se bave VRP-om u drugim oblastima. VRP-i spadaju u NP teške probleme, tako da je traženje optimalnih rješenja računarski zahtijevan zadatak čak i za probleme srednje veličine (Osaba i ostali, 2020). Za njihovo rješavanje se mogu primijeniti različite postojeće metode. Međutim, rast kompleksnosti novih oblika VRP-a i jačine računara podstiče istraživače da smišljaju nove i unaprjeđuju postojeće metode.

Broj radova koji se bavi VRP-om skoro da ima savršen eksponencijalni rast od početka objavljivanja do danas. U periodu od 1954. do 2005. godine, godišnja stopa rasta je bila 6% (Eksioglu i ostali, 2009). U Google Scholaru, Gora i ostali (2020) su pronašli preko 5400 objavljenih radova na temu VRP-a objavljenih u periodu od 1959. do 2018. godine. Pretraga po ključnoj riječi „vehicle routing“ u Clarivate Web od Science izdvaja vraća više od 8000 radova uključujući 131 pregledni rad (Bai i ostali, 2023). Imena istraživača koja se najčešće pominju u radovima o VRP-ima su Gilbert Laporte, Michael Gendreau, Jean-Yves Potvin itd. (Eksioglu i ostali, 2009). Neke od najčešćih riječi koje se pojavljuju uz frazu „rutiranje vozila“ su heuristike,

algoritmi, rješavanje problema, optimizacija, transportne rute, matematički modeli i raspoređivanje (Eksioglu i ostali, 2009). Časopisi u kojima se najviše objavljuju radovi posvećeni VRP-u su *European Journal of Operational Research* i *Transportation Science*, u kojima je objavljeno skoro 20% svih radova na ovu temu (Eksioglu i ostali, 2009).

### **Definicija VRP-a**

Osnovni VRP, predložen od Dantzig i Ramsera (1959), može se definisati kao kombinatorni problem određivanja ruta za skup vozila kojima se opslužuje skup klijenata koji imaju određene potrebe za posjetom, uz određene ciljeve i ograničenja. Komponente VRP-a su skup korisnika koje potrebno posjetiti (pri čemu svaki ima određeni zahtjev), skup vozila (koji kreću iz centralnog skladišta i treba da se vrate u njega), ograničenja (kapaciteta vozila, nedjeljivosti pošiljke, posjete u samo jednoj ruti, vremenski prozori itd.) i ciljevi (minimalni trošak, minimalno trajanje dostave i slično ili višestruki ciljevi). Kod izvornog VRP-a cilj je naći rute za vozila kojim će se obezbijediti najmanji ukupni pređeni put, posjeta svakom klijentu u okviru samo jedne od ruta i povratak svakog vozila u depo po završetku rute. Teret u vozilu ne smije preći maksimalni kapacitet vozila i razdvajanje pošiljaka nije dozvoljeno. Izvorni VRP se naziva još kapacitativni VRP (CVRP – eng. *Capacitated VRP*) (Bai i ostali, 2021). Iz njega se razvilo mnoštvo oblika VRP-a, tako da je VRP danas opšte ime za cijelu klasu problema posvećenih optimalnom dizajnu ruta za flotu vozila koja opslužuju grupu klijenata (Gora i ostali, 2020).

Iz distributivne perspektive, VRP problem se može opisati i kao problem određivanja ruta za flotu vozila kojim se opslužuju korisnici sa distributivnim potrebama da bi se zadovoljili određeni ciljevi distribucije. Ciljevi su minimalni trošak distribucije, najkraće vrijeme, poštovanje termina, višestruki ciljevi itd. Vozila kreću od distributivnog skladišta i treba da se vrate u distributivno skladište nakon što obave distributivni zadatak. Pri tom, treba da se ispoštuju različita ograničenja kao što su: kapacitet vozila, pristup korisnicima, vrijeme preuzimanja pošiljki od korisnika itd. (Labadie i Prodhon, 2016).

## **Istorija VRP-a**

VRP je nastao uopštavanjem problema trgovačkog putnika, uvođenjem kapaciteta vozila i potražnje u tačkama opsluge. U literaturu su ga uveli Dantzig i Ramser (1959) kao problem dispečiranja kamiona. Od tada počinje njegovo izučavanje i taj problem postaje osnova za sve dalje oblike VRP-a (Eksioglu i ostali, 2009). U prvobitnom obliku odnosio se na distribuciju robe od centralnog skladišta do geografski raspršenih korisnika (Konstantakopoulos i ostali, 2022). Tačnije, podrazumijevao je problem otpreme kamiona za prevoz benzina od terminala do benzinskih stanica, pri čemu je ukupna potražnja svih stanica značajno veća od kapaciteta kamiona. Shodno tome, potrebno je definisati više ruta kako bi se sve benzinske stanice zadovoljile. Cilj je da ukupan pređeni put bude minimalan. Problem je podrazumijevao jedan tip vozila, tj. da na svaku rutu ide vozilo istog kapaciteta (Gora i ostali, 2020). Tek sa radom Clarke i Wright (1964) u problem je uvedeno da se rutama mogu dodijeliti vozila različitih kapaciteta. Termin VRP se u naslovu nekog rada prvi put spominje kod Golden i ostali (1972) (prema: Eksioglu i ostali, 2009). Od početka, literatura o VRP-u rapidno raste i VRP dobija svoje varijante po uzoru na realne probleme (Elatar i ostali, 2023). Poseban podstrek razvoju VRP literature daje uvođenje i primjena mikro računara u istraživanjima 1990-ih godina. To je omogućilo da se razviju i implementiraju složeniji algoritmi pretrage. Tih godina uveden je prvi put i termin metaheuristika, za algoritme pretrage rješenja VRP-a i drugih kombinatorno optimizacionih problema (Eksioglu i ostali, 2009).

## **VRP i ostali problemi određivanja ruta**

VRP pripada grupi problema posvećenih izboru ruta u grafu. Izbor ruta u grafu je značajan računarski problem, i sa teorijske i sa praktične strane. Problemi izbora ruta se mogu podijeliti na nekoliko kategorija. Najjednostavniji podrazumijeva izbor optimalnog puta u mreži između polazišta i odredišta. Proširenjem tog problema dobija se čuveni TSP, gdje je potrebno u jednoj ruti obići više odredišta uz minimalan trošak. Na kraju, uvođenjem potražnje u svakom odredištu i kapaciteta vozila koji je manji od sume potražnje dobija se VRP. Problem izbora optimalnog puta između polazišta i odredišta je problem pronalaženja puta kod koga je suma težina njegovih dijelova minimalna. Problem se javlja na mreži gdje su poznata rastojanja između

povezanih čvorova. Veze među čvorovima predstavljaju potencijalne komponente puta od polazišta do odredišta. Mreža puteva se predstavlja u vidu grafa. Najpoznatija heuristika za njegovo rješavanje je Dijkstrin algoritam (Gora i ostali, 2020).

TSP je optimizacioni problem koji ima primjenu u različitim disciplinama kao što su transport, telekomunikacije, računarstvo itd. Koristi se i kao testni slučaj za skoro svaki novi algoritam diskretne optimizacije. U svom najjednostavnijem obliku TSP podrazumijeva određivanje najkraće rute koja prolazi kroz svih  $n$  čvorova tačno jedan put (Gora i ostali, 2020). Mogući su i dodatni uslovi, poput zahtjeva za povratak u polaznu tačku kada se obiđe svih  $n-1$  tačaka (Danzig i Ramser, 1959). Prvu formalnu definiciju TSP dali su Hamilton i Kirkman 1856. godine, definišući ga kao problem nalaženja kruga koji prolazi kroz svaki vrh grafa/poliedra samo jednom (Gora i ostali, 2020). Ipak, Ojler sa svojim problemom prelaska 7 mostova se smatra ocem TSP. Trenutna definicija TSP je od Karla Mengera iz 1930. godine, koji ga je tada nazvao problem poštara (eng. *messenger problem*) (Gora i ostali, 2020). TSP je NP težak problem. Ako se pretpostavi da je svaki par čvorova povezan sa granom, ukupan broj mogućih ruta kroz  $n$  čvorova je  $1/n!$ . Čak i za male vrijednosti  $n$  ukupan broj ruta je ekstremno veliki. Na primjer, za  $n=15$  postoji više od 600 milijardi različitih ruta (Dantzig i Ramser, 1959). Trenutno najefikasniji način za rješavanje velikih instanci TSP je Concorde solver (Gora i ostali, 2020). Istraživanja vezana za TSP su danas više usmjerena na njegove oblike koji se javljaju u praksi i njegov asimetrični oblik (Gora i ostali, 2020).

Za razliku od TSP kojem je cilj da nađe najkraći kružni put koji prolazi sve klijente bez ograničenja vremena i kapaciteta, bazični VRP ima ograničenje kapaciteta i stoga zahtijeva nalaženje više od jedne rute sa minimalnim troškovima (Bai i ostali, 2023). VRP je NP težak kao i TSP, ali ga je generalno mnogo teže riješiti nego TSP iste veličine, jer je broj mogućih rješenja mnogo veći za veći vozni park (Gora i ostali, 2020). Mnogo više napora je uloženo da se TSP riješi egzaktnim metodama, dok su VRP više rješavani heuristikama, što takođe odražava težinu problema (Laporte i Nobert, 1987).

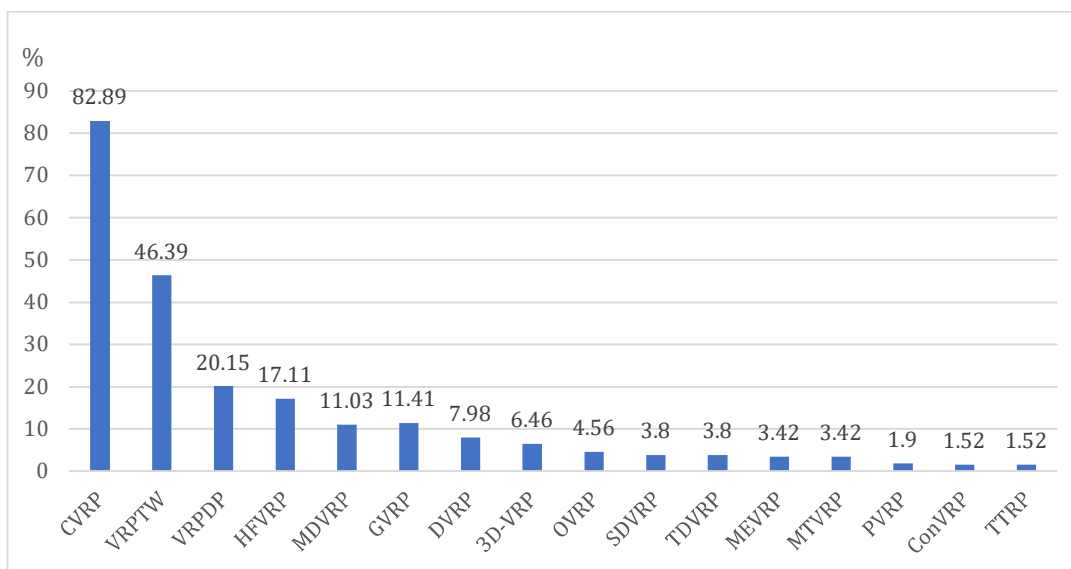
Pored ovih problema u kojima je cilj posjetiti određene čvorove u mreži, postoje i problemi rutiranja u kojima je cilj proći određenim putem ili lukom u mreži. Zadatak pokrivanja lukova poznat je i kao problem kineskog poštara. Podrazumijeva pronalazak rute za poštara kojom će proći sve ulice u dijelu grada koji mu je dodijeljen i ponovo se vratiti u polazišno mjesto uz minimalni pređeni put. Njega je uočio Ojler 1736. godine rješavajući problem prelaska preko kenigsberških mostova (Vidović, 2007).

### **Vrste VRP-a**

Kako distribucija prati zahtjeve tržišta, razvoj privrede i tehnologije, javljaju se brojne varijante VRP-a. Stoga, prvi korak pri postavljanju i rješavanju VRP-a u nekoj kompaniji je prepoznavanje kojemu tipu VRP-a pripada. Sve vrste VRP-a su nastale na bazi osnovnog VRP-a. One su prije svega posljedica težnje akademske zajednice da što realnije formuliše praktične VRP-e. Ta težnja se pojavila od samog uvođenja VRP-a u literaturu (Konstantakopoulos i ostali, 2023). Nove formulacije i modeli VRP-a su nastajali dodavanjem različitih ograničenja i ciljeva iz prakse (Konstantakopoulos i ostali, 2023). Ipak, kod većine varijanti VRP-a cilj je sličan, da se izvrši minimizacija troškova distribucije uz zadržavanje visokog nivoa usluge klijentima distribucije (Konstantakopoulos i ostali, 2023). U posljednje vrijeme veliku ekspanziju su doživjeli VRP-i koji uključuju faktore koji se tiču životne sredine i održivog rutiranja (Gora i ostali, 2020).

Prilagođavanje i unaprjeđivanje modela VRP-a dovelo je do bogate i izdašne literature, sastavljene od mnoštva visokokvalitetnih studija (Osaba i ostali, 2020). VRP-i mogu da se klasifikuju na različite načine. Zbog srodnosti sa temom disertacije, ovdje je data ona predstavljena u radu autora Konstantakopoulos i ostali (2022). Oni izdvajaju 16 kategorija VRP-a koji se najčešće javljaju u distribuciji: CVRP, VRP sa vremenskim prozorima (VRPTW – eng. *VRP with Time Windows*), VRP sa isporukom i prikupljanjem (VRPDP – eng. *VRP with Deliveries and Pickups*), VRP sa heterogenim voznom parkom (HVRP – eng. *Heterogenous fleet VRP*), VRP sa više depoa (MDVRP – eng. *VRP with Multiple Depots*), zeleni VRP (GVRP – eng. *Green VRP*), dinamički VRP (DVRP – eng. *Dynamic VRP*), trodimenzionalni VRP (3D-VRP – eng. *three dimensional VRP*), otvoreni VRP (OVRP – eng. *Open VRP*), VRP sa izdijeljenom isporukom (SDVRP

– eng. *Split Delivery VRP*), VRP sa promjenljivim vremenom putovanja (TDVRP – eng. *Time-Dependent VRP*), multi-ešalonski VRP (MEVRP – eng. *Multi-Echalon VRP*), VRP sa više pokretanja vozila (MTVRP – eng. *Multi-trip VRP*), periodični VRP (PVRP – eng. *Periodic VRP*), VRP sa dosljednošću (conVRP – eng. *consistent VRP*), problem rutiranja tegljača i prikolica (TTVRP – eng. *Truck and trailer VRP*). Pored opisa svakog problema, isti autori navode i radove koji su se njima bavili kao i metode rješavanja koje se najviše koriste za svaku od varijanti VRP-a. Koristeći se preglednim radom Konstantakopoulos i ostali (2022), Elatar i ostali (2023) su napravili pregled zastupljenosti varijanti VRP-a među istraživačima u periodu od 2010. do 2020. godine (slika 3.1)



**Slika 3.1. Zastupljenost VRP varijanti među istraživačima u periodu od 2010. do 2020. godine (prilagođeno prema Elatar, 2023)**

### Metode rješavanja VRP-a

Metode za rješavanje VRP-a se mogu grupisati na egzaktne, heurističke i metaheurističke. Egzakti pristup rješavanju VRP-a se pojavio sa pojavom VRP-a. On podrazumijeva da se VRP modelira kao ILP problem (Labadie i Prodhon, 2016). Međutim, rješavanje takvih modela VRP-a ima eksponencijalno vrijeme računanja. Godine 1987. mogao se riješiti VRP sa svega 30 tačaka (Laporte, 1987). Danas su benčmark instance CVRP-a do 150 tačaka riješene optimalno, ako se pogledaju benčmark skupovi navedeni u <http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/>. Iz istog izvora se

takođe može vidjeti da je i mnogo instanci preko 150 tačaka riješeno optimalno. Usljed nemogućnosti dolaska do rješenja VRP-a većih dimenzija ili njegovog rješavanja u kraćem roku, pribjeglo se kreiranju i primjeni heuristika i metaheuristika za rješavanje VRP-a. Bodin i Golden (1981) definišu pet heurističkih strategija za rješavanje VRP-a: zoniranje - rutiranje, rutiranje - zoniranje, ušteda/ubacivanja, poboljšanja/zamjene i strategija bazirana na matematičkom programiranju.

U poslednjim decenijama dominantno se kreiraju i koriste metaheuristike. U periodu od 2009. do 2015. godine oko 70% radova koji su rješavali VRP su to radili pomoću metaheuristika (Braekers i ostali, 2016). Metaheuristike se uopšteno mogu podijeliti na one koje vrše lokalnu pretragu i one koje pretražuju populaciju. Prve se koriste više od drugih, jer brže dolaze do rješenja. Prema Elatar i ostali (2023), među metaheuristikama baziranim na lokalnoj pretrazi najviše se koristi Tabu pretraživanje (TS – eng. *Taboo Search*) i metoda promjenljivih okolina (eng. *variable neighborhood search*). Manje se koriste metoda pretrage velike okoline (eng. *large neighborhood search*), simulirano kaljenje (eng. *simulated annealing*), iterativna lokalna pretraga i sl. Od metoda baziranih na pretrazi populacije najviše se koriste genetski algoritmi (eng. *genetic algorithms*), optimizacija kolonijom mrava (eng. *ant colony optimization*) i optimizacija rojem čestica (eng. *particle swarm optimization*) (Elatar i ostali, 2023).

Generalno, broj metoda za rješavanje VRP-a rapidno raste poslednjih decenija. Pojavljuju se i nove metaheuristike. Neki primjeri revolucionarnih metaheuristika su firefly algoritam, imperialist competitive algoritam, cuckoo pretraga, artificial bee colony i bat algoritam (Osaba i ostali, 2020). Takođe, istraživači rade hibridizaciju metaheuristika s ciljem sticanja koristi iz prednosti svake od njih. Postoji trend hibridizacije metaheuristika sa mašinskim učenjem, da bi se stvorile inteligentne metaheuristike. Postoji mnogo novih metaheuristika koje se još uvijek ne koriste za rješavanje VRP-a (Elatar i ostali, 2023). Pored toga, raste i broj softvera koji se nudi za rješavanje VRP-a. Veće kompanije koje imaju neku vrstu distribucije, danas imaju softvere za rješavanje VRP-a (Braekers i ostali, 2016). Za razliku od vremena kada su se rute određivale ručno i na bazi iskustva, danas je zadatak prepoznati kojem



VRP-u pripada neki praktični problem i koju metodu rješavanja primijeniti (Konstantakopoulos i ostali, 2022).

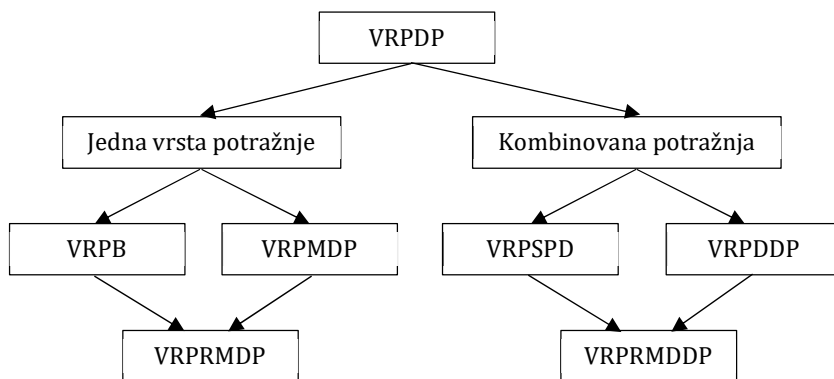
### **Uopšteno o VRPDP-u**

Problemi rutiranja u kojima pored dostave postoji i preuzimanje robe sa korisničkih lokacija svrstavaju se u VRPDP. To su izuzetno važni problemi, sa mnogo praktičnih primjena pri planiranju distribucije. Njihova važnost proizlazi iz potrebe za smanjenjem troškova distribucije, pritisaka i želje da se smanji negativni uticaj transporta na okolinu i sve šireg spektra roba koje se ponovo koriste i recikliraju. Njihovo pravilno rješavanje omogućava upravo smanjenje troškova distribucije kroz smanjenje praznih vožnji, odnosno smanjenje potrošenog goriva čime se smanjuje i negativni uticaj transporta na okolinu. Povratom robe i ambalaže sprječava se njihovo odlaganje u prirodi i omogućava ponovna upotreba, čime se štiti okolina od zagađenja i štede resursi. Ova vrsta VRP-a prisutna je u poštanskim firmama, firmama za distribuciju hrane i pića, onima koje se bave distribucijom kontejnera itd. (Polat, 2017).

Prema Parragh i ostali (2008), postoje dvije grupe VRPDP-a. U prvoj grupi su problemi koji podrazumijevaju da se roba transportuje od depoa do klijenata i od klijenata do depoa. U drugoj grupi, roba se transportuje između klijenata. Model rutiranja predstavljen u ovoj disertaciji pripada prvoj grupi problema, te će se u nastavku obrađivati samo VRPDP-i iz prve grupe. Svaki tip VRPDP-a iz te grupe ima dvije grupe korisnika. Prva grupa su korisnici ili lokacije gdje se roba isporučuje iz depoa, a druga su korisnici ili lokacije odakle se roba isporučuje u depo. Cilj je pronaći rute za određen broj istih vozila tako da ukupan pređeni put bude minimalan, a svi klijenti opsluženi. Količina robe na vozilu ne smije da pređe kapacitet vozila. Početna i krajnja tačka svake rute treba da bude depo.

Kojim redoslijedom i pod kojim uslovima će se klijenti opsluživati definiše se pravilima, koja dovode do različitih varijanti ovog problema. Generalno moguće je izdvojiti tri pravila: „prvo dostava pa onda povrat“, „dostava i povrat izmiješano“, „dostava i povrat simultano“ (Gencer i ostali, 2010). Takođe, podjela može biti izvršena i prema tome da li isti klijent može da prima robu iz distributivnog skladišta

i da je vraća u distributivno skladište. Ukoliko ne može, radi se o jednoj vrsti zahtjeva kod klijenata. Ukoliko je to dozvoljeno, radi se o kombinaciji zahtjeva kod klijenata (Wassan i Nagy, 2014). Uzimajući u obzir moguća pravila pri distribuciji i podjelu klijenata prema vrsti, Wassan i Nagy (2014) izdvajaju šest vrsta VRPDP-a: VRP sa povratom (VRPB – eng. *VRP with Backhauling*), VRP sa izmiješanom dostavom i povratom (VRPMDP – eng. *VRP with Mixed Deliveries and Pickups*), VRP sa istovremenom dostavom i povratom (VRPSDP – eng. *VRP with Simultaneous Deliveries and Pickups*), VRP sa razdvojenom dostavom i povratom (VRPDDP – eng. *VRP with Divisible Deliveries and Pickups*), VRP sa ograničenim miješanjem dostava i povrata (VRPRMDP – eng. *VRP with Restricted Mixing of Deliveries and Pickups*) i VRP sa ograničenim miješanjem razdvojenih dostava i povrata (VRPRMDDP – eng. *VRP with Restricted Mixing of Divisible Deliveries and Pickups*). Njihova klasifikacija je data na slici 3.2. Ovi problemi mogu imati proširenja u vidu ograničenja ili dodatnih mogućnosti, poput vremenskih prozora, heterogenog voznog parka, više depoa itd.



**Slika 3.2. Klasifikacija VRPDP modela (prilagođeno prema Wassan i Nagy, 2014)**

Neki od preglednih radova koji se bave ovom vrstom VRP-a su Parragh (2008), Wassan i Nagy (2014), Koc i Laporte (2017), Santos (2020), Sar i Ghadimi (2023). Parragh i ostali (2008) su prezentovali klasifikaciju glavnih varijanti VRPDP-a i istraživanja o njemu sprovedena do 2008. godine. Wassan i Nagy (2014) daju pregled svih varijanti VRPDP-a i definišu veze među njima. Za svaku varijantu daju i pregled radova koji su je obrađivali i metode rješavanja. Koc i Laporte (2017) su se posvetili proširenjima standardnog VRPB-a i ostalim varijantama VRPDP-a. Santos

(2020) daje pregled radova koji su obrađivali VRPDP iz perspektive održivosti. Sar i Ghadimi (2023) su obradili radove koji su se bavili VRPDP-om u povratnoj logistici. U nastavku je ukratko obrađena svaka vrsta VRPDP-a navedena u klasifikaciji. Date su najbitnije karakteristike problema, početni i noviji radovi koji ih obrađuju, praktični slučajevi u kojima se javljaju itd.

### **VRPDP sa klijentima koji imaju ili isporuku ili povrat**

**VRPB** podrazumijeva da se prvo opslužuju klijenti koji imaju dostavu pa onda klijenti koji imaju povrat. Pri tome, nisu dozvoljene rute na kojima se nalaze samo povratni klijenti. Prema preglednom radu Koc i Laporte (2017), prvi egzakti pristup za rješavanje VRPB-a dali su Yano i ostali (1987). Oni su predložili algoritam grananja i ograđivanja (eng. *branch and bound*). Ovaj algoritam za rješavanje VRPB-a predložili su i Gelinas i ostali (1995), Toth i Vigo (1997) i Mingozzi i ostali (1999) (Koc i Laporte, 2017). Yano i ostali (1987) su uspjeli da riješe VRB sa četiri linijska i četiri povratna klijenta. Mnogi autori su unaprjeđivali algoritam grananja i ograđivanja i dodavali dodatna ograničenja. Tako su Gelinas i ostali (1995) i Mingozzi i ostali (1999) uspjeli da riješe VRPB sa vremenskim prozorima od po 100 klijenata na bazi benčmark instanci datih u Solomon (1987) dodajući im i vremenske prozore. Toth i Vigo (1997) i Mingozzi i ostali (1999) rješavali su instance VRPB-a date u Goetschalckx i Jacobs-Blecha (1989) i Toth i Vigo (1996). Prvi su riješili većinu instanci optimalno, dok ovi drugi one do 100 klijenata. Quiroga i ostali (2019) su dali optimalna rješenja za poznate benčmark instance VRPB-a do 200 klijenta. Za neke od njih to je prvi put da su nađena optimalna rješenja. Oni su koristili egzakti pristup rješavanju zasnovan na algoritmu grananja, sječenja i ocjenjivanja (eng. *branch-cut-and-price*).

Prvi heuristički algoritam za VRPB su predložili Deif i Bodin (1984) (prema: Koc i Laporte, 2017). On se bazirao na Clarke i Wright (CW) heuristici za klasični VRP predstavljenoj u radu Clarke i Wright (1964). Dodali su mu ograničenje koje osigurava da se svi klijenti sa dostavom opsluže prije onih sa povratom. Goetschalckx i Jacobs-Blecha (1989) su predložili space-filling curve heuristiku. Metaheuristike su najpopularnije metode za rješavanje ovih problema. Prema Parragh i ostali (2008), prva metaheuristika upotrijebljena za VRPB je bila zasnovana na genetskom i

pohlepnom algoritmu i data je u Potvin i ostali (1996). Generalno, za rješavanje VRPB-a korišćene su obe vrste metaheuristika, one zasnovane na lokalnoj pretrazi i one zasnovane na pretrazi populacije. Prema Santosu (2020), od metaheuristika sa lokalnom pretragom korišćene su TS (Gribkovskaia i ostali, 2008; Nguyen i ostali, 2016), adaptive large neighborhood search (Ropke i Pisinger, 2006) i metoda promjenljivih okolina (Wassan i ostali, 2017). Od metaheuristika zasnovanih na populaciji korišćene su optimizacija kolonijom mrava (Chávez i ostali, 2015; Paraphantakul i ostali, 2012) i evolucioni algoritmi (Küçükoglu i Öztürk, 2013) (prema: Santos, 2020). Toth i Vigo (2002) su dali pregled egzaktnih i heurističkih metoda za rješavanje klasičnog VRPB-a objavljenim do početka 21. vijeka.

Kod **VRPMDP-a** ne postoji pravilo po kom se opslužuju klijenti. Pošiljke koje se isporučuju i koje se vraćaju u depo, mogu biti izmiješane na vozilu. Glavni izazov u ovom problemu je stalno provjeravanje da li je oslobođeno dovoljno prostora da bi se izvršio utovar. Ovi problemi se u praksi javljaju kod manjih povrata, kao što je slučaj sa kompanijama koje isporučuju hranu (Oesterle i Bauernhansl, 2016). Prema Santos (2020) prvi radovi na temu VRPMDP-a su radovi autora Casco i ostali (1988), Mosheiov (1998) i Salhi i Nagy (1999). Ova vrsta problema nije toliko izučavana. Egzaktni metodi rješavanja dati su samo za slučaj jednog vozila (Parrgah, 2008). Radi se o radovima Sural i Bookbinder (2003) i Baldacci i ostali (2003). Casco i ostali (1988) razvili su prvu heuristiku za ovaj problem, na bazi CW heuristike. Pored njih, heuristike su dali i Mosheiov (1998), Salhi i Nagy (1999) i Nagy i Salhi (2005). Wassan i ostali (2008) modelirali su ovaj problem kao VRPSDP i riješili ga reactive TS metodom. Na taj način došli su do novih najboljih rješenja za pojedine benčmark instance. Kao benčmark instance se koriste najčešće one iz Salhi i Nagy (1999) (prema: Parrgah, 2008). Neki noviji pristupi rješavanju donijeli su primjenu optimizacije kolonijom mrava (Wassan i ostali, 2013) i genetskih algoritama (García-Nájera, 2015) (prema: Koch i ostali, 2020). Avci i Topaloglu (2015) koriste adaptive local search algoritam koji je baziran na simuliranom kaljenju i metodi promjenljivog spusta (eng. *variable neighborhood descent*). Koch i ostali (2020) rješavaju ovaj problema sa trodimenzionalnim ograničenjima utovara, koristeći reactive TS.

Kod **VRPRMDP-a**, povrat se može preuzeti i ako još ima pošiljki za istovar, pod uslovom da je tovarni prostor ispražnjen do zadatog procenta prije utovara. Vozilo može biti u potpunosti utovareno samo ako su u tovarnom prostoru ili pošiljke za isporuku ili one koje se vraćaju u depo. Smatra se da je dovoljno da bude od 20 do 25% praznog prostora da bi se moglo istovremeno obavljati i utovar i istovar (Wassan i Nagy, 2014). Ovaj problem predstavlja generalizaciju prethodna dva problema. Ako je zadati procenat nula onda se dobija VRPMDP, a VRPB ako je 100%. Nagy i ostali (2013) su utvrdili da je dovoljno da vozilo bude skoro prazno da bi se obavljao utovar i da se dobije znatno bolje rješenje nego u slučaju da se čekalo da bude skroz ispražnjeno. S druge strane, ako se postavi da je dovoljno sasvim malo prostora da bi se obavljao i utovar onda se dobija rješenje koje je malo lošije od rješenja VRPMDP-a.

Casco i ostali (1988) su uveli ovaj problem u literaturu (prema: Wassan i Nagy, 2014). Wade i Salhi (2002) ga formulišu kao ILP problem. Reimann i Ulrich (2006) su rješavali VRPRMDP sa vremenskim prozorima, uzeli su u obzir povećanje vremena provedenog kod klijenta koje uzrokuje preslagivanje robe u tovarnom prostoru. Za rješavanje problema su koristili optimizaciju kolonijom mrava. Tütüncü i ostali (2009) su za rješavanje problema koristili greedy randomised adaptive memory programming search metodu. Nagy i ostali (2013) predložili su reactive TS metodu rješavanja i rješavali VRPB benčmark instance za različite vrijednosti parametra kojim se ograničava utovar. Te vrijednosti u procentima iznose: 0, 10, 25, 50, 75 i 100. Dobijena rješenja su poredili i sa najboljim za VRPB i VRPMDP.

### **VRPDP sa klijentima koji imaju i isporuku i povrat**

**VRPSDP** podrazumijeva da se prilikom posjete svakog klijenta izvrši i dostava i povrat simultano. To znači da svaki klijent mora biti opslužen tačno jedanput i sa jednim vozilom. Ovakav problem rutiranja se javlja u mnogim oblastima. Od kompanija koje isporučuju piće, do onih koji isporučuju baterije za električne automobile (Santos, 2020). Takođe, prisutan je kod kompanija koje proizvode ili prodaju različite električne uređaje i koje prilikom isporuke novih preuzimaju stare uređaje.

VRPSDP je poznat više od 30 godina. U tom periodu značajan napredak je napravljen u pogledu njegovog rješavanja, kao i razvoja varijanti kojima se približava realnim problemima (Koc i ostali, 2020). Prvi rad posvećen ovom problemu je rad Min (1989). Koc i ostali (2020) daju pregled radova na temu VRPSD-a. Prvo predstavljaju radove prema metodama koje su korišćene za rješavanje VRPSD-a i dijele ih na one koje su koristili egzaktne, heurističke i metaheurističke metode. Potom, prikazuju radove prema proširenjima koja su uveli u VRPSD. Na kraju su date studije slučaja u kojima su primijenjeni i riješeni VRPSD-i.

Liu i ostali (2021) su koristili memetski algoritam sa efikasnom lokalnom pretragom i proširenim susjedstvom (eng. *memetic algorithm with efficient local search and extended neighborhood*) da bi riješili VRPSDP sa vremenskim prozorima. Njihova rješenja su bila bolja od do tad poznatih za 12 benčmark instanci. Öztaş i Tuş (2022) su koristili hibridni pristup rješavanja kombinujući metodu iterativne lokalne pretrage, VND i threshold acceptance metaheuristike. Uspjeli su doći do najboljih rješenja svih poznatih instanci ovog problema u prihvatljivom vremenu. Wu i Gao (2023) koriste optimizaciju kolonijom mrava da bi riješili VRPSDTW i to je prvi put da je upotrijebljena za ovaj problem.

Kod **VRPDDP**-a klijenti mogu biti posjećeni dva puta, jednom zbog dostave i jednom zbog povrata, bez obaveznog redoslijeda. Klijenti koji se posjećuju dva puta su obično klijenti koji imaju velike zahtjeve za opslugom i u rješenju se posjete njima realizuju na početku i na kraju rute (Nagy i ostali, 2013). Mali broj radova se bavi ovim problemom (Wassan i Nagy, 2014). Salhi i Nagy (1999) i Nagy i Salhi (2005) prvi su obrađivali VRPDDP (prema: Wassan i Nagy, 2014). Nagy i ostali (2013) objašnjavaju vezu ovog problema sa ostalim VRPDP-ima, daju pregled literature, ILP formulaciju problema i heuristiku za rješavanje. Baziraju se na radu Gribkovskaia i ostali (2007) koji je obrađivao ovaj problem, ali za jedno vozilo. Benčmark instance za ovaj problem kreirali su Nagy i ostali (2015) od benčmark instanci VRP-a postavljenih u Christofides i ostali (1979) (prema: Polat, 2017). Polat (2017) je uspio značajno da unaprijedi najbolja rješenja koja su do tad pronađena za ove instance VRPDDP-a.

Gribkovskaia i ostali (2007) izdvajaju četiri vrste mogućeg rješenja VRPDDP-a: Hamiltonovo rješenje gdje se svaki klijent posjećuje samo jednom, dupli put gdje se Hamiltonov put pravi dva puta, laso rješenje i opšte rješenje. Prve tri varijante rješenja se mogu iznuditi dodavanjem odgovarajućih ograničenja VRPDDP-u. Ako se uvede ograničenje po kome je potrebno da klijenti budu opsluženi u jednoj posjeti, onda se dobija Hamiltonovo rješenje. Ako je potrebno da se tovarni prostor isprazni u potpunosti da bi se krenulo sa preuzimanjem, onda se dobija dupli put. Laso rješenje podrazumijeva da postoji ograničenje kojim se definiše koliko prostora treba da bude slobodno da bi se počelo sa simultanom isporukom i preuzimanjem. Jasno je da su prva dva rješenja ekstremne varijante laso rješenja. Sva ova rješenja podrazumijevaju da se klijentima roba isporučuje i od njih preuzima u okviru iste rute. Gribkovskaia i ostali (2007) dodaju još jedno moguće rješenje pod nazivom opšte i ono podrazumijeva da nema ograničenja vezanih za preuzimanje i isporuku robe, ali i da klijenti mogu biti na različitim rutama za isporuku i prijem robe. Oni prave i poređenje rješenja u pogledu dužine puta. Navode da je Hamiltonovo rješenje bolje od duplog puta, laso rješenje bolje od duplog puta, a opšte rješenje od laso rješenja. Laso rješenje može biti bolje od generalnog, ako se ograničeni vrijeme dolaska do rješenja (Gribkovskaia i ostali, 2007). Neka od pomenutih rješenja su rješenja poznatih VRPDP problema. Hamiltonovo rješenje je rješenje problema VRPSDP. Laso rješenje je rješenje VRPRMDDP. Za dupli put i opšte rješenje za autora su nepoznati nazivi problema, osim da se svrstavaju pod VRPDDP.

Kod **VRPRMDDP** klijenti se prvo posjećuju radi dostave, potom se simultano vrši i dostava i povrat kod preostalih klijenata, i na kraju vrši preuzimanje od klijenata koji su prvi opsluženi u svrhu dostave. Uslijed toga, putanja rješenja ima oblik lasoa. Da bi se dobilo takvo rješenje potrebno je da postoji ograničenje u pogledu procenta slobodnog prostora prije nego što se krene u simultanu dostavu i povrat. Ukoliko se stavi da je taj procenat nula dobija se Hamiltonovo rješenje, a ako je 100% onda se dobija dupli put. Prvi rad koji je obrađivao ovaj problem je rad Gribkovskaia i ostali (2001) (prema: Santos, 2020). Isti autori su objavili još radova o ovom problemu. Pored njih, ovim problemom su se bavili Hoff i ostali (2009). Oni su razvili metodu zasnovanu na TS za rješavanje VRPDP koja može da obezbijedi laso rješenje.

Zaključili su da što se povećava zahtijevani procenat slobodnog prostora rješenje se pogoršava, ali i da ne bi trebalo da on bude nula zbog poteškoća pri utovaru koje se tada javljaju. Prema njihovom mišljenju najbolje ga je držati na nekoj maloj vrijednosti.

### **VRP sa balansiranjem opterećenja na rutama**

Balansiranje opterećenja na rutama je posebna vrsta VRP-a koja podrazumijeva postojanje dodatnog cilja ili ograničenja kojim se rute prema nekom kriterijumu izjednačavaju. Taj kriterijum može biti trošak, dužina, trajanje ili kompleksnost rute, broj koleta, masa prevezene robe i sl. (Mara i ostali, 2019). Jedan od razloga balansiranja ruta jeste i zadovoljstvo vozača na poslu. To je postalo od posebne važnosti u zemljama i sredinama u kojima nedostaje vozača. Uvidjelo se da je za ostanak postojećih i dolazak novih radnika, pored primanja, važno obezbijediti zadovoljstvo radnika poslom. Jedan od uslova za to je izjednačeno opterećenje među vozačima. Neravnomjerno opterećenje može dovesti do nezadovoljstva vozača uslijed više radnih sati provedenih na poslu, vožnje zahtijevnijim putem, većeg broja utovarno-istovarnih mjesta, manjeg broja pređenih kilometara itd. Veći broj radnih sati može dovesti do većeg umora, kao i vožnja zahtijevnijim putem i obavljanje većeg broja utovara i istovara. Ako su rute sa manjim brojem kilometara, a plaćanje se vrši po kilometru, onda su i primanja manja. Uslijed većeg umora povećava se šansa za saobraćajnu nezgodu, a uslijed većeg broja istovara povećava se šansa za povredu na radu. S druge strane, ukoliko je opterećenje dobro raspoređeno, radnici će biti i učinkovitiji, manje odsustvovati sa posla i pružati bolju uslugu klijentima (Allison, 1986).

Matl i ostali (2017) su sabrali sve radove do 2017. godine koji uključuju balansiranje opterećenja na rutama u modele VRP-a i izvršili njihovu klasifikaciju. Radove su podijelili prema funkciji jednakosti (eng. *equity function*), metrici jednakosti (eng. *equity metric*), optimizacionom modelu i optimizacionom metodu. U nastavku je dat pregled pronađenih radova koji su na neki način uzeli u obzir opterećenje koje se stvara prilikom utovara i istovara pri balansiranju opterećenja na rutama. Sivaramkumar i ostali (2018) balansiraju opterećenje na rutama prema njihovom trajanju. U trajanje rute uračunavaju vrijeme provedeno u putovanju, vrijeme koje



vozač provede čekajući da opsluži klijente i vrijeme koje provede opslužujući klijente. Ističu važnost izbora tog pristupa u odnosu na balansiranje prema dužini puta, pogotovo u slučaju urbane distribucije. U funkciji cilja minimiziraju ukupni put i ukupnu nejednakost među rutama u pogledu opterećenja. Pored toga što dobijaju ravnomjernije raspoređeno opterećenje po rutama, dobili su i manje trajanje ruta nego u varijantama bez minimiziranja nejednakosti. Bashiri i Sharafi (2015) predstavili su dva modela VRP-a u kojima se pored troškova minimizira i razlika u trajanju ruta. U prvom modelu, cilj je da se poboljša jednakost među vozačima, a u drugom smanji rizik od saobraćajnih nezgoda. Troškove čine troškovi pređenog puta i sipanja goriva. Trajanje rute uključuje vrijeme putovanja do klijenta i vrijeme njegove opsluge. Prvim modelom se pokazalo, pored toga što rute postaju ujednačenije da se i čekanje klijenata na dostavu smanjuje. Drugi model omogućava smanjenje rizika od saobraćajnih nezgoda uzrokovanih umorom kod vozača koji voze duže ture.

Ramos i ostali (2014) nastoje kroz VRP model poboljšati socijalni status vozača. Stoga, kreiraju funkciju sa ciljem minimizacije maksimalnog vremena rada. U vrijeme rada uključuju vrijeme vožnje i vrijeme koje se provede na utovaru i istovaru. Poređenjem rezultata optimizacije sa rezultatima modela kojima je cilj minimizirati troškove i uticaj na okolinu, uvidjeli su da se poboljšavanjem socijalnog statusa vozača povećava put koji vozač prelazi za 10% i smanjuje proizvodnja ugljen-dioksida za 11%. Faulin i ostali (2018) u model VRP-a uvode brigu o bezbjednosti vozača. Smatraju da je ključno uvesti mjere kojim se povećava bezbjednost vozača prilikom utovara i istovara. Te mjere se u model uključuju preko ograničenja. Kako njihovo sprovođenje podrazumijeva više vremena za obavljanje utovara, istovara i kompletne ture, ispitivao se trošak koji se zbog toga stvara. Prema dobijenim rezultatima, uvođenje ovih mjera povećava trošak rješenja za 5-6%. Keskinurk i Yildirim (2011) nastoje poboljšati plan distribucije pekarskih proizvoda minimiziranjem nejednakosti u opterećenju vozača. Nejednakost je izražena kao razlika između ukupnog trajanja svake rute i one sa maksimalnim trajanjem. U ukupno trajanje rute uključuju i trajanje utovara i istovara. Pored toga uvode i ograničenje o maksimalnom trajanju rute zbog hitnosti dostave pekarskih

proizvoda. Došli su do zaključka da što je relaksiranije ograničenje o trajanju rute, manja je nejednakost. Međutim, ukupno trajanje dostave je tada veće. Lee i Ueng (1999) minimiziraju pređeni put i razliku u opterećenju vozača pri kreiranju rješenja distribucije. Opterećenje vozača se posmatra kroz trajanje rute koje se sastoji iz vremena vožnje i vremena provedenog na istovaru. Razlika u opterećenju se minimizira tako što se minimizira suma razlika između najmanje opterećene rute i svake druge rute.

## **4. MODELI OPTIMIZACIJE LOGISTIČKIH PROCESA DISTRIBUCIJE**

### **4.1. Koncept optimizacije**

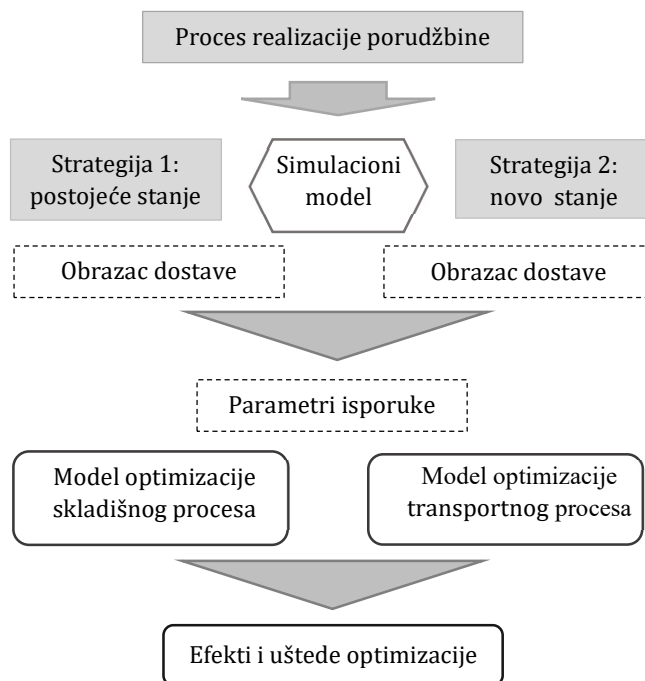
U skladu sa postavljenim ciljevima i hipotezama istraživanja, a na bazi pregleda relevantne literature definisan je koncept i razvijeni su modeli optimizacije procesa distribucije proizvoda. Koncept optimizacije se zasniva na ideji da se definišu obrasci dostave za dvije strategije distribucije:

- strategija 1 odgovara postojećem stanju distribucije (bez smanjenja broja isporuka) i
- strategija 2 podrazumijeva novo stanje u kojem je smanjen broj dnevnih, odnosno nedjeljnih isporuka za određene korisnike.

U te svrhe definisan je simulacioni model sa ciljem da se odrede parametri distribucije za definisane strategije isporuke. Da bi se utvrdile uštede u procesu skladištenja i transporta, definisana su dva modela optimizacije i to:

- model optimizacije skladišnog procesa i
- model optimizacije transportnog procesa.

Definisane strategije isporuke i razvijeni modeli optimizacije primijenjeni su na primjeru realnog sistema distribucije, na bazi čega su utvrđeni efekti i uštede koje se postižu kroz proces optimizacije (slika 4.1)



**Slika 4.1. Osnovni koncept optimizacije procesa distribucije**

Sam koncept optimizacije je zasnovan na činjenici da postoji izuzetno velika međuzavisnost između ključnih procesa distribucije i to: procesa realizacije porudžbine, procesa skladištenja i procesa transporta proizvoda. U tom smislu, proces realizacije porudžbine, kroz dinamiku poručivanja i zahtijevani broj isporuka direktno utiče na troškove distributivnih procesa. Realni distributivni sistemi su pod izuzetno jakim uticajem prodaje, što dovodi do sve učestalijih porudžbina i isporuka robe. Velika učestalost poručivanja i isporuke, relativno malih partija pošiljki, dovodi od neracionalnog trošenja resursa i povećanih troškova u skladišnom i transportnom sistemu. Pretpostavka je da u svakom distributivnom sistemu postoji određeni procenat klijenta kod kojih se može smanjiti broj isporuka, a da to ne ugrozi nivo zaliha i servis potrošača. Na ovoj pretpostavci je zasnovan koncept optimizacije, sa ciljem da se kroz smanjenje broja isporuka ostvare konkretni efekti i uštede u skladišnom i transportnom procesu distribucije proizvoda.

#### **Definisanje obrazaca dostave za strategije distribucije**

Prvo je potrebno vremenski definisati obrazac dostave, tj. da li se on odnosi na dan, sedmicu ili neki drugi period. U okviru obrasca dostave potrebno je definisati

termine dostave. Potom je potrebno za svakog klijenta definisati prosječni obrazac dostave prema tome da li u nekom terminu ima dostavu ili ne. U odnosu na to koliko jedinica isporuke u prosjeku primaju na dan, klijenti se dijele na  $tip_1, tip_2, \dots, tip_n$ . Prema njihovom broju, dobija se raspodjela gdje su njihove relativne frekvencije izražene u procentima ( $f_{r1}, f_{r1}, \dots, f_n$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} tip_1 \quad tip_2 \quad \dots \quad tip_n \\ f_{r1} \quad f_{r2} \quad \dots \quad f_{rn} \end{array} \right\} \quad (1)$$

U okviru svakog tipa, klijenti se dijele prema obrascu dostave kojem pripadaju ( $obr_{11}, obr_{12}, \dots, obr_{1m}$ ). U zavisnosti od toga koliko klijenata ima koji obrazac dostave, dobijaju se udjeli ( $f_{r11}, f_{r12}, \dots, f_{r1m}$ ) svakog od obrazaca dostave u okviru svakog tipa klijenata ( $tip_1, tip_2, \dots, tip_n$ ):

$$tip_1 = \left\{ \begin{array}{l} obr_{11} \quad obr_{12} \quad \dots \quad obr_{1m} \\ f_{r11} \quad f_{r12} \quad \dots \quad f_{r1m} \end{array} \right\}, tip_2 = \left\{ \begin{array}{l} obr_{21} \quad obr_{22} \quad \dots \quad obr_{2m} \\ f_{r21} \quad f_{r22} \quad \dots \quad f_{r2m} \end{array} \right\}, \dots, tip_n = \left\{ \begin{array}{l} obr_{n1} \quad obr_{n2} \quad \dots \quad obr_{nm} \\ f_{rn1} \quad f_{rn2} \quad \dots \quad f_{rnm} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Povratni tok pošiljki od klijenata (*povrat*) takođe opisuje strategiju distribucije. Dat je udjelima ( $udio_1, udio_2, \dots, udio_2$ ) klijenta koji imaju povrat u ukupnom broju onih koji se opslužuju po periodima opsluge ( $period_1, period_2, \dots, period_p$ ) i ukupnim brojem jedinica povrata koji se preuzima od svakog klijenta koji ima povrat. Klijenti mogu vratiti robu u skladište samo u periodu opsluge u kojem je i primaju. Ako je primaju u više perioda opsluge, onda samo u jednom od njih mogu i da je vrate.

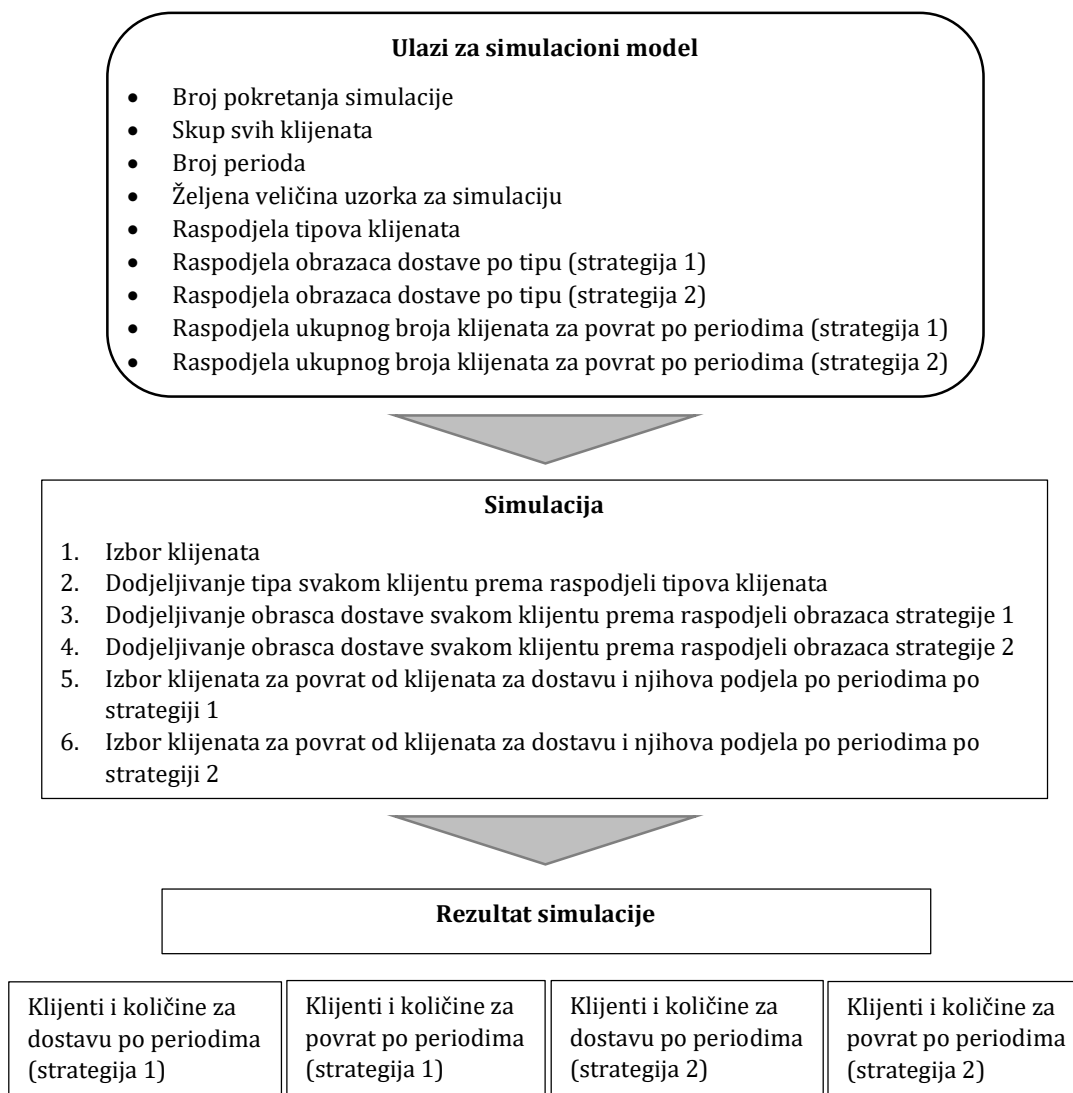
$$povrat = \left\{ \begin{array}{l} period_1 \quad period_2 \quad \dots \quad period_p \\ udio_1 \quad udio_2 \quad \dots \quad udio_p \end{array} \right\} \quad (3)$$

Na ovaj način je opisana strategija 1 distribucije. Strategija 2 distribucije dobija se promjenom obrazaca dostave kod određenog broja klijenata. Ona je opisana kao i strategija 1, samo sa drugim obrascima dostave i relativnim frekvencijama. U

strategiji 2 se takođe mijenja povratni tok, promjenom udjela klijenata koji imaju povratne pošiljke i njihovih količina.

### Simulacioni model

Da bi se definisale instance i parametri distribucije za različite strategije, predložen je simulacioni model koji je prikazan na slici 4.2.



**Slika 4.2. Simulacioni model distribucije**

Na bazi rezultata dobijenih višestrukim pokretanjem simulacionog modela proračunavaju se prosječne vrijednosti parametara procesa realizacije porudžbine za određenu strategiju. Pod parametrima procesa realizacije porudžbine se

podrazumijevaju prosječan broj posjeta klijentu u jednom obrascu dostave, prosječan broj jedinica isporuke klijentu u jednom obrascu dostave, prosječan broj jedinica isporuke u posjeti i prosječan broj jedinica povrata u obrascu dostave. Prosječan broj jedinica isporuke u jednom obrascu dostave predstavlja ulazni podatak za optimizaciju skladišnog procesa i proračun troškova radnika koji ga realizuju. Za skladišni proces se kreira jedan PRR za strategiju 1 i jedan za strategiju 2, oba bazirana na prosječnom broju isporuka i njihovoj raspodjeli u posmatranom periodu. U slučaju transportnog procesa, optimizacija se vrši za svaku instancu distribucije. Cilj je da se za različite skupove klijenata proračunaju troškovi transportnog procesa, kako bi se dobio što relevantniji rezultat. Ulazni podaci su lokacije klijenata, broj jedinica isporuke i broj jedinica povrata u svakom periodu opsluge. Za svaki period opsluge se VRP rješava odvojeno. Pri tom, kao rješenje se bilježi pređeni put, broj ruta i vrijeme opsluge. Nakon rješavanja svih instanci, rezultati za sve instance se sabiraju. Poređenjem rezultata za dvije strategije, dobijaju se razlike u procesu realizacije porudžbine, troškovima transportnog i skladišnog procesa. Poređenjem parametara procesa realizacije porudžbine za jednu i drugu strategiju dobijaju se efekti optimizacije na funkcionisanje distribucije. Na osnovu razlike u troškovima skladišnog i transportnog procesa dobija se odgovor koja je strategija bolja i koliko.

## **4.2. Model optimizacije skladišnog procesa**

Za optimizaciju skladišnog procesa razvijen je model za rješavanje PRR u distributivnom skladištu (DS-PRR) (Popović i ostali, 2021). DS-PRR je problem izbora smjena, određivanja broja radnika po smjenama i profilima, i dodjeljivanja radnika aktivnostima tokom dana u skladištu. Aktivnost predstavlja jednu vrstu posla u skladištu koja zahtijeva određen broj radnika za njezinu realizaciju tokom radnog vremena. Svaka aktivnost je određena zahtijevanim brojem radnika po intervalima radnog dana, profilom radnika koji je mogu obavljati, rokom za ispunjenje zahtjeva za radnicima, eventualnom zavisnošću od druge aktivnosti. U skladištu postoji skup smjena sa punim radnim vremenom i skup smjena sa skraćenim radnim vremenom. Radnici mogu da obavljaju aktivnosti u skladu sa matricom kompatibilnosti profila radnika i aktivnosti. Cijena angažovanja radnika

zavisi od njegovog profila. Svaki radnik smjene sa punim radnim vremenom mora biti slobodan bar jedan interval u okviru definisanog perioda dana.

Dakle, da bi se riješio DS-PRR potrebno je:

1. Izabrati smjene i odrediti broj radnika po smjenama i profilima minimizirajući troškove radne snage;
2. Odrediti kad se koja aktivnost realizuje i sa koliko radnika;
3. Napraviti raspored radnika po intervalima smjene dodjeljujući im aktivnosti ili odmor;
4. Odrediti ukupni trošak rješenja.

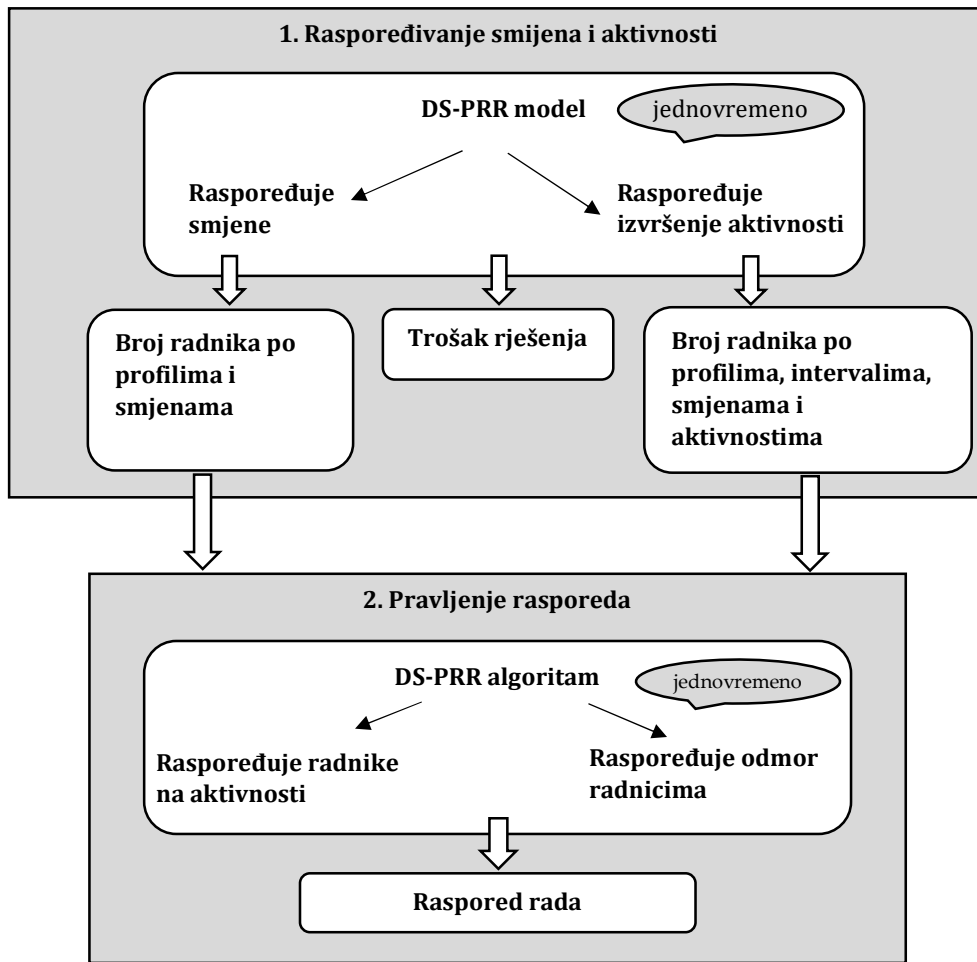
Sve to u uz poštovanje ograničenja o:

1. Ispunjenju zahtjeva za radnicima u definisanom roku;
2. Kompatibilnosti profila radnika i vrste aktivnosti;
3. Predviđenom periodu za odmor.

#### **Metoda rješavanja DS-PRR-a**

Za rješavanje postavljenog DS-PRR razvijena je metoda koja se sastoji od matematičkog modela DS-PRR i algoritma za raspoređivanje radnika na aktivnosti i odmor (DS-PRR algoritam) (Popović i ostali, 2021). Razvijena metoda predstavljena je grafički na slici 4.3.





**Slika 4.3. Metoda rješavanja DS-PRR-a**

### DS-PRR model

DS-PRR model je ILP model koji ima sledeću formu.

$$\min: \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} c_t * y_{tj} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{k=i}^{until} x_{aijk} * b_{kj} = d_{ai}, \quad \forall i \in N, \forall a \in B \cap A_1; \text{until} = \min(i + v_a, n) \quad (5)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{k=i}^{until} x_{aijk} * b_{kj} = d_{ai}, \quad \forall i \in N, \forall a \in B \cap A_2; \text{until} = r_a \quad (6)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{k'=k}^{until} x_{akjk'} * b_{kj} \geq \sum_{a \in G_a} s_a * \sum_{j \in M} \sum_{i \in N} x_{aijk}, \forall k \in N, \forall a \in C \cap A_1;$$

$$until = \min(k + v_a, n) \quad (7)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{k'=k}^{until} x_{akjk'} * b_{kj} \geq \sum_{a \in G_a} s_a * \sum_{j \in M} \sum_{i \in N} x_{aijk}, \forall k \in N, \forall a \in C \cap A_2; \quad until = r_a \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^k x_{aijk} = \sum_{t \in T_a} y_{tija}, \quad \forall k \in N; \forall j \in M, \forall a \in A \quad (9)$$

$$\sum_{a \in H_t} y_{tija} \leq y_{tj}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in M} \sum_{a \in A} y_{tija} \leq q, \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$\sum_{\forall i \in O_j} \sum_{a \in H_t} y_{tija} \leq (f - p) * y_{tj}, \quad \forall t \in T, \forall j \in M_1 \quad (12)$$

$$\sum_{j \in M_2} \sum_{t \in T} y_{tj} \leq w * \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} y_{tj} \quad (13)$$

$$\sum_{t \in T} y_{tj} \leq bignumber * y_j, \quad \forall j \in M \quad (14)$$

$$\sum_{j \in M_1} y_j \leq s_{1max} \quad (15)$$

$$\sum_{j \in M_2} y_j \leq s_{2max} \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{a \in E_t} y_{tija} * b_{ij} \leq e * b_{ij} * \sum_{i \in N} \sum_{a \in H_t} y_{tija}, \quad \forall t \in T, \forall j \in M \quad (17)$$

$$\sum_{j \in M_1} \sum_{t \in T} y_{tj} * b_{ij} \geq \frac{1}{bignumber} \sum_{j \in M_2} \sum_{t \in T} y_{tj} \quad \forall i \in N \quad (18)$$

$$integer: x_{aijk}, y_{tija}, y_{tj}, y_j \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall a \in A, \forall t \in T, \forall k \in N \quad (19)$$

Funkcija cilja (4) teži da minimizira troškove radne snage. Ograničenja (5, 6, 7, 8) osiguravaju da se zahtjevi za radnicima ispune u predviđenom vremenu. Ograničenje (9) reguliše da ukupan broj radnika koji obavlja neku aktivnost u nekom intervalu bude jednak predviđenom broju radnika tog profila u tom intervalu. Ograničenje (10) reguliše da ukupan broj radnika nekog profila u nekom intervalu angažovanih na svim aktivnostima ne može biti veći od ukupnog broja radnika tog profila u smjeni. Ograničenje (11) reguliše da ukupan broj radnika koji radi u skladištu ne može da bude veći od maksimalnog dozvoljenog broja radnika u bilo kom intervalu radnog dana. Ograničenje (12) osigurava da svaki radnik ima odmor predviđene dužine u definisanom vremenu. Ograničenje (13) sprječava prevelik broj radnika u smjenama sa skraćenim radnim vremenom. Ograničenje (14) obezbjeđuje podatak o broju radnika u smjeni bez obzira na profil. Ograničenjima (15 i 16) definiše se željeni maksimalni broj smjena sa punim radnim vremenom i sa skraćenim radnim vremenom. Ograničenje (17) reguliše vrijeme provedeno u obavljanju aktivnosti koje nisu primarne određenom profilu. Ograničenje (18) postavlja obavezu prisustva bar jednog radnika sa punim radnim vremenom u svakom intervalu. Ograničenje (19) definiše prirodu promjenljivih. Tabela 4.1. daje opis svih ulaznih i izlaznih veličina DS-PRR modela.

**Tabela 4.1. Ulazi i izlazi DS-PRR modela**

| <b>Ulazi</b>      | <b>Opis</b>   |
|-------------------|---|
| <b>Vrijeme</b>    |   |
| $N$               | Skup intervala radnog dana  |
| $M$               | Skup svih smjena  |
| $M_1$             | Skup smjena sa punim radnim vremenom  |
| $M_2$             | Skup smjena sa skraćenim radnim vremenom  |
| $s_1$             | Maksimalni broj smjena sa punim radnim vremenom   |
| $s_2$             | Maksimalni broj smjena sa skraćenim radnim vremenom   |
| $n$               | Redni broj posljednjeg intervala radnog dana  |
| $b_{kj}$          | Parametar koji ima vrijednost 1 ako $k \in N$ je dio smjene $j \in M$ ; u suprotnom je 0.   |
| <b>Aktivnosti</b> |   |
| $A$               | Skup svih aktivnosti  |
| $B$               | Skup nezavisnih aktivnosti  |
| $C$               | Skup zavisnih aktivnosti  |
| $G_a$             | Skup aktivnosti od kojih aktivnost $a \in C$ zavisi   |
| $d_{ai}$          | Potrebe za radnicima aktivnosti $a$ u intervalu $i$   |
| $s_a$             | Procenat zavisnosti aktivnosti $a \in C$ od aktivnosti $a' \in G_a$ (u decimalnom broju)  |
| <b>Rokovi</b>     |   |
| $A_1$             | Skup aktivnosti sa vremenskim prozorom kao rokom za završetak   |
| $v_a$             | Veličina vremenskog prozora za završetak aktivnosti $a \in A_1$ (u intervalima)   |
| $A_2$             | Skup aktivnosti sa vremenskim prozorom predstavljenim rednim brojem intervala do kada se mora obaviti                                     |
| $r_a$             | Interval do koga se mora zadovoljiti potreba za radnicima aktivnosti $a \in A_2$  |
| <b>Radnici</b>    |   |
| $T$               | Skup svih profila radnika   |
| $T_a$             | Skup svih profila radnika kojima je dozvoljeno da obavljaju aktivnost $a$   |
| $H_t$             | Skup svih aktivnosti koje radnik profila $t \in T$ može da obavlja  |
| $E_t$             | Skup aktivnosti koje nisu primarne za radnika profila $t \in T$   |
| $c_t$             | Trošak radnika profila $t$  |
| $q$               | Maksimalni dozvoljeni broj radnika koji može raditi u isto vrijeme  |
| $p$               | Trajanje pauze (u intervalima)  |
| $f$               | Veličina vremenskog prozora (u intervalima)   |
| $O_j$             | Skup intervala dozvoljenih za pauzu u smjeni $j \in M_1$  |
| $w$               | Maksimalno dozvoljeni procenat radnika sa skraćenim radnim vremenom (u decimalnom broju)  |
| $e$               | Maksimalno dozvoljeni udio vremena proveden na obavljaju aktivnosti koje nisu primarne (u decimalnom broju)                               |
| <b>Izlazi</b>     |   |
| $y_j$             | Ukupan broj radnika u smjeni $j \in M$  |
| $y_{tj}$          | Broj radnika profila $t \in T$ dodijeljenih smjeni $j \in M$  |
| $y_{tija}$        | Broj radnika profila $t \in T$ dodijeljenih aktivnosti $a \in A$ u intervalu $i \in N$ smjene $j \in M$                                   |
| $x_{aijk}$        | Broj radnika dodijeljenih intervalu $i \in N$ smjene $j \in M$ da ispuni potrebu za radnicima aktivnosti $a \in A$ iz intervala $k \in N$ |

## DS-PRR algoritam

Pseudokod DS-PRR algoritma prikazan je narednim algoritmom (algoritam 1).

### Algoritam 1 - Pseudokod za DS-PRR algoritam

1. Kreiraj radnike svakog profila svake smjene na osnovu vrijednosti  $y_{tj}$
2. U svakom skupu radnika iste smjene i istog profila dodijeli radnicima redne brojeve
3. Za svakog radnika napravi niz praznih intervala čiji broj odgovara broju intervala smjene u kojoj radi
4. Dodijeli svakom radniku aktivnost u svakom intervalu njegove smjene na bazi vrijednosti  $y_{tij}$ . Aktivnosti uvijek dodjeljuj počevši od prvog radnika u skupu
5. Ukoliko je u nekom intervalu manji broj aktivnosti od radnika u smjeni, radniku koji ne dobije aktivnost dodijeliti nulu i označiti taj interval kao slobodan za tog radnika
6. Ponavljaj
  - a. Uzmi smjenu  $s$  iz skupa smjena  $M$ , smanji skup za tu smjenu:
    - i. Ako ima radnika u smjeni  $s$  onda
      1. Ponavljaj
        - a. Uzmi profil  $t$  iz skupa profila radnika  $T$ 
          - i. Ako ima radnika profila  $t$
          - ii. Ponavljaj
            1. Ako smjena  $s \in M_1$ , izbroji za svakog radnika smjene  $s$  i profila  $t$  broj slobodnih intervala u periodu predviđenom za odmor u smjeni  $s$
            2. Ako smjena  $s \in M_2$ , izbroji za svakog radnika smjene  $s$  i profila  $t$  broj slobodnih intervala u cijeloj smjeni
            3. Nađi radnika sa najvećim brojem slobodnih intervala  $r_{max}$  i radnika sa najmanjim brojem slobodnih intervala  $r_{min}$
            4. Ako je  $r_{max} - r_{min} > 1$ :
              - a. Prvom slobodnom intervalu radnika  $r_{max}$  dodijeli aktivnost radnika  $r_{min}$  iz tog intervala, a radniku  $r_{min}$  taj interval postavi da je slobodan i dodijeli mu nulu
          - iii. Dok postoji razlika u broju slobodnih intervala između dva radnika veća od 1
        2. Dok ima profila u skupu profila  $T$
    7. Dok ima smjena u skupu smjena  $M$

## 4.3. Model optimizacije transportnog procesa

Za optimizaciju transportnog procesa razvijen je model VRP-a za distribuciju proizvoda (DP-VRP). S obzirom da se danas mnoge firme u Evropi suočavaju sa nedostatkom vozača, VRP je modeliran tako da može da uzme u obzir i želje vozača. Sve u cilju poboljšanja uslova rada vozača i njegovog ostanka na poslu. Prepoznato

je da vozači ne vole da rade utovarno – istovarne operacije. Pored toga, dokazano je da obavljajući te poslove često zadobijaju povrede. Stoga, u model DP-VRP-a je dodato ograničenje o maksimalnom trajanju utovarno-istovarnih operacija u okviru jedne rute (*u-i* ograničenje).

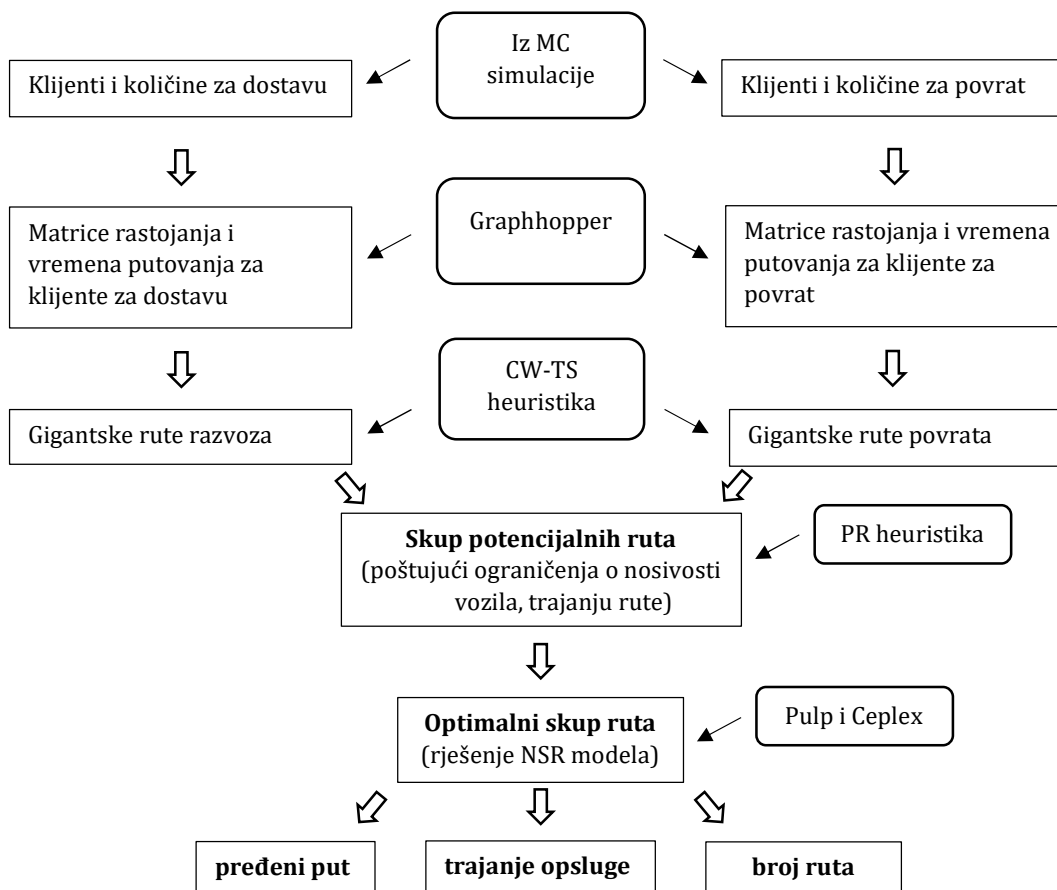
### **Postavka DP-VRP-a**

Potrebno je odrediti rute kojima se opslužuju klijenti tako da ukupna dužina pređenog puta bude minimalna. Dužina puta predstavlja trošak rješenja. Klijenti se opslužuju u svrhu dostave proizvoda koje su poručili, a pojedini od njih i zbog vraćanja proizvoda ili ambalaže (povrata) u distributivno skladište. Politika distributivne firme je da se u vozilu nikada ne miješa roba koja se isporučuje sa robom koja se vraća u distributivno skladište. Zbog te politike, rute vozila moraju biti takve da obezbjeđuju prvo obilazak svih klijenata radi isporuke. Potom, u drugom dijelu, da se klijenti posjećuju zbog preuzimanja povrata i prevoza u distributivno skladište. Povrat u nekom periodu opsluge može da se preuzima samo od klijenata koji su prethodno imali isporuku proizvoda u tom periodu opsluge. Svaki klijent kojem se roba isporučuje ne mora imati i povrat. Ruta ne može da bude sastavljena samo od klijenata koji imaju jedino povrat. Klijent koji ima povrat ne mora biti opslužen u okviru iste rute kojom mu je roba isporučena. Takođe, potrebno je da se poštuje ograničenje o kapacitetu vozila i maksimalnom trajanju rute. Sva vozila su istog kapaciteta. Njihov broj nije ograničen.

Ovako definisan problem generalno može se svrstati među VRPDDP-e. Pripadnost ovoj grupi VRP-a je zbog činjenice da klijenti mogu imati i dostavu i povrat i da se oni mogu realizovati u dvije posjete. Razlika, u odnosu na opšti VRPDDP, je što ne moraju svi klijenti da imaju i dostavu i povrat. U pogledu rješenja koje se dobija za njega, ono je miks duplog puta i opšteg rješenja. Sličnost sa duplim putem se ogleda u tome što je potrebno da se prvo realizuju sve isporuke, pa onda da se vrše preuzimanja povrata robe. Sličnost sa opštom rutom proizlazi iz mogućnosti da klijent koji ima i isporuku i povrat može biti opslužen jednom rutom za dostavu a drugom za povrat. Ukoliko se uvede ograničenje o trajanju vremena utovara i istovara na ruti, rješavani VRP se pridružuje i grupi VRP-a koji se bave balansiranjem opterećenja na rutama i socijalno održivim VRP-ima.

## Metoda rješavanja DP-VRP-a

Metoda rješavanja DP-VRP-a podrazumijeva primjenu razvijenih heuristika, egzaktnog modela i eksternih softvera (slika 4.4). Heuristike i modeli su razvijeni za potrebe rješavanja DP-VRP-a. Razvijena je heuristika za kreiranje gigantskih ruta razvoza i povrata (GRRP heuristika) i heuristika za pravljenje potencijalnih ruta (PR heuristika). Egzaktni model služi za izbor najboljeg skupa ruta (NSR model). Eksterni softveri koji se koriste su Graphhopper, Pulp i Cplex dodaci Pythonu.



Slika 4.4. Metoda rješavanja DP-VRP-a

### GRRP heuristika

GRRP heuristika je bazirana na CW heuristici, TS metaheuristici i 2-opt algoritmu. CW heuristika ili algoritam ušteda je daleko najpoznatiji pristup rješavanju VRP-a (Larson i Odoni, 1999). Ideja na kojoj se zasniva je jednostavna. Ako postoji jedno distributivno skladište  $D$  i  $n$  lokacija koje treba opslužiti, onda se to može uraditi

obilazeći svaki čvor posebno. Ukupna dužina puta koji bi se tada prešao je  $2 * \sum_{i=1}^n d(D, i)$ . Ukoliko bi se u jednoj ruti obišla dva čvora, recimo  $i$  i  $j$ , tada bi se ukupna dužina puta smanjila za vrijednost  $s(i, j)$ .

$$s(i, j) = 2d(D, i) + 2d(D, j) - [d(D, i) + d(i, j) + d(D, j)] = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j) \quad (20)$$

Vrijednost  $s(i, j)$  predstavlja uštedu koja nastaje opslugom čvorova  $i$  i  $j$  u jednoj ruti, umjesto da se svaki opslužuje posebno. Što je veća ušteda  $s(i, j)$ , to je za ukupnu dužinu puta bolje da se ti čvorovi nađu u jednoj ruti. Čvor  $i$  i  $j$  se mogu kombinovati u jednoj ruti samo ako se time ne krše postavljena ograničenja VRP-a. Postoje dvije vrste CW algoritma, sekvencijalni i paralelni. Prvi podrazumijeva da se kreira gigantska ruta pa na neki način od nje prave rute. Drugi podrazumijeva da se sve rute prave paralelno. U ovoj disertaciji je korišćen prvi tip i on se može opisati u vidu pseudokoda datog algoritmom 2.

#### **Algoritam 2 – Pseudokod za sekvencijalni tip CW heuristike**

1. *Izračunaj uštede za svaki par čvorova*
2. *Rangiraj uštede u opadajućem nizu*
3. *Uključi granu (i, j) u rutu ako se time ne krši nijedno ograničenje i ako:*
  - a. *ni tačka i ni tačka j nisu već uključene u rutu (važi samo za tačke prve uštede) ili*
  - b. *je jedna od njih već uključena u postojeću rutu, ali nije unutrašnja tačka u ruti (tačka je unutrašnja u ruti ukoliko nije susjedna početnoj tački D)*
4. *Kada je lista ušteda potrošena do kraja završiti sa algoritmom*

S obzirom da se u ovoj disertaciji rješava VRP sa isporukom i povratom, odvojeno je računata gigantska ruta za razvoz i za povrat. U oba slučaja računato je više gigantskih ruta. Prije računanja postavljeno je da gigantske rute razvoza počinju u distributivnom skladištu, ali da mogu da se završe u bilo kojoj tački razvoza. Gigantske rute povrata su računate tako da svaki razvozni čvor  $R$  bude početni čvor jedne povratne rute. Svaka od njih se završavala u distributivnom skladištu. Formula za računanje ušteda za gigantsku razvoznu rutu data je u nastavku, a poslije nje i za uštede pri računanju gigantske povratne rute.

$$s(i, j) = d(D, i) + d(D, j) - [d(D, i) + d(i, j)] = d(D, i) - d(i, j) \quad (21)$$



$$s(i, j) = d(R, i) + d(i, D) + d(R, j) + d(j, D) - [d(R, i) + d(i, j) + d(j, D)] = d(i, D) + d(R, j) - d(i, j) \quad (22)$$

Po formiranju gigantskih ruta, pristupa se njihovom poboljšanju pomoću 2-opt algoritma i TS metaheuristike. TS je jedna od najčešće korišćenih metaheuristika za rješavanje VRP-a. Predložio ju je Glover (1986), a Hansen (1986) značajno unaprijedio (Teodorović, 2007). Ukratko, podrazumijeva da se prilikom pretrage rješenja, stavlja tabu ili zabrana posjete određenom rješenju trajno ili određeni broj iteracija. Za vrijednost tabua u GRRP heuristici stavljeno je da se kreće u opsegu od  $[tabu_{max\_vrijednost} - 3, tabu_{max\_vrijednost}]$ , pri čemu je  $tabu_{max\_vrijednost} = \max(5, \text{zaokruženo}(\text{broj\_klijenata}/4.5))$ . To znači da se za četiri vrijednosti tabua ispituje da li se može dobiti bolja gigantska ruta. Ukoliko se dobije bolja, pamti se i prethodna u slučaju razvoza. U slučaju povrata, pamti se samo najbolja. Kako je TS metaheuristika primijenjena u okviru GRRP heuristike prikazano je algoritmom 3. U algoritmu  $x_{cw}$  predstavlja rješenje iz CW heuristike koje ima svoju dužinu i niz brojeva koji predstavljaju redoslijed obilaska klijenata,  $x_o$  predstavlja najbolje pronađeno rješenje tokom pretrage,  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  predstavlja skup rješenja nastalih od  $x_o$  pomoću 2-opt algoritma i  $tabu_{long}(i)$  predstavlja listu sa penalima za zamjene koja su vršene više puta.

### Algoritam 3 – Pseudokod za TS u okviru GRRP heuristike

---

1. Dodaj u skup rješenja  $S$  rješenje  $x_{cw}$ ,  $i$
2. Postavi  $tabu_{long} = 0$  i  $tabu_{vrijednost} = tabu_{max\_vrijednost} - 3$
3. Ponavljaj
  - a. Postavi da je  $tabu$  lista prazna, da je  $it$  iterator nula i da je  $x_o = x_{cw}$
  - b. Ponavljaj
    - i. Pomoću 2-opt algoritma generiši susjedna rješenja od  $x_o$ , tj.  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
    - ii. Od  $i = 1$  do  $n$ 
      1. Ako je  $x_i$  najbolje rješenje do sad i ne nalazi se u  $S$ ,
        - a. postavi da je  $x_b = x_i$ ,  $x_o = x_i$  i  $it = it + 1$
      2. Drugačije, ako je  $tabu(i) = 0$ ,  $x_i + tabu_{long}(i)$  bolje od  $x_o$  i  $x_i$  se ne nalazi u  $S$ :
        - a. postavi da je  $x_o = x_i$ ,  $it = it + 1$
    - iii. Ažuriraj  $tabu$  i  $tabu_{long}$  listu za  $x_b$  ako ima novo  $x_b$ . Ako nema, onda ažuriraj za  $x_o$
    - c. Dok je  $it < broj\ klijenata$
    - d. Ako postoji, dodaj  $x_b$  u skup rješenja  $S$ . Ako je povrtana ruta, zamijeni ga sa prethodnim. Povećaj  $tabu_{vrijednost}$  za 1
  4. Dok je  $tabu_{vrijednost} \leq tabu_{max\_vrijednost}$
  5. Vрати skup rješenja

---

Susjedstvo nekog rješenja se generiše uz pomoć 2-opt algoritma. Ovaj algoritam je uveo Croes (1958). Zasniva se na ideji da se u ruti uklone dvije grane i potom ona rekonstruiše, kako bi se došlo do boljeg rješenja. Opisan je algoritmom 4 (Teodorović, 2021).

### Algoritam 4 – Pseudokod za 2-opt algoritam

---

1. Konstruisati početnu rutu
  2. Neka je  $(a_1, a_2, \dots, a_n, a_1)$  početna ruta,  $D$  njena dužina i  $i = 1$
  3. Neka je  $j = i + 2$
  4. Ukloniti grane  $(a_i, a_{i+1})$  i  $(a_j, a_{j+1})$  i konstruisati novu rutu  $(a_1, a_2, \dots, a_i, a_j, \dots, a_{i+1}, a_{j+1}, a_{j+2}, \dots, a_1)$ . Ukoliko nova ruta ima dužinu manju od  $D$ , zapamtiti novu rutu i vratiti se na korak 2. U suprotnom slučaju preći na korak 5.
  5. Neka je  $j = j + 1$ . U slučaju kada je  $j \leq n$  vratiti se na korak 4. U suprotnom slučaju povećati  $i$  za 1 ( $i = i + 1$ ). Ako je  $i \leq n - 2$  preći na korak 3. U suprotnom slučaju završiti sa algoritmom.
- 

U okviru GRRP heuristike 2-opt algoritam je korišćen tako što se za svako  $i$  generisalo jedno rješenje susjedno početnom. U slučaju razvoznih ruta, algoritam je korigovan tako da je dozvoljeno da i zadnji čvor u ruti može da mijenja poziciju, jer on nije distributivno skladište. U slučaju povratnih ruta prvi i poslednji čvor nisu bili

isti, pa je i algoritam korigovan prema tome. Kod povratnih ruta prvi čvor je zadnji razvozni, a distributivno skladište je poslednji čvor.

## PR heuristika

Pseudokod PR heuristike prikazan je algoritmom 5.

### Algoritam 5 – Pseudokod za PR heuristiku u skraćenom obliku

---

1. Iniciraj skup gigantskih razvoznih ruta
    - a. Ponavljaj
      - i. Uzmi gigantsku rutu razvoza iz skupa gigantskih ruta razvoza,
        1. Smanji taj skup za tu rutu
        2. Od gigantske rute razvoza generiši potencijalne rute koje sadrže samo razvozne klijente
        3. Dodaj generisane rute u skup potencijalnih ruta, ako se već ne nalaze u njemu
        4. Iniciraj skup gigantskih povratnih ruta
        5. Ponavljaj
          - a. Uzmi gigantsku rutu povrata iz skupa gigantskih ruta povrata,
          - b. Smanji taj skup za tu rutu
          - c. Od gigantske rute razvoza i gigantske rute povrata generiši sve potencijalne rute
          - d. Dodaj generisane rute u skup potencijalnih ruta, ako se već ne nalaze u njemu
        6. Dok god skup gigantskih ruta povrata nije prazan
      - b. Dok god skup gigantskih ruta razvoza nije prazan
  2. Vрати skup potencijalnih ruta
- 

Potencijalne rute se generišu u skladu sa ograničenjem za maksimalni broj jedinica robe koji se može utovariti na vozilo, ograničenjem za maksimalno dozvoljeno trajanje rute i  $u$ -i ograničenjem. Detaljniji opis ove heuristike se nalazi u Prilogu 1.

## NSR model

NSR model je dat kao model disjunktnog pokrivanja skupa (eng. *set-partitioning model*):

$$\min \sum_{j \in N} c_j x_j \quad (23)$$

tako da:

$$\sum_{j \in N} a_{ij} x_j = 1 \quad \forall i \in M \quad (24)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in N \quad (25)$$

Gdje je  $N$  skup svih ruta,  $M$  skup svih klijenata i:

$x_j = 1$ , ako je ruta  $j$  izabrana u optimalni skup ruta (promjenljiva)

$c_j$  dužina rute  $j$  (parametar)

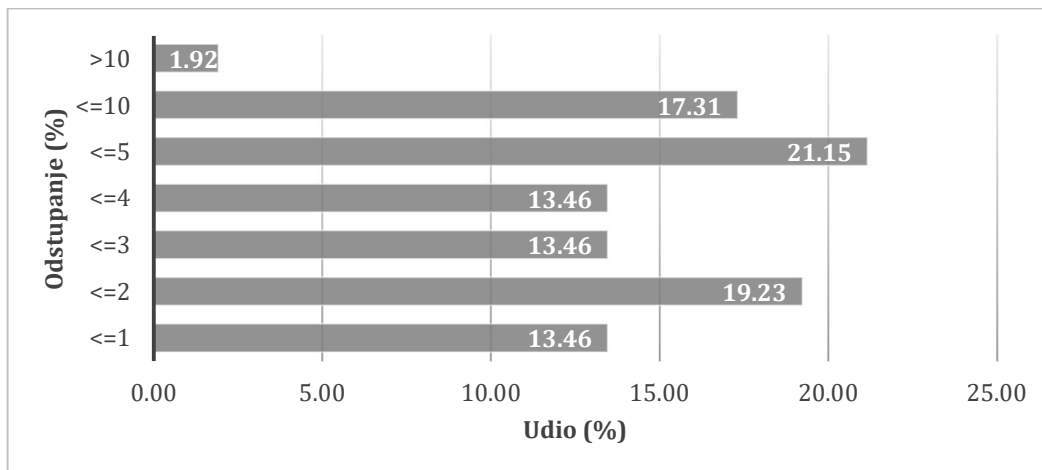
$a_{ij} = 1$  ako je klijent  $i$  uključen u rutu  $j$  (parametar)

### **Testiranje na benčmark instancama**

Da bi se uvidio kvalitet predložene metode, ona je testirana na benčmark instancama VRPB-a. Tačnije, testiran je njen dio koji se sastoji od GRRP heuristike, PR heuristike i NSR modela. Za dozvoljeno trajanje rute i utovarno-istovarnih operacija, koje je prisutno u PR heuristici, definisane su velike vrijednosti, tako da ne utiču na rješenje. Za testiranje su uzete benčmark instance VRPB-a, jer nisu pronađene instance za VRPDDP koji je rješavan u ovoj disertaciji. S druge strane, rješavani oblik VRPDDP-a dijelom odgovara VRPB-u, jer ne zahtijeva da klijenti koji imaju povrat budu na istoj ruti na kojoj im se roba isporučuje. Glavna razlika je što kod VRPB-a klijenti ili imaju dostavu ili povrat, dok kod VRPDDP-a imaju oboje. Testiranje je rađeno na instancama VRPB-a koje su uveli Goetschalckx i Jacobs-Blecha (1989), njih 68 ukupno. Svaka instanca sadrži od 25 do 200 klijenata, zadat broj ruta koje rješenje treba da ima i kapacitet vozila. Svaki klijent je opisan Kartezijevim koordinatama i količinom koja treba da mu se dostavi ili preuzme od njega. Klijenti su podijeljeni na one kojima se roba dostavlja i od kojih se roba preuzima. Instance i najbolja do sad poznata rješenja su preuzeta sa sajta <http://www.vrp-rep.org/>. Kao najbolja rješenja navedena su ona objavljena u radu Queiroga i ostali (2019).

Da bi se razvijena metoda mogla testirati na benčmark instancama VRPB-a potrebno je bilo dodati u LP model ograničenje o tačnom broju ruta koje rješenje treba da ima, a izbaciti  $u$ -i ograničenje i ograničenje o maksimalnom trajanju ruta iz GRRP i PR heuristike. Za svaku instancu, matrica najkraćih rastojanja je izračunata preko Euklidove formule. Pokazalo se da su rješenja dobijena pomoću predstavljene metode za većinu instanci ista ili neznatno lošija od najboljih poznatih. Za nekoliko instanci su rješenja značajno lošija ili se do njih nije moglo doći za zadati broj ruta.

Tu se radi o instancama koje imaju više od 125 klijenata za dostavu i povrat. U slučaju da se nije moglo doći do rješenja za zadati broj ruta, njihov broj je povećavan za 1 i došlo se do rješenja. Uzrok nešto lošijih rješenja može da leži u činjenici da je algoritam prilagođen problemu koji je rješavan u ovoj disertaciji, a on se sa svojim specifičnostima razlikuje od VRPB-a. Stoga, usvojeno je da se predložena metoda može koristiti za potrebe ove disertacije. Od ukupnog broja raspoloživih instanci, tj. njih 62, riješeno je 52 ili 83.89%. Od ukupnog broja riješenih instanci, 11.5% je riješeno tako što je povećan broj dozvoljenih ruta za 1. Raspodjela odstupanja rješenja dobijenih metodom za rješavanje DP-VRP-a od benchmark rješenja data su na grafiku ispod (slika 4.5).



**Slika 4.5. Raspodjela odstupanja dobijenih od benchmark rješenja**

## 5. TESTIRANJE I PRIMJENA MODELA

Razvijeni modeli su testirani i primijenjeni na realnom primjeru jedne distributivne kompanije iz Beograda. Taj distributer vrši distribuciju za svoje objekte na teritoriji Beograda (gradsku distribuciju) i na teritoriji ostatka Srbije bez Kosova i Metohije (nacionalnu distribuciju). Postavljena je strategija 1 distribucije na bazi postojećeg načina funkcionisanja distribucije i strategija 2 kao nova strategija dobijena smanjenjem broja posjeta klijentima i broja jedinica isporuke. Potrebno je ispitati kakve će efekte imati strategija 2 na funkcionisanje distribucije i na troškove skladišnog i transportnog sektora. Strategija 2 distribucije je donesena na bazi analize strategije 1 u pogledu količina koje se isporučuju i hitnosti dostave. U skladu s tim, određeni broj klijenata robu će dobijati manje puta nego ranije. Za određeni broj klijenata to će značiti i manji broj jedinica isporuke. Primjer se radi za robu široke potrošnje koja ne zahtijeva posebne temperaturne režime i uslove isporuke.

Za gradsku distribuciju obrazac dostave obuhvata jedan dan, a za nacionalnu jednu sedmicu. U gradskoj distribuciji podrazumijevaju se maksimalno tri dostave po obrascu dostave, i to jutarnja, podnevna i večernja. Za nacionalnu distribuciju, obrazac dostave podrazumijeva maksimalno tri dostave u toku sedmice. Klijenti mogu pripadati obrascu ponedjeljak, srijeda i petak ili utorak, četvrtak i subota. Pretpostavljeno je da sve ono što važi za jedan dan za gradsku distribuciju, važi i za jedan sedmični obrazac za nacionalnu. Razlika je u tome što se u slučaju nacionalne distribucije jedinice isporuke isporučuju na cijelim euro paletama. Shodno tome, jedna jedinica isporuke jednaka je jednoj euro paleti. Kod gradske distribucije jedinice isporuke se isporučuju u rol paletama, za koje je uzeto da zauzimaju tovarnog prostora koliko i pola euro palete. Prema tome, jedna jedinica isporuke kod gradske distribucije jednaka je jednoj rol paleti ili polovini euro palete.

Strategija 1 i strategija 2 distribucije opisane su u tabelama 5.1 i 5.2. Tabela 5.1 daje raspodjelu klijenata prema broju jedinica isporuke koje dobijaju u jednom obrascu dostave. U odnosu na taj broj, određen im je tip koji je jednak broju jedinica isporuke koji dobijaju u jednom obrascu dostave. Obrasci dostave su predstavljeni sa nizom od tri broja, koji redom predstavljaju broj jedinica isporuke koji se isporučuje u

prvom, drugom i trećem periodu opsluge (tabela 5.2). U strategiji 2 nalaze se i obrasci koji podrazumijevaju zadržavanje obrazaca iz strategije 1 i oni su predstavljeni sa terminom „postojeći“.

**Tabela 5.1. Raspodjela klijenata prema tipu**

| Tipovi         | 1 | 2    | 3     | 4     | 5    | 6    | 7    | 8    |
|----------------|---|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Raspodjela (%) | 0 | 7.00 | 57.00 | 15.00 | 8.00 | 6.00 | 4.00 | 3.00 |

**Tabela 5.2. Raspodjele obrazaca dostave**

| Tip | Strategija 1                       |                              | Strategija 2                                    |                                     |
|-----|------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
|     | Obrasci dostave                    | Raspodjela (%)               | Obrasci dostave                                 | Raspodjela (%)                      |
| 2   | [1,0,1], [1,1,0], [0,1,1]          | [30.00, 60.00, 10.00]        | [1,0,0], [2,0,0], [postojeći]                   | [60.00, 30.00, 10.00]               |
| 3   | [1,1,1], [2,1,0], [2,0,1], [1,2,0] | [70.00, 10.00, 10.00, 10.00] | [1,1,0], [2,1,0], [postojeći]                   | [30.00, 20.00, 50.00]               |
| 4   | [2,1,1], [1,2,1], [1,1,2]          | [80.00, 10.00, 10.00]        | [2,1,0], [2,2,0], [2,0,2], [1,1,1], [postojeći] | [20.00, 10.00, 10.00, 10.00, 50.00] |
| 5   | [2,2,1], [2,1,2], [1,2,2]          | [80.00, 10.00, 10.00]        | [2,1,1], [2,2,0], [1,2,1], [postojeći]          | [10.00, 10.00, 10.00, 70.00]        |
| 6   | [2,2,2], [3,2,1], [2,3,1], [1,2,3] | [30.00, 30.00, 30.00, 10.00] | [2,2,1], [2,2,1], [1,2,2], [postojeći]          | [10.00, 10.00, 10.00, 70.00]        |
| 7   | [2,2,2], [3,2,1], [2,3,1], [1,2,3] | [40.00, 30.00, 30.00]        | [2,2,2], [postojeći]                            | [10.00, 90.00]                      |
| 8   | [3,3,2], [3,2,3], [2,3,3], [4,2,2] | [30.00, 30.00, 30.00, 10.00] | [3,2,2], [postojeći]                            | [10.00, 90.00]                      |

Pretpostavljeno je da je broj jedinica povrata koji se vraća uvijek 1. Stoga, ne postoje obrasci povrata. Postoji samo raspodjela ukupnog broja klijenata koji imaju povrat po periodima opsluge (tabela 5.3).

**Tabela 5.3. Raspodjela ukupnog broja klijenata koji imaju povrat po periodima opsluge**

| Period opsluge   | 1     | 2     | 3     | Ukupno |
|------------------|-------|-------|-------|--------|
| Strategija 1 (%) | 21.43 | 21.43 | 21.43 | 64.29  |
| Strategija 2 (%) | 21.43 | 14.29 | 14.29 | 50.01  |

Simulacioni model je pokrenut 6 puta. Za gradsku distribuciju to znači 6 dana simulacije rada distribucije. Za nacionalnu to je 6 sedmičnih obrazaca od 3 dana. Ako se pretpostavi da postoje 2 tipa sedmičnih obrazaca od 3 dana (ponedjeljak, srijeda i petak) i (utorak, četvrtak i subota), onda 2 sedmična obrasca pokrivaju jednu radnu sedmicu. Ako ih je ukupno 6, znači da pokrivaju 3 sedmice rada. Pretpostavljeno je

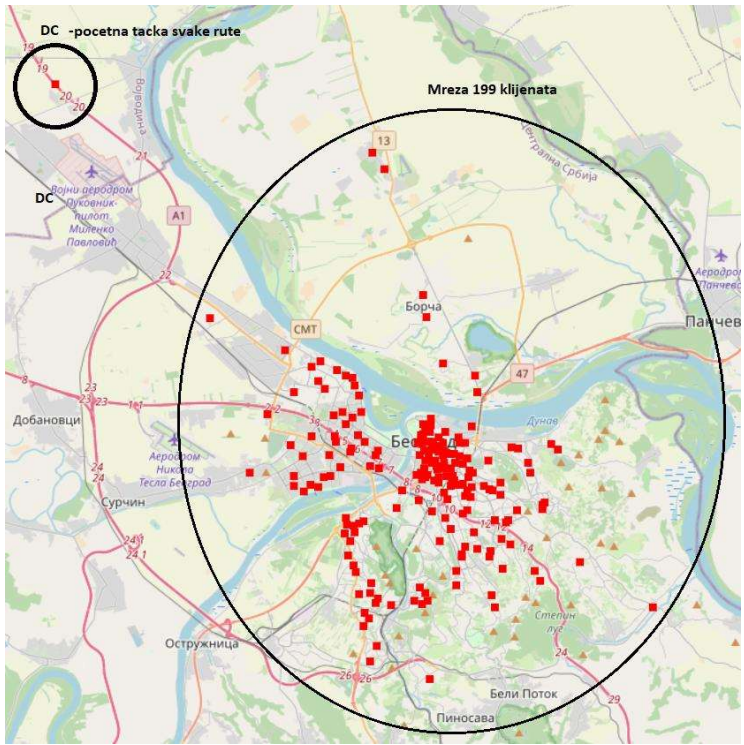
da se u jednom obrascu dostave posjeti 70 klijenata pri gradskoj distribuciji i 70 klijenta pri nacionalnoj. Klijenti gradske i nacionalne distribucije su dati u skupovima. Oba skupa broje po 200 klijenata. Klijenti su u skupovima označeni sa rednim brojevima, a njihove lokacije date su na slikama 5.1 i 5.2. Za kreiranje svake instance distribucije, iz skupa klijenata se na slučajan način bira njih 70. Potom se u skladu sa opisanim strategijama za svakog klijenta definišu količine koje mu se dostavljaju i vraćaju u svakom periodu opsluge. Sve to uz pomoć simulacionog modela. Prilikom svake posjete radi preuzimanja povrata uzima se jedna jedinica tovara, tako da je broj jedinica povrata jednak broju posjeta radi povrata.

Prosječan broj jedinica isporuke u obrascu dostave i broj jedinica povrata po periodima dobijen nakon simulacije je dat u tabeli 5.4. To su vrijednosti koje važe za jedan dan za gradsku distribuciju i za jednu sedmicu za nacionalnu, zaokružene na cijele brojeve.

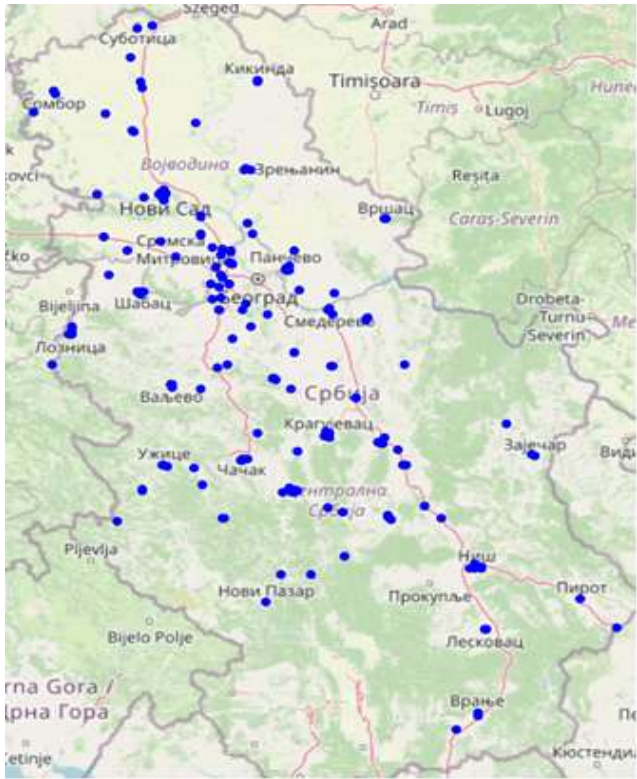
**Tabela 5.4. Prosječne vrijednosti parametara distribucije po strategijama**

| <b>Period</b>            | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>Ukupno</b> |
|--------------------------|----------|----------|----------|---------------|
| <b>Dostava (posjete)</b> |          |          |          |               |
| Strategija 1             | 69       | 64       | 59       | 192           |
| Strategija 2             | 70       | 62       | 38       | 170           |
| <b>Jedinica isporuke</b> |          |          |          |               |
| Strategija 1             | 103      | 85       | 70       | 258           |
| Strategija 2             | 108      | 80       | 49       | 237           |
| <b>Povrat (posjete)</b>  |          |          |          |               |
| Strategija 1             | 15       | 15       | 15       | 45            |
| Strategija 2             | 15       | 10       | 10       | 35            |





**Slika 5.1. Mreža gradske distribucije**



**Slika 5.2. Mreža nacionalne distribucije**

## 5.1 Efekti optimizacije na distribuciju

Efekti optimizacije na funkcionisanje distribucije ogledaju se kroz promjene koje su se desile u procesu realizacije porudžbine. Sve one se mogu izvesti na osnovu podataka o broju klijenata svakog tipa koji se pojavio u svakom pokretanju simulacije za jednu i za drugu strategiju.

### Opšte promjene u funkcionisanju distribucije

Promjene koje su se desile u pogledu prosječnog broja posjeta i prosječnog broja jedinica isporuke, posmatrajući sve klijente, predstavljene su tabelama 5.5 i 5.6. U tabeli 5.7 ukršteni su podaci za ta dva parametra, kako bi se stekao uvid u kakvom su odnosu njihove promjene. U tabeli 5.8 su upoređene raspodjele klijenata po tipu za strategiju 1 i strategiju 2, da bi se uvidjele promjene u strukturi klijenata. Po istom principu, u tabeli 5.9 data je raspodjela klijenata prema broju posjeta za strategiju 1 i strategiju 2. Cilj je da se uvidi kako se strategije 1 i 2 razlikuju u pogledu odnosa klijenata koji imaju jednu, dvije i tri posjete. Naredne dvije tabele pokazuju promjene u raspodjeli ukupnog broja posjeta (tabela 5.10) i ukupnog broja jedinica isporuke (tabela 5.11) po tipovima klijenata. U posljednjoj tabeli u ovom dijelu (tabela 5.12) upoređuje se broj klijenata po periodima koji se posjećuje radi preuzimanja robe.

**Tabela 5.5. Prosječan broj posjeta i prosječan broj jedinica isporuke u jednom obrascu dostave**

|              | Broj posjeta | Broj jedinica isporuke |
|--------------|--------------|------------------------|
| Strategija 1 | 2.74         | 3.68                   |
| Strategija 2 | 2.41         | 3.38                   |
| Razlika      | -0.33        | -0.30                  |
| Razlika (%)  | -12.04       | -8.15                  |

**Tabela 5.6. Procentualna razlika između strategija u raspodjeli posjeta i jedinica isporuke po periodima**

| Period opsluge    | 1    | 2     | 3      | Ukupno |
|-------------------|------|-------|--------|--------|
| Posjeta           | 0.97 | -4.16 | -35.69 | -11.98 |
| Jedinica isporuke | 5.19 | -7.03 | -29.43 | -8.21  |

**Tabela 5.7. Promjene kod klijenata koji su prešli na nove obrasce dostave (u procentima)**

| Posjeta | Jedinica isporuke |       |       |
|---------|-------------------|-------|-------|
|         | ukupno            | manji | Isti  |
| ukupno  | 49.05             | 28.81 | 20.24 |
| manji   | 32.38             | 17.38 | 15.00 |
| isti    | 16.67             | 12.64 | 4.03  |

**Tabela 5.8. Raspodjela ukupnog broja klijenata prema broju jedinica isporuke koji primaju**

| Tip              | 1       | 2      | 3      | 4     | 5     | 6      | 7    | 8      |
|------------------|---------|--------|--------|-------|-------|--------|------|--------|
| Strategija 1 (%) | 0.00    | 7.62   | 57.38  | 16.19 | 8.57  | 4.52   | 3.33 | 2.38   |
| Strategija 2 (%) | 4.76    | 17.86  | 45.95  | 15.48 | 7.86  | 2.62   | 3.33 | 2.14   |
| Razlika stvarna  | 4.76    | 10.24  | -11.43 | -0.71 | -0.71 | -1.90  | 0.00 | -0.24  |
| Razlika (%)      | #DIV/0! | 134.38 | -19.92 | -4.41 | -8.33 | -42.11 | 0.00 | -10.00 |

**Tabela 5.9. Raspodjela ukupnog broja klijenata prema broju posjeta**

| Broj posjeta     | 1   | 2     | 3      |
|------------------|-----|-------|--------|
| Strategija 1 (%) | 0   | 24.1  | 75.9   |
| Strategija 2 (%) | 6.3 | 44.55 | 49.15  |
| Razlika stvarna  | 6.3 | 20.45 | -26.75 |
| Razlika (%)      | /   | 84.85 | -35.24 |

**Tabela 5.10. Raspodjela ukupnog broja posjeta po tipovima klijenata**

| Tip              | 1       | 2     | 3      | 4     | 5    | 6     | 7    | 8    |
|------------------|---------|-------|--------|-------|------|-------|------|------|
| Strategija 1 (%) | 0.00    | 5.07  | 55.78  | 16.31 | 8.70 | 6.52  | 4.35 | 3.26 |
| Strategija 2 (%) | 1.73    | 15.52 | 45.40  | 14.37 | 9.14 | 5.68  | 4.82 | 3.34 |
| Razlika stvarna  | 1.73    | 10.45 | -10.38 | -1.94 | 0.44 | -0.84 | 0.47 | 0.07 |
| Razlika (%)      | #DIV/0! | 2.06  | -0.19  | -0.12 | 0.05 | -0.13 | 0.11 | 0.02 |

**Tabela 5.11. Raspodjela ukupnog broja jedinica isporuke po tipovima klijenata**

| Tip              | 1       | 2      | 3      | 4     | 5     | 6      | 7    | 8     |
|------------------|---------|--------|--------|-------|-------|--------|------|-------|
| Strategija 1 (%) | 0.00    | 3.75   | 45.84  | 16.09 | 10.72 | 9.65   | 7.51 | 6.43  |
| Strategija 2 (%) | 1.23    | 11.63  | 38.91  | 15.07 | 10.81 | 8.06   | 7.98 | 6.31  |
| Razlika stvarna  | 1.23    | 7.87   | -6.93  | -1.01 | 0.09  | -1.59  | 0.47 | -0.12 |
| Razlika (%)      | #DIV/0! | 209.78 | -15.12 | -6.29 | 0.80  | -16.46 | 6.24 | -1.93 |

**Tabela 5.12. Raspodjela ukupnog broja klijenata od kojih se roba preuzima**

| Period           | 1     | 2      | 3      | Ukupno |
|------------------|-------|--------|--------|--------|
| Strategija 1 (%) | 21.43 | 21.43  | 21.43  | 64.29  |
| Strategija 2 (%) | 21.43 | 14.29  | 14.29  | 50.01  |
| Razlika stvarna  | 0     | -7.14  | -7.14  | -14.28 |
| Razlika (%)      | 0.00  | -33.32 | -33.32 | -22.21 |

U nastavku su detaljnije razrađene promjene u pogledu broja posjeta i broja jedinica isporuke koji se isporučuje. U tabelama koje predstavljaju ove promjene, ista grupa

klijenta posmatra se i za strategiju 1 i za strategiju 2 distribucije. Npr. ista grupa klijenata tipa 2 se posmatra koliko prima jedinica isporuke pri strategiji 1 i pri strategiji 2 distribucije. Neki klijenti će promijeniti tip, tj. broj jedinica isporuke koji primaju, ali će se i dalje posmatrati kao članovi iste grupe. Dakle, neće se pojaviti grupa klijenata sa jednom jedinicom isporuke tj. tipa 1 kod strategije 2 distribucije. Sve zbog željene analize promjena po grupama klijenta, tj. tipu. U svakoj tabeli postoji i sumarni red koji pokazuje i promjene na nivou svih tipova klijenta zajedno.

### **Promjene u broju posjeta po periodima**

Najveća promjena u broju posjeta desila se u trećem periodu. Broj posjeta po klijentu u tom periodu iznosi 0.84 za strategiju 1 i 0.54 za strategiju 2 (tabela 5.13). To znači da 84.05% klijenata dobija isporuku u tom periodu pri strategiji 1, a pri strategiji 2 njih 54.05%. To je smanjenje od 35.69% (tabela 5.14). Odnos u ukupnom broju posjeta između perioda se najviše promijenio između prvog i trećeg perioda, a u korist prvog perioda (tabela 5.15 i 5.16).

**Tabela 5.13. Prosječan broj posjeta po klijentu**

| Tip | Period (strategija 1) |      |      |       | Period (strategija 2) |      |      |       |
|-----|-----------------------|------|------|-------|-----------------------|------|------|-------|
|     | 1                     | 2    | 3    | Svi   | 1                     | 2    | 3    | svi   |
| svi | 0.99                  | 0.92 | 0.84 | 2.743 | 1.00                  | 0.88 | 0.54 | 2.414 |
| 2   | 0.81                  | 0.75 | 0.44 | 2.00  | 0.94                  | 0.16 | 0.06 | 1.16  |
| 3   | 1.00                  | 0.89 | 0.79 | 2.68  | 1.00                  | 0.95 | 0.40 | 2.35  |
| 4   | 1.00                  | 1.00 | 1.00 | 3.00  | 1.00                  | 0.83 | 0.75 | 2.57  |
| 5   | 1.00                  | 1.00 | 1.00 | 3.00  | 1.00                  | 1.00 | 0.94 | 2.94  |
| 6   | 1.00                  | 1.00 | 1.00 | 3.00  | 1.00                  | 1.00 | 1.00 | 3.00  |
| 7   | 1.31                  | 1.31 | 1.31 | 3.92  | 1.31                  | 1.31 | 1.31 | 3.92  |
| 8   | 1.33                  | 1.33 | 1.33 | 4.00  | 1.33                  | 1.33 | 1.33 | 4.00  |

**Tabela 5.14. Razlika u prosječnom broju posjeta po tipu klijenta i periodu između strategija**

| Tip | Period (stvarna razlika) |       |       |       | Period (procentualna razlika) |        |        |        |
|-----|--------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|     | 1                        | 2     | 3     | svi   | 1                             | 2      | 3      | Svi    |
| svi | 0.01                     | -0.04 | -0.30 | -0.33 | 0.97                          | -4.16  | -35.69 | -11.98 |
| 2   | 0.13                     | -0.59 | -0.38 | -0.84 | 15.38                         | -79.17 | -85.71 | -42.19 |
| 3   | 0.00                     | 0.07  | -0.40 | -0.33 | 0.00                          | 7.69   | -50.00 | -12.24 |
| 4   | 0.00                     | -0.17 | -0.25 | -0.43 | 0.00                          | -17.33 | -25.33 | -14.22 |
| 5   | 0.00                     | 0.00  | -0.06 | -0.06 | 0.00                          | 0.00   | -6.45  | -2.15  |
| 6   | 0.00                     | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00                          | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 7   | 0.00                     | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00                          | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 8   | 0.00                     | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00                          | 0.00   | 0.00   | 0.00   |

**Tabela 5.15. Raspodjela ukupnog broja posjeta po periodima**

| Tip | Period (strategija 1) |       |       | Period (strategija 2) |       |       |
|-----|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
|     | 1                     | 2     | 3     | 1                     | 2     | 3     |
| svi | 35.94                 | 33.42 | 30.64 | 41.22                 | 36.39 | 22.39 |
| 2   | 40.63                 | 37.50 | 21.88 | 81.08                 | 13.51 | 5.41  |
| 3   | 37.36                 | 33.07 | 29.57 | 42.57                 | 40.58 | 16.85 |
| 4   | 33.33                 | 33.33 | 33.33 | 38.86                 | 32.12 | 29.02 |
| 5   | 33.33                 | 33.33 | 33.33 | 34.07                 | 34.07 | 31.87 |
| 6   | 33.33                 | 33.33 | 33.33 | 33.33                 | 33.33 | 33.33 |
| 7   | 33.33                 | 33.33 | 33.33 | 33.33                 | 33.33 | 33.33 |
| 8   | 33.33                 | 33.33 | 33.33 | 33.33                 | 33.33 | 33.33 |

**Tabela 5.16. Razlika u raspodjeli ukupnog broja posjeta po periodima između strategija**

| Tip | Period (stvarna razlika) |        |        | Period (procentualna razlika) |        |        |
|-----|--------------------------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|
|     | 1                        | 2      | 3      | 1                             | 2      | 3      |
| svi | 5.29                     | 2.97   | -8.26  | 14.71                         | 8.89   | -26.94 |
| 2   | 40.46                    | -23.99 | -16.47 | 99.58                         | -63.96 | -75.29 |
| 3   | 5.21                     | 7.51   | -12.72 | 13.95                         | 22.71  | -43.03 |
| 4   | 5.53                     | -1.21  | -4.32  | 16.58                         | -3.63  | -12.95 |
| 5   | 0.73                     | 0.73   | -1.47  | 2.20                          | 2.20   | -4.40  |
| 6   | 0.00                     | 0.00   | 0.00   | 0.00                          | 0.00   | 0.00   |
| 7   | 0.00                     | 0.00   | 0.00   | 0.00                          | 0.00   | 0.00   |
| 8   | 0.00                     | 0.00   | 0.00   | 0.00                          | 0.00   | 0.00   |

### Promjene u broju jedinica isporuke po periodima

U prosjeku se isporučuje 1.47 jedinica isporuke u prvom periodu usluge posmatrajući sve klijente (tabela 5.17). U taj prosjek su ušli i oni kojima se ne

isporučuje nijedna jedinica isporuke. Prosječan broj jedinica isporuke po klijentu najviše se smanjio u trećem periodu, a povećao u prvom (tabela 5.18). Posmatrajući ukupan broj isporuka, odnos se takođe promijenio u korist prvog perioda (tabela 5.19 i 5.20).

**Tabela 5.17. Prosječan broj jedinica isporuke po klijentu**

| Tip | Period (strategija 1) |      |      |       | Period (strategija 2) |      |      |       |
|-----|-----------------------|------|------|-------|-----------------------|------|------|-------|
|     | 1                     | 2    | 3    | Svi   | 1                     | 2    | 3    | Svi   |
| svi | 1.47                  | 1.22 | 1.00 | 3.68  | 1.55                  | 1.13 | 0.70 | 3.38  |
| 2   | 0.81                  | 0.75 | 0.44 | 2.00  | 1.13                  | 0.16 | 0.06 | 1.34  |
| 3   | 1.20                  | 1.00 | 0.79 | 3.00  | 1.31                  | 1.01 | 0.40 | 2.71  |
| 4   | 1.80                  | 1.12 | 1.08 | 4.00  | 1.80                  | 0.97 | 0.97 | 3.75  |
| 5   | 1.77                  | 1.90 | 1.32 | 5.00  | 1.84                  | 1.71 | 1.16 | 4.71  |
| 6   | 2.28                  | 2.22 | 1.50 | 6.00  | 2.11                  | 2.22 | 1.22 | 5.56  |
| 7   | 3.38                  | 2.77 | 3.00 | 9.15  | 3.31                  | 2.77 | 3.00 | 9.08  |
| 8   | 3.67                  | 3.67 | 3.33 | 10.67 | 3.67                  | 3.56 | 3.33 | 10.56 |

**Tabela 5.18. Razlika u prosječnom broju jedinica isporuke po klijentu između strategija**

| Tip | Period (stvarna razlika) |       |       |       | Period (procentualna razlika) |        |        |        |
|-----|--------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|     | 1                        | 2     | 3     | svi   | 1                             | 2      | 3      | Svi    |
| svi | 0.08                     | -0.09 | -0.29 | -0.30 | 5.19                          | -7.03  | -29.43 | -8.21  |
| 2   | 0.31                     | -0.59 | -0.38 | -0.66 | 38.46                         | -79.17 | -85.71 | -32.81 |
| 3   | 0.10                     | 0.00  | -0.40 | -0.29 | 8.48                          | 0.42   | -50.00 | -9.65  |
| 4   | 0.00                     | -0.15 | -0.11 | -0.25 | 0.00                          | -13.10 | -9.88  | -6.33  |
| 5   | 0.06                     | -0.19 | -0.16 | -0.29 | 3.64                          | -10.17 | -12.20 | -5.81  |
| 6   | -0.17                    | 0.00  | -0.28 | -0.44 | -7.32                         | 0.00   | -18.52 | -7.41  |
| 7   | -0.08                    | 0.00  | 0.00  | -0.08 | -2.27                         | 0.00   | 0.00   | -0.84  |
| 8   | 0.00                     | -0.11 | 0.00  | -0.11 | 0.00                          | -3.03  | 0.00   | -1.04  |

**Tabela 5.19. Raspodjela ukupnog broja jedinica isporuke po periodima**

| Tip | Period (strategija 1) |       |       | Period (strategija 1) |       |       |
|-----|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
|     | 1                     | 2     | 3     | 1                     | 2     | 3     |
| svi | 39.88                 | 33.10 | 27.02 | 45.70                 | 33.52 | 20.77 |
| 2   | 40.63                 | 37.50 | 21.88 | 83.72                 | 11.63 | 4.65  |
| 3   | 40.14                 | 33.48 | 26.38 | 48.19                 | 37.21 | 14.60 |
| 4   | 45.00                 | 28.00 | 27.00 | 48.04                 | 25.98 | 25.98 |
| 5   | 35.48                 | 38.06 | 26.45 | 39.04                 | 36.30 | 24.66 |
| 6   | 37.96                 | 37.04 | 25.00 | 38.00                 | 40.00 | 22.00 |
| 7   | 36.97                 | 30.25 | 32.77 | 36.44                 | 30.51 | 33.05 |
| 8   | 34.38                 | 34.38 | 31.25 | 34.74                 | 33.68 | 31.58 |

**Tabela 5.20. Razlika u raspodjeli jedinica isporuke po periodima između strategija**

| Tip | Period (stvarna razlika) |        |        | Period (procentualna razlika) |        |        |
|-----|--------------------------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|
|     | 1                        | 2      | 3      | 1                             | 2      | 3      |
| svi | 5.82                     | 0.42   | -6.25  | 14.59                         | 1.28   | -23.11 |
| 2   | 43.10                    | -25.87 | -17.22 | 106.08                        | -68.99 | -78.74 |
| 3   | 8.05                     | 3.73   | -11.78 | 20.06                         | 11.14  | -44.66 |
| 4   | 3.04                     | -2.02  | -1.02  | 6.76                          | -7.22  | -3.78  |
| 5   | 3.56                     | -1.76  | -1.79  | 10.02                         | -4.63  | -6.78  |
| 6   | 0.04                     | 2.96   | -3.00  | 0.10                          | 8.00   | -12.00 |
| 7   | -0.53                    | 0.26   | 0.28   | -1.44                         | 0.85   | 0.85   |
| 8   | 0.36                     | -0.69  | 0.33   | 1.05                          | -2.01  | 1.05   |

Promjene koje se odnose samo na prosječan broj jedinica isporuke u posjeti date su u tabelama 5.21 i 5.22. Napravljena je razlika u odnosu na prosječan broj jedinica isporuke po klijentu, gdje u prosjek ulaze i klijenti koji ne dobijaju isporuku u nekom periodu.

**Tabela 5.21. Prosječan broj jedinica isporuke po posjeti**

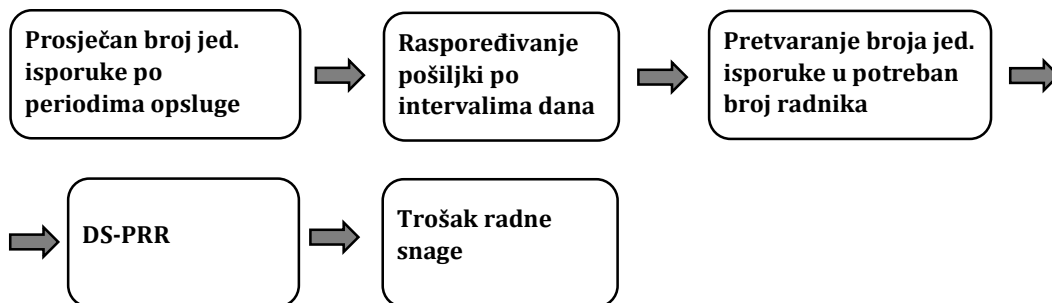
| Tip | Period (strategija 1) |      |      |      | Period (strategija 2) |      |      |      |
|-----|-----------------------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|
|     | 1                     | 2    | 3    | svi  | 1                     | 2    | 3    | svi  |
| svi | 1.49                  | 1.33 | 1.18 | 4.00 | 1.55                  | 1.29 | 1.30 | 4.14 |
| 2   | 1.00                  | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 1.20                  | 1.00 | 1.00 | 1.16 |
| 3   | 1.20                  | 1.13 | 1.00 | 3.34 | 1.31                  | 1.06 | 1.00 | 1.15 |
| 4   | 1.80                  | 1.12 | 1.08 | 4.00 | 1.80                  | 1.18 | 1.30 | 1.46 |
| 5   | 1.77                  | 1.90 | 1.32 | 5.00 | 1.84                  | 1.71 | 1.24 | 1.60 |
| 6   | 2.28                  | 2.22 | 1.50 | 6.00 | 2.11                  | 2.22 | 1.22 | 1.85 |
| 7   | 2.59                  | 2.12 | 2.29 | 7.00 | 2.53                  | 2.12 | 2.29 | 2.31 |
| 8   | 2.75                  | 2.75 | 2.50 | 8.00 | 2.75                  | 2.67 | 2.50 | 2.64 |

**Tabela 5.22. Razlika u prosječnom broju jedinica isporuke po posjeti i period između strategija**

| Tip | Period (stvarna razlika) |       |       |       | Period (procentualna razlika) |       |       |       |
|-----|--------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|
|     | 1                        | 2     | 3     | svi   | 1                             | 2     | 3     | svi   |
| svi | 0.06                     | -0.04 | 0.12  | 0.14  | 4.17                          | -2.81 | 0.65  | 0.81  |
| 2   | 0.20                     | 0.00  | 0.00  | -1.84 | 30.30                         | 0.00  | 0.00  | 10.10 |
| 3   | 0.10                     | -0.08 | 0.00  | -2.18 | 8.33                          | -5.26 | 0.00  | 1.25  |
| 4   | 0.00                     | 0.06  | 0.22  | -2.54 | 0.00                          | 6.06  | 10.39 | 4.52  |
| 5   | 0.06                     | -0.19 | -0.08 | -3.40 | -3.68                         | -3.68 | -3.70 | -3.69 |
| 6   | -0.17                    | 0.00  | -0.28 | -4.15 | -7.27                         | -3.91 | -3.33 | -5.00 |
| 7   | -0.06                    | 0.00  | 0.00  | -4.69 | -1.67                         | -1.30 | -1.30 | -1.43 |
| 8   | 0.00                     | -0.08 | 0.00  | -5.36 | 0.71                          | -2.31 | -2.31 | -1.25 |

## 5.2. Optimizacija skladišnog procesa

U ovom poglavlju radi se optimizacija upotrebe radne snage u skladištu s ciljem optimizacije skladišnog procesa i ispituju potencijalni efekti primjene strategije 2 distribucije na skladišni proces. U tu svrhu, ispituje se mogućnost smanjivanja troškova radnika u skladištu, ukoliko se smanji broj isporuka klijentima. Za proračun je korišćen prosječan broj isporuka po periodima (tabela 5.4) i podaci o radu realnog skladišta uz određene pretpostavke. Ideja je da se na osnovu broja pošiljki koji treba da se isporuči i primi u skladište odredi potreban broj radnika, proračuna njihov trošak i rasporedi ih na poslove pri strategiji 1 i strategiji 2 distribucije. Upoređivanjem troškova ove dvije strategije, dobio bi se efekat primjene strategije 2. Da bi se to ostvarilo, najprije je potrebno očekivani broj isporuka transformisati u zahtjeve za radnicima. U tu svrhu, ovdje je dat model po kojem bi se vršilo to transformisanje. Na bazi dobijenih zahtjeva za radnicima i ostalih parametara rada skladišta, definiše se DS-PRR. Kompletan proces određivanja rješenja, tj. utvrđivanja troška radne snage za jednu strategiju distribucije prikazan je na slici 5.3.



**Slika 5.3. Proces dobijanja rješenja za jednu strategiju distribucije**

U ovom poglavlju se ispituje i kakav efekat na troškove rješenja za upotrebu radne snage u skladištu ima uvođenje mogućnosti odlaganja izvršenja određenih skladišnih aktivnosti. Stoga, DS-PRR je prvo riješen bez te mogućnosti, pa sa tom mogućnošću. Rezultati su upoređeni i po tom osnovu, da bi se uvidjelo da li se rješenje značajnije mijenja sa primjenom te mogućnosti.



Primjer je riješen samo za gradsku distribuciju. U slučaju nacionalne distribucije, roba se u okviru jednog dana sprema za isporuku narednog dana, nema podjele dana na tri dijela, a samim tim nema ni rokova u toku dana kada je koju robu potrebno iskomisionirati. Pravilo je samo da porudžbine koje se prime danas, budu iskomisionirane sutradan i isporučene prekosutra, osim u slučaju nedjelje koja je neradna. Znači, kod obrasca ponedjeljak – srijeda – petak, sve porudžbine koje se prime u petak, komisioniraju se u subotu i dostavljaju u ponedjeljak. Sve porudžbine koje se prime u subotu komisioniraju se u ponedjeljak i dostavljaju utorak itd. Isto važi i za obrazac utorak – četvrtak – subota. Pošiljke se tovaru u jutarnjim časovima dana u kome se dostavljaju. Zbog svega navedenog, nema potrebe za rješavanjem PRR.

U primjeru su obrađene samo aktivnosti utovara, komisioniranja, istovara i kontrole na prijemu robe u skladište. Istovar se odnosi samo na istovar robe od dobavljača u distributivno skladište. Radni dan je podijeljen na tri perioda opsluge, a oni na intervale dužine jednog sata. Dužina intervala od jednog sata uzeta je iz razloga što se evidencija o broju pristiglih porudžbina u uzornom distributivnom skladištu vodila po satu. U skladu sa usvojenim postupkom rješavanja ovog dijela primjera, u nastavku je najprije broj isporuka iz prethodnog primjera podijeljen po intervalima radnog dana i transformisan u zahtjeve za radnicima. Potom, kreiran je i riješen PRR i napravljen raspored radnika.

### **Pretvaranje posla u zahtjeve za radnicima**

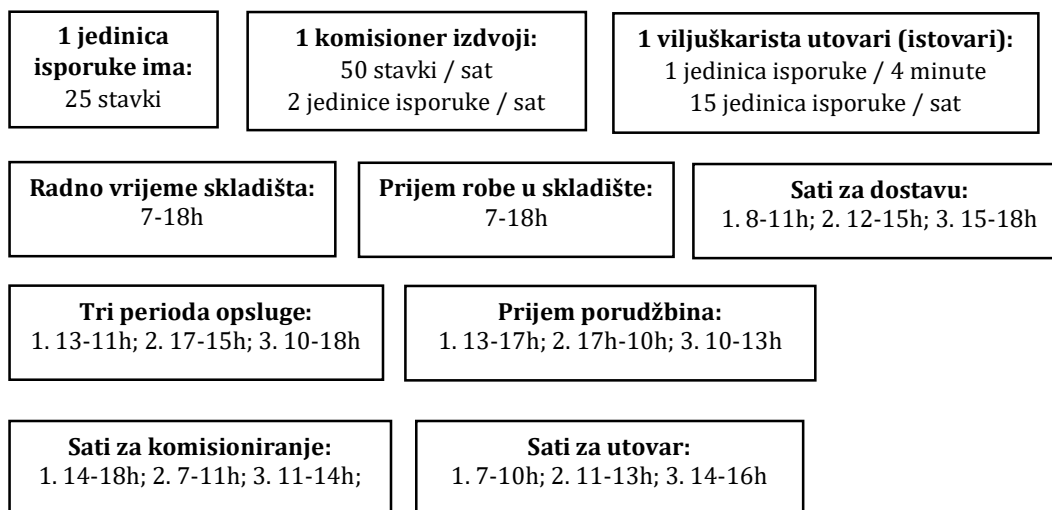
Potrebno je u okviru svakog perioda opsluge definisati zahtjeve za obavljanjem svake od aktivnosti po intervalima perioda opsluge na bazi broja isporuka koji se realizuje u tom periodu opsluge. Za svaku aktivnost vezanu za isporuku, u svakom periodu opsluge definisan je rok do kada se primaju zahtjevi i do kada treba da se realizuje. Za aktivnosti koje se tiču prijema pošiljki u distributivno skladište zahtjevi nisu dijeljeni u periode, nego se posmatrao cijeli radni dan. Zahtjevi za realizacijom aktivnosti izraženi su kroz broj jedinica isporuke koje je potrebno obraditi, odnosno potreban broj radnika. Ti zahtjevi su ovdje podijeljeni po intervalima na osnovu podataka iz realnog skladišta. Prema podacima iz prakse, raspodjela jedinica isporuke po satima za komisioniranje i utovar približno je ravnomjerna u svakom

periodu opsluge. Pretpostavljeno je i da jedinice isporuke za istovar ne dolaze poslije 16 h.

Transformisanje broja jedinica isporuke u zahtjeve za radnicima rađeno je na bazi broja isporuka u nekom intervalu i iskustvenih podataka o vremenu potrebnom da se jedna jedinica isporuke obradi kroz posmatranu aktivnost. U slučaju komisioniranja uzet je prosječan broj stavki u jedinici isporuke i prosječno vrijeme za izdvajanje jedne stavke da bi se odredio potreban broj radnika za komisioniranje. Na osnovu vremena potrebnog za utovar jedne jedinice isporuke, definisan je potreban broj viljuškarista. Kako podaci o pošiljkama koje ulaze u skladište nisu bili dostupni, za proračun potrebnog broja kontrolora i viljuškarista za istovar korišćen je broj jedinica isporuke koji se distribuira. Postavljeno je da je broj pošiljki koji ulazi u skladište jednak određenom procentu broja isporuka koji izlazi iz skladišta. Potreban broj viljuškarista za istovar računat je po istom principu kao i za utovar. Potreban broj radnika za obavljanje aktivnosti kontrole računat je u odnosu na raspoređen broj viljuškarista koji radi na istovaru u nekom satu, s obzirom na međusobnu zavisnost aktivnosti koje obavljaju. U ovom primjeru pretpostavljeno je da se u skladište u jednom danu primi onoliko jedinica isporuke koliko se i otpremi. Stoga, koliko viljuškarista bude trebalo za utovar toliko će trebati i za istovar. Odnos potrebnog broja radnika za istovar i kontrolu je postavljen da bude dva prema jedan u korist radnika koji vrše istovar.

Za potrebe proračuna zahtjeva za radnicima korišćeni su sledeći podaci o radu realnog skladišta: jedan komisioner izdvoji oko 300 stavki za 6 sati efektivnog rada, očekivani broj stavki u jednoj jedinici isporuke je 25. Prema tome, jedan komisioner za 6 sati može da pripremi 12 jedinica isporuke, odnosno dvije jedinice isporuke u satu. Jednom radniku za utovar jedne jedinice isporuke je potrebno 4 minuta, tj. za jedan sat može da utovari 15 jedinica isporuke. Isto važi i za istovar. Radno vrijeme skladišta je od 7 do 18 h sa tri perioda opsluge. Svaki period opsluge ima sate za prijem porudžbina, komisioniranje i utovar. Istovar se u svakom periodu obavlja tokom cijelog njegovog trajanja. Prvi počinje u 13 h jednog dana i završava se u 11 h narednog dana. Porudžbine koje stignu u periodu od 13 do 17 h se komisioniraju od 14 do 18 h. Utovar počinje u 7 h narednog dana i traje do 10 h. Prve porudžbine stižu

korisnicima već u 8 h, a dostava u ovom periodu se završava u 11 h. Drugi period opsluge počinje u 17 h jednog dana i završava se u 15 h narednog dana. U njemu se komisioniraju porudžbine koje pristignu od 17 - 10 h narednog dana. Komisioniranje se vrši u periodu od 7 do 11 h. Te porudžbine se utovaraju od 11 do 13 h i dostavljaju od 12 do 15 h. Treći period opsluge traje od 10 do 18 h. Porudžbine pristigle u periodu od 10 do 13 h se komisioniraju od 11 do 14 h. Utovar se vrši u periodu od 14 do 16 h, a dostava od 15 do 18 h. Slika 5.4 daje pregled postavki rada skladišta.







#### Slika 5.4. Postavke rada skladišta

Na osnovu opisanog postupka i uvedenih pretpostavki, proračunat je potreban broj radnika za komisioniranje i utovar pri strategiji 1 i strategiji 2 distribucije. Tabele 5.23 i 5.24 prikazuju broj jedinica isporuke koji treba pripremiti i utovariti u svakom periodu po satima i potreban broj radnika po profilima pri strategiju 1 i strategiju 2 distribucije. Sjenke u poljima označavaju aktivnosti koje se obavljaju u nekom satu. Ako neko polje ima više sjenki, to znači da se u njemu istovremeno obavlja više aktivnosti. Dobijene vrijednosti broja potrebnih radnika zaokruživane su na veću vrijednost po pravilima zaokruživanja.

**Tabela 5.23. Uporedni prikaz broja jedinica isporuke i zahtjeva za radnicima pri strategiji 1**

| Period opsluge |               |             |               |     |               |             |               |     |               |             |               |
|----------------|---------------|-------------|---------------|-----|---------------|-------------|---------------|-----|---------------|-------------|---------------|
| 1              |               |             |               | 2   |               |             |               | 3   |               |             |               |
| h              | Jed. isporuke | Komisionera | Viljuškarišta | h   | Jed. isporuke | Komisionera | Viljuškarišta | h   | Jed. isporuke | Komisionera | Viljuškarišta |
| svi            | 103           | 52          | 7             | svi | 85            | 44          | 6             | svi | 70            | 35          | 5             |
| 13             |               | /           | /             | 17  |               | /           | /             | 10  |               | /           | /             |
| 14             | 28            | 14          | /             | 7   | 20            | 10          | /             | 11  | 24            | 12          | /             |
| 15             | 26            | 13          | /             | 8   | 21            | 11          | /             | 12  | 26            | 13          | /             |
| 16             | 25            | 13          | /             | 9   | 21            | 11          | /             | 13  | 20            | 10          | /             |
| 17             | 24            | 12          | /             | 10  | 23            | 12          | /             | 14  |               | /           | 2             |
| 7              |               | /           | 3             | 11  |               | /           | 3             | 15  | d             | /           | 3             |
| 8              | d             | /           | 2             | 12  | d             | /           | 3             | 16  | d             | /           | /             |
| 9              | d             | /           | 2             | 13  | d             | /           | /             | 17  | d             | /           | /             |
| 10             | d             | /           | /             | 14  | d             | /           | /             | /   | /             | /           | /             |





Legenda:

|   |                   |   |                |   |        |   |   |         |
|---|-------------------|---|----------------|---|--------|---|---|---------|
|  | prijem porudžbina |  | komisioniranje |  | utovar |  | d | dostava |
|---|-------------------|---|----------------|---|--------|---|---|---------|

**Tabela 5.24. Uporedni prikaz broja jedinica isporuke i zahtjeva za radnicima pri strategiji 2**

| Period opsluge |               |             |               |     |               |             |               |     |               |             |               |
|----------------|---------------|-------------|---------------|-----|---------------|-------------|---------------|-----|---------------|-------------|---------------|
| 1              |               |             |               | 2   |               |             |               | 3   |               |             |               |
| h              | Jed. isporuke | Komisionera | Viljuškarišta | h   | Jed. isporuke | Komisionera | Viljuškarišta | h   | Jed. isporuke | Komisionera | Viljuškarišta |
| svi            | 108           | 54          | 7             | svi | 79            | 40          | 5             | svi | 49            | 25          | 4             |
| 13             |               | /           | /             | 17  |               | /           | /             | 10  |               | /           | /             |
| 14             | 28            | 14          | /             | 7   | 19            | 10          | /             | 11  | 19            | 10          | /             |
| 15             | 28            | 13          | /             | 8   | 20            | 10          | /             | 12  | 16            | 8           | /             |
| 16             | 26            | 13          | /             | 9   | 20            | 10          | /             | 13  | 14            | 7           | /             |
| 17             | 26            | 12          | /             | 10  | 20            | 10          | /             | 14  |               | /           | 2             |
| 7              |               | /           | 3             | 11  |               | /           | 2             | 15  | d             | /           | 2             |
| 8              | d             | /           | 2             | 12  | d             | /           | 3             | 16  | d             | /           | /             |
| 9              | d             | /           | 2             | 13  | d             | /           | /             | 17  | d             | /           | /             |
| 10             | d             | /           | /             | 14  | d             | /           | /             | /   | /             | /           | /             |

Legenda:

|   |                   |   |                |   |        |   |   |         |
|---|-------------------|---|----------------|---|--------|---|---|---------|
|  | prijem porudžbina |  | komisioniranje |  | utovar |  | d | dostava |
|---|-------------------|---|----------------|---|--------|---|---|---------|

U tabeli 5.25 data je raspodjela potrebnog broja viljuškarišta za istovar robe u distributivno skladište po intervalima i ista je za obe strategije. Pošto je za utovar pošiljki pri strategiji 1 bilo potrebno ukupno 16 viljuškarišta, taj broj je ravnomjerno raspoređen od 7 do 16 h.

**Tabela 5.25. Potreban broj viljuškarista za istovar po intervalima**

|                 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| R.br. intervala | 1 | 2 | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| h               | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Viljuškarista   | 2 | 2 | 2 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 0  | 0  |

**Definisanje ostalih ulaznih parametara za DS-PRR model**

Na raspolaganju su 3 smjene sa punim radnim vremenom i 8 smjena sa skraćenim radnim vremenom. Od njih se može izabrati najviše 3 smjene sa punim radnim vremenom i 1 sa skraćenim. Smjene sa punim radnim vremenom traju 9 sati, pri čemu je jedan sat odmor. Radnici se raspoređuju na odmor, pri čemu to može biti četvrti, peti ili šesti interval smjene. Smjene sa skraćenim radnim vremenom traju 4 vezana intervala, bez odmora. Tabela 5.26 pokazuje početak svake od raspoloživih smjena i raspoložive intervale na raspolaganju za odmor u smjenama sa punim radnim vremenom. Npr. smjena 1 i smjena 4 počinju u 7 h. Razlika je samo u dužini trajanja.

**Tabela 5.26. Raspoložive smjene**

| Smjene sa punim radnim vremenom | Smjene sa skraćenim radnim vremenom | Početak smjene (h) | Početak smjene (r.br. intervala) | Intervali raspoloživi za odmor |
|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1                               | 4                                   | 7                  | 1                                | 4,5,6                          |
| 2                               | 5                                   | 8                  | 2                                | 5,6,7                          |
| 3                               | 6                                   | 9                  | 3                                | 6,7,8                          |
| /                               | 7                                   | 10                 | 4                                | /                              |
| /                               | 8                                   | 11                 | 5                                | /                              |
| /                               | 9                                   | 12                 | 6                                | /                              |
| /                               | 10                                  | 13                 | 7                                | /                              |
| /                               | 11                                  | 14                 | 8                                | /                              |
| /                               | /                                   | 15                 | /                                | /                              |
| /                               | /                                   | 16                 | /                                | /                              |
| /                               | /                                   | 17                 | /                                | /                              |

Broj radnika koji radi pola radnog vremena mora da bude ispod 30% od ukupnog broja radnika. U svakom intervalu u kome rade radnici sa četveročasovnim radnim vremenom, potrebno je da bude minimalno jedan radnik sa punim radnim vremenom. Maksimalni dozvoljeni jednovremeni broj radnika u skladištu je 40. Broj kontrolora u intervalu treba da bude najmanje 50% od broja viljuškarista koji rade

na istovaru u tom intervalu. Radnici mogu da obavljaju samo one aktivnosti predviđene za njihov profil, što je dato u matrici usklađenosti profila sa aktivnostima (tabela 5.27). Duplim zvjezdicama su označene primarne aktivnosti nekog profila radnika. Ostale aktivnosti koje može da obavlja nisu primarne za posmatranog radnika. Pri tom, ukupan broj intervala angažovanih na aktivnostima koje nisu primarne za neki tip radnika, posmatrajući sve radnike tog profila, mora da bude manji za 50% od ukupnog broja intervala na kojima ti radnici rade. Trošak angažovanja radnika za jednu smjenu za jedan profil dat je u vidu odnosa cijene njegovog angažovanja i cijene angažovanja radnika sa najmanjom cijenom rada u skladištu. Ti odnosi za svaki profil radnika preuzeti su iz realnog skladišta i predstavljeni u tabeli 5.27. U slučaju četveročasovnih smjena, njihov trošak je upola manji. Vrijednosti svih ulaznih parametara zajedno sa njihovim oznakama i opisom prikazane su u tabeli u prilogu 2, osim onih datih u tabeli 5.27.

**Tabela 5.27. Matrica usklađenosti aktivnosti i radnika**

| Profil radnika | Aktivnosti |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Trošak radnika |      |
|----------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|------|
|                | kom        | kon | pop | ppr | sup | kop | uto | ist | wpr | woi |                |      |
| ks             | **         | *   | *   | *   |     |     |     |     |     |     |                | 1.28 |
| kn             | *          | **  | *   | *   |     |     |     |     |     |     |                | 1.4  |
| pr             | *          | *   | **  | *   |     |     |     |     |     |     |                | 1    |
| pk             | *          | *   | *   | **  |     |     |     |     |     |     |                | 1.28 |
| sp             | *          | *   | *   | *   | **  |     |     |     | *   | *   |                | 1.6  |
| kr             | *          |     |     |     |     | **  |     |     |     |     |                | 1.6  |
| vi             | *          |     |     |     |     |     | **  | **  |     | *   |                | 1.4  |
| wp             | *          | *   | *   | *   |     |     |     |     | **  |     |                | 1.36 |
| wv             | *          | *   | *   | *   |     |     | *   | *   | *   | **  |                | 1.4  |

**Legenda**

**Profili radnika**

sp- supervizor  
 ks- komisioner  
 kn- kontrolor  
 pr- pomoćni radnik  
 pk- paker  
 kr- kontrolor na prijemu  
 vi- viljuškarista  
 wp- wms primač  
 wv- wms viljuškarista

**Aktivnosti**

kom- komisioniranje  
 kon- kontrola  
 pop- pomoćni poslovi  
 ppr- priprema robe  
 sup- supervizija  
 kop- kontrola na prijemu  
 uto- utovar vozila  
 ist- istovar vozila  
 wpe- wms prijem robe  
 woi- wms odlaganje i izuzimanje robe

**Rješenje 1 – bez mogućnosti odlaganja izvršenja aktivnosti**

Trošak rješenja pri strategiji 1 je 33.36, kao i pri strategiji 2. Dakle, nije došlo do smanjenja troškova uprkos smanjenju broja pošiljki koje se otpremaju iz skladišta.

Teoretski gledano, troškovi radne snage bi trebalo da se smanje u ovom slučaju. Ako bi bilo moguće u svakom intervalu radnog dana dodijeliti svakoj aktivnosti onoliko radnika koliko se traži, onda bi trošak rješenja pri strategiji 1 bio 29.06. Po istom principu računanja, trošak rješenja pri strategiji 2 bio bi 23.64. To predstavlja smanjenje za 18.65%. Na osnovu toga, vidi se da nije iskorišćen potencijal za uštede u troškovima radne snage nastao smanjenjem broja isporuka. Stoga, u nastavku se ispituje kakav bi efekat na troškove imala odluka o mogućem odlaganju izvršenja određenih aktivnosti, odnosno da li bi to moglo da pomogne da se pomenuti potencijal iskoristi.

### **Rješenje 2 – uz mogućnost odlaganja izvršenja aktivnosti**

Mogućnost odlaganja izvršenja aktivnosti, predstavljena je u radu Popović i ostali (2021), podrazumijeva da se zahtjevi za radnicima mogu zadovoljiti u određenom broju intervala nakon što su postavljeni ili do isteka određenog perioda. U primjeru koji se rješava, postavljeno je da se zahtjevi za komisionerima mogu ispuniti do kraja perioda opsluge u kome su se pojavili. U prvom periodu to je do 18 h, u drugom do 11 h, a u trećem do 14 h. Za zahtjeve za viljuškaristima koji obavljaju utovar ostavljano je da se moraju ispuniti u intervalu u kome se zahtijevaju i u traženom broju. U slučaju zahtjeva za viljuškaristima koji obavljaju istovar, definisano je da se mogu ispuniti i u intervalu nakon pojavljivanja zahtjeva.

Primjenom pomenutih mogućnosti odlaganja, troškovi radne snage pri strategiji 1 iznose 29.64 a pri strategiji 2, 27.42 što je smanjenje za 7.49%. To znači da se potencijal smanjenja od 18.65% u velikoj mjeri iskoristio. Ako se uporede troškovi rješenja bez odlaganja i sa odlaganjem pri istoj strategiji, smanjenje je 11.1% pri strategiji 1 i 17.80% pri strategiji 2.

U tabelama 5.28 i 5.29 dat je rezultat primjene modela za rješavanje PRR na kreiranom primjeru pri strategiji 1 i strategiji 2 distribucije uz mogućnost odlaganja izvršenja aktivnosti. Tabele pokazuju potreban i raspoređeni broj radnika za komisioniranje, utovar, istovar i kontrolu. Da bi se lakše ispratilo kako su zadovoljene potrebe za komisionerima, komisioniranje je predstavljeno kroz tri odvojene aktivnosti. Za svaki period opsluge po jednom. Konačan raspored rada za

svakog radnika, dobijen pomoću DS-PRR algoritma, dat je tabelama 5.30 i 5.31. Tabela 5.30 prikazuje raspored rada pri strategiji 1, a tabela 5.31 pri strategiji 2. Kao ulazi u DS-PRR algoritam korišćeni su rezultati rješenja DS-PRR modela, tj. tabele 5.28 i 5.29.

**Tabela 5.28. Potreban i raspoređen broj radnika pri strategiji 1**

| Interval<br>r.br. h<br>svi | komision1 |       | komision2 |       | komision3 |       | utovar |       | istovar |       | kontrola<br>rasp. |
|----------------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|--------|-------|---------|-------|-------------------|
|                            | potr.     | rasp. | potr.     | rasp. | potr.     | rasp. | potr.  | rasp. | potr.   | rasp. |                   |
|                            | 44        | 44    | 49        | 49    | 38        | 38    | 18     | 18    | 18      | 18    | 9                 |
| 1. 7                       | 10        | 4     | 0         | 0     | 0         | 0     | 3      | 3     | 2       | 0     | 0                 |
| 2. 8                       | 11        | 6     | 0         | 0     | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 3. 9                       | 11        | 15    | 0         | 0     | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 4     | 2                 |
| 4. 10                      | 12        | 19    | 0         | 0     | 0         | 0     | 0      | 0     | 2       | 2     | 1                 |
| 5. 11                      | 0         | 0     | 12        | 12    | 0         | 0     | 3      | 3     | 2       | 2     | 1                 |
| 6. 12                      | 0         | 0     | 13        | 5     | 0         | 0     | 3      | 3     | 2       | 0     | 0                 |
| 7. 13                      | 0         | 0     | 10        | 16    | 0         | 0     | 0      | 0     | 2       | 2     | 1                 |
| 8. 14                      | 0         | 0     | 14        | 16    | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 9. 15                      | 0         | 0     | 0         | 0     | 13        | 12    | 3      | 3     | 2       | 4     | 2                 |
| 10. 16                     | 0         | 0     | 0         | 0     | 13        | 14    | 0      | 0     | 0       | 0     | 0                 |
| 11. 17                     | 0         | 0     | 0         | 0     | 12        | 12    | 0      | 0     | 0       | 0     | 0                 |

potr. potreban broj radnika      komision1      komisioniranje u 1. periodu  
 rasp. raspoređen broj radnika      komision2      komisioniranje u 2. periodu  
    komision3      komisioniranje u 3. periodu



**Tabela 5.29. Potreban i raspoređen broj radnika pri strategiji 2**

| Interval<br>r.br. h | komision1 |       | komision2 |       | komision3 |       | utovar |       | istovar |       | kontrola<br>rasp. |
|---------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|--------|-------|---------|-------|-------------------|
|                     | potr.     | rasp. | potr.     | rasp. | potr.     | rasp. | potr.  | rasp. | potr.   | rasp. |                   |
| svi                 | 40        | 40    | 39        | 39    | 40        | 40    | 16     | 16    | 18      | 18    | 9                 |
| 1. 7                | 10        | 3     | 0         | 0     | 0         | 0     | 3      | 3     | 2       | 2     | 1                 |
| 2. 8                | 10        | 4     | 0         | 0     | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 3. 9                | 10        | 17    | 0         | 0     | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 4. 10               | 10        | 16    | 0         | 0     | 0         | 0     | 0      | 0     | 2       | 2     | 1                 |
| 5. 11               | 0         | 0     | 10        | 10    | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 6. 12               | 0         | 0     | 8         | 2     | 0         | 0     | 3      | 3     | 2       | 0     | 0                 |
| 7. 13               | 0         | 0     | 7         | 13    | 0         | 0     | 0      | 0     | 2       | 4     | 2                 |
| 8. 14               | 0         | 0     | 14        | 14    | 0         | 0     | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 9. 15               | 0         | 0     | 0         | 0     | 14        | 14    | 2      | 2     | 2       | 2     | 1                 |
| 10. 16              | 0         | 0     | 0         | 0     | 13        | 13    | 0      | 0     | 0       | 0     | 0                 |
| 11. 17              | 0         | 0     | 0         | 0     | 13        | 13    | 0      | 0     | 0       | 0     | 0                 |

potr. potreban broj radnika      komision1      komisioniranje u 1. periodu  
 rasp. raspoređen broj radnika      komision2      komisioniranje u 2. periodu  
    komision3      komisioniranje u 3. periodu

**Tabela 5.30. Raspored radnika na aktivnosti pri strategiji 1**

| Interval<br>r.br. h | Smjena 1 |    |    |    |    |    |    | Smj. 2 |    | Smjena 3 |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Smj. 4 |    |    |    |    |    |
|---------------------|----------|----|----|----|----|----|----|--------|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|
|                     | ks       | ks | ks | kr | vi | vi | vi | vi     | vi | ks       | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks | kr     | vi | vi | ks | ks |    |
| 1. 7                | k1       | k1 | k1 | k1 | ut | ut | ut |        |    |          |    |    |    |    |    |    |    |    |    |        |    |    |    |    |    |
| 2. 8                | k1       | k1 | k1 | ka | k1 | is | is | ut     | ut |          |    |    |    |    |    |    |    |    |    |        |    |    |    | k1 | k1 |
| 3. 9                | k1       | k1 | k1 | ka | k1 | is | is | is     | is | k1       | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | ka | ut     | ut | k1 | k1 |    |    |
| 4. 10               | k1       | k1 | k1 | k1 | 0  | k1 | k1 | is     | is | k1       | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | ka | k1     | k1 | k1 | k1 |    |    |
| 5. 11               | 0        | 0  | 0  | 0  | k2 | 0  | ut | ut     | ut | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | ka | is     | is | k2 | k2 |    |    |
| 6. 12               | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | ut | 0  | ut     | ut | 0        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0  |    |    |    |    |
| 7. 13               | k2       | k2 | k2 | ka | k2 | k2 | k2 | 0      | 0  | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | is     | is |    |    |    |    |
| 8. 14               | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | ut | ut | is     | is | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | ka | k2     | k2 |    |    |    |    |
| 9. 15               | k3       | k3 | k3 | ka | ut | ut | ut | is     | is | k3       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | ka | is     | is |    |    |    |    |
| 10. 16              |          |    |    |    |    |    |    | k3     | k3 | k3       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3     | k3 |    |    |    |    |
| 11. 17              |          |    |    |    |    |    |    |        |    | k3       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3     | k3 |    |    |    |    |

**Legenda**

ks komisioner      k1 komisioniranje1      ut utovar      ka kontrola  
 vi viljuškarista      k2 komisioniranje2      is istovar      / Ne pripada  
 kr kontrolor      k3 komisioniranje3      0 pauza      smjeni

**Tabela 5.31. Raspored radnika na aktivnosti pri strategiji 2**

| Interval | Smjena 1 |    |    |    |    |    | Smjena 3 |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Smjena 4 |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|----------|----|----|----|----|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|
| r.br.    | h        | ks | kr | vi | vi | vi | vi       | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks | ks       | ks | ks | kr | ks | ks | vi |    |
| 1.       | 7        | k1 | ka | ut | ut | ut | is       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |    |    |    |    |    |    |
| 2.       | 8        | k1 | ka | k1 | ut | ut | is       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |          |    |    |    |    |    |    |    |
| 3.       | 9        | k1 | ka | ut | ut | is | is       | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1       | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 |
| 4.       | 10       | k1 | k1 | 0  | 0  | 0  | is       | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1 | k1       | k1 | k1 | k1 | k1 | ka | k1 | k1 |
| 5.       | 11       | 0  | 0  | ut | ut | is | is       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2       | k2 | 0  | 0  | ka |    |    |    |
| 6.       | 12       | k2 | k2 | ut | ut | ut | 0        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0        | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 7.       | 13       | k2 | ka | is | is | is | is       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | ka |
| 8.       | 14       | k2 | k2 | ut | ut | is | is       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2       | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | k2 | ka |
| 9.       | 15       | k3 | ka | ut | ut | is | is       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 |
| 10.      | 16       |    |    |    |    |    |          | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 |
| 11.      | 17       |    |    |    |    |    |          | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3       | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 | k3 |

**Legenda**

|                  |                    |            |              |
|------------------|--------------------|------------|--------------|
| ks komisioner    | k1 komisioniranje1 | ut utovar  | ka kontrola  |
| vi viljuškarista | k2 komisioniranje2 | is istovar | / Ne pripada |
| kr kontrolor     | k3 komisioniranje3 | 0 pauza    | smjeni       |

**5.3. Optimizacija transportnog procesa**

Primjer optimizacije transportnog procesa se radi za gradsku i nacionalnu distribuciju. Za gradsku distribuciju se koriste kombi vozila nosivosti 5, 6 i 7 euro paleta, koja mogu da ponesu redom 10, 12 i 14 jedinica isporuke koje se distribuiraju u gradskoj mreži. Za nacionalnu distribuciju koristi se kamion nosivosti 16 euro paleta, odnosno 16 jedinica isporuke koje se distribuiraju u nacionalnoj mreži. Nosivost vozila izražena u broju jedinica isporuke koji može stati u njih data je u tabeli ispod (tabela 5.32). U skladu sa tom nosivošću i tipom distribucije koju obavljaju, vozila su redom označena kao vozilo 10-grad, vozilo 12-grad, vozilo 14-grad i vozilo 16-nac. Jedinice povrata po veličini odgovaraju jedinicama isporuke. Za svaki tip vozila maksimalno trajanje rute iznosi 9 h. DP-VRP je prvo riješen bez *u-i* ograničenja, pa zatim sa tim ograničenjem. Rezultati su potom upoređeni, da bi se uočilo koliko to poskupljuje rješenje. I za gradsku i za nacionalnu distribuciju ograničeno je da vozač može maksimalno 3 h da provode na utovarno-istovarnim operacijama kod klijenata. Vrijeme utovarno-istovarnih operacija računato je u odnosu na broj klijenta koji se nalazi na ruti, broj jedinica isporuke koji se dostavlja

i broj jedinica povrata koji se vraća u distributivno skladište. Pretpostavljeno je da svaka posjeta klijentu donosi zadržavanje od 10 minuta, a svaka jedinica isporuke i povrata dodatnih 5 minuta.

**Tabela 5.32. Nosivost vozila kojim se vrši distribucija**

| Vozilo  | Tip distribucije | Tip vozila | Nosivost (jedinica isporuke) | Nosivost (euro paleta) |
|---------|------------------|------------|------------------------------|------------------------|
| 10-grad | gradska          | Kombi      | 10                           | 5                      |
| 12-grad | gradska          | Kombi      | 12                           | 6                      |
| 14-grad | gradska          | Kombi      | 14                           | 7                      |
| 16-nac  | nacionalna       | Kombi      | 16                           | 16                     |

### Rezultat - bez primjene *u-i* ograničenja

Dobijeni rezultati svakog riješenog DP-VRP-a su dati u prilogu 3. Poređenjem rezultata za strategiju 1 i strategiju 2 distribucije, uočava se da se ukupne vrijednosti sva tri parametra smanjuju pri strategiji 2. To važi i za gradsku i za nacionalnu distribuciju, i za sve tipove vozila. Da bi se uočio efekat uvedenih odluka, u narednim tabelama prikazane su razlike u pređenom putu, broju ruta i ukupnom trajanju ruta pri strategiji 1 i strategiji 2 za sve instance i sve periode opsluge. Za gradsku distribuciju rezultat su dati prema tipovima vozila u tabelama 5.33, 5.34 i 5.35, a za nacionalnu u tabeli 5.36.

**Tabela 5.33. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 10-grad**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -1290.46    | -7.67  | -13.00    | -7.14  | -67.72        | -11.11 |
| 1      | 319.22      | 4.85   | 5.00      | 6.94   | 6.37          | 2.79   |
| 2      | -412.56     | -7.38  | -5.00     | -8.33  | -18.54        | -9.15  |
| 3      | -1197.12    | -25.80 | -13.00    | -26.00 | -55.55        | -31.10 |

**Tabela 5.34. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 12-grad**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -1012.29    | -7.13  | -10.00    | -6.67  | -63.57        | -10.92 |
| 1      | 314.30      | 5.72   | 4.00      | 6.78   | 7.28          | 3.36   |
| 2      | -332.12     | -6.98  | -4.00     | -8.00  | -17.79        | -9.17  |
| 3      | -994.47     | -25.20 | -10.00    | -24.39 | -53.06        | -31.01 |

**Tabela 5.35. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 14-grad**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -1107.67    | -8.78  | -12.00    | -9.23  | -64.57        | -11.43 |
| 1      | 156.47      | 3.21   | 2.00      | 3.92   | 5.09          | 2.42   |
| 2      | -281.07     | -6.67  | -3.00     | -6.98  | -16.87        | -8.99  |
| 3      | -983.07     | -27.91 | -11.00    | -30.56 | -52.79        | -31.65 |

**Tabela 5.36. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 16-nac**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -6982.23    | -8.24  | -17.00    | -8.95  | -143.42       | -9.82  |
| 1      | 299.59      | 1.00   | 4.00      | 5.97   | 8.02          | 1.55   |
| 2      | -602.87     | -2.15  | -4.00     | -6.35  | -22.43        | -4.62  |
| 3      | -6678.95    | -24.97 | -17.00    | -28.33 | -129.01       | -28.21 |

**Rezultat - sa primjenom *u-i* ograničenja**

Dobijeni rezultati ukazuju da uvođenje *u-i* ograničenja nije dovelo do značajnijih promjena u odnosu između rješenja pri strategiji 1 i 2. Tabela 5.37 daje uporedni prikaz razlika u rješenjima za obe strategije sa i bez primjene *u-i* ograničenja. Uočljivo je da su razlike između strategija veće pri primjeni *u-i* ograničenja. Detaljne razlike između strategija sa ovim ograničenjem se mogu vidjeti u tabelama priloga 4. Poređenje rezultata pri istoj strategiji, sa i bez primjene *u-i* ograničenja, pokazuje da primjena ovog ograničenja povećava troškove rješenja (tabela 5.38). Detaljne razlike u rješenjima pri istoj strategiji, sa i bez *u-i* ograničenja, nalazi se u prilogu 5.

**Tabela 5.37. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 bez i sa *u-i* ograničenjem**

| Vozilo  | <i>u-i</i> ograničenje | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|---------|------------------------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|         |                        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| 10-grad | bez                    | -1290.46    | -7.67  | -13.00    | -7.14  | -67.72        | -11.11 |
|         | sa                     | -1318.21    | -7.82  | -13.00    | -7.14  | -68.38        | -11.20 |
| 12-grad | bez                    | -1012.29    | -7.13  | -10.00    | -6.67  | -63.57        | -10.92 |
|         | sa                     | -1196.48    | -8.26  | -11.00    | -7.28  | -65.55        | -11.22 |
| 14-grad | bez                    | -1107.67    | -8.78  | -12.00    | -9.23  | -64.57        | -11.43 |
|         | sa                     | -1480.99    | -10.73 | -15.00    | -10.49 | -70.15        | -12.15 |
| 16-nac  | bez                    | -6982.23    | -8.24  | -17.00    | -8.95  | -143.42       | -9.82  |
|         | sa                     | -7648.77    | -8.88  | -27.00    | -13.43 | -149.36       | -10.12 |

**Tabela 5.38. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja pri istim strategijama**

| Vozilo  | Strategija | Pređeni put |      | Broj ruta |       | Trajanje ruta |      |
|---------|------------|-------------|------|-----------|-------|---------------|------|
|         |            | km          | %    | broj      | %     | h             | %    |
| 10-grad | 1          | 41.64       | 0.25 | 0.00      | 0.00  | 0.71          | 0.12 |
|         | 2          | 13.89       | 0.09 | 0.00      | 0.00  | 0.05          | 0.01 |
| 12-grad | 1          | 279.92      | 1.97 | 1.00      | 0.67  | 2.42          | 0.42 |
|         | 2          | 95.73       | 0.73 | 0.00      | 0.00  | 0.44          | 0.08 |
| 14-grad | 1          | 1192.95     | 9.46 | 13.00     | 10.00 | 12.55         | 2.22 |
|         | 2          | 819.63      | 7.12 | 10.00     | 8.47  | 6.97          | 1.39 |
| 16-nac  | 1          | 1352.26     | 1.60 | 11.00     | 5.79  | 14.22         | 0.97 |
|         | 2          | 685.72      | 0.88 | 1.00      | 0.58  | 8.28          | 0.63 |

#### **5.4. Analiza dobijenih rezultata**

Promjene koje je donijela strategija 2 distribucije odrazile su se na sva tri razmatrana procesa, čime su u suštini potvrđene polazne hipoteze istraživanja.

##### **Analiza promjena u procesu realizacije porudžbine**

Strategija 2 distribucije donosi smanjenje broja posjeta u jednom obrascu dostave sa 2.74 na 2.41 i smanjenje broj jedinica isporuka sa 3.68 na 3.38. Time se kod 49.05% klijenata mijenja dosadašnji način poručivanja (tabela 5.39). Do smanjenja broja posjeta dolazi uslijed smanjenja broja jedinica isporuke kod 17.38% klijenata, ali i pri istom broju jedinica isporuke kod njih 15.00% (tabela 5.40). U praksi se smanjenje broja jedinica isporuke može ostvariti prebacivanjem sadržaja jedne ili više tovarno-manipulativnih jedinica na jednu ili više drugih tovarno-manipulativnih jedinica, ukoliko one nisu popunjene. Kod prve grupe klijenata, na taj način se gube sve jedinice isporuke u jednom ili više perioda, pa dolazi do smanjenja broja posjeta. Kod druge grupe dolazi samo do premještanja jedinica isporuke iz jednog ili više perioda u jedan ili više drugih perioda. Pored klijenata koji smanjuju i broj jedinica isporuke i broj posjeta, 12.64% njih smanjuje broj jedinica isporuke pri istom broju posjeta. Kod tih klijenata se samo smanjuje broj jedinica isporuke, ali ostaje bar jedna za isporuku u svakom periodu. Do smanjenja broja jedinica isporuke tada dolazi prebacivanjem sadržaja u tovarno-manipulativne jedinice u drugim periodima.

Najveći procenat klijenata koji prelazi na novi način naručivanja jesu klijenti tipa 2 (90.63%), tj. klijenti koji naručuju dnevno 2 jedinice isporuke. Kod svih njih to podrazumijeva smanjenje broja posjeta, a kod 62% tih klijenata uzrok je smanjenje broja isporuka. Najveći uticaj na ukupne promjene imaju klijenti tipa 3, zbog najvećeg udjela u ukupnom broju klijenata (57.38%). Skoro polovina tih klijenata (47.72%) mijenja dosadašnji način naručivanja. Od toga, 62.61% njih to radi uz smanjenje broja posjeta, a kod 17.43% to je posljedica smanjenja broja jedinica isporuke. Uopšteno, u slučaju klijenata tipa 3, kod većine tih klijenata, smanjenje broja posjeta je sa tri na dvije i broja jedinica isporuke sa tri na dvije.

**Tabela 5.39. Promjene kod klijenata koji su prešli na nove obrasce dostave u procentima**

| Tip | Prelazi na nove šeme | Prelazi na nove šeme uz broj posjeta |       |                    |        | Prelazi na nove šeme uz broj jedinica isporuke |       |                    |       |
|-----|----------------------|--------------------------------------|-------|--------------------|--------|--|-------|--------------------|-------|
|     |                      | Manji                                | Isti  | Odnos (manji-isti) |        | Manji  | Isti  | Odnos (manji-isti) |       |
| svi | 49.05                | 32.38                                | 16.67 | 66.02              | 33.98  | 28.81  | 20.24 | 58.74              | 41.26 |
| 2   | 90.63                | 90.63                                | 0.00  | 100.00             | 0.00   | 62.50  | 28.13 | 68.97              | 31.03 |
| 3   | 47.72                | 29.88                                | 17.84 | 62.61              | 37.39  | 26.14  | 21.58 | 54.78              | 45.22 |
| 4   | 57.35                | 50.00                                | 7.35  | 87.18              | 12.82  | 22.06  | 35.29 | 38.46              | 61.54 |
| 5   | 33.33                | 2.78                                 | 30.56 | 8.33               | 91.67  | 33.33  | 0.00  | 100.00             | 0.00  |
| 6   | 47.37                | 0.00                                 | 47.37 | 0.00               | 100.00 | 47.37  | 0.00  | 100.00             | 0.00  |
| 7   | 7.14                 | 0.00                                 | 7.14  | 0.00               | 100.00 | 7.14   | 0.00  | 100.00             | 0.00  |
| 8   | 10.00                | 0.00                                 | 10.00 | 0.00               | 100.00 | 10.00  | 0.00  | 100.00             | 0.00  |

**Tabela 5.40. Promjene u pogledu broja posjeta i broja jedinica isporuke (ukršteno) u procentima**

| Tip | Prelazi na nove šeme | Smanjili broj posjeta uz broj jedinica isporuke |       |                    |       | Zadržali isti broj posjeta uz broj jedinica isporuke |      |                    |       |
|-----|----------------------|---|-------|--------------------|-------|--|------|--------------------|-------|
|     |                      | Manji   | Isti  | Odnos (manji-isti) |       | Manji  | Isti | Odnos (manji-isti) |       |
| svi | 49.05                | 17.38   | 15.00 | 53.68              | 46.32 | 12.64  | 4.03 | 75.83              | 24.17 |
| 2   | 90.63                | 62.50   | 28.13 | 68.97              | 31.03 | 0.00   | 0.00 | 0.00               | 0.00  |
| 3   | 47.72                | 17.43   | 12.45 | 58.33              | 41.67 | 10.70  | 7.14 | 60.00              | 40.00 |
| 4   | 57.35                | 14.71   | 35.29 | 29.41              | 70.59 | 7.35   | 0.00 | 100.00             | 0.00  |
| 5   | 33.33                | 2.78  | 0.00  | 100.00             | 0.00  | 30.55  | 0.00 | 100.00             | 0.00  |
| 6   | 47.37                | 0.00  | 0.00  | 0.00               | 0.00  | 47.37  | 0.00 | 100.00             | 0.00  |
| 7   | 7.14                 | 0.00  | 0.00  | 0.00               | 0.00  | 7.14   | 0.00 | 100.00             | 0.00  |
| 8   | 10.00                | 0.00  | 0.00  | 0.00               | 0.00  | 10.00  | 0.00 | 100.00             | 0.00  |

Ukupno gledajući kod 11.98% klijenata se smanjuje broj posjeta (tabela 5.41), a kod 8.21% se smanjuje broj jedinica isporuke (tabela 5.42). U trećem periodu dolazi do najvećih smanjenja, sa smanjenjem od 35.69% u pogledu broja posjeta i 29.43% u pogledu broja jedinica isporuke. Što znači da će prodajni objekti uglavnom ostati bez

treće isporuke. Ipak, prosječan broj jedinica isporuke u posjeti ostaje približno isti, tj. oko 4 (tabela 5.43). Do tog broja se dolazi kad se u prosjek za neki period ne uzimaju klijenti kojima se ne isporučuje nijedna isporuka. Iz toga proizlazi, da se ukupno posmatrano smanjio i broj posjeta i broj jedinica isporuke. Iz tabele 5.39 se vidi da njih 32.38% ima manji broj posjeta i 28.81% manji broj jedinica isporuke. Prema tome, može se očekivati je da je i broj isporuka po posjeti ostao približno isti. U konačnici to navodi na zaključak da smanjenje broja jedinica isporuke po posjeti prati smanjenje broja posjeta, što je moguće ako kapaciteti tovarno-manipulativnih jedinica nisu bili u potpunosti iskorišćeni.

**Tabela 5.41. Prosječan broj posjeta po obrascu**

| Periodi      | 1    | 2     | 3      | Svi    |
|--------------|------|-------|--------|--------|
| Strategija 1 | 0.99 | 0.92  | 0.84   | 2.74   |
| Strategija 2 | 1.00 | 0.88  | 0.54   | 2.41   |
| Razlika (%)  | 0.97 | -4.16 | -35.69 | -11.98 |

**Tabela 5.42. Prosječan broj jedinica isporuka po obrascu**

| Periodi      | 1    | 2     | 3      | Svi   |
|--------------|------|-------|--------|-------|
| Strategija 1 | 1.47 | 1.22  | 1.00   | 3.68  |
| Strategija 2 | 1.55 | 1.13  | 0.70   | 3.38  |
| Razlika      | 5.19 | -7.03 | -29.43 | -8.21 |

**Tabela 5.43. Prosječan broj jedinica isporuka po posjeti**

| Periodi      | 1    | 2     | 3    | Svi  |
|--------------|------|-------|------|------|
| Strategija 1 | 1.49 | 1.33  | 1.18 | 4.00 |
| Strategija 2 | 1.55 | 1.29  | 1.30 | 4.14 |
| Razlika      | 4.18 | -3.00 | 9.75 | 3.44 |

Dosadašnja analiza ukazuje da kako tovarno-manipulativne jedinice nisu bile dovoljno popunjene, strategija 2 distribucije je omogućila smanjenje broja jedinica isporuke i broja posjeta po obrascu dostave kod određenog broj klijenata. To je za posljedicu imalo smanjenje broja posjeta sa tri na dvije kod tih klijenta. Ta smanjenja su se kroz strategiju najviše realizovala u trećem periodu opsluge, zbog dodatnih benefita koji se time postižu. Kod gradske distribucije, to znači da se smanjuje broj večernjih posjeta klijentima. Time se racionalizuje prijem robe u prodajnim objektima, jer se sva roba prima u toku jedne smjene (7 - 15 h). Prije svega, zbog manje radne snage koju je u tom slučaju potrebno angažovati. U zimskom periodu, to znači i smanjenje dostava koje se realizuju pri slabijoj vidljivosti napolju. Takođe,

razlog je i činjenica da se poslije 15 h obavljaju najveće kupovine i da ih tad ima najviše (najviše ih generišu ljudi koji se sa posla vraćaju svojim kućama), te su u tom periodu potrebni radnici u samom prodajnom objektu (za rad na kasama, pomoći kupcima oko vaganja voća i povrća, usluživanje mesom i mesnim prerađevinama itd.). S druge strane, komfor kupaca prilikom kupovine je ugrožen ukoliko se tada popunjavaju police, a sem toga kupci očekuju da police budu pune prilikom kupovine. Teže bi bilo i dopremiti robu do police i popuniti je, uslijed povećanog broja ljudi, pa bi to i trajalo dosta duže. To posebno važi za vrlo male prodajne objekte u gradskoj mreži, gdje se roba direktno smješta na police iz dostavnih vozila. U toku dana (do 15 h) kupci su uglavnom penzioneri, djeca i zaposleni ljudi koji izlaze sa posla po doručak. Svi oni generišu manje kupovine i ne zadržavaju se dugo u prodajnim objektima. Prema tome, prikladnije je da se tad radi prijem robe i popunjavanje polica. Slično važi za prodajne objekte koji se opslužuju u okviru nacionalne distribucije. Bilo bi dobro da se petkom i subotom manje vrši prijem robe, jer su tad radnici potrebni u prodajnom objektu više nego drugim danima zbog veće kupovine.

### **Efekti na području skladišta**

Strategija 2 distribucije donosi značajnije opterećenje skladištu iz kojeg se vrši gradska distribucija u periodu od 7 do 10 h kako bi se spremila podnevna isporuka i u periodu od 14 do 18 h kako bi se spremila jutarnja. Manja opterećenost između ta dva perioda mogla bi se iskoristi za prijem robe, jer u tom periodu bi trebalo da stiže roba od dobavljača koja je krenula ujutru od njihovih skladišta. Trošak radne snage u skladištu se smanjuje za 7.49%, poredeći strategiju 2 i strategiju 1 distribucije u slučaju postojanja mogućnosti odlaganja izvršenja aktivnosti, **čime su potvrđene hipoteze H2 i H3**. To je približno smanjenju broja pošiljki pri strategiji 2 od 8.21%. Može se postaviti pitanje kako je došlo do smanjenja troškova radne snage, ako se ista količina robe priprema u skladištu. Jedan od razloga je to što je pretpostavljeno da vrijeme koje je potrebno komisioneru da izdvoji pošiljke koje su sada veće, nije povećano. Smatralo se da prilikom obilaska lokacija proizvoda sam broj proizvoda koji se izuzima ne utiče značajno na vrijeme komisioniranja. U slučaju viljuškarista koji vrše utovar, podrazumijevano je da broj proizvoda na



tovarno-manipulativnoj jedinici ne utiče na potreban broj viljuškarista. To je dovelo do smanjenja potrebnog broja komisionera i viljuškarista za utovar. Broj viljuškarista za istovar robe od dobavljača i kontrolora na prijemu je ostao isti i pri strategiji 2. Rezultati ukazuju da smanjenje potrebnog broja radnika za pripremu isporuka nije toliko veliko, da bi uticalo na ukupne troškove. Tek omogućavanjem da se izvršenje aktivnosti odloži, došlo se do smanjenja troškova.

### **Efekti na području transporta**

Analiza je rađena za slučaj bez primjene *u-i* ograničenja. U slučaju gradske distribucije, pri strategiji 2, opterećenje transporta u prvom periodu se blago povećava, u drugom blago smanjuje, a u trećem značajno smanjuje. Stoga, ukupni troškovi transporta se smanjuju. To je, prije svega, iz razloga što su tada tovarno-manipulativne jedinice popunjene, pa ih je manje. Može se reći da ukupno smanjenje pređenog puta pri strategiji 2 prati smanjenje broja jedinica isporuke (8.21%) (tabela 5.44). U slučaju gradske distribucije, smanjenja po tipu vozila od najmanjeg do najvećeg kapaciteta, su 7.67%, 7.13% i 8.78%. Dobijeni rezultati jasno potvrđuju *opravdanost i ispunjenost početnih hipoteza istraživanja H2 i H3*.

Jasno je šta smanjenje broja pređenih kilometara donosi kompaniji. Međutim, da bi se dobile potpune uštede, potrebno je uzeti u obzir i smanjenja u pogledu broja ruta i trajanja opsluge. Smanjenjem broja ruta i trajanja distribucije, kompanija bi dobila prednosti u pogledu angažovanja vozila i vozača. Manji broj ruta znači manji broj potrebnih vozila za realizovanje dostave u nekom periodu opsluge. Manje vrijeme provedeno u opsluzi, može takođe da znači manji broj potrebnih vozača i manje troškove vozača. Broj ruta i trajanje distribucije se najviše smanjuju u trećem periodu (30.56% i 31.65%). Pretpostavka je da se vozila iz prvog perioda dostave (7 – 11 h) vraćaju u periodu od 9 do 12 h i da se po povratku tovare za dostavu od 12 do 15 h. Shodno tome, sva vozila se vraćaju do 16 h. Pri strategiji 1, samo jedan dio njih se tovari po povratku za dostavu od 15 do 18 h. Pri strategiji 2, taj broj je dodatno smanjen. To je dobro iz ugla transporta, jer se tako smanjuje potreban broj vozača. Većina vozača bi u tom slučaju završavala svoj radni dan do 16 h. Isti vozač ne bi morao da radi od 7 do 19 h, ili bi mogao da radi uz određene slobodne dane. Sa novim rješenjem smanjuje se vremenska iskorišćenost vozila, jer se povećava broj

vozila koji ne rade poslije 16 h. S druge strane, raste iskorišćenost nosivosti vozila i smanjuju se troškovi vozača.

**Tabela 5.44. Poređenje smanjenja broja jedinica isporuke i posjeta sa smanjenjem pređenog puta za gradsku distribuciju**

| Period           | Procentualno |       |        |        | Za šest dana |         |          |          |
|------------------|--------------|-------|--------|--------|--------------|---------|----------|----------|
|                  | 1            | 2     | 3      | Svi    | 1            | 2       | 3        | Svi      |
| Posjeta          | 0.97         | -4.16 | -35.69 | -11.98 | 2.65         | -12.85  | -128.60  | -138.81  |
| Jed. isporuke    | 5.19         | -7.03 | -29.43 | -8.21  | 28.60        | -27.55  | -129.99  | -128.94  |
| Pređeni put (km) |              |       |        |        |              |         |          |          |
| vozilo 10        | 4.85         | -7.38 | -25.8  | -7.67  | 319.22       | -412.56 | -1197.27 | -1290.46 |
| vozilo 12        | 5.72         | -6.98 | -25.2  | -7.13  | 314.3        | -332.12 | -994.47  | -1012.29 |
| vozilo 14        | 3.21         | -6.67 | -27.91 | -8.78  | 156.47       | -281.07 | -983.07  | -1107.67 |
| Broj ruta        |              |       |        |        |              |         |          |          |
| vozilo 10        | 6.94         | -8.33 | -26.00 | -7.14  | 5            | -5      | -13      | -13      |
| vozilo 12        | 6.78         | -8.00 | -24.39 | -6.67  | 4            | -4      | -10      | -10      |
| vozilo 14        | 3.91         | -6.98 | -30.56 | -9.23  | 2            | -3      | -11      | -12      |
| Trajanje (h)     |              |       |        |        |              |         |          |          |
| vozilo 10        | 2.79         | -9.15 | -31.10 | -11.11 | 6.37         | -18.54  | -55.55   | -67.72   |
| vozilo 12        | 3.36         | -9.17 | -31.01 | 10.92  | 7.28         | 17.79   | 53.06    | -63.57   |
| vozilo 14        | 2.42         | -8.99 | -31.65 | 11.43  | 5.09         | -16.87  | -52.79   | -64.57   |

U slučaju nacionalne distribucije, broj isporuka pri strategiji 2 se smanjuje za 8.21%, a pređeni put za 8.24% (tabela 5.45). Njihov odnos je približno sličan onom kod gradske distribucije. Isto važi i za smanjenja u broju ruta i trajanju distribucije. Broj ruta se smanjuje za 8.95%, a trajanje opsluge za 9.82%. Smanjenje broja ruta se i kod ove vrste distribucije može iskoristi za poboljšanja uslova rada vozača. Kako se broj ruta najviše smanjuje u trećem periodu opsluge, vozači bi mogli raditi svaku drugu subotu ili petak. Prema tome, bili bi slobodni dva dana u sedmici, u petak i nedjelju, ili u subotu i nedjelju. Takođe, ako se pokaže da je pojedinu robu bolje dopremiti sopstvenim vozilima od dobavljača, onda ta slobodna vozila mogu da se preusmjere za te potrebe.

**Tabela 5.45. Poređenje smanjenja broja jedinica isporuke i posjeta sa smanjenjem pređenog puta za nacionalnu distribuciju**

| Period           | Procentualno |       |        |        | Sedmično (prosjeak) |         |          |          |
|------------------|--------------|-------|--------|--------|---------------------|---------|----------|----------|
|                  | 1            | 2     | 3      | Svi    | 1                   | 2       | 3        | Svi      |
| Posjeta          | 0.97         | -4.16 | -35.69 | -11.98 | 2.65                | -12.85  | -128.60  | -138.81  |
| Jed. isporuke    | 5.19         | -7.03 | -29.43 | -8.21  | 28.60               | -27.55  | -129.99  | -128.94  |
| Pređeni put (km) | 1.00         | -2.15 | -24.97 | -8.24  | 99.86               | -200.96 | -2226.32 | -2327.41 |
| Broj ruta        | 5.97         | -6.35 | -28.33 | -8.95  | 1.33                | -1.33   | -5.67    | -5.67    |
| Trajanje (h)     | 1.55         | -4.62 | -28.21 | -9.82  | 2.67                | -7.48   | -43.00   | -47.81   |

## 6. ZAKLJUČAK

Trendove u današnjoj distribuciji kreiraju potrošači, koji imaju sve strože zahtjeve u pogledu dostupnosti proizvoda. Žele da su im proizvodi dostupni u što kraćem roku i da ih što manje drže na zalihama. To dovodi do čestog poručivanja manjih količina proizvoda od stane prodajnih objekata. Današnje vrijeme donosi specifične izazove za distribuciju, kao što su kratki rokovi isporuke, nedostatak radne snage, problem sa energentima itd. Distribucija robe u gradskim sredinama ima svoju dodatnu specifičnost, kao što su prostorni i ekološki uslovi. To sve zahtijeva optimizaciju u pogledu korišćenja energetske, ljudske i prostorne resursa. S druge strane, od distribucije se zahtijeva da maksimizira zadovoljstvo potrošača proizvoda. Sve navedeno inicira da je neophodna optimizacija logističkih procesa u distribuciji proizvoda, čemu je ova disertacija nastojala da doprinese.

U disertaciji su predloženi pristup, koncept i modeli za optimizaciju logističkih procesa u distribuciji proizvoda. Prema predloženom pristupu polazna tačka za optimizaciju svih logističkih procesa je definisanje uslova isporuke, prije svih, broja isporuka. U skladu s tim, predloženi koncept optimizacije podrazumijeva da se definišu različite strategije distribucije u pogledu uslova isporuke i odredi koja je bolja na bazi rezultata optimizacije skladišnog i transportnog procesa. Problem optimizacije transportnog procesa pri distribuciji proizvoda postavljen je kao VRPDP, dok je problem optimizacije skladišnog procesa predstavljen kao PRR u skladištu. Prvi je dopunjen sa mogućnošću ograničavanja vremena koje vozač provede obavljajući utovarno-istovarne operacije, s ciljem poboljšanja uslova rada vozača. PRR u skladištu je dopunjen sa mogućnošću odlaganja izvršenja pojedinih aktivnosti u skladištu, kako bi se što više optimizovalo iskorišćenje radne snage.

Istraživanje sprovedeno u disertaciji potvrdilo je hipoteze iznijete na početku disertacije. Analizom dobijenih rezultata za primjer rješavan u radu, dolazi se do zaključka da uslovi distribucije direktno utiču na ekonomičnost odvijanja distribucije i logističkih procesa. Optimizacija korišćenja glavnih resursa logističkih procesa, kao što su radna snaga i transportna sredstva, daje pun efekat samo uz odgovarajuće uslove isporuke, čime se potvrđuje hipoteza H1. Razvoj i primjena

modela optimizacije kojima se optimizuje njihova upotreba u funkciji različitih uslova isporuke, omogućava bolje iskorišćenje ovih resursa, što potvrđuje hipotezu H2. Rezultati dobijeni primjenom koncepta i modela jasno pokazuju da mjere racionalizacije i konsolidacije porudžbenica i isporuka, obezbjeđuju konkretne uštede u logističkim procesima na području transporta i skladištenja proizvoda, čim je potvrđena hipoteza H3.

## **6.1 Naučni doprinosi**

Iz potvrđenih hipoteza, proizlazi i potvrda očekivanih naučnih doprinosa disertacije. Oni se ogledaju u sveobuhvatnom pristupu optimizaciji logističkih procesa sa fokusom na dinamici dostave tj. prethodnom definisanju uslova isporuke, ali i na razvoju koncepta i modela optimizacije ovih procesa u distribuciji. DS-PRR model je uklopljen u sveobuhvatni koncept optimizacije logističkih procesa i dodatno je unaprijedio rješenje kroz raspoređivanje izvršenja aktivnosti u skladištu. Predloženi model za optimizaciju transportnog procesa doprinosi literaturi dajući joj novi oblik VRPDP-a, koji podrazumijeva da se pošiljke koje se vraćaju u distributivno skladište ne preuzimaju prije nego što se izvrše sve isporuke, pri tom nije neophodno da svi klijenti imaju povratne pošiljke. Uz to, ovaj model je dopunjen sa ograničenjem o trajanju utovara i istovara na jednoj ruti, s ciljem poboljšanja uslova rada vozača. Detaljnom analizom razvoja odnosa distributera i korisnika distribucije, ustanovljena je međuzavisnost logistike, distribucije, racionalizacije, optimizacije, uspjeha distributera, zadovoljstva korisnika distribucije i zadovoljstva potrošača proizvoda. Mogući praktični doprinosi rada pokazani su na primjeru distributera sa teritorije Srbije, za gradski i nacionalni tip distribucije. Oni podrazumijevaju rješenja kojim se smanjuju troškovi radne snage u skladištu i troškovi transporta. Na primjeru se pokazalo da se troškovi radne snage u skladištu smanjuju za 7.49%. Pređeni put se smanjuje od 7 do 9%, broj ruta od 7 do 10% i trajanje distribucije od 9 do 12% u zavisnosti od tipa vozila i vrste distribucije.

## **6.2 Pravci budućih istraživanja**

Kako potreba za distribucijom gotovih proizvoda neće nestati, bar ne u skorijoj budućnosti, racionalizacija i optimizacija logističkih procesa biće u fokusu svih

teorijskih i praktičnih nastojanja usmjerenih ka unaprjeđenju logističkih procesa. Rezultati istraživanja u ovoj disertaciji jasno ukazuju na stalnu potrebu za usklađivanjem zahtjeva prodaje i logistike distribucije. U budućnosti će na raspolaganju biti i snažniji računarski resursi, tako da će se moći obrađivati veće količine podataka. Tehnološki napredak i inovacije otvoriće nove prostore za optimizaciju logističkih procesa. Međutim, može se očekivati i da izazovi u distribuciji rastu, odnosno još veći pritisak na smanjenje potrošnje energije, upotrebe radne snage i uticaj na životnu sredinu, uz naročitu brigu o uslovima rada, kvalitetu distribucije i sveukupnim troškovima. Stoga, budućnost distributera će biti u daljim nastojanjima ka unaprjeđenju logističkih procesa.

Na bazi ideje za optimizaciju logističkih procesa u distribuciji iznesene u ovoj disertaciji, nameću se određeni pravci budućih istraživanja. Oni se odnose na:

- Testiranje modela na drugim realnim primjerima, na različitim tržištima i ispitivanje eksternih faktora koji mogu uticati na rješenja;
- Prilagođavanje/adaptaciju modela za rješavanje drugih (sličnih) problema;
- Razvoj aplikacije koja bi služila logističarima kao alat za podršku odlučivanju;
- Predviđanje tražnje i zahtjeva za distribucijom proizvoda, primjenom Big data analitike i vještačke inteligencije;
- Razvoj modela optimizacije skladišnog procesa baziranih na automatizaciji i robotizaciji;
- Optimizaciju procesa transporta i isporuke robe primjenom novih tehnologija kao što su dronovi i autonomna vozila.

## LITERATURA

- [1] Alajkovic, A., Brcic, M., Ivandic, V., Bubalo, L., Koncic, M., Kovac, M. (2022). Delivery pattern planning in retailing with transport and warehouse workload balancing, *Croatian Operational Research Review*, 13 (1), 99-111.
- [2] Andrejić, M. (2015). Modeli merenja i unapređenja efikasnosti logističkih procesa distribucije proizvoda. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [3] Andrejić, M., Kilibarda, M. (2017). Efikasnost logističkih procesa. Monografija. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- [4] Andrejić, M., Kilibarda, M., Popović, V. (2015). Logistics failures in distribution process. Proceedings of the 2nd Logistics international conference, LOGIC 2015, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, pp. 247-252.
- [5] Allison, J.D. Workload Balancing in Vehicle Routing Problems. (1986). Ph.D. Dissertation, Oklahoma State University, USA.
- [6] Avci, M., & Topaloglu, S. (2015). An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 83, 15–29.
- [7] Bai, R., Chen, X., Chen, Z.L., Cui, T., Gong, S., He, W., Jian, X., Jin, H., Jin, J., Kendall, G., Li, J., Lu, Z., Ren, J., Weng, P., Xue, N. and Zhang, H. (2021). Analytics and machine learning in vehicle routing research. *International Journal of Production Research*, 61 (1), 4-30.
- [8] Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., Mingozzi, A. (2003). An exact algorithm for the traveling salesman problem with deliveries and collections. *Networks*, 42, 26-41.
- [9] Ballou, R.H. (2007). The evolution and future of logistics and supply chain management. *European Business Review*, 19 (4), 332-348.
- [10] Bard, J.F. and Wan, L. (2008). Workforce design with movement restrictions between workstation groups. *Manufacturing and Service Operations Management*, 40 (1), 24-42.
- [11] Bard, J.F., Morton, D.P, Wang, Y.M. (2007). Workforce planning at USPS mail processing and distribution centers using stochastic optimization. *Annals of Operations Research*, 155 (1), 51–78.
- [12] Bartels, R. (1976). Marketing and Distribution are not Separate. *International Journal of Physical Distribution*, 7 (1), 22–29.
- [13] Bashiri, M. and Sharafi, A. (2015). Two Developed Models for a Green Vehicle Routing Problem with Safety and Social Concerns, CIE45 Proceedings, 28-30 October 2015, Metz, France.

- [14] Bienstock, C.C., Mentzer, J.T. & Bird, M.M. (1997). Measuring physical distribution service quality. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 25, 31-44.
- [15] Bodin, L. and Golden, B. (1981). Classification in Vehicle Routing and Scheduling, *Networks*, 11, 97-108.
- [16] Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313.
- [17] Cachon, G. P. (2001). Managing a retailer's shelf space, inventory, and transportation. *M&SOM*, 3 (3), 211-229.
- [18] Casco, D. O., Golden, B. L., and Wasil, E. A. (1988). Vehicle routing with backhauls: Models, algorithms, and case studies. In Golden, B. and A.A. Assad, e., editors, *Vehicle Routing: Methods and Studies*, 16, 127-147, Amsterdam.
- [19] Chávez, J. J. S., Escobar, J. W., and Echeverri, M. G. (2016). A multi-objective Pareto ant colony algorithm for the Multi-Depot Vehicle Routing problem with Backhauls. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (1), 35-48.
- [20] Chávez, J. J. S., Escobar, J. W., Echeverri, M. G., and Meneses, C. A. P. (2015). A metaheuristic ACO to solve the multi-depot vehicle routing problem with backhauls. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 6 (2), 49-58.
- [21] Chopra, S. i Meindl, P. (2013). *Supply Chain Management Strategy, Planning, and Operation*. 5th Edition, Pearson, London.
- [22] Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1979). The vehicle routing problem. In: Christofides AM, P. Toth, & C. Sandi (Ed.). *Combinatorial optimization*. Chichester, Wiley, 315-338.
- [23] Clarke, G., Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581
- [24] Cox, R., Goodman, C. and Fichandler, T. (1965). *Distribution in a High-Level Economy*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [25] Croes, G., A. (1958). A method for solving travelling salesman problems, *Operations Research*, 6 (6), 791-812.
- [26] Dantzig G. B. i Ramser J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6, 80-91.
- [27] Davarzani, H., Norrman, A. (2015). Toward a relevant agenda for warehousing research: literature review and practitioner's input. *Logistics Research*, 8 (1).
- [28] De Causmaecker, P., Demeester, P., Vanden Berghe, G. and Verbeke, B. (2004). Analysis of real-world personnel scheduling problems. In *Proceedings of the 5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*, Pittsburgh, USA, 183-197.

- [29] de Leeuw, S, and Wiers, V.C.S. (2015). Warehouse Manpower Planning Strategies in Times of Financial Crisis: Evidence from Logistics Service Providers and Retailers in The Netherlands. *Production Planning and Control*, 26 (4), 328–337.
- [30] Deif, I., Bodin, L. D. (1984). Extension of the Clarke and Wright algorithm for solving the vehicle routing problem with backhauling. *Proceedings of the Babson Conference on Software Uses in Transportation and Logistics Management*, Babson Park, USA.
- [31] Derkinderen, V., Jessa Bekker, J., Smet, P. (2023). Optimizing workforce allocation under uncertain activity duration. *Computers & Industrial Engineering*, 109228.
- [32] Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische matematik*, 1(1), 269–271.
- [33] Dragan, D., Kramberger, T., Popović, V. (2019). Optimization methods and heuristics and their role in supply chains and logistics in Vidović M., Kilibarda M., Zečević S., Radivojević G. (eds.). *Quantitative methods in logistics*. Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, Accepted for publishing.
- [34] Dragan, D., Keshavarzsaleh, A., Popović, V., Jereb B., Intihar, M. (2019). Heuristic-based optimisation approach: cost-effective school transportation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*.
- [35] Dragan, D., Keshavarzsaleh, A., Intihar, M., Popović, V., Kramberger, T. (2020). Throughput forecasting of different types of cargo in the adriatic seaport Koper. *Maritime Policy & Management*.
- [36] Dragan, D., Popović, V., Keshavarzsaleh, A. (2019). Forecasting future trends in freight transport in Slovenia until the year 2030. *Proceedings of the 4th Logistics international conference, LOGIC 2019*, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, pp. 02-19.
- [37] Eksioğlu, B., Vural, A.V., Reisman, A. T. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers and Industrial Engineering*, 57, 1472–1483.
- [38] Elatar, S., Abouelmehdi, K., Riffi, M.S. (2023). The vehicle routing problem in the last decade: variants, taxonomy and metaheuristics. *Procedia Computer Science*, 2 (220), 398–404.
- [39] Emerson, C.J.; Grimm, C.M. (1996). Logistics and Marketing Components of Customer Service: An Empirical Test of the Mentzer, Gomes and Krapfel Model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 26 (8), 29–42.
- [40] Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M. and Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: a review of applications, methods and models”, *European Journal of Operational Research*, 153, 3–27.



- [41] Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B. and Sier, D. (2003). An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering. *Annals of Operations Research*, 127 (1), 121-144.
- [42] Farahani, R.Z. Rezapour, S., Kardar, L. (2011). *Logistics Operations and Management: Concepts and Models*, Elsevier.
- [43] Faulin, J., Lera-Lopéz, F., Juan, A. (2011). Optimizing routes with safety and environmental criteria in transportation management in Spain: a case study. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 4, 38-59.
- [44] Fernie, J. (1997). Retail Change and Retail Logistics in the United Kingdom: Past Trends and Future Prospects, *The Service Industries Journal*, 17 (3), 383-396.
- [45] Fernie, J., Sparks, L., McKinnon, A.C. (2010). Retail logistics in the UK: past, present and future. *International Journal of Retail and Distribution Management*, 38 (11), 894-914.
- [46] Fisher, M. L. i Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11 (2), 109-124.
- [47] Fleischmann B, Meyr H, Wagner M (2005) Advanced planning. In: Stadtler H, Kilger C (eds) *Supply chain management and advanced planning*, 3rd ed. Springer, Berlin, 81-106.
- [48] Freichel, S. i Wörtge, J. (2018). Facility Design in Omni-Channel Retail - A logistics point of view. The 18th International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management, Osijek, Croatia.
- [49] Ganbold, O., Kundu, K., Li, H., Zhang, W. (2020). A Simulation-Based Optimization Method for Warehouse Worker Assignment. *Algorithms*, 13 (12), 326.
- [50] García-Nájera, A., Bullinaria, J.A., & Gutiérrez-Andrade, M.A. (2015). An evolutionary approach for multi-objective vehicle routing problems with backhauls. *Computers & Industrial Engineering*, 81, 90-108.
- [51] Gelinas, S., Desrochers, M., Desrosiers, J., Solomon, M. M. (1995). A new branching strategy for time constrained routing problems with application to backhauling. *Annals of Operations Research*, 61, 91-109.
- [52] Gencer, C., Kızılkaya Aydoğan E., Çetin, S. (2010). Simultaneous pick-up and delivery decision support systems. In *Decision Support Systems, Advances*. Croatia, INTECH, 203-214.
- [53] Ghiani, G., Laporte, G., Musmanno, R. (2004). *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*. Wiley-Interscience, Hoboken, USA.
- [54] Goetschalckx, M., Jacobs-Blecha, C. (1989). The vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research* 42, 39-51.
- [55] Golden, B. L., Magnanti, T. L., & Nguyen, H. Q. (1972). Implementing vehicle routing algorithms. *Networks*, 7(2), 113-148.

- [56] Gora, P., Bankiewicz, D., Karnas, K., Kaźmierczak, W., Kutwin, M., Perkowski, P., Plotka, S., Szczurek, A., & Zięba, D. (2020). On a road to optimal fleet routing algorithms: a gentle introduction to the state-of-the-art. In *Smart Delivery Systems*, 37-92, Elsevier.
- [57] Gribkovskaia, I., Halskau, and Myklebost, K. (2001). Models for pick-up and deliveries from depots with lasso solutions. In Stefansson, G. and Tilanus, B., editors, *Proceedings of the 13th Annual Conference on Logistics research NOFOMA 2001*, pp 279–293. Chalmers University of Technology, Göteborg.
- [58] Gribkovskaia, I., Halskau, sr Ø, Laporte, G., Vlček, M. (2007). General solutions to the single vehicle routing problem with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 180 (2), 568-84.
- [59] Gribkovskaia, I., Laporte, G., and Shyshou, A. (2008). The single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups. *Computers & Operations Research*, 35 (9), 2908–2924.
- [60] Günther, M. and Nissen, V. (2010) Sub-daily staff scheduling for a logistics service provider. *KI Künstliche Intell*, 24, 105–113.
- [61] Günther, M. and Nissen, V. (2010). A comparison of three heuristics on a practical case of sub-daily staff scheduling”. In *Proceedings of the 8th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*, Belfast, Northern Ireland, 201–219.
- [62] Günther, M. and Nissen, V. (2010b). Sub-daily staff scheduling for a logistics service provider. *KI – Künstliche Intelligenz*, 24, 105–113.
- [63] Hlača, B. (2006). *Poslovna logistika*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka.
- [64] Hoff, A., Gribkovskaia, I., Laporte, G., and Løkketangen, A. (2009). Lasso solution strategies for the vehicle routing problem with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 192 (3), 755–766.
- [65] Holzapfel, A., Hübner, A., Kuhn, H., Sternbeck, M.G. (2016). Delivery pattern and transportation planning in grocery retailing. *European Journal of Operational Research*, 252, 54-68.
- [66] Hou, H., Chaudhry, S., Chen, Y. and Hu, M. (2017). Physical distribution, logistics, supply chain management, and the material flow theory: a historical perspective. *Information Technology and Management*, 18 (2), 107-117.
- [67] Hrablik, H., Horňáková, N. & Babčanová, D. (2015). Use of operational research methods in logistics. In *Carpathian Logistics Congress*, Jeseník, Czech Republic, 307-312.
- [68] Hübner, A.H., Kuhn, H. and Sternbeck, M.G. (2013). Demand and supply chain planning in grocery retail: an operations planning framework, *International Journal of Retail & Distribution Management*, 41 (7), 512-530.
- [69] Kärki, P. (2012). The impact of customer order lead time-based decisions on the firm’s ability to make money: Case study: Build to order manufacturing of

electrical equipment and appliances. ACTA Wasaensia 257, Industrial Management 25, Universitas Wasaensis.

- [70] Kellermayr-Scheucher, M., Niedermeier, M., Brandtner, P. (2023). Applications and Perceptions of Workforce Management Systems for Warehouse Operation - Results and Findings from Expert Interviews, *Procedia Computer Science*, 219, 255–262.
- [71] Keskinurk, T., Yildirim, M.B. (2011). A genetic algorithm metaheuristic for bakery distribution vehicle routing problem with load balancing. *Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, International Symposium on, 287-291.
- [72] Kilibarda, M., Zečević, S. (2008). Upravljanje kvalitetom u logistici, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- [73] Kilibarda, M., Andrejić, M., Popović, V. (2013). Creating and measuring logistics value. *Proceedings of the 1st Logistics international conference LOGIC 2013*, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, pp. 197-202.
- [74] Kilibarda, M., Andrejić, M., Popović, V. (2020). Research in logistics service quality: a systematic literature review. *Transport*, 35(2).
- [75] Kilibarda, M., Kaurin, T., Popović, V., Despić D. (2018). Izbor RFID sistema u distribuciji proizvoda primenom AHP metode. *Zbornik radova sa konferencije Simpozijum operacionih istraživanja SYM-OP-IS 2018*, Zlatibor, str. 135-140.
- [76] Koc, C. i Laporte, G. (2018). Vehicle routing with backhails: Review and research perspectives. *Computer Operation Research*, 91, 79–91.
- [77] Koç, C., Laporte, G., & Tükenmez, I. (2020). A review of vehicle routing, with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, 104987–105001.
- [78] Koch, H., Schlogell, M. & Bortfeldt, A. (2020). A hybrid algorithm for the vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints and mixed backhails. *Journal of Scheduling*, 23, 71–93.
- [79] Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P., & Kechagias, E. P. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. *Operations Research*, 22, 2033–2062.
- [80] Küçükoglu, I. i Öztürk, N. (2013). A differential evolution approach for the vehicle routing problem with backhails and time windows. *Journal of Advanced Transportation*, 48 (8), 942–956.
- [81] Kuhn, H., Sternbeck, M.G. (2013) Integrative retail logistics: An exploratory study. *Operation Management Reserch* 6, 2–18
- [82] Kuhn, H., Sternbeck, M.G. (2013). Integrative retail logistics: an exploratory study. *Operations Management Research*, 6 (1–2), 2–18.
- [83] La Londe, B. J., i Headen, R. (1971). Strategic planning for distribution. *Long Range Planning*, 4 (2), 23–29.

- [84] Labadie, N, Prins, C., Prodhon, C. (2016). General Presentation of Vehicle Routing Problems. In *Metaheuristics for Vehicle Routing Problems*. John Wiley & Sons, Inc.
- [85] Ladier, A.-L. and Alpan, G. (2015). Integrating truck scheduling and employee rostering in a cross-docking platform – an iterative approach. In *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Seville, Spain, 676-685.
- [86] Ladier, A.-L., Alpan, G. and Penz, B. (2014). Joint employee weekly timetabling and daily rostering: A decision-support tool for a logistics platform. *European Journal of Operational Research*, 234, 278-291.
- [87] Laporte, G., Nobert, Y., (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. In: *North-Holland Mathematics Studies*, 132, 147–184.
- [88] Larson, R. C. and Odoni, A. R. (1999). *Urban Operation Research*. Prentice-Hall, USA.
- [89] Lee, T.R., Ueng, J.H. (1999). A study of vehicle routing problems with load-balancing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 29 (10), 646-657.
- [90] Lerner, A. (1949). The Myth of the Parasitic Middleman, *Commentary*, 8, 45-51.
- [91] Lewis, H., Culliton, J., and Steele, J. (1956). *The Role of Air Freight in Physical Distribution*. Alpine Press, 57-115.
- [92] Liu, S., Tang, K., Yao, X. (2021). Memetic search for vehicle routing with simultaneous pickup-delivery and time windows. *Swarm and Evolutionary Computation*, 66, 100927.
- [93] Mabe, J. (2016) *The Evolution of Retail Distribution*. Dostupno online: <https://www.techgistics.net/blog/2016/6/10/the-evolution-of-retail-distribution>. Poslednji put pristupljeno 11.2.2023.
- [94] Mara, T. W., Kuo, R.J., Asih, A. M. S. (2019). *International Journal of Information and Management Sciences*, 30, 249-169.
- [95] Martins, S., Amorim, P., Almada-Lobo, B. (2018). Consistent consolidation strategies in grocery retail distribution. In *Operational Research. Proceedings in Mathematics & Statistics*; Alves, M., Almeida, J., Oliveira, J., Pinto, A., Eds.; Springer, Berlin/Heidelberg, Germany.
- [96] Martins, S., Amorim, P., Almada-Lobo, B. (2018). Delivery mode planning for distribution to brick-and-mortar retail stores: discussion and literature review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30 (4), 785–812.
- [97] Matl, P. Hartl, R.F., and Vidal, T. (2018). Workload equity in vehicle routing problems: A survey and analysis, *Transportation Science*, 52 (2), 239–260.
- [98] McDonald, M., Christopher, M., Bass, M. (2003). *Delivering Value*. In: *Marketing Complete Guide*, Palgrave, London, pp 409.

- [99] Mentzer, J. T., Gomes, R., & Krapfel, R. E. (1989). Physical Distribution Service: A Fundamental Marketing Concept? *Journal of the Academy of Marketing Science*, 17 (1), 53-62.
- [100] Mentzer, J.T., Flint, D.J. and Hult, G.T.M. (2001). Logistics service quality as a segment-customized process, *Journal of Marketing*, 65, 82-104.
- [101] Milivojević, S., Pajić, V., Kilibarda, M. Andrejić, M. (2021). Modeliranje poslovnih procesa realizacije porudžbine. *Poltehnika 2021 Conference*, Belgrade.
- [102] Min, H. (1989). The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points. *Transportation Research Part A*, 23, 377–386.
- [103] Mingozzi, A., Giorgi, S., Baldacci, R. (1999). An exact method for the vehicle routing problem with backhauls. *Transportation Science* 33, 315–329.
- [104] Mosheiov, G. (1998). Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics. *Computers Industrial Engineering*, 34 (3), 669 – 684.
- [105] Nagy, G. and Salhi, S. (2005). Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162 (1), 126 – 141.
- [106] Nagy, G., Wassan, N. A., & Salhi, S. (2013). The vehicle routing problem with restricted mixing of deliveries and pickups. *Journal of Scheduling*, 16 (2), 199–213.
- [107] Nagy, G., Wassan, N.A., Speranza, M.G., Archetti, C. (2015). The Vehicle Routing Problem with Divisible Deliveries and Pickups. *Transportation Science*, 49 (2), 271-294.
- [108] Nguyen, P. K., Crainic, T. G., and Toulouse, M. (2016). Multi-trip pickup and delivery problem with time windows and synchronization. *Annals of Operations Research*, 253 (2), 899–934.
- [109] Nikoličić S, (2011). Prilog poboljšanju posotjećih metoda i modela zautvrđivanje performansi malopordajnog logističkog sistema, *Doktorska disertacija*, FTN Novi Sad.
- [110] Oesterle, J. and Bauernhansl, T. (2016). Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Mixed Linehaul and Backhaul Customers, Heterogeneous Fleet, time Window and Manufacturing Capacity. *Procedia CIRP*, 41, 573-578.
- [111] Osaba, E., Yang, X.S., Del Ser, J. (2020). Is the vehicle routing problem dead? An overview through bioinspired perspective and a prospect of opportunities. *Nature-Inspired Computation in Navigation and Routing Problems*, 57–84.
- [112] Ozder, E. H., Ozcan, E. and Eren, T. (2020). A systematic literature review for personnel scheduling problems, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 19 (6), 1695–1735.
- [113] Öztaş, T., Tuş, A. (2022). A hybrid metaheuristic algorithm based on iterated local search for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Expert Systems with Applications*, 202, 117401.

- [114]Paraphantakul, C., Miller-Hooks, E., and Opananon, S. (2012). Scheduling deliveries with backhauls in thailands cement industry. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2269(1), 73–82.
- [115]Parkhi, S., Jagadeesh, D., Kumar, R. A. (2014). A Study on Transport Cost Optimization in Retail Distribution. *Journal of Supply Chain Management Systems* Volume, 3(4).
- [116]Parragh, S.N., Doerner, K.F., Hartl, R.F. (2008). A survey on pickup and delivery problems. Part I Transportation between customers and depot. *Journal Für Betriebswirtschaft*, 58 (1), 21–51.
- [117]Pečený, L., Meško, P., Kampf, R., Gašparík, J. (2020). Optimization in transport and logistic processes. *Transportation Research Procedia*, 44, 15–22.
- [118]Pfohl, H. (2018). *Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 9th Edition, Springer.
- [119]Poist, R. (1986). Evolution of Conceptual Approaches to the Design of Logistics Systems. *Transportation Journal*, 26, 35-39.
- [120]Polat, O. (2017). A parallel variable neighborhood search for the vehicle routing problem with divisible deliveries and pickups, *Computers & Operations Research*, 85, 71-86.
- [121]Popović, V., Kilibarda, M., Andrejić, M., Jereb, B., Dragan, D. (2021). A New Sustainable Warehouse Management Approach for Workforce and Activities Scheduling. *Sustainability*, 13 (4).
- [122]Popović, V., Kilibarda, M., Andrejić, M. (2015). Izbor pošiljki za utovar i njihovo raspoređivanje u tovarnom prostoru pomoću constraint programinga. *Zbornik radova sa konferencije Simpozijum operacionih istraživanja SYM-OP-IS 2015*, Srebrno jezero, str. 274-277.
- [123]Popović, V. (2015). Operator scheduling using min-conflicts and tabu search based heuristic in container terminals. *Proceedings of the 2nd Logistics international conference, LOGIC 2015*, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, pp. 105-110.
- [124]Popović, V., Jereb, B., Kilibarda, M., Andrejić, M., Keshavarzsaleh, A, Dragan, A. (2018). Electric Vehicles as Electricity Storages in Electric Power Systems. *Logistics & Sustainable Transport*, 9(2): 57-72. Faculty of Logistics, University of Maribor, Celje, Slovenia
- [125]Potvin J.Y, Guertin, F. (1996). The clustered traveling salesman problem: A genetic approach. In: Osman IH, Kelly JP (eds) *Meta-heuristics theory and applications*, 619–631, Kluwer, Boston.
- [126]Queiroga, E., Frota, Y., Sadykov, R., Subramanian, A., Uchoa, E., Vidal, T. (2020). On the exact solution of vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operation Research*, 287 (1), 76–89.

- [127]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.
- [128]Reimann, M. and Ulrich, H. (2006). Comparing backhauling strategies in vehicle routing using Ant Colony Optimization. *Central European Journal of Operations Research*, 14 (2), 105–123.
- [129]Rijal, A., Bijvank, M., Goel, A., de Koster, R. (2021). Workforce scheduling with order-picking assignments in distribution facilities. *Transportation Science* 55, 725–746.
- [130]Riopel, D., Langevin, A., Campbell, J.F. (2005). The Network of Logistics Decisions. In: Langevin, A., Riopel, D. (Eds.), *Logistics Systems: Design and Optimization*, 1–38, Springer-Verlag, New York.
- [131]Ropke, S. and Pisinger, D. (2006). A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 171(3), 750–775.
- [132]Ross D. F. (1998). *Competing Through Supply Chain Management: Creating Market-Winning Strategies Through Supply Chain Partnerships*, Chapman & Hall, New York.
- [133]Ross, D. F. (1998). *Competing Through Supply Chain Management: Creating Market-Winning Strategies Through Supply Chain Partnerships*. Kluwer Academic Publishers, ix–xi, Boston, USA.
- [134]Rushton, A., Croucher, P., Baker, P. (2006). *The handbook of logistics and distribution management*, 3rd edition. Kogan page, London and Philadelphia.
- [135]Sadjady H. (2011). Physical Flows. In Farahani i ostali (Ed.), *Logistics Operations and Management: Concepts and Models*, 43–53.
- [136]Salhi, S. and Nagy, G. (1999). A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling. *Journal of the Operational Research Society*, 50 (10), 1034-1042.
- [137]Santos, M.J. (2020). Towards solving a robust and sustainable Vehicle Routing Problem with Backhauls, *Repositório Aberto da Universidade do Porto*.
- [138]Sar, K., Ghadimi, P. (2023). A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations, *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109011.
- [139]Scholz, A., Schubert, D., & Wäscher, G. (2017). Order picking with multiple pickers and due dates–simultaneous solution of order batching, batch assignment and sequencing, and picker routing problems. *European Journal of Operational Research*, 263, 461–478.
- [140]Schubert, D., Scholz, A., Wäscher, G. (2018). Integrated order picking and vehicle routing with due dates. *OR Spectrum*, 40, 1109–1139.
- [141]Schuman, M. (2017). Smiles Aren't Factory-Made. *Bloomberg Businessweek*, 8-9.

- [142]Segetlija, Z., Lamza-Maronić, M. (1993). Poslovna logistika - specifična funkcija poduzeća. *Ekonomski vjesnik*, 6 (2), 293-305.
- [143]Seifi, M.S. (2011). Logistics strategic decisions. In: *Logistics Operations and Management, Concepts and Models*. In Farahani et al. (Ed.), *Logistics Operations and Management: Concepts and Models*, 43–53. Elsevier, Amsterdam.
- [144]Shaw, E. (1994). The Utility of the Four Utilities Concept. In Fullerton, R. (Ed.), *Explorations in the History of Marketing*, JAI Press, Greenwich, CT, 47-66.
- [145]Shukla, H., Chhadva, J., Arora, J., Sheth, K., & Malhotra, K. (2017). Application of operation research in logistics and warehouse optimization. *International Journal of Innovative Research in Technology & Science*, 5(6).
- [146]Simchi-Levi, D., Simchi-Levi, E., Watson, M. (2004). Tactical Planning for Reinventing the Supply Chain. In: *The Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge*. International Series in Operations Research & Management Science, 62, Springer, Boston, USA.
- [147]Sivaramkumar, V., Thansekhar, M.R., Saravanan, Miruna Joe Amali, S. (2018). Demonstrating the importance of using total time balance instead of route balance on a multi-objective vehicle routing problem with time windows. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 1287–1306.
- [148]Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints. *Operations Research*, 35, 254–265
- [149]Southern, R.N. (2011). Historical Perspective of the Logistics and Supply Chain Management Discipline. *Transportation Journal*, 50 (1), 53-64.
- [150]Sternbeck, M.G. and Kuhn, H. (2014). An integrative approach to determine store delivery patterns in grocery retailing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70, 205–224.
- [151]Stewart, W. M. (1965). Physical Distribution: Key to Improved Volume and Profits. *Journal of Marketing*, 29 (1), 65-70.
- [152]Sural, H., Bookbinder, J.H. (2003). The single-vehicle routing problem with unrestricted backhauls. *Networks*, 41, 127-136.
- [153]Takai, E. (2009). The role of operations research towards advanced logistics. *Science & Technology Trends Quarterly Review*, 102–120.
- [154]Tamilia, R.D. (2019). History of Channels of Distribution and Their Evolution in Marketing Thought, *Proceedings of the 19th Biennial Conference on Historical Analysis and Research in Marketing (CHARM)*, Ottawa, Canada.
- [155]Teodorović. D. (2007). *Transportne mreže*. Četvrto izdanje. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [156]Timms, H.L. and Pohlen, M.F. (1970). *The Production Function in Business*, 3rd ed., Richard D. Irwin, Inc., Homewood, USA.



- [157]Toth, P. Vigo, D. (1996). Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with backhauls, In *Advanced Methods in Transportation Analysis*, Bianco, L. Toth, P. (Eds.), 585–608, Springer Verlag, Berlin.
- [158]Toth, P. Vigo, D. (1997). An exact algorithm for the vehicle routing problem with backhauls. *Transportation Science*, 31, 372–385.
- [159]Toth, P., Vigo, D. (2002). VRP with backhauls. In: Toth, P., Vigo, D. (eds.) *The Vehicle Routing Problem*, 195–224. SIAM, Philadelphia
- [160]Tseng, Y, Yue, E., L., Taylor, M. (2005). The role of transportation in logistics chain. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1657 – 1672.
- [161]Tütüncü, G. Y., Carreto, C. A. C., Baker, B. M. (2009). A Visual Interactive Approach to Classical and Mixed Vehicle Routing Problems with Backhauls, *Omega*, 37, 138-154.
- [162]Van den Bergh, J., Beliën, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E. and De Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 226 (3), 367-385.
- [163]van Donselaar, K., Gaur, V., van Woensel, T., Broekmeulen, R. A., Fransoo, J. C. (2010). Ordering behavior in retail stores and implications for automated replenishment. *Management Science*, 56 (5), 766–784.
- [164]Vasić, N. (1996). Modeliranje i definisanje dimenzija logističke usluge u elektronskoj trgovini. *Doktorska disertacija, Saobraćajni fakultet, Beograd.*
- [165]Vidović, M. (2007). *Kvantitativna analiza sistema rukovanja materijalom, Saobraćajni fakultet, Beograd, Srbija*
- [166]Villarreal, M.C, Goldsman, D., Keskinocak, P. (2015). Workforce Management and Scheduling Under Flexible Demand, *Service Science*, 7 (4), 331–351.
- [167]Vukićević, S. (1995). *Skladišta. Preving, Beograd.*
- [168]Wade, A., & Salhi, S. (2004). An ant system algorithm for the mixed vehicle routing problem with backhauls. *Metaheuristics: Computer decision-making*, 699–719.
- [169]Wan, L. (2005). *Staff planning and scheduling in the service industry: An application to US postal service mail processing and distribution centers. PhD thesis. University of Texas.*
- [170]Wassan, N. A., Salhi, S., Nagy, G., Wassan, N., & Wade, A. C. (2013). Solving the mixed backhauling vehicle routing problem with ants. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, 2 (2), 62–77.
- [171]Wassan, N. A., Wassan, A. H., and Nagy, G. (2008b). A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries. *Journal of Combinatorial Optimization*, 15 (4), 368–386.
- [172]Wassan, N., Wassan, N., Nagy, G., and Salhi, S. (2017). The multiple trip vehicle routing problem with backhauls: Formulation and a two-level variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 78, 454–467.

- [173]Wassan, N.A., Nagy, G. (2014). Vehicle Routing Problem with Deliveries and Pickups: Modelling Issues and ta-heuristics Solution Approaches. *International Journal of Transportation*, 2 (1), 95-110.
- [174]Wassan, N. A., Nagy, G. (2014). Vehicle Routing Problem with Deliveries and Pickups: Modeling Issues and Meta-heuristics Solution Approaches. *International Journal of Transportation*, 1, 95-110.
- [175]Welling, G. M. (1994). *The Postwar Economy: 1945-1960, American History from Revolution to Reconstruction and Beyond*. Dostupno online: <https://www.let.rug.nl/usa/outlines/history-1994/postwar-america/the-postwar-economy-1945-1960.php>. Poslednji put pristupljeno: 11.2.2023.
- [176]Wensing, T, Kuhn, H., Sternbeck, M. (2018). Optimizing case-pack sizes in the bricks-and-mortar retail trade, *OR Spectrum*, 40 (4), 913-94.
- [177]Whiteoak, P. (1999). The Realities of Quick Response in the Grocery Sector. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 29 (7), 508-519.
- [178]Wu, H. i Gao, Y. (2023). An ant colony optimization based on local search for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time window. *Applied Soft Computing*, 139, 110203.
- [179]Xing, Y. i Grant, D.B. (2006). Developing a framework for physical distribution service quality of multi-channel and “pure-player” internet retailers. *International Journal of Retail and Distribution Management*, 34 (4/5), 279-289.
- [180]Yano, C. A., Chan, T. J., Richter, L. K., Cutler, T., Murty, K. G., McGettigan, D. (1987). Vehicle routing at Quality Stores. *Interfaces*, 17, 52-63.

# PRILOZI

## Prilog 1. Detaljni opis PR heuristike

Detaljni opis PR heuristike dat je u nastavku u vidu pseudokoda. Ulazni podaci su skup velikih razvoznih ruta, skup velikih povratnih ruta, kapacitet vozila, dozvoljeno trajanje rute, dozvoljeno trajanje utovara i istovara.

### Algoritam - Pseudokod za PR heuristiku u detaljnom obliku

---

#### DIO 1. Kreiranje razvoznog dijela rute i njegovo dodavanje u skup potencijalnih ruta

1. for *ruta\_razvozna\_velika* u *skup\_rute\_razvozne\_velike*:

a. for *i* u *ruta\_razvozna\_velika*:

i.  $brk\_razvoz = 0$ ;  $ui\_vrijeme = 0$ ;  $ruta\_razvoza = []$ ;  $m =$  pozicija od  $i + 1$

ii. for  $j$  u  $ruta\_razvozna\_velika[m:]$ :

1.  $brk\_razvoz = brk\_razvoz + brk\_razvoz[j]$ ;  $ui\_vrijeme = ui\_vrijeme + ui\_vrijeme[j]$

2. if  $brk\_razvoz$  i  $ui\_vrijeme$  zadovoljavaju uslove:

a. dodaj  $j$  na  $ruta\_razvoza$ ;  $skup\_klijenata\_razvozne\_rute =$  prevedi u skup ( $ruta\_razvoza$ )

b. if  $skup\_klijenata\_razvozne\_rute$  nije u  $skup\_ruta\_razvoza$

i. dodaj  $skup\_klijenata\_razvozne\_rute$  u  $skup\_ruta\_razvoza$

ii.  $poten\_ruta\_rjesenja = 2opt$  optimizuj ( $ruta\_razvoza + [1]$ )

iii. if trajanje  $poten\_ruta\_rjesenja$  zadovoljava uslov:

1. dodaj  $poten\_ruta\_rjesenja$  u  $skup\_poten\_ruta\_rjesenja$  i nastavi sa **DIO 2**

iv. Else:  $brk\_razvoz = brk\_razvoz - brk\_razvoz[j]$ ;  $ui\_vrijeme = ui\_vrijeme - ui\_vrijeme[j]$

c. Else:  $brk\_razvoz = brk\_razvoz - brk\_razvoz[j]$ ;  $ui\_vrijeme = ui\_vrijeme - ui\_vrijeme[j]$

#### DIO 2. Pravljenje kombinovane rute od razvozne rute kao razvoznog dijela i prve povratne tačke gigantske povratne rute. Pravljenje prve dvije tačke rute povrata

1. for  $ruta\_povratna\_velika$  u  $skup\_rute\_povratne\_velike$ :

a.  $prvi\_povratni = ruta\_povratna\_velika[0]$ ;  $brk\_povrat = 0$

b.  $brk\_povrat = brk\_povrat + brk\_povrat[prvi\_povratni]$ ;

c.  $ui\_vrijeme = ui\_vrijeme + ui\_vrijeme[prvi\_povratni]$

d. if  $brk\_povrat$  i  $ui\_vrijeme$  zadovoljavaju uslove:

i. dodaj  $prvi\_povratni$  na  $ruta\_razvoza$

ii.  $optmizovana\_ruta\_razvoza = 2opt$  optimizuj ( $ruta\_razvoza + [prvi\_povratni]$ )

iii.  $poten\_ruta\_rjesenja = optmizovana\_ruta\_razvoza + [1]$

iv. if trajanje  $poten\_ruta\_rjesenja$  zadovoljava uslov:

1. dodaj *optimizovana\_ruta\_razvoza*[-2] na *ruta\_povrata*; dodaj *prvi\_povratni* na *ruta\_povrata*;
  2. dodaj *poten\_ruta\_rjesenja* u *skup\_poten\_ruta\_rjesenja* i nastavi sa **DIO 3**
2. nastavi sa **DIO 1** sa sledecim *j*

**DIO 3. Ako potencijalni povratni dio nije bio za posmatranu razvoznu rutu, a ni uopšte**

1. for *i* u *ruta\_povratna\_velika*[1:]:
  - a.  $brk\_povrat = brk\_povrat + brk\_povrat[i]$ ;  $ui\_vrijeme = ui\_vrijeme + ui\_vrijeme[i]$
  - b. if *brk\_povrat* i *ui\_vrijeme* zadovoljavaju uslove:
    - i. dodaj *i* na pocetak *ruta\_povrata*; *skup\_klijenata\_povratne\_rute* = prevedi na skup (*ruta\_povrata*)
    - ii. if *skup\_klijenata\_povratne\_rute* nije u *skup\_ruta\_povrata*
      1. if *skup\_klijenata\_povratne\_rute* nije u *rjecnik\_ruta\_povrata*
        - a. *optimizovana\_ruta\_povrata* = 2opt optimizuj (*ruta\_povrata* +[1])
        - b. if *ruta\_povrata*[1] != *optimizovana\_ruta\_povrata*[1]:
          - i.  $optimizovana\_ruta\_razvoza = 2opt\ optimizuj\ (ruta\_razvoza + [optimizovana\_ruta\_povrata[1]])$
          - ii.  $poten\_ruta\_rjesenja = optimizovana\_ruta\_razvoza[:-2] + optimizovana\_ruta\_povrata$
          - iii. if trajanje *poten\_ruta\_rjesenja* zadovoljava uslov
            1. dodaj *poten\_ruta\_rjesenja* u *skup\_poten\_ruta\_rjesenja*
        - c. Else
          - i.  $poten\_ruta\_rjesenja = ruta\_razvoza + optimizovana\_ruta\_povrat$
          - ii. if trajanje *poten\_ruta\_rjesenja* zadovoljava uslov:
            1. dodaj *poten\_ruta\_rjesenja* u *skup\_poten\_ruta\_rjesenja*
        - d. dodaj *optimizovana\_ruta\_povrata* u *rjecnik\_ruta\_povrata* sa kljucem *skup\_klijenata\_povratne\_rute*
        - e. if *ruta\_povrata* != *optimizovana\_ruta\_povrata*:
          - i. nova pozicija od *i* = *optimizovana\_ruta\_povrata.index(i)*
          - ii.  $nova\_ruta\_povrata = ruta\_povrata$ ;  $nova\_poten\_ruta\_rjesenja = poten\_ruta\_rjesenja$
          - iii. for *k* u *ruta\_povrata*[nova pozicija od *i*:-1]
            1.  $nova\_ruta\_povrata = nova\_ruta\_povrata[:-1]$ ;
            2.  $nova\_poten\_ruta\_rjesenja = nova\_poten\_ruta\_rjesenja[:-1]$
            3. dodaj *nova\_ruta\_povrata* u *rjecnik\_ruta\_povrata* sa kljucem *skup\_klijenata\_povratne\_rute*
            4. if trajanje *nova\_poten\_ruta\_rjesenja* zadovoljava uslov:

- a. dodaj *nova\_poten\_ruta\_rjesenja* u *skup\_poten\_ruta\_rjesenja*

iii. Else: nastavi sa **DIO 4**

- c. Else:  $brk\_povrat = brk\_povrat - brk\_povrat[i]$ ;  $ui\_vrijeme = ui\_vrijeme + ui\_vrijeme[i]$

2. nastavi sa **DIO 2** sa sledećom *ruta\_povratna\_velika*

**DIO 4 Else... Ako potencijalni povratni dio nije bio za posmatranu razvoznu rutu, ali je bio uopšte**

1. if  $rječnik\_ruta\_povrata[skup\_klijenata\_povratne\_rute][0][1] \neq povratna\_ruta[1]$

- a.  $t = rječnik\_ruta\_povrata[skup\_klijenata\_povratne\_rute][0][1]$
- b.  $optmizovana\_ruta\_razvoza = 2opt$  optimizuj ( $ruta\_razvoza + [t]$ )
- c. for *ruta* u  $rječnik\_ruta\_povrata[skup\_klijenata\_povratne\_rute]$ :
  - i.  $poten\_ruta\_rjesenja = optmizovana\_ruta\_razvoza + ruta$
  - ii. if trajanje *poten\_ruta\_rjesenja* zadovoljava uslov:
    - 1. dodaj *poten\_ruta\_rjesenja* u *skup\_poten\_ruta\_rjesenja*

2. Else

- a. for *ruta* u  $rječnik\_ruta\_povrata[skup\_klijenata\_povratne\_rute]$ :
  - i.  $poten\_ruta\_rjesenja = optmizovana\_ruta\_razvoza + ruta$
  - ii. if trajanje *poten\_ruta\_rjesenja* zadovoljava uslov:
    - 1. dodaj *poten\_ruta\_rjesenja* u *skup\_poten\_ruta\_rjesenja*

3. nastavi sa **DIO 3** sa sledećim *i*

---

#### Legenda:

*i, j* – klijenti (čvorovi rute)

*m* – čvor u ruti pod rednim brojem *m*

*ruta\_razvozna\_velika* – ruta sastavljena od svih klijenata (čvorova) kojima se roba isporučuje

*skup\_rute\_razvozne\_velike* – skup svih velikih razvoznih ruta, sortiran od najkraće i bez 1 na kraju

*ruta\_razvoza* – ruta napravljena od velike rute razvoza (dijela velike rute razvoza)

prevedi u skup – pretvaranje niza čvorova u skup čvorova

*skup\_klijenata\_razvozne\_rute* - uvodi se jer kad je skup, onda nije važan redoslijed klijenata. A to je važno poslije radi provjere da li je već taj skup klijenata ispitivan.

*skup\_ruta\_razvoza* – skup svih razvoznih ruta predstavljenih u obliku skupa

*brk\_razvoz* – ukupan broj koleta svih klijenata kojima se roba razvoz na posmatranoj ruti

*brk\_razvoz[j]* – broj koleta za dopremu čvoru *j*

*ui\_vrijeme[j]* – vrijeme potrebno za utovar i istovar koleta čvora *j*

[] – niz čvorova u kome svaki čvor ima svoj redni broj. Prvi redni broj u nizu je 0.

*ruta\_razvozna\_velika[m:]* – niz čvorova rute razvozne velike sa početnim *m*-tim čvorom

*poten\_ruta\_rjesenja* – potencijalna ruta rjesenja, početna i završna tačka joj je distributivno skladište, ulazi u skup svih potencijalnih ruta

*ruta\_povratna\_velika* – ruta sastavljena od svih klijenata (čvorova) od kojih se roba preuzima

*skup\_rute\_povratne\_velike* – skup svih velikih povratnih ruta  
*brk\_povrat* – ukupan broj koleta svih klijenata od kojih se roba preuzima na posmatranoj ruti  
*brk\_povrat[j]* – broj koleta koji se preuzima u čvoru *j*  
*skup\_ruta\_povrata* – skup svih povratnih ruta  
*ruta\_razvoza[-m]* – *m*-ti čvor rute razvoza gledajući od kraja (-1 je poslednji, -2 je prethodni itd)  
*ruta\_povrata[m]* – *m*-ti čvor rute povrata gledajući od početka (0 je prvi, 1 je drugi itd)  
“=” – znak za različito  
*rječnik\_ruta\_povrata* – rječnik svih povratnih ruta, u kojem je ključ rječnika povratna ruta, a vrijednosti njen optimalni raspored, kao i optimalni rasporedi ukoliko se ona smanjuje za po jedan čvor  
*index(i)* – vraća redni broj čvora *i* u ruti, tj. njegovu poziciju  
*[m:n]* – niz koji počinje sa *m*-tim čvorom i završava sa *n*-tim  
*[:-1]* – smanji za poslednji član posmatranu rutu  
*rječnik\_ruta\_povrata [skup\_klijenata\_povratne\_rute][0][1]* – drugi čvor prve zapamćene rute za skup čvorova dat u *skup\_klijenata\_povratne\_rute*

## Prilog 2. Tabela vrijednosti ulaznih veličina za DS-PRR model

| Ulazi      | Opis  | Vrijednost u primjeru                |
|------------|---|--------------------------------------|
| Vrijeme    |   |                                      |
| $N$        | Skup intervala radnog dana  | $\{1, \dots, 14\}$                   |
| $M$        | Skup svih smjena  | $\{1, \dots, 16\}$                   |
| $M_1$      | Skup smjena sa punim radnim vremenom  | $\{1, \dots, 6\}$                    |
| $M_2$      | Skup smjena sa skraćenim radnim vremenom  | $\{7, \dots, 16\}$                   |
| $s_1$      | Maksimalni broj smjena sa punim radnim vremenom   | 3                                    |
| $s_2$      | Maksimalni broj smjena sa skraćenim radnim vremenom   | 3                                    |
| $n$        | Redni broj posljednjeg intervala radnog dana  | 14                                   |
| $b_{kj}$   | Parametar koji ima vrijednost 1 ako $k \in N$ je dio smjene $j \in M$ ; u suprotnom je 0.                   | tabela 5.26                          |
| Aktivnosti |   |                                      |
| $A$        | Skup svih aktivnosti  | $\{k1, k2, k3, ur, ir, ka\}$         |
| $B$        | Skup nezavisnih aktivnosti  | $\{k1, k2, k3, ur, ir\}$             |
| $C$        | Skup zavisnih aktivnosti  | $\{ka\}$                             |
| $G_a$      | Skup aktivnosti od koji aktivnost $a \in C$ zavisi  | $\{ir\}$                             |
| $d_{ai}$   | Potrebe za radnicima aktivnosti $a$ u intervalu $i$   | tabela 5.28 i 5.29                   |
| $s_a$      | Procenat zavisnosti aktivnosti $a \in C$ od aktivnosti $a' \in G_a$ (u decimalnom broju)                    | 30                                   |
| Rokovi     |   |                                      |
| $A_1$      | Skup aktivnosti sa vremenskim prozorom kao rokom za završetak   | $\{ur, ir, ka\}$                     |
| $v_a$      | Veličina vremenskog prozora za završetak aktivnosti $a \in A_1$ (u intervalima)                             | $v_{ur} = 0, v_{ir} = 1, v_{ka} = 0$ |
| $A_2$      | Skup aktivnosti sa vremenskim prozorom predstavljenim rednim brojem intervala do kada se mora obaviti       | $\{k1, k2, k3\}$                     |
| $r_a$      | Interval do koga se mora zadovoljiti potreba za radnicima aktivnosti $a \in A_2$                            | $r_{k1} = 0, r_{k2} = 1, r_{k3} = 0$ |
| Radnici    |   |                                      |
| $T$        | Skup svih profila radnika   | $\{ks, kr, vu\}$                     |
| $T_a$      | Skup svih profila radnika kojima je dozvoljeno da obavljaju aktivnost $a$                                   | tabela 5.27                          |
| $H_t$      | Skup svih aktivnosti koje radnik profila $t \in T$ može da obavlja  | tabela 5.27                          |
| $E_t$      | Skup aktivnosti koje nisu primarne za radnik profila $t \in T$  | tabela 5.27                          |
| $c_t$      | Trošak radnika profila $t$  | tabela 5.27                          |
| $q$        | Maksimalni dozvoljeni broj radnika koji može raditi u isto vrijeme  | 40                                   |
| $p$        | Trajanje pauze (u intervalima)  | 1                                    |
| $f$        | Veličina vremenskog prozora (u intervalima)   | 3                                    |
| $O_j$      | Skup intervala dozvoljenih za pauzu u smjeni $j \in M_1$  | tabela 5.26                          |
| $b$        | Maksimalni dozvoljeni procenat radnika sa skraćenim radnim vremenom (u decimalnom broju)                    | 0.3                                  |
| $e$        | Maksimalni dozvoljeni udio vremena proveden na obavljaju aktivnosti koje nisu primarne (u decimalnom broju) | 0.5                                  |

### Prilog 3. Rješenja svih DP-VRP-a

Tabela 1. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 1 za vozila 10-grad

|             | Period<br>opsluge | Pređeni<br>put (km) | Broj<br>ruta | Broj<br>klijenata | Broj jed.<br>isporuke | Broj jed.<br>povrata | $u_i$ (h) | Vožnja<br>(h) | $u_i +$<br>vožnja |
|-------------|-------------------|---------------------|--------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------|---------------|-------------------|
| Uku-<br>pno | 1                 | 6586.37             | 72           | 504               | 617                   | 90                   | 142.9     | 85.52         | 228.43            |
|             | 2                 | 5592.43             | 60           | 475               | 512                   | 90                   | 129.36    | 73.24         | 202.55            |
|             | 3                 | 4639.8              | 50           | 443               | 418                   | 90                   | 116.13    | 62.45         | 178.61            |
| 1           | 1                 | 1079.76             | 12           | 83                | 106                   | 15                   | 23.91     | 13.4          | 37.32             |
|             | 2                 | 934.95              | 10           | 80                | 88                    | 15                   | 21.93     | 11.81         | 33.73             |
|             | 3                 | 806.84              | 9            | 76                | 73                    | 15                   | 20        | 10.68         | 30.68             |
| 2           | 1                 | 1117.54             | 12           | 85                | 102                   | 15                   | 23.91     | 14.98         | 38.89             |
|             | 2                 | 1041.97             | 11           | 83                | 92                    | 15                   | 22.75     | 13.85         | 36.61             |
|             | 3                 | 740.7               | 8            | 72                | 66                    | 15                   | 18.75     | 10.71         | 29.45             |
| 3           | 1                 | 1009.36             | 11           | 84                | 98                    | 15                   | 23.43     | 13.37         | 36.8              |
|             | 2                 | 834.96              | 9            | 78                | 79                    | 15                   | 20.84     | 11.23         | 32.05             |
|             | 3                 | 752.61              | 8            | 76                | 68                    | 15                   | 19.58     | 10.35         | 29.94             |
| 4           | 1                 | 1071.48             | 12           | 84                | 100                   | 15                   | 23.57     | 13.98         | 37.56             |
|             | 2                 | 834.78              | 9            | 77                | 75                    | 15                   | 20.33     | 11.31         | 31.62             |
|             | 3                 | 740.76              | 8            | 74                | 71                    | 15                   | 19.49     | 9.98          | 29.48             |
| 5           | 1                 | 1182.06             | 13           | 84                | 107                   | 15                   | 24.16     | 15.25         | 39.41             |
|             | 2                 | 1009.15             | 11           | 80                | 93                    | 15                   | 22.33     | 13.01         | 35.34             |
|             | 3                 | 822.92              | 9            | 71                | 72                    | 15                   | 19.07     | 10.5          | 29.59             |
| 6           | 1                 | 1126.17             | 12           | 84                | 104                   | 15                   | 23.92     | 14.54         | 38.45             |
|             | 2                 | 936.62              | 10           | 77                | 85                    | 15                   | 21.18     | 12.03         | 33.2              |
|             | 3                 | 775.97              | 8            | 74                | 68                    | 15                   | 19.24     | 10.23         | 29.47             |



**Tabela 2. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 2 za vozila 10-grad**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u-i$ (h) | Vožnja (h) | $u-i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 6905.59          | 77        | 508            | 649                | 90                | 146.21    | 88.59      | 234.8          |
|        | 2              | 5179.87          | 55        | 429            | 476                | 60                | 116.17    | 67.88      | 184.01         |
|        | 3              | 3442.68          | 37        | 287            | 295                | 60                | 77.43     | 45.66      | 123.06         |
| 1      | 1              | 1148.66          | 13        | 84             | 107                | 15                | 24.17     | 14.21      | 38.38          |
|        | 2              | 916.9            | 10        | 73             | 85                 | 10                | 20.08     | 11.61      | 31.68          |
|        | 3              | 547.7            | 6         | 46             | 48                 | 10                | 12.5      | 7.19       | 19.68          |
| 2      | 1              | 1243.15          | 14        | 85             | 118                | 15                | 25.23     | 16.11      | 41.35          |
|        | 2              | 909.32           | 9         | 74             | 81                 | 10                | 19.93     | 12.14      | 32.06          |
|        | 3              | 578.08           | 6         | 50             | 50                 | 10                | 13.33     | 8.45       | 21.79          |
| 3      | 1              | 1071.81          | 12        | 85             | 103                | 15                | 23.98     | 13.82      | 37.81          |
|        | 2              | 802.77           | 9         | 74             | 75                 | 10                | 19.41     | 10.47      | 29.89          |
|        | 3              | 547.57           | 6         | 50             | 47                 | 10                | 13.08     | 7.31       | 20.38          |
| 4      | 1              | 1067.38          | 12        | 85             | 103                | 15                | 24        | 14.16      | 38.13          |
|        | 2              | 748.74           | 8         | 69             | 70                 | 10                | 18.16     | 10.55      | 28.71          |
|        | 3              | 534.61           | 6         | 45             | 46                 | 10                | 12.17     | 6.85       | 19.03          |
| 5      | 1              | 1190.1           | 13        | 84             | 108                | 15                | 24.25     | 15.1       | 39.35          |
|        | 2              | 938.03           | 10        | 71             | 86                 | 10                | 19.84     | 12.13      | 31.94          |
|        | 3              | 646.74           | 7         | 49             | 56                 | 10                | 13.68     | 8.37       | 22.03          |
| 6      | 1              | 1184.49          | 13        | 85             | 110                | 15                | 24.58     | 15.19      | 39.78          |
|        | 2              | 864.11           | 9         | 68             | 79                 | 10                | 18.75     | 10.98      | 29.73          |
|        | 3              | 587.98           | 6         | 47             | 48                 | 10                | 12.67     | 7.49       | 20.15          |

**Tabela 3. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 1 za vozila 12-grad**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u_i$ (h) | Vožnja (h) | $u_i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 5498.99          | 59        | 504            | 617                | 90                | 142.89    | 74.04      | 216.89         |
|        | 2              | 4757.75          | 50        | 475            | 512                | 90                | 129.33    | 64.54      | 193.9          |
|        | 3              | 3945.62          | 41        | 443            | 418                | 90                | 116.17    | 54.96      | 171.1          |
| 1      | 1              | 917.02           | 10        | 83             | 106                | 15                | 23.92     | 11.74      | 35.66          |
|        | 2              | 829.02           | 9         | 80             | 88                 | 15                | 21.91     | 10.65      | 32.58          |
|        | 3              | 664.37           | 7         | 76             | 73                 | 15                | 20        | 9.26       | 29.25          |
| 2      | 1              | 936.83           | 10        | 85             | 102                | 15                | 23.9      | 12.95      | 36.85          |
|        | 2              | 882.33           | 9         | 83             | 92                 | 15                | 22.76     | 12.07      | 34.82          |
|        | 3              | 599.94           | 6         | 72             | 66                 | 15                | 18.75     | 9.12       | 27.87          |
| 3      | 1              | 836.16           | 9         | 84             | 98                 | 15                | 23.43     | 11.4       | 34.81          |
|        | 2              | 734.61           | 8         | 78             | 79                 | 15                | 20.83     | 10.34      | 31.18          |
|        | 3              | 666.23           | 7         | 76             | 68                 | 15                | 19.58     | 9.36       | 28.93          |
| 4      | 1              | 914.04           | 10        | 84             | 100                | 15                | 23.58     | 12.44      | 36.01          |
|        | 2              | 694.57           | 7         | 77             | 75                 | 15                | 20.34     | 9.96       | 30.29          |
|        | 3              | 657.94           | 7         | 74             | 71                 | 15                | 19.5      | 9.12       | 28.63          |
| 5      | 1              | 945.75           | 10        | 84             | 107                | 15                | 24.17     | 12.86      | 37.03          |
|        | 2              | 844.14           | 9         | 80             | 93                 | 15                | 22.33     | 11.21      | 33.56          |
|        | 3              | 675.74           | 7         | 71             | 72                 | 15                | 19.08     | 9.03       | 28.1           |
| 6      | 1              | 949.19           | 10        | 84             | 104                | 15                | 23.89     | 12.65      | 36.53          |
|        | 2              | 773.08           | 8         | 77             | 85                 | 15                | 21.16     | 10.31      | 31.47          |
|        | 3              | 681.4            | 7         | 74             | 68                 | 15                | 19.26     | 9.07       | 28.32          |

**Tabela 4. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 2 za vozila 12-grad**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u-i$ (h) | Vožnja (h) | $u-i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 5813.29          | 63        | 508            | 649                | 90                | 146.25    | 77.9       | 224.17         |
|        | 2              | 4425.63          | 46        | 429            | 476                | 60                | 116.18    | 59.95      | 176.11         |
|        | 3              | 2951.15          | 31        | 287            | 295                | 60                | 77.4      | 40.61      | 118.04         |
| 1      | 1              | 979.42           | 11        | 84             | 107                | 15                | 24.16     | 12.66      | 36.82          |
|        | 2              | 759.04           | 8         | 73             | 85                 | 10                | 20.09     | 9.94       | 30.03          |
|        | 3              | 468.5            | 5         | 46             | 48                 | 10                | 12.5      | 6.37       | 18.87          |
| 2      | 1              | 1031.49          | 11        | 85             | 118                | 15                | 25.25     | 13.91      | 39.17          |
|        | 2              | 793.76           | 8         | 74             | 81                 | 10                | 19.91     | 11.14      | 31.05          |
|        | 3              | 495.23           | 5         | 50             | 50                 | 10                | 13.32     | 7.55       | 20.88          |
| 3      | 1              | 916.12           | 10        | 85             | 103                | 15                | 24        | 12.19      | 36.19          |
|        | 2              | 662.55           | 7         | 74             | 75                 | 10                | 19.42     | 9.11       | 28.53          |
|        | 3              | 471.94           | 5         | 50             | 47                 | 10                | 13.08     | 6.56       | 19.64          |
| 4      | 1              | 905.61           | 10        | 85             | 103                | 15                | 24        | 12.76      | 36.76          |
|        | 2              | 660.04           | 7         | 69             | 70                 | 10                | 18.17     | 9.38       | 27.54          |
|        | 3              | 448.9            | 5         | 45             | 46                 | 10                | 12.17     | 5.92       | 18.09          |
| 5      | 1              | 970.5            | 10        | 84             | 108                | 15                | 24.25     | 13.08      | 37.34          |
|        | 2              | 781.93           | 8         | 71             | 86                 | 10                | 19.83     | 10.43      | 30.26          |
|        | 3              | 559.45           | 6         | 49             | 56                 | 10                | 13.66     | 7.53       | 21.21          |
| 6      | 1              | 1010.15          | 11        | 85             | 110                | 15                | 24.59     | 13.3       | 37.89          |
|        | 2              | 768.31           | 8         | 68             | 79                 | 10                | 18.76     | 9.95       | 28.7           |
|        | 3              | 507.13           | 5         | 47             | 48                 | 10                | 12.67     | 6.68       | 19.35          |

**Tabela 5. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 1 za vozila 14-grad**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u-i$ (h) | Vožnja (h) | $u-i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 4875.31          | 51        | 504            | 617                | 90                | 142.96    | 67.35      | 210.28         |
|        | 2              | 4216.42          | 43        | 475            | 512                | 90                | 129.36    | 58.4       | 187.73         |
|        | 3              | 3522.1           | 36        | 443            | 418                | 90                | 116.19    | 50.6       | 166.8          |
| 1      | 1              | 831.8            | 9         | 83             | 106                | 15                | 23.92     | 10.83      | 34.75          |
|        | 2              | 686.81           | 7         | 80             | 88                 | 15                | 21.92     | 9.01       | 30.92          |
|        | 3              | 586.07           | 6         | 76             | 73                 | 15                | 20        | 8.36       | 28.36          |
| 2      | 1              | 799.06           | 8         | 85             | 102                | 15                | 23.92     | 11.64      | 35.56          |
|        | 2              | 793.05           | 8         | 83             | 92                 | 15                | 22.76     | 11.04      | 33.78          |
|        | 3              | 569.25           | 6         | 72             | 66                 | 15                | 18.76     | 8.92       | 27.67          |
| 3      | 1              | 749.89           | 8         | 84             | 98                 | 15                | 23.43     | 10.44      | 33.86          |
|        | 2              | 671.05           | 7         | 78             | 79                 | 15                | 20.83     | 9.46       | 30.29          |
|        | 3              | 583.7            | 6         | 76             | 68                 | 15                | 19.58     | 8.53       | 28.1           |
| 4      | 1              | 780.52           | 8         | 84             | 100                | 15                | 23.59     | 10.78      | 34.37          |
|        | 2              | 611.15           | 6         | 77             | 75                 | 15                | 20.35     | 9.08       | 29.42          |
|        | 3              | 583.56           | 6         | 74             | 71                 | 15                | 19.51     | 8.33       | 27.84          |
| 5      | 1              | 856.64           | 9         | 84             | 107                | 15                | 24.17     | 11.8       | 35.99          |
|        | 2              | 760.5            | 8         | 80             | 93                 | 15                | 22.33     | 10.29      | 32.63          |
|        | 3              | 589.31           | 6         | 71             | 72                 | 15                | 19.08     | 8.1        | 27.2           |
| 6      | 1              | 857.4            | 9         | 84             | 104                | 15                | 23.93     | 11.86      | 35.75          |
|        | 2              | 693.86           | 7         | 77             | 85                 | 15                | 21.17     | 9.52       | 30.69          |
|        | 3              | 610.21           | 6         | 74             | 68                 | 15                | 19.26     | 8.36       | 27.63          |

**Tabela 6. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 2 za vozila 14-grad**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u-i$ (h) | Vožnja (h) | $u-i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 5031.78          | 53        | 508            | 649                | 90                | 146.26    | 69.15      | 215.37         |
|        | 2              | 3935.35          | 40        | 429            | 476                | 60                | 116.18    | 54.69      | 170.86         |
|        | 3              | 2539.03          | 25        | 287            | 295                | 60                | 77.44     | 36.63      | 114.01         |
| 1      | 1              | 830.1            | 9         | 84             | 107                | 15                | 24.16     | 11.03      | 35.2           |
|        | 2              | 677.24           | 7         | 73             | 85                 | 10                | 20.08     | 8.97       | 29.04          |
|        | 3              | 397.48           | 4         | 46             | 48                 | 10                | 12.5      | 5.71       | 18.22          |
| 2      | 1              | 926.36           | 10        | 85             | 118                | 15                | 25.25     | 12.93      | 38.16          |
|        | 2              | 709.19           | 7         | 74             | 81                 | 10                | 19.91     | 10.03      | 29.95          |
|        | 3              | 434.97           | 4         | 50             | 50                 | 10                | 13.34     | 7.08       | 20.41          |
| 3      | 1              | 777.04           | 8         | 85             | 103                | 15                | 24.01     | 10.92      | 34.92          |
|        | 2              | 586.18           | 6         | 74             | 75                 | 10                | 19.42     | 8.38       | 27.79          |
|        | 3              | 397.34           | 4         | 50             | 47                 | 10                | 13.09     | 5.81       | 18.89          |
| 4      | 1              | 766.95           | 8         | 85             | 103                | 15                | 23.99     | 10.9       | 34.9           |
|        | 2              | 587.93           | 6         | 69             | 70                 | 10                | 18.17     | 8.58       | 26.76          |
|        | 3              | 391.58           | 4         | 45             | 46                 | 10                | 12.18     | 5.5        | 17.64          |
| 5      | 1              | 874.33           | 9         | 84             | 108                | 15                | 24.26     | 11.78      | 36.02          |
|        | 2              | 698.51           | 7         | 71             | 86                 | 10                | 19.84     | 9.58       | 29.41          |
|        | 3              | 487.24           | 5         | 49             | 56                 | 10                | 13.67     | 6.67       | 20.33          |
| 6      | 1              | 857              | 9         | 85             | 110                | 15                | 24.59     | 11.59      | 36.17          |
|        | 2              | 676.3            | 7         | 68             | 79                 | 10                | 18.76     | 9.15       | 27.91          |
|        | 3              | 430.42           | 4         | 47             | 48                 | 10                | 12.66     | 5.86       | 18.52          |

**Tabela 7. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 1 za vozila 16-nac**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u-i$ (h) | Vožnja (h) | $u-i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 29988.96         | 67        | 504            | 617                | 90                | 142.95    | 375.55     | 518.51         |
|        | 2              | 28036.01         | 63        | 475            | 512                | 90                | 129.34    | 355.86     | 485.21         |
|        | 3              | 26749.57         | 60        | 443            | 418                | 90                | 116.15    | 341.19     | 457.35         |
| 1      | 1              | 5580.2           | 12        | 83             | 106                | 15                | 23.92     | 69.6       | 93.52          |
|        | 2              | 5019.61          | 11        | 80             | 88                 | 15                | 21.92     | 65.26      | 87.17          |
|        | 3              | 5248.8           | 12        | 76             | 73                 | 15                | 19.99     | 67.36      | 87.35          |
| 2      | 1              | 4683.38          | 11        | 85             | 102                | 15                | 23.92     | 61.18      | 85.09          |
|        | 2              | 4303.91          | 11        | 83             | 92                 | 15                | 22.75     | 56.57      | 79.34          |
|        | 3              | 4346.61          | 10        | 72             | 66                 | 15                | 18.75     | 57.41      | 76.16          |
| 3      | 1              | 5511.14          | 12        | 84             | 98                 | 15                | 23.42     | 67.39      | 90.83          |
|        | 2              | 5041.27          | 11        | 78             | 79                 | 15                | 20.84     | 62.13      | 82.96          |
|        | 3              | 3984.06          | 10        | 76             | 68                 | 15                | 19.59     | 50.4       | 69.99          |
| 4      | 1              | 4857.23          | 11        | 84             | 100                | 15                | 23.6      | 61.81      | 85.4           |
|        | 2              | 4610.75          | 10        | 77             | 75                 | 15                | 20.33     | 59.58      | 79.93          |
|        | 3              | 4511.39          | 10        | 74             | 71                 | 15                | 19.5      | 58.07      | 77.57          |
| 5      | 1              | 5465.58          | 12        | 84             | 107                | 15                | 24.17     | 66.72      | 90.91          |
|        | 2              | 5251.66          | 11        | 80             | 93                 | 15                | 22.33     | 65.01      | 87.34          |
|        | 3              | 4833.16          | 10        | 71             | 72                 | 15                | 19.08     | 60.67      | 79.75          |
| 6      | 1              | 3891.43          | 9         | 84             | 104                | 15                | 23.92     | 48.85      | 72.76          |
|        | 2              | 3808.81          | 9         | 77             | 85                 | 15                | 21.17     | 47.31      | 68.47          |
|        | 3              | 3825.55          | 8         | 74             | 68                 | 15                | 19.24     | 47.28      | 66.53          |

**Tabela 8. Rješenja DP-VRP-a pri strategiji 2 za vozila 16-nac**

|        | Period opsluge | Pređeni put (km) | Broj ruta | Broj klijenata | Broj jed. isporuke | Broj jed. povrata | $u_i$ (h) | Vožnja (h) | $u_i +$ vožnja |
|--------|----------------|------------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|-----------|------------|----------------|
| Ukupno | 1              | 30288.55         | 71        | 508            | 649                | 90                | 146.2     | 380.18     | 526.53         |
|        | 2              | 27433.14         | 59        | 429            | 476                | 60                | 116.14    | 346.58     | 462.78         |
|        | 3              | 20070.62         | 43        | 287            | 295                | 60                | 77.4      | 250.91     | 328.34         |
| 1      | 1              | 5551.7           | 13        | 84             | 107                | 15                | 24.14     | 70.1       | 94.27          |
|        | 2              | 4870.37          | 10        | 73             | 85                 | 10                | 20.09     | 62.34      | 82.42          |
|        | 3              | 2957.43          | 6         | 46             | 48                 | 10                | 12.49     | 38.25      | 50.75          |
| 2      | 1              | 4700.86          | 11        | 85             | 118                | 15                | 25.24     | 61.54      | 86.8           |
|        | 2              | 4315.85          | 10        | 74             | 81                 | 10                | 19.91     | 56.33      | 76.25          |
|        | 3              | 2902.87          | 7         | 50             | 50                 | 10                | 13.33     | 38.87      | 52.21          |
| 3      | 1              | 5558.84          | 13        | 85             | 103                | 15                | 24        | 67.86      | 91.88          |
|        | 2              | 5205.54          | 11        | 74             | 75                 | 10                | 19.41     | 64.02      | 83.44          |
|        | 3              | 2916.13          | 7         | 50             | 47                 | 10                | 13.08     | 36.83      | 49.93          |
| 4      | 1              | 5029.89          | 12        | 85             | 103                | 15                | 23.99     | 64.36      | 88.37          |
|        | 2              | 4608.23          | 10        | 69             | 70                 | 10                | 18.16     | 59.33      | 77.52          |
|        | 3              | 3613.84          | 7         | 45             | 46                 | 10                | 12.17     | 44.45      | 56.61          |
| 5      | 1              | 5366.18          | 12        | 84             | 108                | 15                | 24.23     | 66.32      | 90.61          |
|        | 2              | 4742.53          | 10        | 71             | 86                 | 10                | 19.83     | 58.88      | 78.71          |
|        | 3              | 4326.61          | 9         | 49             | 56                 | 10                | 13.67     | 53.87      | 67.54          |
| 6      | 1              | 4081.08          | 10        | 85             | 110                | 15                | 24.6      | 50         | 74.6           |
|        | 2              | 3690.62          | 8         | 68             | 79                 | 10                | 18.74     | 45.68      | 64.44          |
|        | 3              | 3353.74          | 7         | 47             | 48                 | 10                | 12.66     | 38.64      | 51.3           |

## Prilog 4. Rješenja DP-VRP-a sa primjenom *u-i* ograničenja

**Tabela 1. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 10-grad**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -1318.21    | -7.82  | -13.00    | -7.14  | -68.38        | -11.20 |
| 1      | 316.29      | 4.80   | 5.00      | 6.94   | 6.32          | 2.77   |
| 2      | -418.95     | -7.48  | -5.00     | -8.33  | -19.09        | -9.41  |
| 3      | -1215.55    | -26.06 | -13.00    | -26.00 | -55.61        | -31.08 |

**Tabela 2. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 12-grad**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -1196.48    | -8.26  | -11.00    | -7.28  | -65.55        | -11.22 |
| 1      | 299.23      | 5.42   | 4.00      | 6.78   | 6.62          | 3.05   |
| 2      | -377.52     | -7.79  | -4.00     | -8.00  | -17.95        | -9.22  |
| 3      | -1118.19    | -27.17 | -11.00    | -26.19 | -54.22        | -31.36 |

**Tabela 3. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 14-grad**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -1480.99    | -10.73 | -15.00    | -10.49 | -70.15        | -12.15 |
| 1      | 80.16       | 1.57   | 1.00      | 1.85   | 3.93          | 1.85   |
| 2      | -375.44     | -8.16  | -4.00     | -8.51  | -18.55        | -9.64  |
| 3      | -1185.71    | -28.96 | -12.00    | -28.57 | -55.53        | -32.19 |

**Tabela 4. Razlika između rješenja pri strategiji 2 i 1 za vozila 16-nac**

| Period | Pređeni put |        | Broj ruta |        | Trajanje ruta |        |
|--------|-------------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|        | km          | %      | broj      | %      | h             | %      |
| svi    | -7648.77    | -8.88  | -27.00    | -13.43 | -149.36       | -10.12 |
| 1      | 108.86      | 0.36   | -1.00     | -1.39  | 7.70          | 1.47   |
| 2      | -763.28     | -2.68  | -6.00     | -9.09  | -24.25        | -4.95  |
| 3      | -6994.35    | -25.81 | -20.00    | -31.75 | -132.81       | -28.75 |



## Prilog 5. Detaljno poređenje rješenja DP-VRP-a sa i bez primjene *u-i* ograničenja

**Tabela 1. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 10-grad pri strategiji 1**

| Period | Pređeni put |      | Broj ruta |      | Trajanje ruta |      |
|--------|-------------|------|-----------|------|---------------|------|
|        | km          | %    | broj      | %    | h             | %    |
| svi    | 41.64       | 0.25 | 0.00      | 0.00 | 0.71          | 0.12 |
| 1      | 4.46        | 0.07 | 0.00      | 0.00 | 0.05          | 0.02 |
| 2      | 11.89       | 0.21 | 0.00      | 0.00 | 0.35          | 0.17 |
| 3      | 25.29       | 0.55 | 0.00      | 0.00 | 0.31          | 0.17 |

**Tabela 2. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 10-grad pri strategiji 2**

| Period | Pređeni put |      | Broj ruta |      | Trajanje ruta |       |
|--------|-------------|------|-----------|------|---------------|-------|
|        | km          | %    | broj      | %    | h             | %     |
| svi    | 13.89       | 0.09 | 0.00      | 0.00 | 0.05          | 0.01  |
| 1      | 1.53        | 0.02 | 0.00      | 0.00 | 0.00          | 0.00  |
| 2      | 5.50        | 0.11 | 0.00      | 0.00 | -0.20         | -0.11 |
| 3      | 6.86        | 0.20 | 0.00      | 0.00 | 0.25          | 0.20  |

**Tabela 3. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 12-grad pri strategiji 1**

| Period | Pređeni put |      | Broj ruta |      | Trajanje ruta |       |
|--------|-------------|------|-----------|------|---------------|-------|
|        | km          | %    | broj      | %    | h             | %     |
| svi    | 279.92      | 1.97 | 1.00      | 0.67 | 2.42          | 0.42  |
| 1      | 22.09       | 0.40 | 0.00      | 0.00 | -0.08         | -0.04 |
| 2      | 87.88       | 1.85 | 0.00      | 0.00 | 0.71          | 0.37  |
| 3      | 169.95      | 4.31 | 1.00      | 2.44 | 1.79          | 1.05  |

**Tabela 4. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 12-grad pri strategiji 2**

| Period | Pređeni put |      | Broj ruta |      | Trajanje ruta |       |
|--------|-------------|------|-----------|------|---------------|-------|
|        | km          | %    | broj      | %    | h             | %     |
| svi    | 95.73       | 0.73 | 0.00      | 0.00 | 0.44          | 0.08  |
| 1      | 7.02        | 0.12 | 0.00      | 0.00 | -0.74         | -0.33 |
| 2      | 42.48       | 0.96 | 0.00      | 0.00 | 0.55          | 0.31  |
| 3      | 46.23       | 1.57 | 0.00      | 0.00 | 0.63          | 0.53  |

**Tabela 5. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 14-grad pri strategiji 1**

| Period | Pređeni put |       | Broj ruta |       | Trajanje ruta |      |
|--------|-------------|-------|-----------|-------|---------------|------|
|        | km          | %     | broj      | %     | h             | %    |
| svi    | 1192.95     | 9.46  | 13.00     | 10.00 | 12.55         | 2.22 |
| 1      | 234.54      | 4.81  | 3.00      | 5.88  | 2.21          | 1.05 |
| 2      | 386.51      | 9.17  | 4.00      | 9.30  | 4.61          | 2.46 |
| 3      | 571.90      | 16.24 | 6.00      | 16.67 | 5.73          | 3.44 |

**Tabela 6. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 14-grad pri strategiji 2**

| Period | Pređeni put |       | Broj ruta |       | Trajanje ruta |      |
|--------|-------------|-------|-----------|-------|---------------|------|
|        | km          | %     | broj      | %     | h             | %    |
| svi    | 819.63      | 7.12  | 10.00     | 8.47  | 6.97          | 1.39 |
| 1      | 158.23      | 3.14  | 2.00      | 3.77  | 1.05          | 0.49 |
| 2      | 292.14      | 7.42  | 3.00      | 7.50  | 2.93          | 1.71 |
| 3      | 369.26      | 14.54 | 5.00      | 20.00 | 2.99          | 2.62 |

**Tabela 7. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 16-nac pri strategiji 1**

| Period | Pređeni put |      | Broj ruta |      | Trajanje ruta |      |
|--------|-------------|------|-----------|------|---------------|------|
|        | km          | %    | broj      | %    | h             | %    |
| svi    | 1352.26     | 1.60 | 11.00     | 5.79 | 14.22         | 0.97 |
| 1      | 571.44      | 1.91 | 5.00      | 7.46 | 5.31          | 1.02 |
| 2      | 431.75      | 1.54 | 3.00      | 4.76 | 4.32          | 0.89 |
| 3      | 349.07      | 1.30 | 3.00      | 5.00 | 4.59          | 1.00 |

**Tabela 8. Razlika između rješenja sa i bez *u-i* ograničenja za vozila 16-nac pri strategiji 2**

| Period | Pređeni put |      | Broj ruta |      | Trajanje ruta |      |
|--------|-------------|------|-----------|------|---------------|------|
|        | km          | %    | broj      | %    | h             | %    |
| svi    | 685.72      | 0.88 | 1.00      | 0.58 | 8.28          | 0.63 |
| 1      | 380.71      | 1.26 | 0.00      | 0.00 | 4.99          | 0.95 |
| 2      | 271.34      | 0.99 | 1.00      | 1.69 | 2.50          | 0.54 |
| 3      | 33.67       | 0.17 | 0.00      | 0.00 | 0.79          | 0.24 |

## BIOGRAFIJA AUTORA

Kandidat Vlado Popović, master inženjer saobraćaja, rođen je 21.10.1987. godine u Gradišci (BiH). Osnovnu školu „Vuk Karadžić“ završio je 2002. godine u Srpcu (BiH) kao nosilac Vukove diplome. Gimnaziju (opšti smjer) Centra srednjih škola „Petar Kočić“ iz Srpca, završio je 2006. godine. Iste godine upisao je Osnovne akademske studije Saobraćajnog fakulteta, na Odsjeku za logistiku. Osnovne akademske studije završio je 2010. godine sa prosječnom ocjenom 9,15 i završnim radom „Pristupi rješavanju problema raspoređivanja radne snage“. Master akademske studije Saobraćajnog fakulteta, modul „Logistika“, upisao je 2010. godine i završio 2011. godine sa prosječnom ocjenom 10 i odbranjenim master radom pod nazivom „Internet marketing i njegova primjena u logistici“. Školske 2013/2014 upisao je Doktorske akademske studije na Saobraćajnom fakultetu, studijski program „Saobraćaj“.

U školskoj 2014/2015, dobio je stipendiju Vlade Republike Slovenije, u sklopu programa bilateralne razmjene studenata između R. Slovenije i R. Srbije. Tu stipendiju je iskoristio pohađajući Fakultet za Logistiku Univerziteta u Mariboru i boraveći u Celju. Školske 2016/2017 dobio je Erasmus plus stipendiju za pohađanje prvog semestra te školske godine na Fakultetu za Logistiku Univerziteta u Mariboru. Kandidat je položio sve ispite predviđene nastavnim planom i programom doktorskih studija sa prosječnom ocjenom 9.83. U dosadašnjem istraživačkom radu, kandidat je kao autor ili koautor učestvovao izradi pet radova u časopisima sa SCI liste, jednog rada u tematskom zborniku od međunarodnog značaja, jednog rada u časopisu od nacionalnog značaja i devet radova saopštenih na međunarodnim i domaćim konferencijama. U periodu od 2012. do 2014. godine bio je zaposlen u firmi FFT Group d.o.o. Beograd na poslovima organizacije transporta. Od 2017. godine zaposlen je u firmi NTS Soft d.o.o. Banja Luka na poslovima projektovanja softvera za logistiku.

## **IZJAVA O AUTORSTVU**

Ime i prezime autora      Vlado Popović

Broj indeksa                DS13D014

### **Izjavljujem**

da je doktorska disertacija pod naslovom

#### **OPTIMIZACIJA LOGISTIČKIH PROCESA U DISTRIBUCIJI PROIZVODA**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu,

---

**Potpis autora**

---

**IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE  
DOKTORSKOG RADA**

|                      |   |
|----------------------|---|
| Ime i prezime autora | Vlado Popović   |
| Broj indeksa         | DS13D014  |
| Studijski program    | Saobraćaj   |
| Naslov rada          | OPTIMIZACIJA LOGISTIČKIH PROCESA U DISTRIBUCIJI<br>PROIZVODA                            |
| Mentor               | dr Milorad Kilibarda, redovni profesor<br>Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet |

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu,

---

**Potpis autora**

---

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

### **OPTIMIZACIJA LOGISTIČKIH PROCESA U DISTRIBUCIJI PROIZVODA**

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.  
Kratak opis licenci je sastavni dio ove izjave).

U Beogradu,

---

**Potpis autora**

---

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
6. **Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.