

# Analiza dostave u posljednjoj milji odabrane tvrtke

---

**Babić, Lucija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:624540>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Lucija Babić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Lucija Babić

Zagreb, 2024.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lucija Babić** JMBAG: 0035213970

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza dostave u posljednjoj milji odabrane tvrtke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of Last Mile Delivery of Selected Company**

Opis zadatka:

„Dostava u posljednjoj milji“ je posljednja faza dostave u lancu opskrbe, koja uključuje kretanje proizvoda od posljednjeg distribucijskog centra do krajnjeg odredišta, obično kuće ili ureda krajnjeg korisnika. Ova faza često predstavlja najizazovniji dio dostavnog procesa zbog specifičnih zahtjeva, poput preciznosti, brzine i prilagođenosti korisničkim potrebama. Problemu dostave u posljednjoj milji pristupa se kroz različite metode i tehnologije, s ciljem minimizacije troškova i maksimizacije zadovoljstva korisnika. Jedna od metoda je standardni pristup optimizacije ruta dostavnih vozila.

U radu je potrebno:

- Uvodno prikazati porast paketne distribucije i rast značaja optimizacije u ovom segmentu logistike.
- Dati preglede analize pojma dostave posljednje milje te metoda i tehnologija koje se koriste u rješavanju.
- Na primjeru odabrane tvrtke opisati cijeli logistički proces usmjeren na dostavu paketa korisnicima.
- Detaljno analizirati proces posljednje milje te ovisno o rezultatima analize, predložiti moguća unapređenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

7. ožujka 2024.

Datum predaje rada:

9. svibnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Goran Đukić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivo Garašić

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Goranu Đukiću na susretljivosti, razumijevanju i pomoći tijekom izrade diplomskog rada te na savjetima i prenesenom znanju tijekom cijelog studija.

Posebna zahvala pripada mojim roditeljima koji su mi kroz cijelo obrazovanje bili podrška, vjerovali u mene i bili moj najveći oslonac. Zahvaljujem se i cijeloj obitelji na razumijevanju, savjetima i neizmjerljivoj ljubavi.

Zahvaljujem se svojim kolegicama i kolegama prvenstveno na prijateljstvu i društvu tijekom svih godina studija, a zatim i na pomoći i svim savjetima. Bez njih moje studentsko iskustvo ne bi bilo isto.

Hvala svim zaposlenicima DPD-a, a pogotovo Loreni i Franu jer bez njihove dobre volje i pomoći ne bih mogla dovršiti ovaj rad.

Na kraju, moram se zahvaliti svom zaručniku Patriku. Hvala na silnom strpljenju, razumijevanju i podršci. Zahvalna sam što znam da je uvijek tu za mene, što me neprestano motivira i potiče te što me čini boljom osobom.

Lucija Babić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS KRATICA.....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. UPRAVLJANJE LANCEM OPSKRBE .....	2
3. E-TRGOVINA .....	4
4. PRUŽATELJI USLUGA UPRAVLJANJA LOGISTIKOM .....	8
4.1. Značaj i prednosti korištenja logističkih usluga treće strane za e-trgovinu.....	9
4.2. Nedostatci korištenja logističkih usluga treće strane.....	11
4.3. Alternativna rješenja umjesto korištenja logističkih usluga treće strane .....	13
5. DOSTAVA U POSLJEDNJOJ MILJI.....	15
5.1. Koraci dostave u posljednjoj milji.....	16
5.2. Izazovi dostave u posljednjoj milji .....	17
5.3. Troškovi dostave u posljednjoj milji .....	19
5.4. Optimizacija dostave u posljednjoj milji .....	20
5.5. Novi trendovi dostave u posljednjoj milji .....	23
5.5.1. Ormarići za pohranu .....	23
5.5.2. Dronovi.....	25
5.5.3. Autonomni dostavni roboti.....	26
5.5.4. Crowdsourcing .....	27
6. OPTIMIZACIJA RUTA.....	29
6.1. Problem usmjeravanja vozila.....	29
6.1.1. Osnovni problem usmjeravanja vozila – VRP .....	30
6.1.2. Problem usmjeravanja vozila s ograničenjima kapaciteta – CVRP .....	30
6.1.3. Problem usmjeravanja vozila s vremenskim ograničenjima – VRPTW.....	31
6.1.4. Problem usmjeravanja vozila s ograničenjem duljine rute – DVRP.....	31
6.1.5. Problem usmjeravanja vozila s prikupljanjem i dostavom - VRPPD .....	31
6.1.6. Problem usmjeravanja vozila s dostavom i prikupljanjem – VRPDP .....	32
6.1.7. Problem usmjeravanja vozila s povratnim prikupljanjem – VRPB .....	32

6.2. Problem trgovačkog putnika.....	33
6.3. Metode i algoritmi koji se koriste za optimizaciju ruta .....	34
6.3.1. Algoritam ušteda Clarke & Wright .....	35
6.3.2. Algoritam najbližeg susjeda .....	39
6.3.3. Algoritam grananja i ograničavanja .....	43
8. ANALIZA RUTA POSLJEDNJE MILJE ODABRANE TVRTKE.....	51
8.1. Osnovne informacije.....	51
8.2. Proces dostave paketa.....	53
8.3. Predviđanje vremena dostave .....	59
8.4. Analiza ruta dostave posljednje milje.....	63
8.4.1. Ruta 1 .....	64
8.4.1.1. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta.....	65
8.4.1.2. Algoritam najbližeg susjeda .....	68
8.4.1.3. Algoritam grananja i ograničavanja .....	71
8.4.2. Ruta 2 .....	77
8.4.2.1. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta.....	78
8.4.2.2. Algoritam najbližeg susjeda .....	81
8.4.2.3. Algoritam grananja i ograničavanja .....	83
8.4.3. Ruta 3 .....	87
8.4.3.1. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta.....	89
8.4.3.2. Algoritam najbližeg susjeda .....	91
8.4.3.3. Algoritam grananja i ograničavanja .....	92
8.4.4. Analiza ruta .....	96
ZAKLJUČAK .....	99
LITERATURA .....	100

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Lanac opskrbe [1].....	2
Slika 2. Udio e-trgovine u ukupnoj svjetskoj maloprodaji [2].....	4
Slika 3. 1PL, 2PL, 3PL, 4PL, 5PL [4].....	8
Slika 4. Proces dostave u kojoj sudjeluje 3PL tvrtka [5].....	10
Slika 5. Troškovi pojedinih operacija u lancu opskrbe [7].....	15
Slika 6. Postotak svjetske populacije koja živi u urbanism područjima kroz godine [13].....	21
Slika 7. Kompletan (FTL) i djelomičan utovar kamiona [15].....	21
Slika 8. Proces logistike povrata [17].....	22
Slika 9. Ormarić za pohranu [19].....	24
Slika 10. Dron za dostavu proizvoda korisnicima [21].....	25
Slika 11. Autonomni dostavni robot [22].....	26
Slika 12. Crowdsourcing i klasična dostava.....	28
Slika 13. Spajanje dviju lokacija u jednu rutu [28].....	36
Slika 14. Primjer stabla pretraživanja [30].....	44
Slika 15. Prikaz DPD depoa u Hrvatskoj.....	52
Slika 16. Porast broja paketa kroz godine.....	52
Slika 17. MDU skener.....	53
Slika 18. Glavni izbornik MDU skenera.....	54
Slika 19. Zaslone MDU skenera nakon skeniranja paketa.....	54
Slika 20. Zaslone MDU skenera za potpis.....	56
Slika 21. Dodjeljivanje dodatnog koda paketima.....	57
Slika 22. Prikaz popisa prepreka na MDU skeneru.....	58
Slika 23. Oznaka paketa koji je namijenjen za razmjenu.....	58
Slika 24. Oznaka paketa namijenjenog za povrat.....	59
Slika 25. Grafički prikaz 1HP.....	60
Slika 26. Primjer jedne rute vozila DPD-a.....	61
Slika 27. Redoslijed stopova jedne rute.....	62
Slika 28. Tablica uz pomoć koje se prati postotak optimizacije.....	63
Slika 29. Prikaz prve rute.....	64
Slika 30. Prikaz druge rute.....	77
Slika 31. Prikaz treće rute.....	87



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prikaz matrice udaljenosti za algoritam ušteta Clarka i Wrighta.....	37
Tablica 2. Tablica ušteta za algoritam Clarka i Wrighta.....	37
Tablica 3. Tablica relacija poredanih po uštedama.....	38
Tablica 4. Matrica udaljenosti za algoritam najbližeg susjeda.....	40
Tablica 5. Odabir početne relacije.....	40
Tablica 6. Povezivanje čvorova u rutu.....	41
Tablica 7. Povezivanje čvorova u rutu.....	41
Tablica 8. Povezivanje čvorova u rutu.....	42
Tablica 9. Povezivanje čvorova u rutu.....	42
Tablica 10. Povezivanje posljednjeg dodanog čvora sa polaznim.....	43
Tablica 11. Matrica udaljenosti algoritma grananja i ograničavanja.....	45
Tablica 12. Ponalazak minimalnih elemenata u svakom retku.....	45
Tablica 13. Tablica nakon provedenog oduzimanja.....	46
Tablica 14. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu.....	46
Tablica 15. Tablica nakon provedenog oduzimanja.....	46
Tablica 16. Izračun kazni.....	47
Tablica 17. Reduciranje tablice.....	48
Tablica 18. Reducirana tablica.....	48
Tablica 19. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku.....	48
Tablica 20. Tablica nakon provedenog oduzimanja.....	49
Tablica 21. Izračun kazni.....	49
Tablica 22. Reducirana tablica.....	49
Tablica 23. Dobiveni podaci o prvoj ruti.....	65
Tablica 24. Tablica troškova za prvu rutu.....	66
Tablica 25. Tablica ušteta za prvu rutu.....	67
Tablica 26. Odabir najbliže lokacije od početne točke.....	68
Tablica 27. Odabir sljedeće najbliže lokacije.....	69
Tablica 28. Odabir sljedeće najbliže lokacije.....	70
Tablica 29. Ponalazak minimalnih elemenata u svakom retku.....	71
Tablica 30. Tablica nakon provedenog oduzimanja.....	72
Tablica 31. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu.....	72
Tablica 32. Tablica nakon provedenog oduzimanja.....	73

Tablica 33. Izračun kazni.....	74
Tablica 34. Izračun kazni.....	75
Tablica 35. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu.....	76
Tablica 36. Izračun kazni.....	76
Tablica 37. Reducirana matrica.....	77
Tablica 38. Dobiveni podaci o drugoj ruti.....	78
Tablica 39. Tablica troškova za drugu rutu.....	79
Tablica 40. Tablica ušteda za drugu rutu.....	80
Tablica 41. Odabir najbliže lokacije od početne točke.....	81
Tablica 42. Odabir sljedeće najbliže lokacije.....	82
Tablica 43. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku.....	83
Tablica 44. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu.....	84
Tablica 45. Izračun kazni.....	85
Tablica 46. Izračun kazni.....	86
Tablica 47. Izračun kazni.....	86
Tablica 48. Dobiveni podaci o trećoj ruti.....	88
Tablica 49. Tablica troškova za treću rutu.....	89
Tablica 50. Tablica troškova za treću rutu.....	90
Tablica 51. Odabir najbliže lokacije od početne točke.....	91
Tablica 52. Odabir sljedeće najbliže lokacije.....	92
Tablica 53. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku.....	93
Tablica 54. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu.....	93
Tablica 55. Izračun kazni.....	94
Tablica 56. Izračun kazni.....	95
Tablica 57. Izračun kazni.....	96
Tablica 58. Usporedba ruta.....	97

## POPIS KRATICA

1HP - Predviđanje unutar jednog sata - eng. *One Hour Predict*

1PL - Logistika prve strane - eng. *First-party logistics*

2PL - Logistika druge strane - eng. *Second party logistics*

3PL - Logistika treće strane - eng. *Third party logistics*

4PL - Logistika četvrte strane - eng. *Fourth party logistics*

5PL - Logistika pete strane - eng. *Fifth party logistics*

CVRP - Problem usmjeravanja vozila s ograničenjima kapaciteta - eng. *Capacitated Vehicle Routing Problem*

DVRP - Problem usmjeravanja vozila s ograničenjem duljine rute - eng. *Distance Constrained Vehicle Routing Problem*

ETA - Predviđeno vrijeme dolaska - eng. *Estimated Time of Arrival*

FMS - Sustav upravljanja flotom - eng. *Fleet Management System*

FTL - Pun utovar - eng. *Full Truckload*

LTL - Manje od punog tovara - eng. *Less-than-Truckload*

MDU - Mobilna podatkovna jedinica - eng. *Mobile Data Unit*

OFD - Optičko prepoznavanje znakova - eng. *Optical Character Recognition*

PUDO - Preuzimanje i dostava - eng. *Pick-Up and Drop-Off*

SCM - Upravljanje lancem opskrbe - eng. *Supply Chain Management*

TSP - Problem trgovačkog putnika - eng. *Traveling Salesman Problem*

VRP - Problem usmjeravanja vozila - eng. *Vehicle Routing Problem*

VRPB - Problem usmjeravanja vozila s povratnim prikupljanjem - eng. *Vehicle Routing Problem with Backhauls*

VRPDDP - Problem usmjeravanja vozila s djeljivom dostavom i prikupljanjem - eng. *Vehicle Routing Problem with Divisible Delivery and Pickup*

VRPDP - Problem usmjeravanja vozila s dostavom i prikupljanjem - eng. *Vehicle Routing Problem with Delivery and Pickup*

VRPPD - Problem usmjeravanja vozila s prikupljanjem i dostavom - eng. *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*

VRPSDP - Problem usmjeravanja vozila s istovremenom dostavom i prikupljanjem - eng. *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup*

VRPTW - Problem usmjeravanja vozila s vremenskim ograničenjima - eng. *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

## SAŽETAK

Dostava u posljednjoj milji odnosi se na završni dio isporuke proizvoda od distribucijskog centra do krajnjeg kupca. Ovaj segment dostave često predstavlja najskuplji i najizazovniji dio cijelog lanca opskrbe zbog svojih specifičnih zahtjeva. Razvoj e-trgovine značajno je povećao potrebu za učinkovitom dostavom u posljednjoj milji, s obzirom na sve veći broj online narudžbi koje zahtijevaju brzu i preciznu isporuku. Kako bi se nosili sa sve većim pritiskom na vlastite lance opskrbe, tvrtke se često oslanjaju na vanjske logističke tvrtke koje preuzimaju odgovornost za optimizaciju ruta, praćenje paketa i zadovoljstvo kupaca. Integracija s pružateljima logističkih usluga treće strane omogućuje tvrtkama da fokus zadrže na svojoj osnovnoj djelatnosti, dok treće strane osiguravaju da logistički procesi ostanu što učinkovitiji. Optimizacija ruta ima ključnu ulogu u smanjenju troškova i povećanju učinkovitosti dostave u posljednjoj milji, omogućujući brže isporuke i bolje zadovoljstvo kupaca. Problem trgovačkog putnika i problem usmjeravanja vozila pružaju teorijsku podlogu za rješavanje izazova planiranja optimalnih ruta.

U ovom radu objašnjen je koncept dostave u posljednjoj milji te su definirani načini optimizacije. Naglasak je stavljen na optimizaciju ruta te je dan pregled najpoznatijih algoritama za rješavanje problema putujućeg trgovca i problema usmjeravanja vozila. Također je provedena analiza procesa dostave paketa tvrtke DPD te analiza ruta koristeći odabrane algoritme.

Ključne riječi: dostava u posljednjoj milji, lanac opskrbe, pružatelji logističkih usluga treće strane, optimizacija ruta, analiza proces dostave, analiza ruta.

## **SUMMARY**

Last-mile delivery refers to the final stage of product delivery from the distribution center to the end customer. This segment of delivery often represents the most expensive and challenging part of the entire supply chain due to its specific requirements. The development of e-commerce has significantly increased the need for efficient last-mile delivery, given the growing number of online orders that demand fast and precise delivery. To cope with the increasing pressure on supply chains, companies often rely on external logistics companies that take responsibility for route optimization, package tracking, and customer satisfaction. Integration with third-party logistics providers allows companies to focus on their core business, while third parties ensure that logistics processes remain as efficient as possible. Route optimization plays a key role in reducing costs and increasing last-mile delivery efficiency, enabling faster deliveries and greater customer satisfaction. The Traveling Salesman Problem and Vehicle Routing Problem provide a theoretical basis for tackling the challenges of planning optimal routes.

This paper explains the concept of last-mile delivery and defines its optimization methods. The focus is placed on route optimization, with an overview of the most well-known algorithms for solving the Traveling Salesman Problem and Vehicle Routing Problem. An analysis of DPD's parcel delivery process is also conducted, along with a route analysis using selected algorithms.

**Keywords:** last-mile delivery, supply chain, third-party logistics providers, route optimization, delivery process analysis, route analysis.

## 1. UVOD

U suvremenom digitalnom dobu, e-trgovina je postala ključna komponenta globalnog tržišta, omogućujući kupcima širom svijeta jednostavan pristup raznovrsnom asortimanu proizvoda i usluga. Ova inovativna platforma ne samo da transformira način kupovine, već i cjelokupno poslovanje. Usprkos naglom razvoju i uspješnoj implemetaciji u većinu komercijalnih aktivnosti, pojavljuju se novi logistički izazovi. Jedan od njih je i koncept dostave u posljednjoj milji (eng. *last-mile delivery*), a odnosi se na posljednji segment lanca opskrbe u kojem se proizvodi ili usluge izravno dostavljaju krajnjim potrošačima. To je posljednja faza isporuke koja se odvija od distribucijskog centra ili trgovine do mjesta gdje potrošač prima svoju narudžbu. Efikasnost i pouzdanost sustava koji se koriste pri dostavi u posljednjoj milji ključni su za ostvarivanje konkurentnosti na tržištu e-trgovine i drugih online usluga.

U cilju poboljšanja procesa dostave u posljednjoj milji, tvrtke koriste različite strategije, uključujući korištenje logističkih usluga treće strane, optimizacije ruta, korištenje naprednih tehnologija poput bespilotnih letjelica, autonomnih dostavnih robota, pametnih sustava za praćenje te mogle druge kako bi smanjile troškove i vrijeme isporuke, te pružile bolje iskustvo kupcima.

U uvodnom dijelu ovog rada opisan je proces upravljanja lanacem opskrbe te koncept e-trgovine. Nadovezujući se na nagli porast zastupljenosti e-trgovine, objašnjen je jedan on načina na koji se tvrtke nose sa vlastitim logističkim izazovima, a uključuje suradnju sa pružateljima usluga treće strane. Tu su definirane razne prednosti i nedostaci te predstavljena i neka alternativna rješenja. Nadalje je opisan koncept dostave u posljednjoj milji. Nakon opisa koraka, prednosti i nedostataka, predstavljeno je i pet načina za optimizaciju dostave te novi trendovi. Od tih pet načina, kao najistaknutiji je odabran proces optimizacije ruta. U sklopu toga su definirani problem usmjeravanja vozila i problem putujućeg trgovca te razne metode za rješavanje navedenih problema, od kojih su izdvojeni i detaljnije obrađeni algoritam ušteda Clarka i Wrighta, algoritam najbližeg susjeda te algoritam grananja i ograničavanja. Nakon toga slijedi opis logističkih procesa tvrtke DPD, sa naglaskom na dostavu paketa. Na samom kraju ovog rada provedena je analiza ruta dobivenih upotrebom DPD optimizatora te je provedena usporedba sa rutama dobivenima provođenjem tri ranije spomenuta algoritma.

## 2. UPRAVLJANJE LANCEM OPSKRBE

Upravljanje lancem opskrbe (SCM, eng. *Supply Chain Management*) je proces upravljanja tokom svih dobara i usluga prema i iz poduzeća te uključuje sve procese i aktivnosti pretvaranja materijala u konačan proizvod te isporuku krajnjem kupcu. SCM se fokusira na planiranje, kontrolu i optimizaciju svih aktivnosti u lancu opskrbe kako bi se osigurala efikasnost, konkurentnost i zadovoljstvo potrošača. Ovaj koncept predstavlja ključni dio strategije mnogih organizacija širom svijeta, bez obzira na njihovu veličinu ili industriju. Jedan od osnovnih ciljeva upravljanja lancem opskrbe je smanjenje troškova uz istovremeno poboljšavanje kvalitete proizvoda ili usluga. Efikasno upravljanje lancem opskrbe zahtijeva koordinaciju između različitih funkcionalnih područja unutar organizacije, kao i suradnju s vanjskim dobavljačima i partnerima.

Sam lanac opskrbe predstavlja sustav organizacija, ljudi, aktivnosti, informacija i resursa koji su uključeni u proces proizvodnje i distribucije proizvoda ili usluga od sirovina do krajnjih potrošača. Lanac opskrbe predstavlja temelj proizvodnih procesa, usmjeravajući tok materijala, informacija i resursa od dobavljača do potrošača. Komponente lanca opskrbe prikazane su na [Slika 1], a uključuju proizvođače sirovina, dobavljače, proizvođače proizvoda, prijevoznike, distributer, maloprodajne trgovce i kupce.



Slika 1. Lanac opskrbe [1]

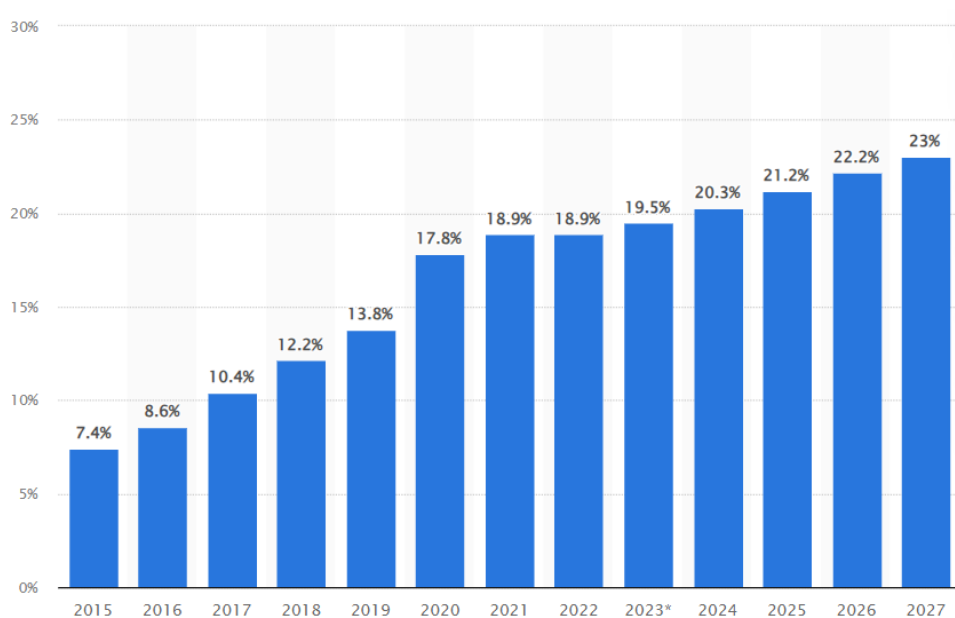
Globalizacija, tehnološki napredak i promjene u potražnji potrošača konstantno mijenjaju dinamiku lanca opskrbe, što zahtijeva stalno prilagođavanje i inovacije kako bi se ostvarile konkurentske prednosti. Upravo posljednji korak lanca opskrbe, isporuka proizvoda krajnjem kupcu, predstavlja ključan izazov za upravljanje lancem opskrbe jer je često najkompleksnija i najskuplja faza. Uspješno upravljanje isporukom proizvoda unaprjeđuje učinkovitost cijelog lanca opskrbe i povećava zadovoljstvo kupaca.



### 3. E-TRGOVINA

E-trgovina, ili elektronička trgovina, predstavlja dinamičan sektor u suvremenom poslovanju, gdje se proizvodi i usluge nude i kupuju putem interneta. Ovaj procvat digitalne trgovine transformirao je tradicionalni način kupovine i poslovanja, otvarajući vrata globalnom tržištu. Ključne značajke e-trgovine uključuju jednostavan pristup bogatom asortimanu proizvoda, personalizirane preporuke, sigurne transakcije i praktičnost online kupovine.

Na [Slika 2] može se vidjeti porast zastupljenosti e-trgovine u odnosu na cjelokupnu maloprodaju u svijetu. U 2023. godini e-trgovina je činila čak 19,5 % svjetske maloprodaje, a prema procjenama taj će postotak iznositi oko 23 % do 2027. godine.



Slika 2. Udio e-trgovine u ukupnoj svjetskoj maloprodaji [2]

Platforme e-trgovine nude kupcima širok izbor proizvoda, od odjeće i elektronike do digitalnih usluga, pružajući im mogućnost usporedbe cijena, čitanja recenzija i pronalaženja najboljih ponuda.

Inovacije poput virtualne stvarnosti i proširene stvarnosti dodatno obogaćuju korisničko iskustvo, omogućavajući virtualno isprobavanje proizvoda prije kupovine. Prilagođene marketinške strategije, poput oglašavanja putem društvenih medija i personaliziranih e-mailova, pomažu tvrtkama da dosegnu svoju ciljanu publiku i izgrade dugoročne odnose s kupcima. E-trgovina također pridonosi internacionalizaciji poslovanja, omogućujući tvrtkama

da dosegnu globalno tržište bez geografskih ograničenja. Kao ključni element suvremenog poslovanja, e-trgovina iz temelja mijenja tradicionalne lance opskrbe. S porastom ove industrije, logistika i upravljanje lancima opskrbe postaju vitalni za uspjeh poslovanja.[3]

Neki od ključnih aspekata utjecaja e-trgovine na lanac opskrbe su:

- Brža i efikasnija dostava

E-trgovina je postavila visoke standarde u pogledu brzine dostave. Potrošači su sve više skloni očekivati brzu isporuku svojih narudžbi, što dovodi do potrebe za optimizacijom lanca opskrbe. Tvrtke su prisiljene ulagati u napredne tehnologije, poput praćenja u stvarnom vremenu, automatizacije i optimizacije rute dostave, kako bi udovoljile visokim očekivanjima kupaca.

- Promjene u logistici

E-trgovina je potaknula inovacije u logističkim procesima. Uvođenje pametnih skladišta, autonomnih vozila i bespilotnih letjelica čine distribucijske procese efikasnijima. Osim toga, tehnologije poput interneta stvari omogućavaju praćenje i upravljanje zalihama u stvarnom vremenu, minimizirajući rizik od prekomjerne zalihe ili nestašica.

- Personalizacija i prilagodba

Poslovanje putem interneta omogućava tvrtkama prikupljanje obilja podataka o kupcima. Ovi podaci koriste se za personalizaciju ponude proizvoda, ciljanje određenih tržišnih segmenata i prilagodbu lanca opskrbe prema promjenama u potrošačkim preferencijama. Ova prilagodba pomaže u smanjenju gubitaka i povećava ukupnu učinkovitost lanca opskrbe.

- Globalna dostupnost proizvoda

Tvrtkama je znatno lakše doseći globalno tržište bez potrebe za fizičkim prisustvom u različitim zemljama. To postavlja nove izazove u međunarodnom upravljanju lancem opskrbe, uključujući rješavanje carinskih i regulatornih pitanja te prilagodbu distribucijskih mreža globalnom okruženju.

- Povećana konkurencija

S porastom e-trgovine, konkurencija među tvrtkama postala je izraženija. Tvrtke su prisiljene stalno inovirati i poboljšavati svoje lančane procese kako bi zadržale korak s brzim tempom tržišta. To često uključuje ulaganje u nove tehnologije i praćenje najnovijih trendova u e-commerceu.

Uz niz prednosti, e-trgovina se također susreće s raznim specifičnim logističkim izazovima koji mogu utjecati na efikasnost isporuke, zadovoljstvo kupaca i profitabilnost tvrtki. Ti izazovi su sljedeći:

- Dostava u posljednjoj milji

Dostava u posljednjoj milji predstavlja jedan od najvećih logističkih izazova u e-trgovini. Ovaj segment isporuke često je skup i može biti izuzetno složen, osobito u urbanim područjima s gužvom, ograničenim parkiralištima i prometnim ograničenjima.

- Optimizacija ruta isporuke

S povećanjem broja narudžbi, optimizacija ruta isporuke postaje izazov. Pronalaženje najbržih i najučinkovitijih putanja kako bi se smanjili troškovi dostave i vrijeme isporuke predstavlja velik izazov, a tehnološka rješenja poput pametnih sustava za praćenje mogu biti ključna u rješavanju ovog problema.

- Složenost povrata robe

E-trgovina često ima više povrata proizvoda u usporedbi s tradicionalnim maloprodajnim modelima. Upravljanje tim povratima može biti logistički izazovno, zahtijevajući brzo i učinkovito rukovanje s vraćenim proizvodima, a istovremeno očuvanje njihove kvalitete.

- Skladištenje i upravljanje zalihama

S obzirom na raznolikost proizvoda i stalni pritisak za brzom isporukom, skladištenje i upravljanje zalihama postaju ključni faktori. Nedostatak pravilnog upravljanja zalihama može dovesti do problema s dostupnošću proizvoda, gubitkom prodaje ili prekomjernom zalihosti koja povećava troškove.

- Cyber prijetnje i sigurnost podataka

E-trgovina se oslanja na digitalne platforme i sustave za obradu narudžbi, što ih čini podložnima cyber prijetnjama. Gubitak podataka ili prekidi u online sustavima mogu ozbiljno ometati logističke procese, uzrokovati kašnjenja i negativno utjecati na povjerenje potrošača.

- Međunarodna dostava

Ako e-trgovina posluje na globalnoj razini, suočava se s izazovima međunarodne dostave, uključujući carinske formalnosti, različite zakonodavne uvjete i različite standarde kvalitete. Ovi faktori mogu utjecati na vrijeme isporuke i troškove dostave.

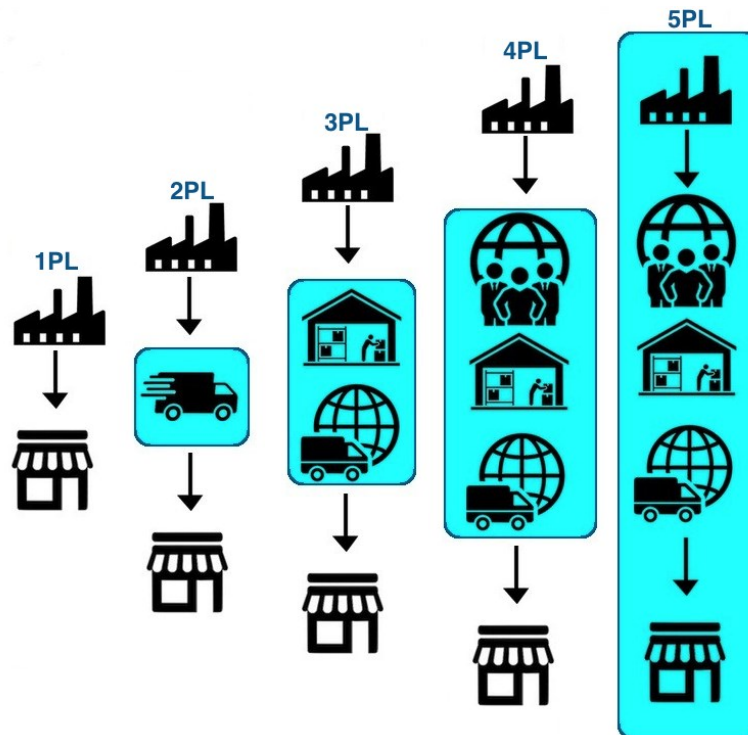
- Ekološki utjecaj dostave

Povećana potreba za brzom dostavom može imati negativan ekološki utjecaj zbog povećane emisije stakleničkih plinova od transporta. Tvrtke se suočavaju s pritiskom za pronalaženje održivih i ekološki prihvatljivih rješenja dostave.

Rješavanje ovih logističkih problema u e-trgovini zahtijeva inovativna rješenja, tehnološke napretke, pažljivo planiranje i suradnju s partnerima u lancu opskrbe kako bi se osigurala efikasna i zadovoljavajuća usluga za potrošače.

#### 4. PRUŽATELJI USLUGA UPRAVLJANJA LOGISTIKOM

S obzirom na sve veći broj tvrtki koje nude mogućnost kupnje preko interneta, što zahtijeva brzu i učinkovitu isporuku proizvoda, u cilju zadovoljavanja potražnje kupaca, tvrtke su primorane pronalaziti načine za optimizaciju svojih procesa proizvodnje i isporuke. Dok za manje tvrtke to može biti jednostavno, veće se tvrtke moraju prilagoditi kako bi zadovoljile zahtjeve tržišta te se iz tog razloga često okreću pružateljima usluga upravljanja logistikom. Tvrtke mogu prepustiti kontrolu nad nekim dijelom ili svojim cijelim lancem opskrbe, ovisno o njihovim specifičnim potrebama. Ovisno o razini uključenosti pružatelja usluga upravljanja logistikom razlikuju se logistika prve (1PL), druge (2PL), treće (3PL), četvrte (4PL) i pete strane (5PL). Na [Slika 3] je shema koja prikazuje različitu razinu integracije logističkih usluga u svakom od ovih modela.



Slika 3. 1PL, 2PL, 3PL, 4PL, 5PL [4]

Logistika prve strane (1PL, eng. *First-party logistics*) podrazumijeva da tvrtka koja proizvodi ili distribuira proizvode samostalno obavlja svoje logističke aktivnosti. To uključuje skladištenje vlastitih proizvoda, upravljanje inventarom, transport robe i sl. U ovom modelu tvrtka preuzima potpunu odgovornost za sve logističke operacije, što može rezultirati visokim operativnim troškovima i manjkom fleksibilnosti.

2PL model (eng. *Second party logistics*) uključuje angažiranje vanjskih pružatelja logističkih usluga kako bi se podržale osnovne logističke potrebe tvrtke. Ovaj model je drugačije definiran u raznim izvorima. Neki tvrde da su ovdje uključene samo usluge transporta, dok drugi navode da mogu biti uključene i druge usluge poput skladištenja i upravljanja inventarom, sve dok je ograničeno na samo jednu vrstu usluge od svakog pružatelja.

Logistika treće strane (3PL, eng. *Third party logistics*) predstavlja korak dalje od 2PL-a. Naime, u ovom modelu pružatelji logističkih usluga preuzimaju veći dio odgovornosti za logističke procese. To može uključivati skladištenje, upravljanje inventarom, transport, distribuciju i druge logističke funkcije. 3PL često uključuje veću razinu integracije i neke dodatne aktivnosti kao što su strategijsko planiranje, upravljanje rizicima, optimizacija lanca opskrbe i dr.

4PL (eng. *Fourth party logistics*) ide korak dalje od prethodnih modela. Ovdje se tvrtka oslanja na strateškog partnera, integratora lanca opskrbe koji preuzima potpunu odgovornost za upravljanje cijelim lancem opskrbe tvrtke. Ovaj integrator može biti specijalizirani pružatelj logističkih usluga ili konzultantska tvrtka koja pruža usluge upravljanja lancem opskrbe. Glavni cilj 4PL-a je optimizacija i integracija različitih logističkih procesa kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i konkurentnost.

5PL (eng. *Fifth party logistics*) koncept je relativno nov i obuhvaća integraciju naprednih tehnologija poput umjetne inteligencije, analitike podataka i interneta stvari (IoT) u upravljanju lancem opskrbe. Ovi pružatelji usluga fokusiraju se na pružanje visokotehnoloških rješenja za optimizaciju lanca opskrbe, uključujući prediktivnu analitiku, automatizaciju procesa i poboljšanu vidljivost. Njihova uloga je osigurati da tvrtke imaju najnaprednije alate i tehnologije na raspolaganju za upravljanje svojim logističkim operacijama i optimizaciju njihove učinkovitosti.

U svakom od ovih modela, razina integracije, odgovornosti i specijalizacija razlikuje se, omogućujući tvrtkama da pronađu najbolji pristup upravljanju svojim logističkim operacijama ovisno o njihovim potrebama i ciljevima.

#### **4.1. Značaj i prednosti korištenja logističkih usluga treće strane za e-trgovinu**

U kontekstu naglog porasta e-trgovine i paketne distribucije upravo su pružatelji logističkih usluga treće strane najzastupljeniji te imaju ključnu ulogu u osiguravanju učinkovite i uspješne isporuke robe kupcima. Ovakav princip rasterećuje tvrtke i one se mogu usredotočiti na svoje

osnovne djelatnosti dok se logistički procesi povjeravaju stručnjacima. Proces dostave proizvoda kupljenih preko e-trgovine uz pomoć 3PL tvrtke prikazan je na [Slika 4].



Slika 4. Proces dostave u kojoj sudjeluje 3PL tvrtka [5]

Prednosti korištenja usluga 3PL tvrtki su sljedeće [6]:

- Povećanje operativne fleksibilnosti

Tvrtke mogu prilagoditi svoje logističke potrebe promjenjivim zahtjevima tržišta bez potrebe za ulaganjem u vlastite resurse i infrastrukturu. 3PL omogućava tvrtkama da prošire svoje poslovanje na nova tržišta s manjim rizikom i većom učinkovitošću. Neke od glavnih značajki 3PL-a za e-trgovinu su sljedeće:

- Skladištenje i upravljanje inventarom

3PL pružatelji nude skladišne kapacitete koji su često potrebni e-trgovcima zbog varijabilnih količina inventara. Oni ne samo da pružaju prostor za pohranu robe već i efikasno upravljaju inventarom, prateći kretanje proizvoda od ulaza do izlaza.

- Brza i pouzdana dostava

3PL pružatelji imaju dobro razvijenu infrastrukturu za transport i distribuciju robe. Kroz svoje mreže vozila, skladišta i partnerstva s prijevoznicima, mogu osigurati brzu i pouzdanu dostavu kupcima, često nudeći različite opcije brze dostave.

- Globalna dostupnost

Mnogi 3PL pružatelji imaju globalnu prisutnost, što je posebno važno za e-trgovce koji posluju na međunarodnom tržištu. Kroz svoje mreže skladišta i prijevoznih kapaciteta, mogu olakšati međunarodnu dostavu i carinjenje robe.

- Smanjenje troškova

Korištenje 3PL-a može pomoći e-trgovcima da smanje operativne troškove povezane s logistikom poput nabave i održavanja skladišta, upravljanja osobljem i flotom vozila te ulaganja u informacijske tehnologije. Umjesto ulaganja u vlastitu logističku infrastrukturu, e-trgovci mogu iskoristiti usluge 3PL-a po potrebi, plaćajući samo za stvarno korištene resurse.

- Usmjerenost na osnovnu djelatnost

Outsourcing logističkih funkcija e-trgovcima omogućava da se usredotoče na svoju osnovnu djelatnost, poput razvoja proizvoda, marketinga i korisničke podrške. Time se oslobađaju resursi i vrijeme koje bi inače bili potrošeni na upravljanje logističkim procesima.

Međutim, unatoč brojnim prednostima, postoji nekoliko izazova povezanih s korištenjem 3PL-a. Jedan od glavnih je upravljanje odnosima s pružateljima usluga i osiguravanje da se usluge pružaju u skladu s očekivanjima i standardima kvalitete. Također, postoji rizik od gubitka kontrole nad logističkim procesima i sigurnošću podataka, posebno kada se koriste vanjski IT sustavi. Još jedan izazov je osiguravanje usklađenosti s regulatornim zahtjevima i standardima u različitim geografskim područjima gdje posluje tvrtka. Različite zemlje imaju različite propise i zahtjeve u pogledu carinskih postupaka, poreza i sigurnosnih standarda, što može predstavljati izazov za 3PL pružatelje.

#### **4.2. Nedostatci korištenja logističkih usluga treće strane**

Uz niz prednosti, korištenje usluga treće strane može dovesti i do određenih nedostataka, a oni su sljedeći:

- Gubitak kontrole nad operacijama

Kada se tvrtke oslanjaju na 3PL pružatelje usluga, one gube određenu razinu kontrole nad svojim procesima. Drugim riječima, tvrtke imaju ograničene uvide u svoje svakodnevne aktivnosti, što može otežati praćenje napretka, identificiranje problema i brzu reakciju na



promjene u potražnji ili tržišnim uvjetima. Nedostatak direktnog nadzora može dovesti do toga da pružatelji usluga ne ispunjavaju očekivanja ili standarde kvalitete klijenta.

- Troškovi

Iako se korištenje 3PL usluga često percipira kao način smanjenja troškova, u nekim slučajevima to može rezultirati i značajno višim troškovima. Naknade za usluge 3PL pružatelja mogu biti visoke, a dodatni troškovi za prilagodbu procesa ili nedovoljna transparentnost u cijenama mogu dodatno opteretiti proračun tvrtke. Troškovi se također mogu povećati ako pružatelj usluge ne uspije ispunjavati dogovorene uvjete ili ako dođe do nepredviđenih događaja poput kašnjenja u isporuci ili oštećenja robe.

- Manje fleksibilnosti

Pružatelji 3PL usluga često imaju svoje standarde i procese koji se mogu razlikovati od poslovnih potreba klijenta. To može ograničiti sposobnost prilagodbe ili brze reakcije na promjene u potražnji, sezonske fluktuacije ili specifične zahtjeve kupaca. Nedostatak fleksibilnosti može rezultirati poteškoćama u prilagodbi operativnih procesa ili uvođenju inovacija u lanac opskrbe.

- Kvaliteta usluge

Ovisnost o vanjskom pružatelju usluga može rezultirati varijacijama u kvaliteti usluge. Ako 3PL pružatelji ne uspijevaju ispunjavati dogovorene standarde ili ne mogu osigurati kontinuiranu kvalitetu usluge, to može negativno utjecati na ugled tvrtke i zadovoljstvo kupaca. Nepredviđeni problemi poput kašnjenja u isporuci, oštećenja robe ili nedostatak komunikacije mogu imati ozbiljne posljedice na poslovanje klijenta.

- Sigurnosni rizici

Dijeljenje informacija i povjerenje u treću stranu može stvoriti potencijalne sigurnosne rizike vezane uz povjerljivost podataka o proizvodima, klijentima ili poslovnim procesima. Nedostatak kontrole nad sigurnosnim mjerama može izložiti tvrtku riziku od krađe podataka, kršenja povjerljivosti ili drugih prekršaja sigurnosnih mjera. Ovo postaje posebno važno u područjima kao što su zdravstvo, financije ili vojna industrija, gdje su informacije kojima tvrtke raspolažu posebno osjetljive.

- Poteškoće pri povratu proizvoda

Iako 3PL pružatelji usluga upravljaju povratima od strane kupaca, pri tome se procesu pojavljuju određeni nedostaci. Naime, troškovi upravljanja povratima za tvrtke koje posluju putem e-trgovine su veći nego za tvrtke s fizičkim poslovnica. Volumen vraćenih predmeta ponekad može biti veći nego obično, što može uzrokovati kašnjenja u obradi i usporiti operacije skladišta. To može rezultirati i porastom nezadovoljstva potrošača.

Za mnoge tvrtke, korištenje usluga treće strane predstavlja izvrstan izbor koji donosi brojne koristi. Tvrtke koje nemaju interne resurse ili stručnost za upravljanje složenim procesima logistike i lanca opskrbe mogu se osloniti na stručnost i resurse 3PL pružatelja usluga kako bi poboljšale svoje operacije. Osim toga, korištenje 3PL usluga može omogućiti tvrtkama da se fokusiraju na svoje ključne poslovne aktivnosti, dok se logistički aspekti povjeravaju stručnjacima.

Međutim, za neke tvrtke, korištenje 3PL usluga možda nije najbolji izbor. Primjerice, tvrtke koje imaju visoke standarde kvalitete ili posebne zahtjeve možda neće moći pronaći 3PL pružatelja usluga koji može potpuno udovoljiti njihovim specifičnim potrebama. Neke tvrtke bi morale provesti reorganizaciju svih svojih procesa i napraviti velika početna ulaganja kako bi uopće bilo moguće koristiti logističke usluge treće strane, a to može biti neisplativo. Također, tvrtke koje već imaju dobro uspostavljene interne procese i resurse za upravljanje logistikom možda neće imati dovoljno koristi od suradnje 3PL pružateljima usluga.

Odabir između korištenja 3PL usluga ili internog upravljanja logistikom ovisi o specifičnim potrebama, ciljevima i resursima svake tvrtke. Pritom je nužno razmotriti sve prednosti i moguće nedostatke oba pristupa prije donošenja konačne odluke.

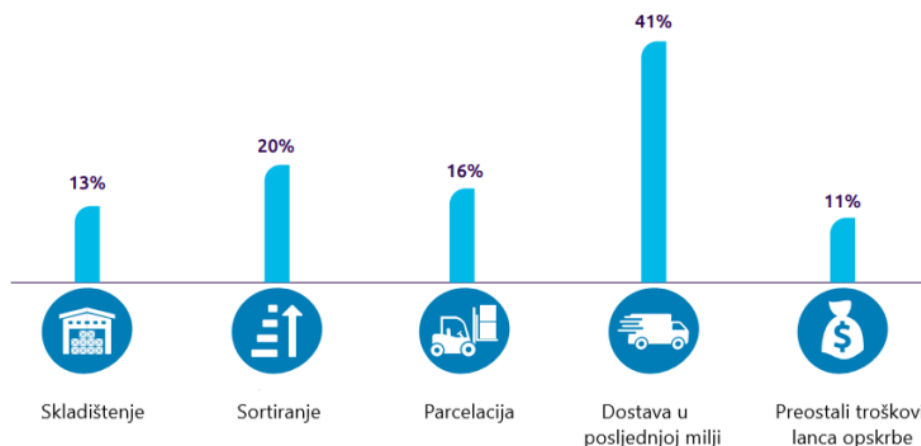
### **4.3. Alternativna rješenja umjesto korištenja logističkih usluga treće strane**

Kako bi optimizirale svoj lanac opskrbe, tvrtke razmatraju različite opcije kako bi pronašle najbolji način za upravljanje logistikom i distribucijom svojih proizvoda. Za mnoge tvrtke, 3PL predstavlja najisplativiju opciju koja može poboljšati efikasnost, smanjiti troškove i povećati fleksibilnost. Međutim, za neke tvrtke, korištenje 3PL usluga nije najbolji izbor. Umjesto toga tvrtke mogu razmotriti alternative poput internog upravljanja lancem opskrbe, uspostavljanja partnerstva s ključnim dobavljačima ili korištenja naprednih tehnoloških rješenja za automatizaciju i digitalizaciju procesa. Ove alternative pružaju tvrtkama veću kontrolu nad

operativnim procesima, smanjujući ovisnost o vanjskim pružateljima usluga ili integrirajući ih na drugačiji način. Jedna od opcija je interni lanac opskrbe, što znači da tvrtka posjeduje i upravlja svim aspektima logistike i opskrbnog lanca. To uključuje skladištenje, transport, upravljanje inventarom i distribuciju. Iako ova opcija pruža veću kontrolu i prilagodljivost, može zahtijevati značajna ulaganja u infrastrukturu, tehnologiju i ljudske resurse. Sljedeća alternativa je internacionalizacija, to jest uspostavljanje vlastitih operacija u drugim regijama ili zemljama kako bi se izbjegla ovisnost o vanjskim pružateljima usluga. Ova opcija pruža veću kontrolu i smanjuje rizik od neispunjenja obveza, ali može također zahtijevati značajna ulaganja i vremenske resurse. Partnerstva s dobavljačima predstavljaju još jednu strategiju upravljenjem lancem opskrbe. Umjesto angažiranja 3PL pružatelja usluga, tvrtke mogu razmotriti uspostavljanje partnerstava s ključnim dobavljačima kako bi poboljšale učinkovitost i ostvarile veću kontrolu nad operativnim procesima. I posljednje, upotreba naprednih tehnoloških rješenja poput automatizacije skladišta, upravljanja inventarom putem softvera ili praćenja pošiljaka može pomoći tvrtkama da poboljšaju učinkovitost i smanje ovisnost o vanjskim pružateljima usluga. Ova opcija je pogodna za tvrtke koje žele povećati automatizaciju i digitalizaciju svojih operacija. Integracija tehnologije može smanjiti ovisnost o ljudskom faktoru i povećati točnost i učinkovitost procesa lanca opskrbe.

## 5. DOSTAVA U POSLJEDNJOJ MILJI

U upravljanju lancem opskrbe i planiranju prijevoza, posljednja milja (eng. *last mile*) ili posljednji kilometar predstavlja završni dio puta koji obuhvaća kretanje pošiljaka od prijevoznog središta do konačne destinacije. Pojam posljednje milje preuzet je iz telekomunikacijske industrije, koja je imala problema s povezivanjem pojedinačnih domova s glavnom telekomunikacijskom mrežom. Slično tome, u upravljanju lancem opskrbe, posljednja milja opisuje logističke izazove u posljednjoj fazi prijevoza, odnosno dostave proizvoda iz distribucijskog centra izravno do krajnjih potrošača. Ova faza ima značajnu ulogu u ispunjavanju očekivanja potrošača i pružanju kvalitetnog iskustva online kupovine. Kao što prikazuje [Slika 5], u prosjeku, ova završna faza čini oko 40 % ukupnih troškova dostave, a prema nekim izvorima čak i preko 50 %. Drugim riječima, otprilike polovica troškova dostave troši se na posljednjoj milji, što je znatno više nego trošak skladištenja. [7]



Slika 5. Troškovi pojedinih operacija u lancu opskrbe [7]

Postoji nekoliko definicija dostave u posljednjoj milji (eng. *last-mile delivery*), ali široko prihvaćeno razumijevanje je da se termin odnosi na sve logističke aktivnosti vezane uz distribuciju pošiljki, poput paketa s proizvodima naručenim putem interneta, do kućanstava privatnih potrošača. Prema tome, dostava posljednje milje počinje kada pošiljka stigne do početne točke u urbanom području, na primjer, centralnog skladišta nakon dugolinijskog transporta, i završava kada pošiljka uspješno stigne do konačne destinacije željene od strane krajnjeg potrošača.

Problem posljednje milje javlja se kada je trenutni status paketa ‘u dostavi’, no potrošači i dalje moraju čekati duže vrijeme prije nego što ga zapravo prime. To se događa zbog mogućih brojnih zaustavljanja i kašnjenja u završnom dijelu dostave. U ruralnim područjima, dostava je usporena zbog velikih udaljenosti između pojedinih lokacija dostave, pri čemu kurirske službe prolaze velike udaljenosti kako bi dostavile samo nekoliko paketa. Situacija nije mnogo bolja ni u urbanim područjima, gdje dolazi do kašnjenja zbog prometnih gužvi. [8]

### **5.1. Koraci dostave u posljednjoj milji**

Dostava u posljednjoj milji uključuje niz koraka koji omogućavaju siguran i učinkovit prijenos pošiljki od distribucijskog centra do krajnjih destinacija. Koraci su sljedeći:

#### **1. Prikupljanje i priprema pošiljki**

Prvi korak uključuje prikupljanje pošiljki iz distribucijskog centra. Pošiljke se sortiraju, označavaju i pripremaju za dostavu.

#### **2. Planiranje ruta**

Razvijanje optimalnih ruta ključan je korak u svakoj dostavi. Korištenjem tehnoloških rješenja za planiranje ruta može se smanjiti vrijeme dostave i troškovi.

#### **3. Praćenje u stvarnom vremenu**

Razne tehnologije i alati omogućuju praćenje vozila u stvarnom vremenu. To pomaže u upravljanju rutama, praćenju zastoja ili problema te pružanju informacija korisnicima o očekivanom vremenu dostave.

#### **4. Dostava na krajnje odredište**

Dostavljači kreću prema krajnjim odredištima kako bi izvršili isporuku. U urbanim područjima, dostavljači se suočavaju s izazovima poput gužvi i ograničenog pristupa, dok u ruralnim područjima moraju prijeći veće udaljenosti između pojedinih dostava.

#### **5. Potvrda isporuke**

Nakon što je pošiljka uspješno isporučena, prikuplja se potvrda isporuke, bilo digitalno putem mobilnog uređaja ili fizički potpis.

## 6. Korisničko iskustvo

Pružanje korisničkog iskustva uključuje jasnu komunikaciju s kupcima, pružanje informacija o vremenu dostave te omogućavanje opcija praćenja i promjene rasporeda isporuke.

## 7. Obrada povratnih informacija

Prikupljanje i analiza povratnih informacija od kupaca pomaže u poboljšanju procesa dostave. To može uključivati promjene u rutama, vrijeme dostave ili unapređenje korisničke podrške.

S obzirom na dinamičnost tržišta i tehnoloških inovacija, navedeni koraci se često prilagođavaju kako bi se osigurala efikasnost i zadovoljstvo kupaca. [9]

## 5.2. Izazovi dostave u posljednjoj milji

U suvremenom kontekstu, last-mile delivery je postao izuzetno važan zbog rasta e-trgovine i promjena potrošačkih navika. S porastom broja online kupovina, potražnja za brzom i pouzdanom dostavom do vrata kuće ili ureda značajno je porasla. Ovaj segment logistike predstavlja kompleksan zadatak za tvrtke i pružatelje usluga dostave. Često se smatra najdužim dijelom logističkog lanca, a to je zbog niza specifičnih izazova s kojima se susreće, od kojih se mogu izdvojiti sljedeći:

### 1. Povećanje obujma

Dva globalna mega-trenda, urbanizacija i e-trgovina, snažni su pokretači stalnog povećanja potražnje za uslugama dostave posljednje milje. Urbanizacija označava trend da se sve više ljudi seli u urbanizirana područja općenito, a posebno u velike gradove. Osim toga, e-trgovina je u stalnom porastu, a sve više se komercijalnih proizvoda naručuje online. Stoga, veća geografska koncentracija i povećanje online narudžbi po osobi dovode do stalnog povećanja obujma pošiljaka koje treba obraditi. [10]

### 2. Visok stupanj individualizacije isporuka

Svaka pošiljka često ima jedinstvene karakteristike, a potrošači traže personalizirane opcije isporuke. Ovo povećava kompleksnost rukovanja svakom pojedinom isporukom, produžujući vrijeme koje je potrebno za svaki korak procesa dostave.

### 3. Održivost

Rastuće gradske potrebe za dostavom uzrokuju znatno veći broj dostavnih vozila koja ulaze u središta gradova, dodatno opterećujući postojeću infrastrukturu, pridonoseći zagušenju i negativnim utjecajima na zdravlje, okoliš i sigurnost. Kao posljedica toga, sve veća svijest potrošača i nova zakonodavstva prisiljavaju kurirske usluge da pojačaju napore za održivo i ekološki prihvatljivo poslovanje. [8]

### 4. Troškovi

Tradicionalna dostava na kućnu adresu pomoću dostavnih vozila skupa je opcija. Gradski promet, gužve i ograničeni pristupi određenim područjima stvaraju izazove u optimizaciji ruta dostave. To dovodi do produljenja vremena isporuke i povećanja troškova logistike. Uz to, na povećanje troškova utječe i porast cijene goriva i održavanja vozila te činjenica da kupci nerijetko nisu kod kuće za primanje svojih pošiljaka.

### 5. Vremenski pritisak

Povećanje obujma pošiljaka uglavnom je potaknuto rastom e-trgovinskih aktivnosti. Većina online trgovaca obećava vrlo kratke rokove isporuke, čak i istog dana, tako da se dostava posljednje milje suočava s uskim rokovima i značajnim vremenskim pritiskom. Osim toga, količine pošiljaka online dostave variraju tijekom tjedna, gdje je njihov broj često znatno veći ponedjeljkom. Uz to postoje i varijacije tijekom godine, na primjer, zbog sezonskih prodaja. Dakle, dostave posljednje milje suočavaju se s vrlo varijabilnim opterećenjima posla, tako da je potrebno razraditi koncepti dostave koji se lako mogu prilagoditi u kratkom roku. [11]

### 6. Starenje radne snage

Starenje radne snage u mnogim industrijaliziranim zemljama povećava problem zapošljavanja, posebno u fizički zahtjevnom okruženju poput dostave paketa. U takvom radnom okruženju alternativni koncepti dostave, manje oslonjeni na ljudski rad, već na automatizaciju, čine se obećavajućom alternativom za budućnost. S druge strane, osoba koja dostavlja paket obično je jedini ljudski kontakt za kupce e-trgovine. Stoga pouzdano, odzivno i profesionalno iskustvo dostave utječe na zadovoljstvo kupaca kako online trgovaca tako i kurirskih usluga. S konceptima samoposluživanja temeljenima na ormarima za pakete ili automatiziranim opcijama dostave temeljenim na bespilotnim letjelicama (dronovima) ili autonomnim dostavnim robotima, ovaj konačni ljudski kontakt se gubi.

### 5.3. Troškovi dostave u posljednjoj milji

Kako sve više potrošača okreće online kupovini i dostavi na kućnu adresu, posljednja milja postaje značajan čimbenik u zadovoljavanju zahtjeva korisnika, koji imaju sve viša očekivanja. Upravljanje troškovima povezanim s dostavom u posljednjoj milji predstavlja velik izazov za tvrtke. Neki od značajnijih čimbenika koji uzrokuju porast troškova kod dostave u posljednjoj milji su dostava isti dan, pružanje mogućnosti besplatne dostave, neuspješne dostave, troškovi osoblja, vozila, raspršenost lokacija, povrati paketa i dr.

S obzirom na veliku kompetitivnost na današnjem tržištu, gdje tvrtke neprekidno pokušavaju pronaći način da se izdvoje od konkurencije i privuku što veći broj kupaca, a pogotovo kada se radi o e-trgovini, očekivanja potrošača postaju sve viša i teško ih je zadovoljiti. Današnji potrošači očekuju brzu i besplatnu dostavu, a često i dostavu istoga dana. To dovodi do smanjenja profitnih marži testavlja tvrtke pod ogroman pritisak da optimiziraju svoje procese dostave i može rezultirati dodatnim troškovima. Prema istraživanju tvrtke Loqate, na primjeru Njemačke, trošak jedne neuspjele dostave iznosi oko 15 €, a u prosjeku 7% dostava ne uspije. Glavni uzrok tomu su netočne adrese koje unose kupci prilikom kupnje. Još neki od razloga su neslanje obavijesti o okvirnom vremenu dostave, kašnjenje, nemogućnost odabira vremenskog okvira za dostavu i dr. Dostava u posljednjoj milji često je nepredvidljiva. Ponekad je u jednom danu potrebno obaviti manji broj dostava, dok se s druge strane broj dostava bitno povećava za vrijeme praznika i posebnih prigoda. Tvrtka mora osigurati da ima dovoljno osoblja dostupnog za premještanje i pružanje usluga dostave u bilo kojem razdoblju. Svaki resurs, a tako i osoblje, povećava troškove i tvrtkama je veliki izazov održavati optimalan broj zaposlenih i neprekidnu uslugu te istovremeno osigurati profitabilnosti i učinkovitost.

Trošak prijevoza je najzahtjevniji i najskuplji dio dostave u posljednjoj milji. Kratki rokovi isporuke stavljaju pritisak na optimalno korištenje kapaciteta teretnih kamiona. Često se, kako bi se osiguralo da dostave u zadnjoj milji stignu na vrijeme, tvrtke moraju odlučiti za LTL (eng. *less-than-truckload*) količinu pošiljaka, koje nedovoljno iskorištavaju kapacitet vozila. Drugim riječima, vozila često odlaze na dostave sa manjim brojem utovarenih paketa jer si tvrtke ne mogu priuštiti čekanje da se nakupi dovoljan broj paketa. Iskorištavanje potpunog kapaciteta vozila i utovar optimalnog broja paketa osigurava optimizaciju troškova goriva i same flote vozila. Također, lokacije za dostave mogu biti bilogdije, od urbanih centara, preko ruralnih predgrađa do gotovo nenaseljenih područja. U gradovima dostavljači svakodnevno prolaze kroz gust promet. Potreba za konstantnim usporavanjem, zaustavljanjem i ubrzavanjem smanjuje



prosječnu brzinu i količinu vremena koju provode na cesti. Ne samo da vozači moraju provesti puno više vremena na cesti kako bi prešli istu udaljenost, već je i potrošnja goriva veća. Upravljanje troškovima dostave i prikupljanja pošiljki na velikim udaljenostima također predstavlja izazov zbog smanjenja broja pošiljaka koje je moguće isporučiti. [12]

#### **5.4. Optimizacija dostave u posljednjoj milji**

S obzirom ne to da se pri dostavi u posljednjoj milji pojavljuje niz već spomenutih izazova i troškova koji ju čine najsporijim i najskupljim dijelom lanca opskrbe, trgovci se koriste nizom metoda i alata kako bi poboljšali i optimizirali isporuku svojih proizvoda. Optimizacija dostave ključna je za konkurentnost, zadovoljstvo kupaca i održivost poslovanja. U današnjem dinamičnom poslovnom okruženju, tvrtke koje uspješno optimiziraju dostavu u zadnjoj milji ostvaruju prednost na tržištu i osiguravaju dugoročni uspjeh.

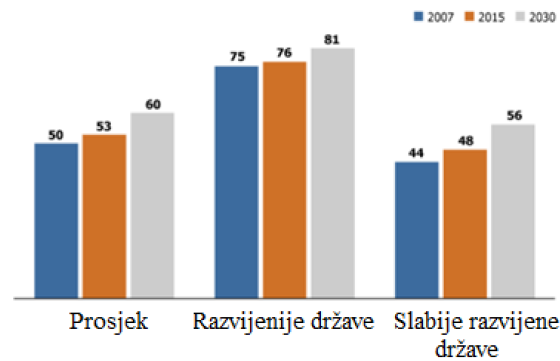
Iako postoji puno principa i načina za minimizaciju troškova i unaprjeđenje učinkovitosti dostave u posljednjoj milji, pet osnovnih su:

##### **1. Optimizacija ruta**

Optimizacija ruta je ključna za uspješnu dostavu u posljednjoj milji. Učinkovito planiranje ruta smanjuje troškove, povećava učinkovitost dostave i poboljšava iskustvo kupaca. Načini optimizacije ruta i algoritimi koji se pritom koriste su razrađeni u poglavlju 6.

##### **2. Skladištenje u urbanim područjima**

Prije su se skladišta uglavnom nalazila na periferijama gradova, udaljena od stvarne zone dostave. U današnje vrijeme dolazi do promjene u tom trendu zbog naglog porasta broja dostava na zahtjev, tj. u vrijeme kada kupac to odredi. Skladišta smještena u sredini urbanih centara olakšavaju putovanje do kupca i omogućavaju kraći vremenski okvir dostave. To također smanjuje troškove dostave u posljednjoj milji te poboljšava brzinu i odziv lanca opskrbe. O važnosti smještaja skladišta u urbanim područjima govori i podatak iz istraživanja Ujedinjenih naroda, gdje se u izvještaju o stanju svjetske populacije iz 2007. godine predviđa kako će do 2030. godine čak 60% svjetske populacije živjeti u urbanim područjima, što je i vidljivo na [Slika 6]. [13]



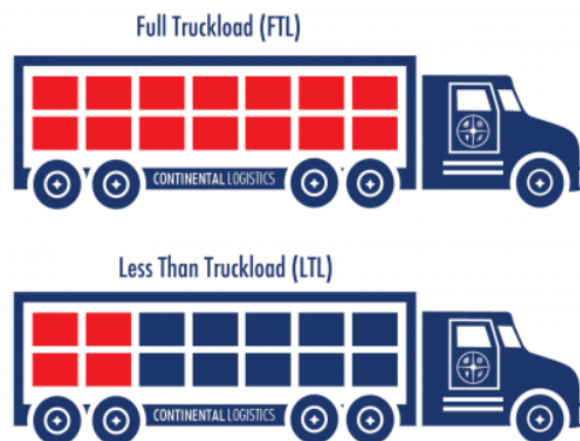
Slika 6. Postotak svjetske populacije koja živi u urbanism područjima kroz godine [13]

### 3. Odabir odgovarajućih vozila

Pri planiranju dostave, tvrtke trebaju uzeti u obzir alternative vozila u skladu s geografskim, prometnim te određenim posebnim uvjetima. Na primjer, urbanistička ograničenja i rastuća gužva zahtijevaju drugačija vozila za gradske rute od onih koja bi se mogla koristiti u predgrađima ili na selu. Izbor odgovarajuće vrste vozila može omogućiti punu iskoristivost kapaciteta vozila, smanjiti troškove i vrijeme provedeno na cesti, što izravno pripomaže u učinkovitosti dostave.

### 4. Optimizacija raspodjele tereta

Kako bi se zadovoljili zahtjevi za dostavom u posljednjoj milji i ispunili kraći vremenski okviri dostave, tvrtke često završe s nedovoljnim iskorištavanjem kapaciteta vozila. Postoje znatne razlike u cijeni prijevoza između prijevoza kompletnog utovara, (FTL, eng. *Full Truckload*), i prijevoza tereta koji je manji od potpuno utovarenog kamiona (LTL, eng. *Less Than Truckload*), koji su prikazani na [Slika 7]. [14]

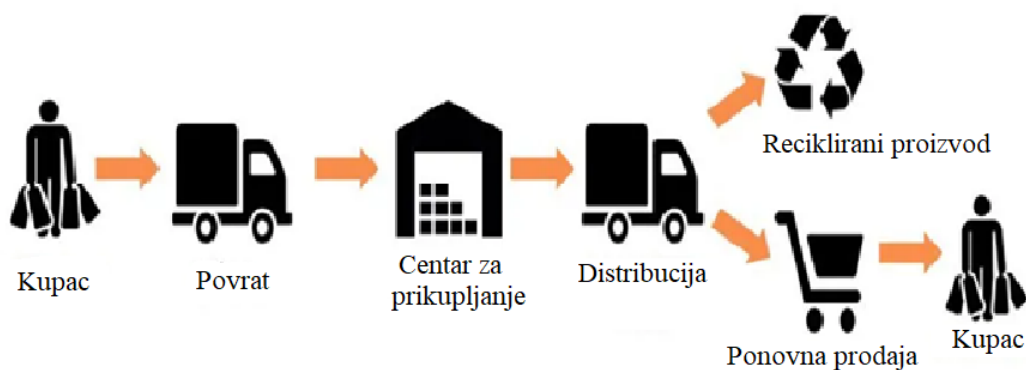


Slika 7. Kompletan (FTL) i djelomičan utovar kamiona [15]

Prilikom raspodjele tereta glavni je cilj maksimizirati iskorištenje resursa i minimizirati vrijeme odziva bez preopterećenja bilo kojeg resursa. Utovar većeg volumena paketa, tj. potpuno utovareni kamion, optimalan je način za smanjenje troškova prijevoza, broja dostava i rizika od oštećenja proizvoda uzrokovanog viškom prostora. S boljom raspodjelom tereta, moguće je smanjiti broj vozila i ljudskih resursa, što pomaže u smanjenju troškova i povećanju učinkovitosti i točnosti.

### 5. Logistika povrata

Logistika povrata (eng. *Reverse logistics*) obuhvaća upravljanje procesom povratka proizvoda od potrošača prema proizvođaču, distributeru ili trgovcu. Ova grana logistike usmjerena je na obradu, rukovanje i obrnuti tok proizvoda koji su vraćeni zbog različitih razloga, uključujući nezadovoljstvo kupca, neispravnost proizvoda, vraćanje iz viška zaliha ili povrat zbog zakonskih obaveza. Prema procjenama, preko 30 % svih proizvoda naručenih online se vraća, za razliku od 8.89 % proizvoda kupljenih u fizičkim trgovinama. To znači da lanac opskrbe ne završava nužno nakon dostave proizvoda nije nužno zadnji korak u lancu opskrbe. Prilikom povrata odvija se cijeli proces dostave u posljednjoj milji, samo u obrnutom redoslijedu. Dostavljač preuzima paket od kupca, provodi određene provjere, vraća paket u centar za prikupljanje, gdje se on dalje distribuira do sekundarnih prodajnih mjesta ili lokalnih trgovaca, te se prodaje ili reciklira prije nego što naposljetku stigne do novog kupca. Taj proces prikazan je na [Slika 8]. [16]



**Slika 8. Proces logistike povrata [17]**

Logistika povrata je skupa, pogotovo za male tvrtke. Troškovi transporta, obrade i ponovne dostave artikala se akumuliraju, a s obzirom na to da 79% online potrošača očekuje besplatnu dostavu povrata, često sve te troškove snosi trgovac. Provođenje dobro planiranog i

optimiziranog procesa logistike povrata ključno je za smanjenje gubitaka i osiguravanje zadovoljstva kupaca.

## **5.5. Novi trendovi dostave u posljednjoj milji**

Novi trendovi u dostavi posljednje milje predstavljaju odgovor na rastuće zahtjeve potrošača, tehnološke inovacije i ekološke izazove. Automatizacija postaje sve zastupljenija, s upotrebom autonomnih vozila, dronova i robota, što osigurava bržu dostavu, smanjenje troškova i minimizaciju potrebe za ljudskim angažmanom. Nadalje, razvoj pametnih paketnih ormara omogućava potrošačima da preuzmu svoje pakete na udobnim lokacijama i vremenima, što povećava fleksibilnost i udobnost dostave. Crowdsourcing je također sve popularniji koncept, gdje se lokalni građani koriste kao vozači ili dostavljači kako bi pružili bržu i jeftiniju dostavu u posljednjoj milji. Ova strategija može povećati pokrivenost područja i smanjiti vrijeme isporuke.

### **5.5.1. Ormarići za pohranu**

Dostava na kućnu adresu najdugotrajniji je i stoga najskuplji način predaje paketa. Dostavljač se mora zaustaviti kod svakog domaćinstva, doći do ulaza, potražiti ispravno zvono i nadati se da je netko kod kuće. Ako nitko nije prisutan, paket se ili ponovno pokušava dostaviti kasnije ili se ostavlja na preuzimanje kod kupca na centralnom mjestu. Svi neuspješni pokušaji dostave uzrokuju dodatan napor i potencijalno nezadovoljstvo kupaca. Stoga mnogi pružatelji dostavnih usluga nastoje uspostaviti neki oblik samoposluživanje kupaca. Kada se primjenjuje ova opcija predaje, više paketa za više kupaca se dovode do objekta koji je lako dostupan svima. Takav decentralizirani objekt može biti ormarić za pakete, trgovina koja služi kao mjesto preuzimanja paketa, kiosk, benzinska crpka, recepcija zgrade ili neko slično mjesto.

U usporedbi s dostavom na kućnu adresu, grupna dostava paketa do decentraliziranog mjesta preuzimanja štedi napor pružatelju usluga, olakšava rukovanje povećanim volumenom paketa, smanjuje troškove i rasterećuje radnu snagu. S druge strane, samoposluživanje kupaca podrazumijeva odricanje od praktičnosti, budući da moraju putovati prema svojim odgovarajućim lokacijama preuzimanja. To može odgoditi konačni primitak pošiljke i može zahtijevati poticaje, kao što su na primjer niže cijene, kako bi se kupci motivirali da sudjeluju u samoposluživanju. Nadalje, put pružatelja poštanskih usluga zamjenjuje se s dodatnim putovanjem kupaca prema lokaciji samoposluživanja. Stoga, i s okolišnog stajališta, ne može

se izravno zaključiti da samoposluživanje smanjuje ekološki utjecaj putovanja, već ovisi o tome hoće li kupac napraviti dodatnu vožnju automobilom između svoje kuće i stanice samoposluživanja ili će proći pokraj lokacije preuzimanja na putu prema kući. [18]

PUDO (eng. *Pick-Up and Drop-Off*) je skraćenica koja predstavlja lokacije na kojima kupci mogu preuzeti ili ostaviti pakete kada im to najviše odgovara. PUDO mreža se sastoji od različitih točaka širom grada ili regije, kao što su trgovine, benzinske postaje, automatizirani ormarići ili drugi javni prostori, koji služe kao lokacije za preuzimanje ili dostavu pošiljaka. Ovakav pristup omogućuje korisnicima da biraju gdje će im paket biti dostavljen, što je posebno korisno u situacijama kada nisu kod kuće ili na radnom mjestu tijekom standardnih sati dostave. PUDO pruža korisnicima veću kontrolu i fleksibilnost nad svojim dostavama, omogućujući im da odaberu lokaciju i vrijeme preuzimanja koje im najviše odgovara. Osim toga, PUDO mreža može smanjiti troškove dostave za dostavljače jer omogućuje grupiranje paketa na jednoj lokaciji umjesto individualnih dostava na različite adrese.

Najpraktičnija opcija za samostalno preuzimanje paketa su ormarići za pakete, takozvani paketomati, jer su smješteni na dobro posjećenim područjima te su dostupni 24 sata dnevno, 7 dana u tjednu, što je posebno korisno za one koji nisu u svojim domovima tijekom uobičajenih vremena dostave tradicionalnih kurirskih službi. Ormarići pohranjuju pakete koje kupci trebaju preuzeti te često omogućuju i slanje paketa. Na [Slika 9] prikazan je klasičan ormarić za pohranu.



**Slika 9. Ormarić za pohranu [19]**

Udaljenost putovanja kupaca prema ormarićima za pakete je jedan od najvažnijih čimbenika uspjeha. Stoga je planiranje njihovih lokacija od izuzetne važnosti. Pritom se pojavljuje izazov ravnoteže planiranja lokacija. Naime, što je više ormarića za pakete postavljeno, to je bolji

njihov doseg prema kupcima, ali su veći jednokratni troškovi instalacije (i obrnuto). Također je bitno i planiranje pravilnog rasporeda svakog ormarića za pakete i dimenzioniranje odjeljaka. Što je svaki pojedinačni odjeljak veći, veća je vjerojatnost da će neki paket stati. No, uz ograničen urban prostor za ormariće za pakete i određenu ukupnu veličinu ormarića, više kupaca može biti usluženo ako se odaberu manji odjeljci.

Glavna razlika između trgovina u kojima se mogu preuzeti paketi i ormarića leži u tome što većina trgovina ima ograničeno radno vrijeme, dok su ormarići za pakete dostupni u svako doba dana, Ovisno o kretanjima kupaca, to dodatno smanjuje skup prihvatljivih lokacija preuzimanja. Osim toga, trgovina ima ukupno ograničenje kapaciteta za pohranu pošiljki, a ne ograničenu veličinu odjeljka za svaki pojedini paket.

### 5.5.2. *Dronovi*

Dronovi, ili bespilotne letjelice, imaju sve veći značaj u svijetu logistike, posebno u kontekstu last-mile delivery. Ova tehnologija donosi niz inovacija i potencijala, ali isto tako izazove i pitanja koja se tiču sigurnosti, regulativa i infrastrukture.

Jedan od ključnih potencijala dronova u dostavi u posljednjoj milji je upravo brzina dostave. Dronovi su u mogućnosti prevaliti kratke udaljenosti znatno brže od tradicionalnih dostavnih vozila, omogućujući istodnevnu ili čak istosatnu dostavu. Ovo ubrzanje u isporuci zadovoljava rastuće zahtjeve potrošača za brzim uslugama i instant zadovoljstvom. Dronovi također mogu pridonijeti smanjenju troškova dostave. Tradicionalne dostavne metode uključuju vozila, radnu snagu i gorivo, što može rezultirati visokim troškovima. Dronovi su ekološki prihvatljiviji, imaju manje operativne troškove i zahtijevaju manje ljudskih resursa, što može dovesti do efikasnijih i jeftinijih isporuka. U situacijama hitnosti, poput medicinske dostave hitnih potrepština, dronovi mogu pružiti neprocjenjivu pomoć. Brza i precizna dostava medicinskih potrepština putem dronova može spašavati živote i pružati podršku u hitnim situacijama. [20] [Slika 10] prikazuje jednu od mogućih varijanti drona za dostavu paketa.



**Slika 10. Dron za dostavu proizvoda korisnicima [21]**

Međutim, postoje i izazovi s kojima se suočava implementacija dronova u dostavu proizvoda. Regulative su jedan od ključnih faktora. Mnoge zemlje još uvijek nisu usvojile precizne zakonodavne okvire koji reguliraju komercijalnu upotrebu dronova. Sigurnost je također jedan od izazova, uključujući rizik od sudara s drugim letjelicama, ljudima ili objektima na tlu. Ključnu ulogu ima i infrastruktura jer su potrebni određeni padobrani, platforme za polijetanje i slično kako bi se dronovi mogli efikasno koristiti za dostavu. Osim toga, pitanje privatnosti također dolazi u obzir, s potrebom za preciznim smjernicama kako bi se izbjegle neželjene intruzije.

Iako postoje izazovi, mnoge tehnološke tvrtke, istražuju i testiraju koncepte dronova za dostavu. To ukazuje da će ova tehnologija imati sve značajniju ulogu u budućnosti logistike, donoseći sa sobom promjene u načinu kako proizvodi stižu do potrošača na brži, ekonomičniji i inovativniji način.

### 5.5.3. *Autonomni dostavni roboti*

Autonomni dostavni roboti predstavljaju inovativnu tehnologiju koja transformira posljednju etapu isporuke proizvoda do krajnjeg odredišta. Ovi roboti su samostalni uređaji opremljeni senzorima, kamerama, GPS-om i drugim naprednim tehnologijama kako bi se samostalno kretali prostorom i dostavljali pakete korisnicima. Jedan takav robot prikazan je na [Slika 11].



Slika 11. Autonomni dostavni robot [22]

Jedna od ključnih prednosti autonomnih dostavnih robota za last-mile delivery je povećanje efikasnosti i smanjenje troškova. Oni su sposobni autonomno navigirati urbanim sredinama, izbjegavajući prepreke i promet, što može smanjiti vrijeme dostave i operativne troškove u

usporedbi s tradicionalnim dostavnim metodama. Zatim, roboti nude ekološki prihvatljivu alternativu. Koristeći električnu energiju i minimizirajući potrebu za vozilima koja koriste fosilna goriva, oni pridonose smanjenju emisija stakleničkih plinova i negativnog utjecaja na okoliš. Brzina i preciznost dostave su njihove ključne karakteristike. Oni mogu izvršiti dostavu u roku od nekoliko sati ili čak manje, što zadovoljava sve veće zahtjeve potrošača za brzom i efikasnom uslugom. [8]

Unatoč nizu prednosti, postoji nekoliko izazova povezanih s implementacijom autonomnih dostavnih robota, kao što su pravne regulative i sigurnosna pitanja. Potrebno je definirati jasne smjernice i zakonodavne okvire kako bi se osiguralo sigurno kretanje robota u urbanim područjima. Osim toga, dostavni roboti također moraju biti prilagođena raznolikim okolnostima i scenarijima, uključujući interakciju s pješacima, parkiranim vozilima i drugim izazovima urbanih sredina.

#### **5.5.4. Crowdsourcing**

Crowdsourcing je inovativni model dostave koji koristi zajednicu, odnosno masu (eng. *crowd*) ljudi kako bi se izvršila dostava proizvoda ili paketa. Ovaj koncept je nastao kao odgovor na izazove tradicionalnih metoda dostave, posebno u posljednjem dijelu lanca opskrbe.

U okviru crowdsourcinga, privatne osobe preuzimaju ulogu dostavljača i koriste vlastita vozila kako bi preuzeli pakete od prodavatelja ili distribucijskih centara te ih dostavili krajnjim korisnicima. Bilo koji član koji se prijavio kao vozač u mrežu crowdsourcinga može odabrati određenu narudžbu koju želi izvršiti. Prednost ovog modela je njegova fleksibilnost u opskrbi, posebno u situacijama naglog porasta ili smanjenja količine paketa za dostavu te u višenamjenskoj upotreba određene imovine poput automobila, kao i niski investicijski zahtjevi za tvrtke za dostavu paketa. Platforme ili aplikacije koje olakšavaju ovu vrstu suradnje povezuju pošiljatelje i dostavljače, pružajući transparentnost, praćenje u stvarnom vremenu i komunikaciju između svih sudionika. [Slika 12] prikazuje razliku procesa crowdsourcinga i klasične dostave. [23]



## Klasična dostava paketa na kućnu adresu



## Crowdsourcing

**Slika 12. Crowdsourcing i klasična dostava**

Crowdsourcing donosi nekoliko prednosti za dostavu u posljednjoj milji. Prvo, povećava fleksibilnost u isporuci jer dostavljači mogu pokriti različite lokacije i razne dostavne zahtjeve. Zatim, smanjuje troškove dostave, budući da se koriste resursi koji već postoje u zajednici. Također, ova metoda često rezultira bržom isporukom, s obzirom na lokalnu prisutnost i dostupnost dostavljača.

Unatoč prednostima, postoji nekoliko izazova kao što su pouzdanost isporuke, sigurnost podataka i komunikaciju između svih sudionika. Također, regulatorna pitanja i pravni aspekti trebaju biti pažljivo razmotreni kako bi se osigurala sigurnost i transparentnost za sve uključene strane.

## 6. OPTIMIZACIJA RUTA

Optimizacija ruta predstavlja proces analize i prilagodbe putanja koje vozila koriste kako bi što efikasnije dostavila robu i ima ključnu ulogu u poboljšanju efikasnosti logističkih operacija, posebno u kontekstu e-trgovine. Kada se poveže s posljednjom miljom, naglasak se stavlja na optimizaciju dostave u urbanim područjima gdje je gustoća dostave često visoka. Ova strategija omogućuje precizno planiranje kako bi se minimizirao broj isporuka s nepotrebnim zastojsima ili udaljenostima te se primjenjuje kako bi se odgovorilo na izazove vezane uz brzu i pouzdanu isporuku proizvoda do krajnjih korisnika. Jedan od ključnih aspekata optimizacije ruta uključuje korištenje tehnologije, poput naprednih softvera. Ovi alati uzimaju u obzir različite parametre poput prometnih uvjeta, vremena isporuke, specifičnosti adresa i preferencija korisnika kako bi stvorili najefikasnije rute dostave. Osim toga, integracija praćenja u stvarnom vremenu omogućuje prilagodbe u hodu, uzimajući u obzir promjene na terenu. Uvođenje tehnološki naprednih rješenja također pomaže u smanjenju troškova povezanih s dostavom, smanjuje rizik od grešaka i poboljšava ukupno iskustvo kupaca. Smanjenje nepotrebnih kilometara, optimizacija vremena vožnje i smanjenje zastoja čine dostavu ekonomičnijom, čime se pridonosi profitabilnosti tvrtki.

U kontekstu posljednje milje, gdje se pojavljuju izazovi gusto naseljenih urbanih područja, optimizacija ruta postaje ključna. Uvođenjem inteligentnih sistema za rute optimiziranje, dostavna vozila mogu zaobići gužve, smanjiti vrijeme dostave i čak minimizirati emisije stakleničkih plinova putem optimalnih putanja. Još jedan od važnih aspekata je i personalizacija dostave. Softveri za optimizaciju ruta mogu uzeti u obzir specifične želje korisnika, poput preferiranog vremena isporuke ili lokacije prema njihovom izboru. Ovo pruža dodatnu razinu prilagodbe koja odražava potrebe suvremenog potrošača. [24]

### 6.1. Problem usmjeravanja vozila

Problem usmjeravanja vozila (VRP, eng. *Vehicle Routing Problem*) predstavlja složeni izazov u području optimizacije, gdje je cilj pronaći najučinkovitije rute za skup vozila kako bi se minimizirali troškovi i vrijeme putovanja. Optimizacija u kontekstu VRP-a podrazumijeva korištenje različitih matematičkih modela, algoritama i tehnika kako bi se pronašlo najbolje moguće rješenje za specifične uvjete dostave. Rješavanje ovog problema pridonosi optimizaciji logističkih lanaca opskrbe i povećava efikasnost pri isporuci dobara i usluga.

Glavni cilj VRP-a je pronaći najučinkovitije rute za skup vozila tako da se zadovolje određeni zahtjevi, kao što su dostava proizvoda ili usluga na različite lokacije. Ovaj problem ima različite varijante, ovisno o specifičnostima situacije, ali osnovna ideja je pronaći optimalne rute kako bi se minimizirali ukupni troškovi. VRP uključuje različite faktore koje treba uzeti u obzir prilikom planiranja ruta. Neki od njih su broj vozila, kapacitet vozila, vremenska ograničenja, prioriteta i preferencije te geografska i prometna ograničenja. [25]

Zbog raznih ograničenja koja se mogu susreti u realnom okruženju, postoji više varijacija VRP-a.

### **6.1.1. Osnovni problem usmjeravanja vozila – VRP**

U osnovnom problemu usmjeravanja vozila cilj je pronaći najučinkovitije rute za skup vozila koja trebaju obaviti dostavu do određenog broja lokacija. Klasično rješavanje problema usmjeravanja vozila se sastoji od povezivanja ruta vozila uz najmanje moguće troškove, na način da se je svaka lokacija posjećena točno jednom i točno jednim vozilom, sve rute vozila započinju i završavaju u skladištu i da su određena ograničenja su zadovoljena.

Prvi korak u rješavanju je formulacija problema. Potrebno je definirati broj vozila, kapacitet svakog vozila, vremenska ograničenja za isporuku i udaljenosti između lokacija. Za formulaciju problema koriste se matematički modeli poput linearnog ili cjelobrojnog programiranja, a nakon toga različite tehnike rješavanja, koje mogu biti egzaktna ili heuristička.

Tehnologija igra ključnu ulogu u rješavanju problema usmjeravanja vozila. Sustavi za praćenje vozila, računalni sustavi za upravljanje flotom (FMS) te analitika podataka omogućuju dinamičko prilagođavanje ruta ovisno o stvarnim uvjetima na terenu, poput prometnih zastoja ili hitnih promjena u rasporedu isporuka.

### **6.1.2. Problem usmjeravanja vozila s ograničenjima kapaciteta – CVRP**

CVRP (eng. *Capacitated Vehicle Routing Problem*) predstavlja proširenje osnovnog problema usmjeravanja vozila s dodatnim ograničenjem kapaciteta vozila. U klasičnom VRP-u, svrha je pronaći najučinkovitije rute za vozila koja moraju posjetiti određene lokacije, počevši i završavajući na skladištu. No, kod problema usmjeravanja vozila s ograničenjima kapaciteta, dodaje se ograničenje kapaciteta vozila, što znači da svako vozilo ima ograničenu nosivost ili kapacitet za prevoženje dobara.

Osnovni cilj CVRP-a je također minimizirati ukupne troškove rutiranja, što uključuje troškove prijevoza, troškove vremena i druge relevantne faktore, uz poštivanje ograničenja kapaciteta vozila. To čini problem izazovnijim, jer pored optimalnog planiranja ruta, potrebno je uzeti u obzir i kapacitete vozila kako bi se osiguralo da nijedno vozilo ne premašuje svoj kapacitet tokom isporuke.

Rješavanje CVRP problema sastoji se u pronalaženju određenog broja ruta s minimalnim troškovima te je potrebno zadovoljiti sljedeće uvjete: svaka ruta mora započeti i završiti u skladištu, svaka lokacija se posjećuje jednom, a količina koja se dostavlja u jednoj ruti ne prelazi zadani kapacitet vozila.

### **6.1.3. Problem usmjeravanja vozila s vremenskim ograničenjima – VRPTW**

VRPTW (eng. *Vehicle Routing Problem with Time Windows*) predstavlja daljnje proširenje osnovnog problema rutiranja vozila pri kojem se dodaje složenost vremenskih ograničenja, što znači da svaka isporuka ili posjet lokaciji mora biti obavljena unutar određenog vremenskog intervala.

Osnovni izazov VRPTW-a jest efikasno planirati rute vozila uzimajući u obzir ne samo udaljenosti i kapacitete vozila, već i vremenska ograničenja za svaku isporuku. Svakom lokacijom pridruženo je vremensko razdoblje unutar kojeg vozilo treba stići kako bi obavilo isporuku ili posjet. Kršenje ovih vremenskih okvira može rezultirati nepovoljnim posljedicama poput kašnjenja, nezadovoljstva klijenata i povećanih troškova. Uvjeti koji moraju biti zadovoljeni pri rješavanju ovog problema su isti kao i kod CVRP-a uz već spomenuti dodatni uvjet da je posluživanje korisnika na lokacijama određeno zadanim vremenskim okvirom.

### **6.1.4. Problem usmjeravanja vozila s ograničenjem duljine rute – DVRP**

DVRP (eng. *Distance Constrained Vehicle Routing Problem*) je još jedna od varijacija osnovnog VRP-a pri kojoj se uvodi dodatno ograničenje na ukupnu duljinu rute ili njezino vremensko trajanje. Ako se ovom problemu uvede još i već spomenuto ograničenje kapaciteta vozila, tada je riječ o problemu usmjeravanja vozila ograničenom udaljenošću i kapacitetom – DCVRP (eng. *Capacitated Distance Vehicle Routing Problem*).

### **6.1.5. Problem usmjeravanja vozila s prikupljanjem i dostavom - VRPPD**

VRPPD (eng. *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*) predstavlja proširenje problema usmjeravanja vozila u kojem se, osim isporuke, također uvodi i aspekt preuzimanja

proizvoda na određenim lokacijama. Ovaj problem često se javlja u industriji prijevoza putnika i robe, gdje vozila ne samo da isporučuju, već i preuzimaju teret na putu do krajnjih odredišta.

VRPPD se prvenstveno odnosi na dostavu proizvoda od jednog do drugog korisnika. To znači da se vozila ne utovaraju na samom polazištu, već je najprije potrebno proizvode preuzeti a tek zatim dostaviti. Ovaj problem također može imati nekoliko varijacija, npr. da je moguće prikupiti proizvode s više različitih lokacija a tek ih onda dostaviti ili je pak moguće i uvesti ograničenje da se nakon prikupljanja sva roba najprije mora dostaviti, a tek onda je moguće obaviti prikupljanje na nekoj drugoj lokaciji. [26]

#### **6.1.6. Problem usmjeravanja vozila s dostavom i prikupljanjem – VRPDP**

Ovaj problem sličan je VRPPD-u, međutim radi se o drugačijem redosljedu prikupljanja i dostave. U VRPDP problemu (eng. *Vehicle Routing Problem with Delivery and Pickup*) se najprije dostavlja određena roba iz skladišta, a zatim se prikuplja. Ovdje se razlikuju dostavni korisnici, oni kojima se dostavljaju proizvodi te korisnici prikupljanja, tj. oni koji šalju proizvode. Međutim, korisnici mogu također istovremeno i primati i slati proizvode. Tada je riječ o podvarijanti ovog problema – VRPSDP (eng. *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup*), što znači da se prikupljanje i dostava odvijaju simultano, tj. jednim vozilom. Druga varijanta je VRPDDP (eng. *Vehicle Routing Problem with Divisible Delivery and Pickup*) i u njoj se koriste različita vozila za dostavu i prikupljanje proizvoda od istog korisnika.

Kompleksnost VRPDP-a leži u potrebi za učinkovitim koordiniranjem oba procesa, pri čemu svaka isporuka ima povezanu lokaciju preuzimanja.

#### **6.1.7. Problem usmjeravanja vozila s povratnim prikupljanjem – VRPB**

VRPB (eng. *Vehicle Routing Problem with Backhauls*) varijanta je klasičnog problema rutiranja vozila koja uvodi pojam povratnog transporta. U osnovnom VRP-u cilj je odrediti najučinkovitije rute za flotu vozila kako bi dostavila robu iz centralnog skladišta do skupa klijenata, pri čemu se minimiziraju ukupni troškovi poput udaljenosti ili vremena putovanja. U VRPB-u se razmatra povratni transport, što uključuje preuzimanje robe od klijenata i vraćanje ih u skladište. To dodaje dodatni sloj kompleksnosti problemu, jer vozila ne samo da trebaju planirati optimalne rute dostave, već i učinkovite rute za prikupljanje robe na povratku do skladišta. Pretpostavka ovog problema je da se prvo sva roba dostavlja, a tek onda može početi prikupljanje. Razlog za to leži u činjenici da je najjednostavnije najprije isprazniti cijelo vozilo

a tek ga zatim puniti jer preslagivanje tereta na lokaciji nije praktično niti ekonomično. Upravo je to glavna razlika u usporedbi s VRPDP-om, gdje nije nužno da su sve dostave obavljenije prije prikupljanja.

Osnovni ciljevi u rješavanju VRPB uključuju minimiziranje ukupne udaljenosti ili vremena putovanja, uzimajući u obzir ograničenja kapaciteta vozila i osiguravajući pravovremene dostave i prikupljanja. Učinkovito upravljanje operacijama povratnog transporta ključno je za optimizaciju čitavog lanca opskrbe i smanjenje troškova prijevoza.

## 6.2. Problem trgovačkog putnika

Problem trgovačkog putnika (TSP, eng. *Traveling Salesman Problem*) jedno je od najpoznatijih problema u kombinatornoj optimizaciji. Riječ je o zadatku pronalaska najkraće moguće rute kojom bi trgovački putnik mogao obići skup određenog broja gradova, posjećujući svaki grad točno jednom prije povratka u početni grad. Njegov ključni izazov leži u eksponencijalnom povećanju broja mogućih ruta s povećanjem broja gradova. TSP se u početku koristio za planiranje putovanja trgovačkih putnika, ali je njegova primjena s vremenom proširena na mnoga druga područja. Privlačnost ovog problema leži u njegovoj jednostavnoj formulaciji i teorijskoj složenosti. Složenost problema proizlazi iz činjenice da je TSP NP-kompletni (NP-complete, eng. *nondeterministic polynomial-time complete*) problem. Jednostavno objašnjeno, to znači da se može brzo provjeriti, ali ne postoji poznat način da se rješenje pronađe brzo. To jest, vrijeme potrebno za rješavanje problema pomoću bilo kojeg trenutno poznatog algoritma naglo se povećava kako veličina problema raste. Trenutno za TSP ne postoji poznato efikasno rješenje koje bi uvijek brzo pronašlo optimalnu rutu. Čim broj gradova preraste nekoliko desetaka, problem postaje računalno nepraktičan za rješavanje putem iscrpne pretrage, jer se broj mogućih ruta povećava eksponencijalno s brojem gradova. Na primjer, za deset gradova postoji 9! mogućih ruta, dok za dvadeset taj broj eksponencijalno raste na 19!. Zbog ovakve složenosti, algoritmi za rješavanje TSP-a često koriste heurističke ili aproksimativne metode koje ne garantiraju optimalno rješenje, ali pružaju dovoljno dobro rješenje u razumnom vremenu. TSP se koristi u mnogim područjima, uključujući logistiku, gdje je potrebno isporučiti robu u različite gradove s minimalnim troškovima putovanja.

Generalno, TSP je jednostavniji problem od VRP, jer podrazumijeva samo jedno vozilo koje treba optimizirati svoju rutu. S druge strane, VRP se bavi optimizacijom više ruta uz kompleksna logistička ograničenja, čineći ga pogodnim za stvarne situacije poput distribucije

proizvoda i planiranja dostave. Zbog svoje složenosti, VRP često zahtijeva naprednije algoritme, dok je TSP ponekad lakše modelirati i rješavati za specifične primjene.

### 6.3. Metode i algoritmi koji se koriste za optimizaciju ruta

Metode rješavanja problema usmjeravanja vozila mogu se podijeliti na egzaktne metode i heurističke metode. Svaka od njih ima svoje prednosti i nedostatke, te se odabir ovisi o složenosti problema, veličini skupa podataka i potrebama za preciznošću. Egzaktne metode nastoje pronaći optimalno rješenje, dok su heurističke metode brže, ali ne garantiraju optimalnost. U praksi, često se kombiniraju ove metode kako bi se postigla dobra ravnoteža između preciznosti i efikasnosti, posebno za velike i složene probleme usmjeravanja vozila.

Egzaktne metode pružaju matematičke alate za točno i optimalno rješavanje problema usmjeravanja vozila, no često su vremenski zahtjevne i praktično neprimjenjive za vrlo velike instance problema. Poznatije egzaktne metode su metoda grananja i ograničavanja, dinamičko programiranje i programiranje ograničenja. Metoda grananja i ograničavanja (eng. *Branch and Bound*) se provodi na način da razdvaja problem na manje dijelove i eksperimentalno odabire najbolje kombinacije kako bi pronašla optimalno rješenje. Kod dinamičkog programiranja se razvija optimalno rješenje rastavljanjem problema na manje podprobleme te s povećanjem opsega problema često zahtijeva eksponencijalno duže vrijeme izvođenja. Programiranje ograničenja je model za međusobno povezivanje različitih varijabli koristeći ograničenja. Ovdje se prostor pretraživanja smanjuje kako bi se problem pojednostavio. Relativno jednostavniji problem zatim se rješava drugim algoritmima pretraživanja. Glavni naglasak je na varijablama i njihovim međusobnim odnosima, umjesto na određivanju sekvence koraka koji će se izvršiti kako bi se riješio zadani problem. [27]

Heurističke metode mogu se podijeliti na dvije kategorije: klasične heuristike i metaheuristike. One nude brže, ali približne načine rješavanja problema. Iako ne garantiraju optimalnost, često su iznimno učinkovite za velike instance problema. Jedna od najpoznatijih heurističkih metoda za rješavanje problema usmjeravanja vozila je Algoritam ušteda Clarka i Wrighta te se primjenjuje kada broj vozila nije fiksna već varijabilan i moguće je rješavati probleme u usmjerenim i neusmjerenim mrežama. Još jedna često primjenjivana heuristička metoda je i algoritam najbližeg susjeda. To je jednostavna metoda koja se koristi za rješavanje problema putujućeg trgovca. Počevši od početne točke, algoritam odabire najbližu neobrađenu točku kao

sljedeću u putu. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se ne obiđu sve točke. Algoritam je brz za implementaciju i može dati brza rješenja za male i srednje velike slučajeve TSP-a, ali može proizvesti i suboptimalna rješenja jer ne razmatra sve moguće kombinacije, već samo trenutno najbližu točku.

Uz algoritam ušteta Clarka i Wrighta te algoritma najbližeg susjeda, često se primjenjuje i SWEEP algoritam. Ova heuristička metoda razvijena je za jednostavno i brzo rješavanje problema usmjeravanja vozila, pogotovo u situacijama s velikim brojem klijenata i ograničenim resursima. Osnovni koraci SWEEP algoritma su skeniranje (eng. *Scan*), vaganje (eng. *Weight*), enumeracija (eng. *Enumerate*), eliminacija (eng. *Eliminate*) i postavljanje (eng. *Place*).

Metaheuristike su općeniti pristupi za rješavanje optimizacijskih problema koji se temelje na strategijama pretraživanja i prilagodbe kako bi se pronašla aproksimativna optimalna rješenja u razumnom vremenskom okviru. Ove strategije omogućuju rješavanje složenih problema s visokom razinom optimizacije. Metaheuristike se često koriste kada je problem teško formalizirati i kada su tradicionalne metode nesavršene zbog veličine prostora rješenja ili brojnih varijabli. One su fleksibilne, prilagodljive i mogu se primijeniti na različite vrste optimizacijskih problema. Primjeri metaheurističkih metoda su simulirano kaljenje, genetski algoritmi, optimizacija rojem čestica te razni algoritmi traganja. [26]

### **6.3.1. Algoritam ušteta Clarke & Wright**

Jedna od najpoznatijih heurističkih metoda za rješavanje problema usmjeravanja vozila je Algoritam ušteta Clarka & Wrighta te se primjenjuje kada broj vozila nije fiksni već varijabilan i moguće je rješavati probleme u usmjerenim i neusmjerenim mrežama.

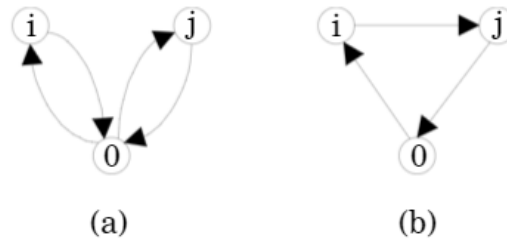
Problema usmjeravanja vozila, za koji je algoritam dizajniran, ima sljedeće zahtjeve:

- Iz skladišta je potrebno dostaviti određene količine robe određenim kupcima
- Za prijevoz robe dostupan je određeni broj vozila, svaki s ograničenim kapacitetom
- Svako vozilo koje se koristi mora pokriti rutu na kojoj se roba dostavlja na jednu ili više lokacija, počevši i završavajući u skladištu
- Svaka lokacija mora biti posjećena točno jednom

Cilj je odrediti raspodjelu lokacija kupaca unutar rute i redoslijed kojim će biti posjećeni te pronaći rješenje koje minimizira ukupne troškove prijevoza. Koncept ušteta se temelji na



uštredama ostvarenim spajanjem dviju ruta u jednu, kako je prikazano na [Slika 13]. Nula predstavlja skladište, tj. početnu i završnu točku.



Slika 13. Spajanje dviju lokacija u jednu rutu [28]

Koraci algoritma uštreda Clarka i Wrighta su sljedeći:

1. Korak: Odabrati bilo koji čvor kao početni i označiti ga kao 0
2. Korak: Izračunati uštreda  $s_{ij} = c_{1i} + c_{1j} - c_{ij}$  za  $i, j = 1, 2, \dots, n$
3. Korak: Poredati uštreda od najveće do najmanje
4. Korak: Počevši od vrha liste uštreda i krećući se prema dolje, formirati veće podrute povezivanjem odgovarajućih čvorova  $i$  i  $j$
5. Korak: Ponavljati dok se ne formira ruta.

Algoritam započinje na način da su sve lokacije podijeljene u zasebne rute, prikazano na slici 9 (a). Potrebno je poznavati troškove svake rute, a oni mogu izraženi preko udaljenosti između lokacija, potrebnom vremenu obilaska ili preko nekog drugog parametra. Na početku algoritma, su troškovi dostave najviši te se teži smanjiti ih. Alternativa tome je posjetiti dvije lokacije na istoj ruti, prikazano na slici 9 (b). S obzirom na to da su troškovi poznati, moguće je izračunati uštreda koje proizlaze iz vožnje jedne rute koja uključuje obje lokacije umjesto obilaženja tih lokacija u zasebnim rutama. Trošak prijevoza između točaka  $i$  i  $j$  označen je kao  $c_{ij}$ . Za slučaj (a) ukupan trošak prijevoza ( $D$ ) definiran je kao:

$$D_a = c_{0i} + c_{i0} + c_{0j} + c_{j0}$$

Isto tako, ukupan trošak prijevoza u slučaju (b) je:

$$D_b = c_{0i} + c_{ij} + c_{j0}$$

Pri spajanju dviju ruta u jednu postiže se sljedeća uštreda ( $S$ ):

$$S_{ij} = D_a - D_b = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

Što je veći iznos uštede, to je isplativije posjetiti točke  $i$  i  $j$  na istoj ruti. Postoje dvije verzije algoritma ušteda, sekvencijalna i paralelna. U sekvencijalnoj se rute stvaraju jedna po jedna, tj. algoritam se izvršava korak po korak, dok se u paralelnoj verziji istovremeno može stvoriti više ruta koje se kasnije kombiniraju. Paralelni algoritam zapravo stvara više podskupova ruta kroz istovremeno izvršavanje koraka, što može rezultirati bržim izvršavanjem, posebno za probleme s velikim skupom podataka. [29]

Za primjer je odabran slučaj koji se sastoji od početne i završne točke 0 te 5 lokacija koje je potrebno povezati u rutu.

Ako su poznate sve udaljenosti od skladišta do lokacija, te međusobne udaljenosti između lokacija, moguće ih je tablično izraziti. Dakle, prvi korak algoritma uključuje tablični prikaz udaljenosti, tj. troškova između svih lokacija, kao što je prikazano u [Tablica 1]. Troškovi u tablici su simetrični te je iz tog razloga popunjen samo gornji dio tablice.

**Tablica 1. Prikaz matrice udaljenosti za algoritam ušteda Clarka i Wrighta**

	0	1	2	3	4	5
0	-	28	31	20	25	34
1		-	21	29	26	20
2			-	38	20	32
3				-	30	27
4					-	25
5						-

Sljedeći korak je izračun ušteda između svih lokacija, kao što je prikazano u [Tablica 2]. Uštede se potom poredaju od najveće prema najmanjoj.

**Tablica 2. Tablica ušteda za algoritam Clarka i Wrighta**

	1	2	3	4	5
1	-	38	19	27	42
2		-	13	36	33
3			-	15	27
4				-	34
5					-

Na temelju izračunatih ušteda, sastavlja se sljedeća tablica rangiranih ušteda relacija, počevši od najveće, prikazano u [Tablica 3].

**Tablica 3. Tablica relacija poredanih po uštedama**

Relacija	Ušteda
1-5	42
1-2	38
2-4	36
4-5	34
2-5	33
1-4	27
3-5	27
1-3	19
3-4	15
2-3	13

Zatim se na temelju ovog popisa stvara ruta na način da se redom povezuju lokacije. Najveća ušteda koristi se za stvaranje inicijalne rute:  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 0$ .

Zatim se pridodaje sljedeća ušteda te se ruta proširuje na:  $0 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 0$ .

Na isti se način i treća najveća ušteda po redu dodaje u rutu:  $0 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 0$ .

Sljedeća relacija koja bi se trebala dodati u rutu je  $4 \rightarrow 5$ , međutim vidljivo je kako se te dvije lokacije ne mogu spojiti jer se već nalaze u djelomičnoj ruti i nemoguće ih je povezati. Isto vrijedi i za relacije  $2 \rightarrow 5$  i  $1 \rightarrow 4$ . Te dvije relacije mogu se odbaciti i zbog činjenice da su lokacije 2 i 1 unutarnji čvorovi rute, što znači da su već povezani sa dvije lokacije i ne mogu se više povezivati s drugim lokacijama.

Ušteda 3-5 može se dodati u rutu jer lokacija 5 nije unutarnji čvor i dobiva se ruta:  $0 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 0$ .

S obzirom da su sve lokacije iskorištene i međusobno povezane, dobivena je konačna ruta. Njezina ukupna udaljenost može se izračunati iz tablice, a iznosi:

$$D = c_{0-4} + c_{4-2} + c_{2-1} + c_{1-5} + c_{5-3} + c_{3-0}$$

$$D = 25 + 20 + 21 + 20 + 27 + 20 = 133$$

U slučaju da postoji i dodatno ograničenje kapaciteta, potrebno je i o tome voditi brigu. U tom slučaju najvjerojatniji neće sve lokacije biti povezane u jednu rutu, već će ih biti više.

### 6.3.2. Algoritam najbližeg susjeda

Algoritam najbližeg susjeda je jednostavan, ali efikasan pohlepni algoritam koji se koristi za rješavanje problema trgovačkog putnika (TSP, eng. *Travelling Salesman Problem*), jednog od najpoznatijih kombinatornih optimizacijskih problema. Pohlepni algoritmi su vrsta heurističkih algoritama koji rješavaju optimizacijske probleme na način da u svakom koraku odabiru najbolji mogući izbor, ne razmišljajući o globalnoj optimizaciji. Osnovna ideja iza ovih algoritama je odabir najbolje moguće opcije u svakom trenutku, u nadi da će takav izbor lokalnih optimuma dovesti do globalno optimalnog rješenja. Jedna od ključnih karakteristika pohlepnih algoritama je ta da donose odluke na temelju trenutnog stanja problema, ne uzimajući u obzir moguće posljedice. Iako su pohlepni algoritmi jednostavni za implementaciju i u mnogim slučajevima daju zadovoljavajuće ili čak optimalne rezultate, posebno ako je problem dovoljno jednostavan, nisu uvijek optimalni i mogu biti osjetljivi na specifičnosti problema ili načinu kako su definirani.

Osnovna ideja algoritma najbližeg susjeda je izabrati početni čvor i zatim u svakom koraku odabrati susjedni čvor koji mu je najbliži. Na taj način se formira ruta koja posjećuje sve čvorove jednom i vraća se u početni čvor.

Postupak algoritma može se opisati sljedećim koracima:

1. Korak: Odabrati početni čvor
2. Korak: Pronaći najbliži susjedni čvor
3. Korak: Dodati taj čvor u rutu i označiti ga kao posjećenog
4. Korak: Ponavljati korake 2 i 3 sve dok svi čvorovi nisu posječeni
5. Korak: Povratak u početni čvor, čime se formira zatvorena putanja

Za primjer je odabrana početna i završna točka rute, označena kao 0 te pet lokacija na temelju kojih je potrebno konstruirati rutu, tako da prijeđena udaljenost bude minimalna. S obzirom da su poznate sve međusobne udaljenosti između lokacija, najprije se izrađuje matrica udaljenosti, prikazana u [Tablica 4].

**Tablica 4. Matrica udaljenosti za algoritam najbližeg susjeda**

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

Prvi korak algoritma je odabrati početni čvor. S obzirom da je već određeno da ruta započinje iz čvora 0, slijedi odabir čvora koji je najmanje udaljen od početnog. U ovom slučaju vidljivo je da minimalna udaljenost od početnog čvora do bilo koje lokacije iznosi 32, a odgovara relaciji  $0 \rightarrow 5$ . Ta se relacija odabire kao početna te je potrebno prekrižiti peti stupac, kao što je prikazano u [Tablica 5], kako bi se naznačilo da se više ne može iz nekog čvora doći u čvor 5.

**Tablica 5. Odabir početne relacije**

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

U sljedećem koraku se iz čvora 5 traži sljedeća najbliža lokacija. Pritom se gleda peti redak i traži najmanja udaljenost. Iz [Tablica 6] je vidljivo da je sljedeća najbliža lokacija čvor 3.

Tablica 6. Povezivanje čvorova u rutu

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

Trenutna ruta je  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ . Postupak se ponavlja i sada se traži lokacija najbliža čvoru 3. Najmanja udaljenost je do čvora 2 i iznosi 6. Stupac dva se također križa, kao što je prikazano u [Tablica 7].

Tablica 7. Povezivanje čvorova u rutu

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

Nakon ovog koraka ruta glasi:  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ . Nadalje se iz drugog retka odabire minimalna vrijednost koja nije u već prekriženim stupcima. Sukladno tome, čvoru 2 je najbliža lokacija 1 te je nova matrica prikazana u [Tablica 8].

Tablica 8. Povezivanje čvorova u rutu

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

Nakon proširivanja rute na  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ , na isti način se odabire i najbliža lokacija čvoru 1. Minimalna vrijednost u prvom retku iznosi 33 i prikazano je u [Tablica 9].

Tablica 9. Povezivanje čvorova u rutu

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

Nakon ovog koraka ruta glasi:  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4$ . S obzirom da su sve lokacije uključene u rutu, jedino preostaje povezati posljednji čvor, to jest lokaciju 4 sa polaznim čvorom 0, što je vidljivo u [Tablica 10].

Tablica 10. Povezivanje posljednjeg dodanog čvora sa polaznim

	0	1	2	3	4	5
0	-	37	65	43	40	32
1	37	-	18	13	33	21
2	65	18	-	6	32	15
3	43	13	6	-	19	7
4	40	33	32	19	-	12
5	32	21	15	7	12	-

Iako je iz tablice vidljivo da vrijednost 40 nije minimalna, zbog ograničenja, a i jer je jedino što ima smisla, to je jedini mogući izbor za završetak rute.

Ruta je završena i glasi:  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 0$ . Njezina ukupna udaljenost iznosi:

$$D = 32 + 7 + 6 + 18 + 33 + 40 = 136$$

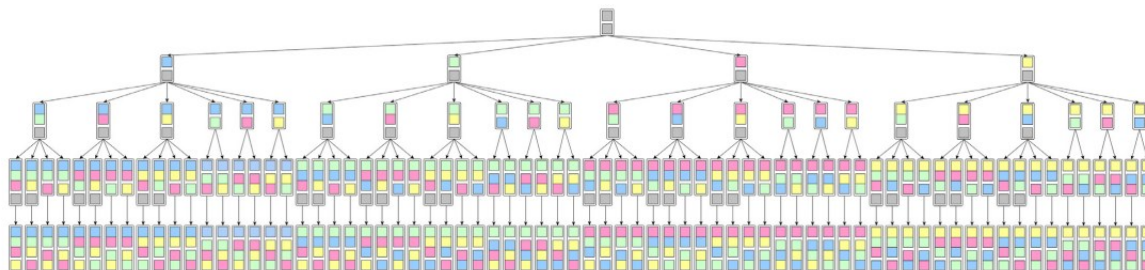
Izbor početnog čvora može utjecati na kvalitetu rješenja koje algoritam daje. Ponekad se može isprobati više početnih čvorova kako bi se pronašlo bolje rješenje. Iako algoritam najbližeg susjeda nije optimalan za sve probleme, često se koristi zbog svoje jednostavnosti i brzine izvođenja.

### 6.3.3. Algoritam grananja i ograničavanja

Algoritam grananja i ograničavanja (engl. *Branch and Bound*) je egzaktna metoda za rješavanje optimizacijskih problema. Proces grananja i ograničavanja uključuje istraživanje različitih kombinacija odlučujućih varijabli podjelom problema na manje podprobleme (granjanje), zanemarivanje kombinacija koje su očito suboptimalne (ograničavanje) te pretraživanje preostalih alternativa sve dok se ne pronađe najbolje rješenje. Drugim riječima, osnovna ideja algoritma je da se problem podijeli na manje dijelove koji se mogu riješiti odvojeno. Zatim se koristi strategija grananja koja generira sve moguće kombinacije tih dijelova, stvarajući tako stablo pretraživanja. U svakom koraku algoritma, dijelovi stabla se procjenjuju koristeći gornje i donje granice. Donje granice se koriste kako bi se odbacili dijelovi stabla koji ne mogu dovesti do boljeg rješenja od trenutno najboljeg pronađenog rješenja, dok se gornje granice koriste kako



bi se odbacili dijelovi stabla koji nisu obećavajući i ne vrijedi ih dalje istraživati. [Slika 14] prikazuje shemu grananja na primjeru jednog stabla pretraživanja.



**Slika 14. Primjer stabla pretraživanja [30]**

U kontekstu rješavanja logističkih problema, poput problema trgovačkog putnika, odlučujuće varijable mogu predstavljati redoslijed posjeta lokacijama, a metoda grananja i ograničavanja može se koristiti za istraživanje različitih redoslijeda (granjanje), odbacivanje manje obećavajućih (ograničavanje) i pronalaženje optimalnog redoslijeda (selekcija). Algoritam grananja i ograničavanja može se provesti i uz pomoć reducirane matrice, a osnovni koraci su sljedeći [31]:

1. Korak: Izraditi tablicu udaljenosti između zadanih čvorova (vrhova)
2. Korak: Reducirati tablicu na način da se u svakom retku pronađe minimalni element koji se zatim oduzima od svih vrijednosti u retku
3. Korak: Pronaći minimalan element u svakom stupcu te ga oduzeti od svih vrijednosti u stupcu
4. Korak: Izračun donje granice
5. Korak: Izračun kazni
6. Korak: Čvorovi koji odgovaraju retku i stupcu u kojem se nalazi element s najvećom kaznom se povezuju u rutu
7. Korak: Uklanjanje retka i stupca u kojem se nalazio odabrani element
8. Korak: Ako nova tablica ne sadrži barem jednu nulu u svakom retku i stupcu ponavlja se 2. korak
9. Korak: Ponavljati korake sve dok se tablica ne reducira do kraja i ne dobije konačna ruta

U sljedećem primjeru odabran je skup od 4 lokacije, gdje su sve međusobne udaljenosti između njih poznate, a potrebno je pronaći najkraću moguću rutu koja svaku lokaciju posjećuje isključivo jednom i vraća se na početnu točku.

Prvi korak algoritma grananja i ograničava uključuje izradu matrice, to jest tablice udaljenosti između svake lokacije, prikazano u [Tablica 11].

**Tablica 11. Matrica udaljenosti algoritma grananja i ograničavanja**

	1	2	3	4
1	-	9	18	23
2	9	-	34	16
3	18	34	-	31
4	23	16	31	-

Sljedeći korak je pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku, prikazano u [Tablica 12]. Minimalni elementi se označuju kao  $u_{ij}$ , gdje  $i$  predstavlja broj retka, a  $j$  broj stupca.

**Tablica 12. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku**

	1	2	3	4	$u_{ij}$
1	-	9	18	23	9
2	9	-	34	16	9
3	18	34	-	31	18
4	23	16	31	-	16
$\Sigma$					52

Zatim se od svake vrijednosti u pojedinom retku oduzima izdvojena minimalna vrijednost pripadajućeg retka. U ovom slučaju, od vrijednosti u prvom retku se oduzima 9, u drugom retku također 9, od vrijednosti u trećem retku se oduzima 18, dok se u četvrtom retku oduzima 16. Dobivene vrijednosti prikazane su u [Tablica 13].

**Tablica 13. Tablica nakon provedenog oduzimanja**

	1	2	3	4
1	-	0	9	14
2	0	-	25	7
3	0	16	-	13
4	7	0	15	-

U trećem koraku se ponavlja isti postupak, ali sa stupcima. U svakom je stupcu potrebno pronaći i izdvojiti minimalnu vrijednost ( $v_{ij}$ ), kao što je vidljivo u [Tablica 14].

**Tablica 14. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu**

	1	2	3	4	$\Sigma$
1	-	0	9	14	
2	0	-	25	7	
3	0	16	-	13	
4	7	0	15	-	
$v_j$	0	0	9	7	16

Nadalje se izdvojene vrijednosti oduzimaju od svih vrijednosti u odgovarajućim stupcima. S obzirom da su u prvom i drugom stupcu minimalne vrijednosti 0, ti stupci će ostati nepromjenjeni. Od vrijednosti u trećem stupcu će se oduzimati 9, dok će se od vrijednosti u četvrtom stupcu oduzimati 7, kao što je prikazano u [Tablica 15]

**Tablica 15. Tablica nakon provedenog oduzimanja**

	1	2	3	4
1	-	0	0	7
2	0	-	16	0
3	0	16	-	6
4	7	0	6	-

Četvrti korak algoritma predstavlja izračun donje granice. Donja granica u algoritmu grananja i ograničavanja predstavlja minimalnu moguću vrijednost rješenja koju algoritam trenutno poznaje, a ta vrijednost se naziva i redukcija matrice. Ona se računa kao zbroj sume minimalnih vrijednosti elemenata iz svakog retka i sume minimalnih vrijednosti elemenata iz svakog stupca:

$$D. G. = \sum_{i=1}^n u_i + \sum_{j=1}^n v_j$$

Prema tome, za zadani slučaj donja granica iznosi:

$$D. G. = 52 + 16 = 68$$

Peti korak uključuje izračun kazni. Kazne se dodjeljuju za nekorištenje predložene veze među elementima, to jest lokacijama, i računaju se za svako polje čija je vrijednost jednaka nuli. Kazna za određeno polje (i,j) se računa tako da se zbroji vrijednost minimalnog elementa u i-tom retku i vrijednost minimalnog elementa u j-tom elementu, a da se pritom ne uzima u obzir polje (i,j). Sukladno tome, kazna za nulu u prvom retku i drugom stupcu je zbroj minimalna vrijednosti u prvom retku, što je 0, i minimalne vrijednosti u drugom stupcu, koja je 0. Dakle, vrijednost kazne za polje (1,2) iznosi 0. Prema istom principu se računaju i kazne za ostale elemente, što je prikazano u [Tablica 16].

**Tablica 16. Izračun kazni**

	1	2	3	4
1	-	$0^{(0+0)}$	$0^{(0+6)}$	7
2	$0^{(0+0)}$	-	16	$0^{(0+7)}$
3	$0^{(6+0)}$	16	-	6
4	7	$0^{(6+0)}$	6	-

Šesti korak algoritma uključuje odabir kazne sa najvećom vrijednosti. Ako se lokacije koje odgovaraju brojevima retka i stupca u kojima se nalazi element s najvećom izračunatom kaznom ne povežu u rutu, tada bi došlo do najvećih gubitaka, to jest kazne. Iz tablice 16 je vidljivo kako najveća kazna iznosi 7 te pripada elementu u polju (2,4). Na temelju toga se stvara prva relacija, i to  $2 \rightarrow 4$ .

U sljedećem koraku se reducira tablica, na način da se uklanjaju redak i stupac elementa s najvećom kaznom, kao što je prikazano u [Tablica 17].

**Tablica 17. Reduciranje tablice**

	1	2	3	4
1	-	$0^{(0+0)}$	$0^{(0+6)}$	7
2	$0^{(0+0)}$	-	16	$0^{(0+7)}$
3	$0^{(6+0)}$	16	-	6
4	7	$0^{(6+0)}$	6	-

Nova reducirana matrica bez drugog retka i četvrtog stupca prikazana je u [Tablica 18]. S obzirom da je ranije dobivena relacija  $2 \rightarrow 4$ , element u polju (4,2) se označava sa x kako bi se izbjeglo dobivanje relacije  $4 \rightarrow 2$ , jer bi se na taj način zatvorila ruta i uključivala bi samo lokacije 2 i 4.

**Tablica 18. Reducirana tablica**

	1	2	3
1	-	0	0
3	0	16	-
4	7	x	6

Za izračun sljedeće kazne nužno da svaki redak i stupac sadrže barem jednu nulu. U ovom slučaju red 4 ne sadrži niti jednu nulu te se ponavljaju drugi i treći korak. Potrebno je ponovno izdvojiti minimalne vrijednosti, koje su prikazane u [Tablica 19].

**Tablica 19. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku**

	1	2	3	$u_{ij}$
1	-	0	0	0
3	0	16	-	0
4	7	x	6	6

Sljedeće je potrebno oduzeti izdvojene vrijednosti od preostalih vrijednostima u retcima. Pritom će prvi i treći redak ostati nepromijenjeni, a od vrijednosti u četvrtom retku oduzima se 6. Dobiveni rezultat je prikazan u [Tablica 20].

**Tablica 20. Tablica nakon provedenog oduzimanja**

	1	2	3
1	-	0	0
3	0	16	-
4	1	x	0

S obzirom da sada svi retci i stupci sadrže barem jednu 0, nije potrebno provoditi oduzimanje po stupcima. Slijedi izračun kazni po istom principu kao i ranije. [Tablica 21] prikazuje matricu sa izračunatim kaznama.

**Tablica 21. Izračun kazni**

	1	2	3
1	-	$0^{(16)}$	$0^{(0)}$
3	$0^{(17)}$	16	-
4	1	x	$0^{(1)}$

Iz tablice se može vidjeti kako najveća kazna iznosi 17 i pripada elementu u polju (3,1). To znači da se između trećeg retka i prvog stupca stvara nova relacija:  $3 \rightarrow 1$ . Zatim se ponovno uklanjaju taj redak i stupac te se dobije nova matrica prikazana u [Tablica 22].

**Tablica 22. Reducirana tablica**

	2	3
1	0	x
4	x	0

Iz matrice je jasno vidljivo da su jedine preostale relacije koje je moguće povezati :  $1 \rightarrow 2$  i  $4 \rightarrow 3$ , čime je algoritam završen.

S obzirom da su izračunate sve relacije, potrebno ih je još spojiti u jednu rutu.

$$2 \rightarrow 4$$

$$3 \rightarrow 1$$

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$$

$$4 \rightarrow 3 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$$

Iz tablice 1 moguće je izračunati ukupnu udaljenost za dobivenu rutu:

$$18 + 9 + 16 + 31 = 74$$

## 8. ANALIZA RUTA POSLJEDNJE MILJE ODABRANE TVRTKE

U ovom poglavlju opisana je tvrtka za dostavu DPD. Na početku su dane osnovne informacije, zatim je opisan njihov proces dostave paketa te proces predviđanja vremena isporuke, po čemu se razlikuju od većine drugih konkurentskih tvrtki. Konačno, analizirane su rute dostavnih vozila dobivene preko njihovog sustava te je provedena usporedba sa rutama za iste lokacije dobivene upotrebom tri različita algoritma, algoritma ušteda Clarka i Wrighta, algoritma najbližeg susjeda te algoritma grananja i ograničavanja.

### 8.1. Osnovne informacije

DPD, što je skraćenica za Dynamic Parcel Distribution, jedan je od vodećih europskih pružatelja usluga dostave paketa. Osnovan je 1976. godine u Njemačkoj, a danas je prisutan u više od 40 zemalja diljem Europe i svijeta. Dio je Geoposta, najveće dostavne mreže paketa u Europi, koji svakodnevno dostavlja 8,3 milijuna paketa.

DPD se ističe visokokvalitetnom uslugom dostave, tehnološkim inovacijama i ekološkom osviještenošću te svojim korisnicima nudi niz usluga, kao što su standardna dostava, ekspresna dostava, dostava na određeni dan, slanje paketa na više adresa, usluge povrata, itd. Kroz svoju mrežu partnerskih tvrtki, DPD omogućuje brzu i pouzdanu distribuciju paketa diljem Europe i svijeta. Neke od glavnih prednosti korištenja DPD-a su:

- aplikacija myDPD koja krajnjim korisnicima omogućava praćenje i upravljanje paketima
- 1HP (eng. *One Hour Predict*) usluga koja predviđa vrijeme dostave paketa unutar jednog sata
- aplikacija myDPD Business koja pošiljateljima paketa pruža informacije o stanju pošiljke te potvrde o preuzimanju i dostavi
- više od 1000 Pickup lokacija diljem Hrvatske
- mogućnost preuzimanja paketa na Pickup paketomatima
- automatsko osiguranje paketa
- tri pokušaja dostave uključena u cijenu
- mogućnost povrata paketa na Pickup lokacijama.

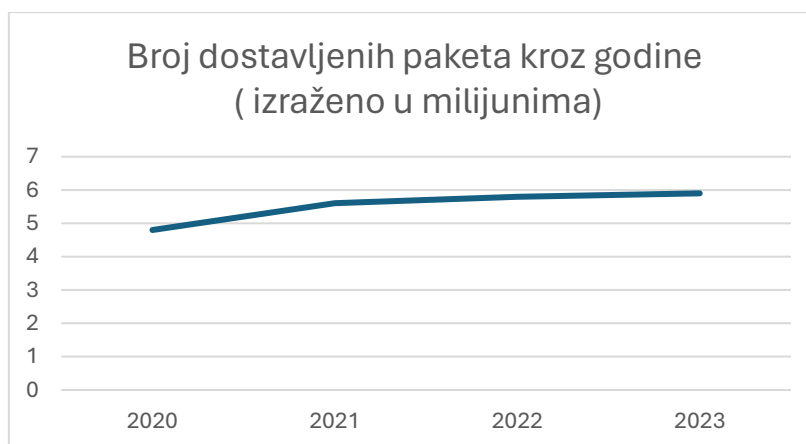


U Hrvatskoj je u DPD-u zaposlena 101 osoba u sklopu 17 depoa i jednog HUB-a. HUB je centralno skladište kroz koje svi paketi koji ulaze u dostavnu mrežu moraju biti sortirani prema adresama dostave, odnosno depoima. Trenutno se nalazi u Zagrebu, na adresi Slatinska 7, Sesvete, dok je u planu otvorenje novog HUB-a u Donjoj Bistri koji će predstavljati centralno skladište za Hrvatsku i Sloveniju. Lokacije depoa mogu se vidjeti na [Slika 15].



**Slika 15. Prikaz DPD depoa u Hrvatskoj**

S obzirom na sve veći broj online kupnji u zadnjim godinama, i DPD bilježi rast u broju dostavljenih paketa. Kao što je prikazano na [Slika 16], u 2020. godini taj broj je iznosio 4,8 milijuna, dok je u 2023. bilo preko 5,9 milijuna dostavljenih paketa.



**Slika 16. Porast broja paketa kroz godine**

## 8.2. Proces dostave paketa

Središnji HUB DPD-a u Zagrebu podijeljen je na dva krila, dio za zaprimanje paketa, tj. utovarna rampa te dio za sortiranje paketa i istovar iz skladišta. Paketi sa različitih lokacija dolaze u skladište, pregledavaju se te se na njih lijepi etiketa koja sadrži podatke potrebne za dostavu, barkod za skeniranje te oznaka dijelu grada kojem pripadaju. Paketi koji se moraju transportirati u druge depoe odlaze na jednu stranu, gdje se utovaraju u vozila, dok se paketi koji se moraju dostaviti unutar Zagreba i okolice odlažu na konvejer i odlaze do mjesta gdje se sortiraju u kaveze. Svaki kavez predstavlja određeno uže područje grada. Paketi se spuštaju s pokretne trake te se na temelju dodijeljenjeg scana, tj. oznake dijela grada svrstavaju u odgovarajuće kaveze. Iz kaveza ih preuzimaju kuriri na način da ih skeniraju i utovare u vozila.

Svaki kurir pokriva određeno područje, ima svoj ID broj i MDU skener. MDU (eng. *Mobile Data Unit*) skener je prijenosni uređaj koji se koristi za skeniranje različitih vrsta podataka na terenu, uključujući, ali ne ograničavajući se na, barkodove, QR kodove ili optičke oznake na paketima, proizvodima ili dokumentima. Ima mogućnost bežične komunikacije što omogućava prijenos podataka u stvarnom vremenu te integraciju u centralni informacijski sustav. Izgled MDU skenera koji se koristi u DPD-u prikazan je na [Slika 17].



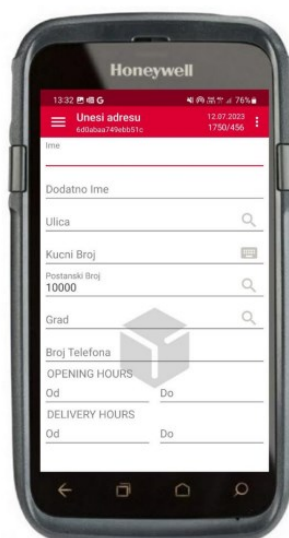
Slika 17. MDU skener

Prije skeniranja paketa, kurir se mora prijaviti na način da unese svoj ID, lozinku od 5 brojeva te broj, to jest šifru ture koju vozi, svoj telefonski broj i registarsku oznaku vozila. Nakon toga otvara se glavni izbornik, prikazan na [Slika 18].



**Slika 18. Glavni izbornik MDU skenera**

Kako bi kurir mogao započeti skeniranje paketa, odabire opciju 'Priprema za isporuku OFD'. OFD (eng. *Optical Character Recognition*) skeniranje paketa je proces skeniranja optičkih oznaka na paketima kako bi se automatski identificirale informacije kao što su adrese primatelja i pošiljatelja, brojevi praćenja ili druge relevantne informacije. Ove informacije se zatim mogu koristiti za praćenje paketa, obradu narudžbi ili bilo koju drugu potrebnu logistiku. Zatim se skeniraju svi paketi koje je potrebno dostaviti. Kada je paket skeniran, automatski se prikazuju, ime, adresa, broj telefona stranke te još neki drugi podaci prikazani na [Slika 19], koji se potom provjeravaju.



**Slika 19. Zaslona MDU skenera nakon skeniranja paketa**

Svaka adresa se mora potvrditi, a postoji i mogućnost da ih se doda u adresar, u slučaju ako se određene adrese često pojavljuju. Moguće je dodati i napomene za paket u obliku komentara kako bi se kasnije lakše pronašao u vozilu. Također, uz pomoć dodatnih opcija paketa može se i urediti vremenski okvir, trajanje stopa, postavljanje stopa kao prvi ili zadnji i slično. Nakon što je paket dodan na OFD listu, postupak se ponavlja i za sve preostale pakete.

Zatim slijedi optimizacija rute. Pritom je najprije potrebno odabrati prvu i zadnju adresu za dostavu te postaviti parametre brzine. Kuriri odabiru brzinu kojom će voziti i prosječno vrijeme koje se planiraju zadržavati na svakom stopu, to jest lokaciji. Svaki kurir samostalno odabire kojom brzinom će vršiti dostave, međutim bitno je da se toga pridržava jer ti parametri utječu na procjenu vremena dostave paketa. Uz to, aplikacija nudi i opciju odabira vremena za pauzu.

Sljedeća stavka je postavljanje vremena odlaska iz skladišta koje mora biti uneseno što preciznije. Na temelju toga optimizator određuje vrijeme do prve zadane adrese. Nakon što su se unijeli svi potrebni podaci, optimizator DPD-a koji je povezan sa aplikacijom za navigaciju HERE WeGo automatski stvara rutu po kojoj bi kurir trebao dostavljati pakete te se ispisuje redosljed dostava i vremenski okvir za dostavu na svaku lokaciju. Optimizator stvara TSP rutu. To znači da je ruta namijenjena samo za jedno vozilo koje mora obići sve zadane lokacije i vratiti se u polaznu toču. Rutu nije potrebno podijeliti više vozila, što je slučaj za VRP. Razlog tome je što se paketi unaprijed razvrstavaju tako da svaki kurir ima svoju rutu koja se stvara zasebno, tj. neovisno o ostalim rutama.

U slučaju da kuriru ne odgovara redosljed koji nudi optimizator, ruta se može promijeniti tako da odabere drugu početnu ili krajnju adresu. Stopovi se mogu i ručno razvrstati, a moguće je i naknadno dodavanje novih stopova.

Nakon što su napravljene sve željene promjene, potrebno je potvrditi rutu. Jednom kada je ruta potvrđena promjene više nisu moguće i nakon unosa pina, paketi su spremni za dostavu. Tada se na temelju potvrđene rute šalju automatske poruke primateljima paketa u kojima je navedeno predviđeno vrijeme dostave, definirano u intervalu od jednog sata. Po završetku svih pripremnih aktivnosti, kurir kreće na dostavu i slijedi popis stranaka, to jest primatelja paketa, a na kojem su ispisani adresa, broj telefona, iznos koji se mora platiti te vremenski rok u kojem se paket mora predati. Prilikom dolaska na zadanu lokaciju, potrebno je skenirati paket te u izborniku koji se otvori upisati ime i prezime osobe koja preuzima paket te zatražiti potpis. Prilikom potpisivanja, ekran skenera se automatski okreće prema stranci, što je vidljivo na [Slika 20].

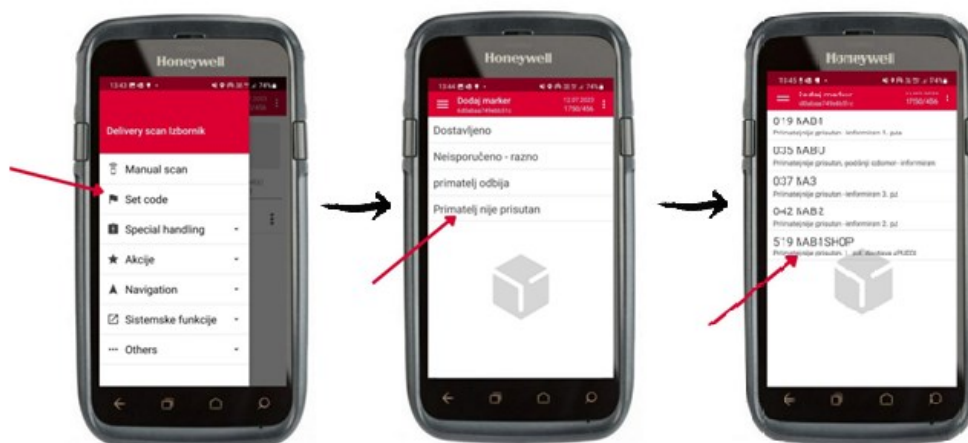
Nakon što se primatelj potpiše, pritisne se kvačica i stop se automatski pomiče sa popisa dostave na popis isporučenih paketa.



**Slika 20. Zaslón MDU skenera za potpis**

Osim naloga za dostavu paketa koji su definirani na početku dana, prije početka dostave, postoje i nalozi koji stignu kuriru tokom dana i oni nisu u optimizaciji. Kurir te naloge može prihvatiti ili odbiti, a odbijaju se ako se ne nalaze na odgovarajućoj turi, ako je nalog krivo dodijeljen, paket nije dobro zapakiran ili iz nekog drugog razloga.

Za pakete koji se ne mogu isporučiti zbog odsutnosti stranke, odbijanja dostave ili preusmjerenja na PUDO (eng. *Pick-Up and Drop-Off*)/paketomat lokaciju, koriste se dodatni kodovi ili preusmjerenja. U tom slučaju, nakon skeniranja paketa odabire se opcija postavljanja koda (eng. set code) te se slijedi izbornik u kojem se bira kategorija u koju pripada neisporučeni paket, a u svakoj kategoriji se nalaze odgovarajući kodovi. [Slika 21] prikazuje postupak dodjeljivanja koda paketima.



**Slika 21. Dodjeljivanje dodatnog koda paketima**

Postoji niz dodatnih kodova koji se dodjeljuju neisporučenim paketima, a najčešći su sljedeći:

- Prva obavijest (019) dodjeljuje se kada stranka prvi dan nije kod kuće
- Druga obavijest (042) dodjeljuje se kada stranka niti drugi dan zaredom nije kod kuće
- Treća obavijest (037) dodjeljuje se ako stranka ni treći dan nije prisutna na adresi
- Odbijanje (015) dodjeljuje se ako stranka odbije primiti paket
- Neispravna adresa (011) dodjeljuje ako je adresa za dostavu napostojeća ili je kriva ulica/kućni broj/poštanski broj
- Nedostatak vremena (032) dodjeljuje se u slučaju da fizički nije bilo dovoljno vremena za dostavu paketa
- Promjena datuma dostave (080) dodjeljuje se ako je stranka zatražila drugi datum dostave, koji je potrebno evidentirati
- Promjena adrese (083) dodjeljuje se ako stranka želi dostavu na drugu adresu ili područje, što je također potrebno upisati
- Viša sila (041) dodjeljuje se u slučaju elementarne nepogode, zatvorene ceste ili slično
- Preusmjeravanje na PUDO/paketomat lokaciju dodjeljuje se u slučaju kada stranka preusmjeri dostavu na paketomat ili u neku od PUDO lokacija (INA, PETROL, dm, iNovine, ...)

Nakon dodjeljivanja koda, paket se s popisa dostava premješta na popis prepreka (eng. *obstacles*). Na tom popisu se nalaze svi paketi koji iz određenog razloga nisu mogli biti dostavljeni, a vidljiv je na [Slika 22].



Slika 22. Prikaz popisa prepreka na MDU skeneru

Osim dostave paketa, stranke mogu koristiti i druge usluge kao što su razmjena paketa za paket i povrat paketa. Prilikom razmjene paketa, stranka mora imati spreman paket za razmjenu jer se u protivnom paket ne smije dostaviti. Skeniranjem tih paketa pojavljuje se obavijest sa napomenom da se radi o 'SWAP' paketima, što je također navedeno i na paketnoj oznaci, vidljivoj na [Slika 23].



Slika 23. Oznaka paketa koji je namijenjen za razmjenu

U slučaju povrata paketa od strane stranke, nakon preuzimanja printa se ‘BACK’ paketna oznaka koja se potom lijepi na pripremljen paket, a vidljiva je na [Slika 24].



**Slika 24. Oznaka paketa namijenjenog za povrat**

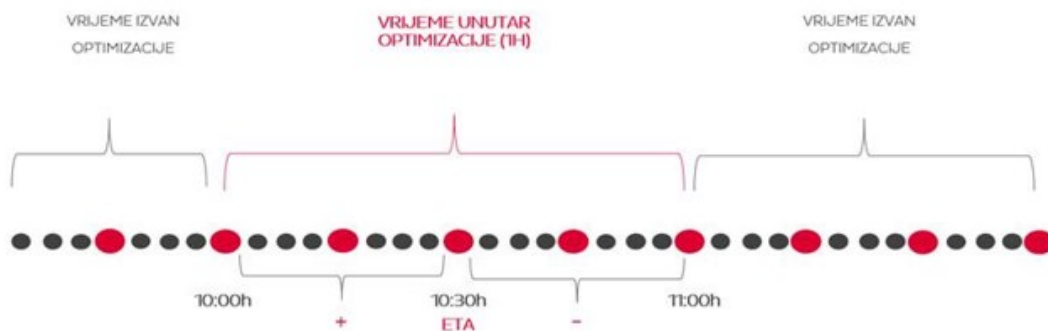
Prilikom povratka na skladište potrebno je skenirati sve pakete koji iz određenog razloga taj dan nisu bili dostavljeni. Paketi se u skladištu skeniraju na način da kurir skladištaru pokazuje svoju karticu ture na kojoj se nalaze scanovi. Skladištar koji skenira pakete otvara turu i scan koji pripada povratima paketa te skenira oznake sa paketa koji su vraćeni i dodjeljuje im odgovarajući kod. Nakon što su paketi skenirani, premještaju se u odgovarajuće kaveze te sljedeći dan imaju prednost za dostavu.

### 8.3. Predviđanje vremena dostave

Za razliku od većine ostalih kurirskih službi koje vrijeme dostave procjenjuju u intervalu od dva sata, DPD primateljima paketa predviđa vrijeme dostave u intervalu od jednog sata, što se naziva 1HP (eng. *One Hour Predict*). Upravo je prema tome određena optimizacija ruta. Naime, iako je osnovni cilj da dostava bude što brža, isporuka paketa primarno mora biti unutar predviđenog vremena. To znači da dostavljačima nije u cilju što prije obići sve stopove, to jest lokacije, već biti tamo u određeno vrijeme.



Svaki stop dobiva vremenski period od jednog sata (1HP) unutar kojih je potrebno dostaviti paket. Razlog zašto je to bitno je taj što primatelj paketa zaprima poruku o vremenu dostave te tada očekuje pakete. Kada kurir postavi vrijeme odlaska iz skladišta, optimizator samostalno računa koliko vremena je potrebno do prve adrese i prema tome definira predviđeno vrijeme dolaska na adresu (ETA, eng. *Estimated Time of Arrival*). Ako je vrijeme odlaska iz skladišta postavljeno na 08:20, a optimizator izračuna da je do prvog stopa potrebno 10 minuta vožnje, ETA za taj paket je 08:30. Za taj stop se zadaje vremenski okvir u kojem je potrebno izvršiti dostavu, a u ovom slučaju je to između 08:00 i 09:00 sati, odnosno 30 minuta prije i 30 minuta poslije predviđenog dolaska na adresu. Ako je za sljedeći stop ETA 08:36, vremenski okvir za taj stop je od 08:06 do 09:06. Kada je kurir u optimizaciji, to znači da je paket dostavljen unutar predviđenog vremenskog okvira. Ovisno o točnom vremenu dolaska na stop, optimizacija može biti u plusu, u minusu ili 0. Kada je optimizacija 0, to znači da je stvarno vrijeme dolaska na stop jednako kao ETA i tome se treba težiti. Ako je optimizacija u plusu, to znači da kurir dolazi prije predviđenog vremena i sukladno tome, ako je optimizacija u minusu, znači da kurir dolazi nakon predviđenog vremena. Sukladno tome, stop se računa kao uspješan ako je odrađen 30 minuta +/- od ETA. Sve više od toga negativno utječe na rezultat, to jest postotak optimizacije. Na [Slika 25] grafički je prikazana opisana usluga 1HP.

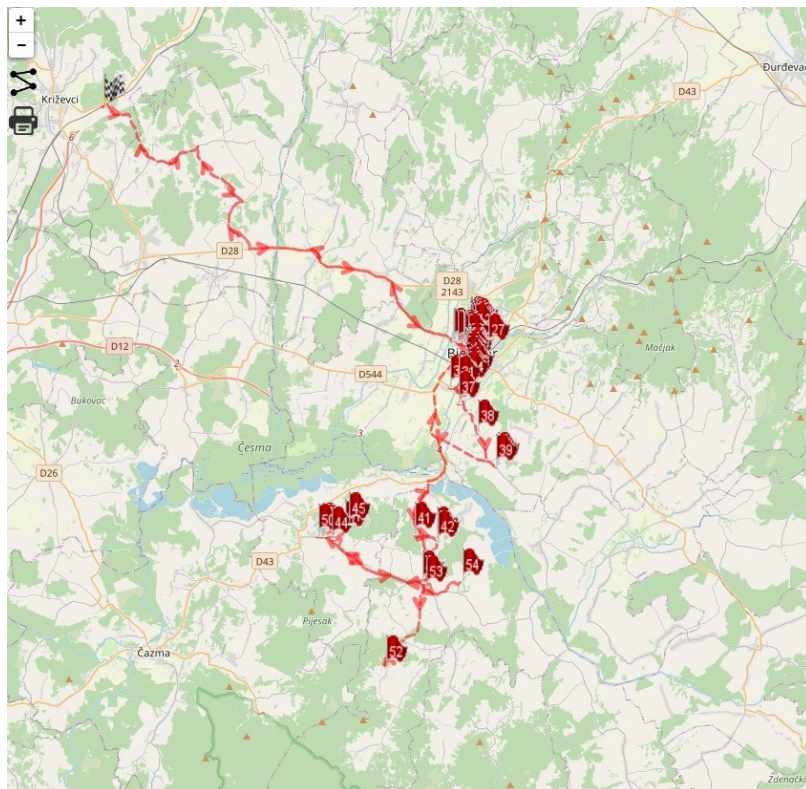


Slika 25. Grafički prikaz 1HP

Također, bitno je napomenuti kako predviđeno vrijeme dolaska ne predstavlja dodatno ograničenje, kao što je to slučaj za problem usmjeravanja vozila s vremenskim ograničenjima. Naime, ETA se koristi samo kao ciljno vrijeme koje je potrebno postići, to jest maksimalno mu se približiti, i to se vrijeme formira nakon stvaranja same rute. To znači da prilikom stvaranja

rute nije potrebno voditi brigu kada će se doći na koju lokaciju, već je kasnije bitno da dostavljači poštuju dobivenu rutu kako bi došli u vrijeme koje je javljeno klijentima.

Koordinatori zaduženi za optimizaciju koji se nalaze u HUB-u imaju uvid u sve kurire i njihove rute, iz svih depoa. Nakon što kuriri skeiraju sve pakete i potvrde rutu, koordinatori mogu vidjeti redoslijed svih stopova rute na karti i sve pojedinosti. Također imaju i uvid u svaku promjenu koju kurir napravi. Ovakav pregled rute omogućava pravovremeno uočavanje grešaka jer je jasno vidljivo ako kurir skenira paket koji ne pripada njegovom području. Prikaz jedne rute koja započinje i završava u skladištu i sa numeriranim stopovima vidi se na [Slika 27].



**Slika 26. Primjer jedne rute vozila DPD-a**

Na [Slika 27] prikazan je popis stopova i redoslijed kojim bi se trebali obilaziti. Iz popisa se može vidjeti ETA i zadani vremenski okvir za dostavu.

## Stop list

Changes: ■ - unspecific, ■ - timeframe, ■ - sort, ■ - unplanned, ■ - district sort, ■ - district changed

Id	No.	SA	TF from-to	TFP from-to	ETA	Time	Change
1248	001	03	07:00 - 21:00	12:56 - 13:56	13:26	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1232	002	03	07:00 - 21:00	13:00 - 14:00	13:30	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1233	003	03	07:00 - 21:00	13:02 - 14:02	13:32	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1234	004	03	07:00 - 21:00	13:04 - 14:04	13:34	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1235	005	03	07:00 - 21:00	13:06 - 14:06	13:36	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1238	006	03	07:00 - 21:00	13:09 - 14:09	13:39	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1237	007	03	07:00 - 21:00	13:12 - 14:12	13:42	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1239	008	03	07:00 - 21:00	13:15 - 14:15	13:45	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1242	009	03	07:00 - 21:00	13:17 - 14:17	13:47	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1243	010	03	07:00 - 21:00	13:19 - 14:19	13:49	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1244	011	03	07:00 - 21:00	13:21 - 14:21	13:51	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1249	012	03	07:00 - 21:00	13:24 - 14:24	13:54	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1251	013	03	07:00 - 21:00	13:26 - 14:26	13:56	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1247	014	03	07:00 - 21:00	13:30 - 14:30	14:00	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1241	015	03	07:00 - 21:00	13:33 - 14:33	14:03	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1245	016	03	07:00 - 21:00	13:35 - 14:35	14:05	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1246	017	03	07:00 - 21:00	13:36 - 14:36	14:06	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1240	018	03	07:00 - 21:00	13:39 - 14:39	14:09	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1252	019	03	07:00 - 21:00	13:43 - 14:43	14:13	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>
1236	020	03	07:00 - 21:00	13:46 - 14:46	14:16	48s	<span style="color: red;">■</span> <span style="color: black;">■</span>

Slika 27. Redosljed stopova jedne rute

Ukoliko prilikom dostave dođe do nekih promjena, kao što je otkazivanje ili promjena dana ili mjesta dostave, što bi prouzročilo dolazak na iduću lokaciju ranije, vozačima je preporučljivo usporiti ili zastati kako ne bi prerano dostavili sve iduće pakete. Drugim riječima, iako je većini kurira u cilju što prije dostaviti sve pakete, DPD-u je najbitnija stavka da oni budu u optimizaciji, to jest da su što bliže ETA-i. Taj se podatak za svakog kurira prati na dnevnoj, tjednoj i mjesečnoj bazi i izražen je u obliku postotka. Kuririma je cilj da 94% od svih paketa bude dostavljeno unutar predviđenog vremena od jednog sata. U tom slučaju se kaže da su u optimizaciji. Upravo na temelju svog postotka optimizacije kuriri dobivaju razne poticaje i bonuse. Na slici je prikazan dio tablice preko koje se prati postotak optimizacije kurira. Zelene označene vrijednosti označavaju da je kurir u optimizaciji, dok crvene vrijednosti označavaju da nije u optimizaciji. Na [Slika 28] prikazana je tablica koja sadrži podatke kao što su datum, oznaka ture, broj depoa, broj predviđenih i nepredviđenih stopova, prijedene udaljenosti i dr.

Date	Tour	Depot	Predicted stops				Not predicted stops (delivery, B2B, pickups)				Total			Stop sequence				Amount of requests for optimisations			
			Predicted stop (B2C)	Success delivery attempt inside TF	%	Unsuccess delivery attempt inside TF	%	NOT predicted stop (B2B, pickups)	Success delivery attempt inside TF	%	Unsuccess delivery attempt inside TF	%	Stops	Success	%	Stop sequence	Followed stop sequence stops		%	NOT followed stop sequence stops	%
2024-04-22-2024-04-22	026	0281760	100	6	6	94	94	25	0	0	25	100	125	6	4.80%	125	61	48.8	64	51.2	6
2024-04-22-2024-04-22	238	0281759	71	5	7.0423	66	92.958	11	0	0	11	100	82	5	6.10%	82	47	57.317	35	42.683	9
2024-04-22-2024-04-22	319	0281763	64	5	7.8125	59	92.188	4	0	0	4	100	68	5	7.35%	68	23	33.824	45	66.176	2
2024-04-22-2024-04-22	323	0281763	48	5	10.417	43	89.583	8	0	0	8	100	56	5	8.93%	56	23	41.071	33	58.929	3
2024-04-22-2024-04-22	103	0281750	66	6	9.0909	60	90.909	8	1	12.5	7	87.5	74	7	9.46%	74	57	77.027	17	22.973	2
2024-04-22-2024-04-22	620	0281761	132	20	15.152	112	84.848	24	1	4.1667	23	95.833	156	21	13.46%	156	38	24.359	118	75.641	2
2024-04-22-2024-04-22	356	0281763	101	16	15.842	85	84.158	5	1	20	4	80	106	17	16.04%	106	69	65.094	37	34.906	2
2024-04-22-2024-04-22	050	0281750	92	16	17.391	76	82.609	9	1	11.111	8	88.889	101	17	16.83%	101	51	50.495	50	49.505	2
2024-04-22-2024-04-22	079	0281750	99	28	28.283	71	71.717	16	3	18.75	13	81.25	115	31	26.96%	115	57	49.565	58	50.435	2
2024-04-22-2024-04-22	208	0281759	83	25	30.12	58	69.88	12	1	8.3333	11	91.667	95	26	27.37%	95	58	61.053	37	38.947	3
2024-04-22-2024-04-22	195	0281752	89	74	83.146	15	16.854	21	15	71.429	6	28.571	110	89	80.91%	110	71	64.545	39	35.455	3
2024-04-22-2024-04-22	073	0281763	71	64	90.141	7	9.8592	16	14	87.5	2	12.5	87	78	89.66%	87	45	51.724	42	48.276	5
2024-04-22-2024-04-22	425	0281753	57	51	89.474	6	10.526	4	4	100	0	0	61	55	90.16%	61	44	72.131	17	27.869	2
2024-04-22-2024-04-22	162	0281756	72	66	91.667	6	8.3333	10	8	80	2	20	82	74	90.24%	82	67	81.707	15	18.293	3
2024-04-22-2024-04-22	041	0281760	76	71	93.421	5	6.5789	18	14	77.778	4	22.222	94	85	90.43%	94	58	61.702	36	38.298	9
2024-04-22-2024-04-22	396	0281750	76	69	90.789	7	9.2105	10	9	90	1	10	86	78	90.70%	86	34	39.535	52	60.465	2
2024-04-22-2024-04-22	120	0281752	68	62	91.176	6	8.8235	14	14	100	0	0	82	76	92.68%	82	56	68.293	26	31.707	2
2024-04-22-2024-04-22	194	0281752	81	74	91.358	7	8.642	16	16	100	0	0	97	90	92.78%	97	72	74.227	25	25.773	6
2024-04-22-2024-04-22	315	0281764	110	102	92.727	8	7.2727	19	18	94.737	1	5.2632	129	120	93.02%	129	96	74.419	33	25.581	3
2024-04-22-2024-04-22	104	0281764	148	137	92.568	11	7.4324	11	11	100	0	0	159	148	93.08%	159	80	50.314	79	49.686	3
2024-04-22-2024-04-22	082	0281755	74	70	94.595	4	5.4054	4	4	100	0	0	78	74	94.87%	78	63	80.769	15	19.231	2
2024-04-22-2024-04-22	210	0281757	103	99	96.117	4	3.8835	14	12	85.714	2	14.286	117	111	94.87%	117	79	67.521	38	32.479	5
2024-04-22-2024-04-22	205	0281751	103	98	95.146	5	4.8544	15	14	93.333	1	6.6667	118	112	94.92%	118	73	61.864	45	38.136	5
2024-04-22-2024-04-22	436	0281750	103	98	95.146	5	4.8544	4	4	100	0	0	107	102	95.33%	107	75	70.093	32	29.907	4
2024-04-22-2024-04-22	373	0281765	82	79	96.341	3	3.6585	9	8	88.889	1	11.111	91	87	95.60%	91	52	57.143	39	42.857	1
2024-04-22-2024-04-22	382	0281752	78	75	96.154	3	3.8462	13	12	92.308	1	7.6923	91	87	95.60%	91	69	75.824	22	24.176	2
2024-04-22-2024-04-22	374	0281765	71	69	97.183	2	2.8169	2	1	50	1	50	73	70	95.89%	73	50	68.493	23	31.507	2
2024-04-22-2024-04-22	420	0281753	86	82	95.349	4	4.6512	16	16	100	0	0	102	98	96.08%	102	70	68.627	32	31.373	2
2024-04-22-2024-04-22	122	0281760	46	44	95.652	2	4.3478	6	6	100	0	0	52	50	96.15%	52	41	78.846	11	21.154	3
2024-04-22-2024-04-22	307	0281764	65	62	95.385	3	4.6154	13	13	100	0	0	78	75	96.15%	78	40	51.282	38	48.718	3
2024-04-22-2024-04-22	311	0281764	82	79	96.341	3	3.6585	23	22	95.652	1	4.3478	105	101	96.19%	105	70	66.667	35	33.333	2
2024-04-22-2024-04-22	188	0281752	70	67	95.714	3	4.2857	11	11	100	0	0	81	78	96.30%	81	47	58.025	34	41.975	2

Slika 28. Tablica uz pomoć koje se prati postotak optimizacije

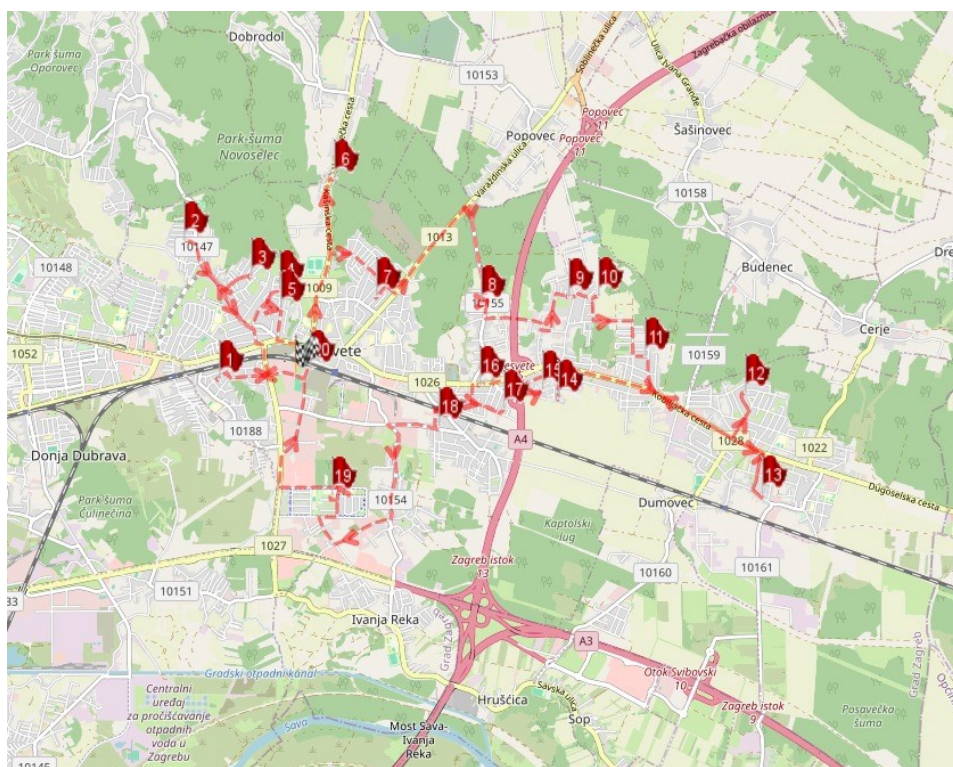
#### 8.4. Analiza ruta dostave posljednje milje

U ovom poglavlju analizirane su tri rute. Za svaku rutu je odabrano 20 nasumičnih lokacija te su pomoću DPD-ovog internog sustava napravljeni fiktivni paketi koje je potrebno dostaviti. Izrada fiktivnog paketa uključuje unos osnovnih podataka o paketu, od kojih su najbitniji vrsta paketa, težina, pošiljatelj, primatelj te adresa i kontakt primatelja. Zatim su za svaki od paketa isprintane odgovarajuće naljepnice koje sadrže QR kodove za skeniranje. Kodovi su skenirani pomoću MDU skenera i nakon odabira parametara dostave, optimizator je izgenerirao rute.

Te dobivene rute bit će uspoređene sa rutama koje sadrže iste lokacije, ali su dobivene korištenjem tri različita algoritma – algoritam ušteda Clarka i Wrighta, algoritam najbližeg susjeda i algoritam grananja i ograničavanja.

### 8.4.1. Ruta 1

Odabrane lokacije za prvu rutu nalaze se na području Sesveta. Ruta generirana iz DPD sustava prikazana je na [Slika 29].



Slika 29. Prikaz prve rute

Ukupno potrebno vrijeme za dostavu na sve lokacije iznosi 50 minuta. Međutim, u to vrijeme nije uračunato vrijeme potrebno za dolazak iz skladišta na prvu lokaciju niti vrijeme potrebno za povratak u skladište nakon dostave. S obzirom da je DPD-ov sustav za optimizaciju ruta povezan sa aplikacijom za navigaciju HERE WeGo, upravo pomoću te aplikacije će se uzimati i sve potrebna vremena između lokacija potrebna za izvršavanje odabranih algoritama. Od skladišta do prve lokacije u ruti, što je zapravo lokacija 20, potrebno je 2 minute, a od posljednje lokacije, to jest lokacije 5, do skladišta je potrebno 6 minuta. To znači da ukupno vrijeme potrebno za obilazak prve rute iznosi 58 minuta. U [Tablica 23] vidljiv je redoslijed dostava po lokacijama, vremenski okviri unutar kojih je potrebno izvršiti dostavu te procijenjeno vrijeme dostave (ETA).

Tablica 23. Dobiveni podaci o prvoj ruti

optimised stop sequence	Address	time frame from	time frame to	ETA
1	LOKACIJA 20	12:56:00	13:56:00	13:26:00
2	LOKACIJA 1	13:00:00	14:00:00	13:30:00
3	LOKACIJA 2	13:02:00	14:02:00	13:32:00
4	LOKACIJA 3	13:04:00	14:04:00	13:34:00
5	LOKACIJA 4	13:06:00	14:06:00	13:36:00
6	LOKACIJA 7	13:09:00	14:09:00	13:39:00
7	LOKACIJA 6	13:12:00	14:12:00	13:42:00
8	LOKACIJA 8	13:15:00	14:15:00	13:45:00
9	LOKACIJA 11	13:17:00	14:17:00	13:47:00
10	LOKACIJA 12	13:19:00	14:19:00	13:49:00
11	LOKACIJA 13	13:21:00	14:21:00	13:51:00
12	LOKACIJA 17	13:24:00	14:24:00	13:54:00
13	LOKACIJA 18	13:26:00	14:26:00	13:56:00
14	LOKACIJA 16	13:30:00	14:30:00	14:00:00
15	LOKACIJA 10	13:33:00	14:33:00	14:03:00
16	LOKACIJA 14	13:35:00	14:35:00	14:05:00
17	LOKACIJA 15	13:36:00	14:36:00	14:06:00
18	LOKACIJA 9	13:39:00	14:39:00	14:09:00
19	LOKACIJA 19	13:43:00	14:43:00	14:13:00
20	LOKACIJA 5	13:46:00	14:46:00	14:16:00

Iz [Tablica 23] vidljivo je da ruta glasi: 0 → 20 → 1 → 2 → 3 → 4 → 7 → 6 → 8 → 11 → 12 → 13 → 17 → 18 → 16 → 10 → 14 → 15 → 9 → 19 → 5 → 0.

#### 8.4.1.1. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta

Prvi algoritam koji će se koristiti za konstruiranje rute je algoritam ušteda Clarka i Wrighta. Prvi korak algoritma uključuje izradu tablice troškova. U ovom slučaju, troškovi su predstavljeni kao vrijeme potrebno za dolazak od jedne lokacije do druge, i izraženi su u minutama. Lokacija 0 predstavlja skladište i mora biti početna i završna točka rute. Troškovi su prikazani u [Tablica 24].

Tablica 24. Tablica troškova za prvu rutu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0	x	6	6	5	5	1	8	8	11	4	10	13	13	13	8	11	11	14	14	4	3	
1		X	2	4	4	6	8	8	11	10	11	13	14	14	10	11	12	16	16	9	6	
2			X	3	4	5	7	7	11	9	11	13	14	14	10	12	12	16	15	8	6	
3				X	2	5	6	6	10	8	9	12	12	11	8	10	10	14	14	7	5	
4					X	4	6	6	9	8	9	11	11	11	7	8	9	13	13	7	5	
5						X	7	7	10	5	9	11	12	11	7	9	10	13	13	5	3	
6							X	3	4	6	6	7	8	8	5	6	7	11	11	9	6	
7								X	8	8	9	11	12	11	7	9	9	14	14	11	7	
8									X	5	4	4	5	6	2	4	5	9	9	10	11	
9										X	5	8	7	7	3	3	5	10	9	6	6	
10											X	4	4	4	1	3	2	6	6	8	10	
11												X	1	4	3	5	3	7	7	11	13	
12													X	3	4	6	3	8	7	11	13	
13														X	3	5	3	4	4	10	12	
14															X	1	2	6	6	7	8	
15																X	4	8	9	10	11	
16																	X	6	5	9	12	
17																		X	3	14	16	
18																			X	6	17	
19																					X	6
20																						X

Sljedeći korak je izračun kazni prema formuli:

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

$S_{ij}$  je oznaka za uštedu postignutu povezivanjem lokacija  $i \rightarrow j$ ,  $c_{i0}$  predstavlja trošak, to jest udaljenost između početne točke i lokacije  $i$ ,  $c_{0j}$  je udaljenost između početne točke i lokacije  $j$ , a  $c_{ij}$  je udaljenost između lokacija  $i$  i  $j$ . Sukladno tome, ušteda koja bi se ostvarila povezivanjem lokacije 1 i lokacije 2 bila bi jednaka zbroju udaljenosti od skladišta do prve lokacije i od skladišta do druge lokacije umanjenom za udaljenost između prve i druge lokacije:

$$S_{1,2} = c_{1,0} + c_{0,2} - c_{1,2}$$

$$S_{1,2} = 6 + 6 - 2 = 10$$

Dobivena ušteda iznosi 10. Na isti način se provodi izračun ušteda i za sve preostale lokacije, a dobivene uštede prikazane su u [Tablica 25].

Tablica 25. Tablica ušteda za prvu rutu

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	X	10	7	7	1	6	6	6	0	5	6	5	5	4	6	5	4	4	1	3
2		X	8	7	2	7	7	6	1	5	6	5	5	4	5	5	4	5	2	3
3			X	8	1	7	7	6	1	6	6	6	7	5	6	6	5	5	2	3
4				X	2	7	7	7	1	6	7	7	7	6	8	7	6	6	2	3
5					X	2	2	2	0	2	3	2	3	2	3	2	2	2	0	1
6						X	13	15	6	12	14	13	13	11	13	12	11	11	3	5
7							X	11	4	9	10	9	10	9	10	10	8	8	1	4
8								X	10	17	20	19	18	17	18	17	16	16	5	3
9									X	9	9	10	10	9	12	10	8	9	2	1
10										X	19	19	19	17	18	19	18	18	6	3
11											X	25	22	18	19	21	20	20	6	3
12												X	23	17	18	21	19	20	6	3
13													X	18	19	21	23	23	7	4
14														X	18	17	16	16	5	3
15															X	18	17	16	5	3
16																X	19	20	6	2
17																	X	25	4	1
18																		X	12	0
19																			X	1
20																				X

Sljedeći korak je sortiranje ušteda od najveće prema najmanjoj i povezivanje lokacija na temelju istih. Najveća ušteda u tablici iznosi 25 i dobiva se stvaranjem relacija između lokacija 11 i 12 te 17 i 18. Time su dobivene prve dvije podrute:  $0 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 0$ , te  $0 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 0$ .

Sljedeća najveća ušteda iznosi 23, a moguća je između lokacija 12 i 13, 13 i 17 te 13 i 18. S obzirom da već postoji relacija  $17 \rightarrow 18$ , moguće je povezati ili  $13 \rightarrow 17$  ili  $13 \rightarrow 18$ . Odabire se povezivanje lokacija 13 i 17 te se stvaraju sljedeće podrute:  $0 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 0$ , te  $0 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 0$ . To se već može povezati i sa prethodno stvorenim podrutama i dobiva se sljedeće:  $0 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 0$ .

Sljedeća po redu ušteda iznosi 22 i to između lokacija 11 i 13. S obzirom da je 13 unutarnji čvor, tu lokaciju nije moguće više povezivati te se ovaj korak preskače.

Analiza ušteda se po istom principu nastavlja dalje te se dobiva konačna ruta:

$0 \rightarrow 5 \rightarrow 20 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 10 \rightarrow 16 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 9 \rightarrow 0$ .



Ukupno vrijeme potrebno za ovu rutu može se izračunati uz pomoć tablice udaljenosti i iznosi:

$$D = 1 + 3 + 6 + 2 + 3 + 2 + 6 + 3 + 4 + 2 + 1 + 3 + 2 + 3 + 1 + 3 + 4 + 3 + 6 + 6 + 4$$

$$D = 68 \text{ min}$$

Dakle, prema algoritmu Clarka i Wrighta, potrebno je 68 minuta za prvu rutu.

#### 8.4.1.2. Algoritam najbližeg susjeda

Sljedeća metoda pomoću koje će se konstruirati ruta je algoritam najbližeg susjeda. Prvi korak je izrada tablice troškova, u njoj su iste vrijednosti kao i u tablici troškova iz prethodnog algoritma, međutim radi jasnijeg prikaza je potrebno ispuniti i donji dio tablice, koji je simetričan gornjem. Zatim se kreće u postupak povezivanja lokacija, na način da se redom povezuju one najbliže. Počinje se pronalaskom lokacije koja je najbliža početnoj točki, to jest skladištu 0. Iz [Tablica 26] vidljivo je da je to upravo točka 5, koja je udaljena od skladišta 1 minutu.

Tablica 26. Odabir najbliže lokacije od početne točke

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	x	6	6	5	5	1	8	8	11	4	10	13	13	13	8	11	11	14	14	4	3
1	6	x	2	4	4	6	8	8	11	10	11	13	14	14	10	11	12	16	16	9	6
2	6	2	x	3	4	5	7	7	11	9	11	13	14	14	10	12	12	16	15	8	6
3	5	4	3	x	2	5	6	6	10	8	9	12	12	11	8	10	10	14	14	7	5
4	5	4	4	2	x	4	6	6	9	8	9	11	11	11	7	8	9	13	13	7	5
5	1	6	5	5	4	x	7	7	10	5	9	11	12	11	7	9	10	13	13	5	3
6	8	8	7	6	6	7	x	3	4	6	6	7	8	8	5	6	7	11	11	9	6
7	8	8	7	6	6	7	3	x	8	8	9	11	12	11	7	9	9	14	14	11	7
8	11	11	11	10	9	10	4	8	x	5	4	4	5	6	2	4	5	9	9	10	11
9	4	10	9	8	8	5	6	8	5	x	5	8	7	7	3	3	5	10	9	6	6
10	10	11	11	9	9	9	6	9	4	5	x	4	4	4	1	3	2	6	6	8	10
11	13	13	13	12	11	11	7	11	4	8	4	x	1	4	3	5	3	7	7	11	13
12	13	14	14	12	11	12	8	12	5	7	4	1	x	3	4	6	3	8	7	11	13
13	13	14	14	11	11	11	8	11	6	7	4	4	3	x	3	5	3	4	4	10	12
14	8	10	10	8	7	7	5	7	2	3	1	3	4	3	x	1	2	6	6	7	8
15	11	11	12	10	8	9	6	9	4	3	3	5	6	5	1	x	4	8	9	10	11
16	11	12	12	10	9	10	7	9	5	5	2	3	3	3	2	4	x	6	5	9	12
17	14	16	16	14	13	13	11	14	9	10	6	7	8	4	6	8	6	x	3	14	16
18	14	16	15	14	13	13	11	14	9	9	6	7	7	4	6	9	5	3	x	6	17
19	4	9	8	7	7	5	9	11	10	6	8	11	11	10	7	10	9	14	6	x	6
20	3	6	6	5	5	3	6	7	11	6	10	13	13	12	8	11	12	16	17	6	x

Dakle, početna relacija je  $0 \rightarrow 5$ . Nadalje se stupac koji pripada lokaciji 5 križa i traži se sljedeća najbliža vrijednost. Stupac 0 ne uzima se u razmatranje sve do posljednjeg koraka. Lokaciji 5 najbliža je lokacija 20, koja je udaljena 3 minute, kao što je prikazano u [Tablica 27].

Tablica 27. Odabir sljedeće najbliže lokacije

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	x	6	6	5	5	5	8	8	11	4	10	13	13	13	8	11	11	14	14	4	3
1	6	X	2	4	4	6	8	8	11	10	11	13	14	14	10	11	12	16	16	9	6
2	6	2	X	3	4	5	7	7	11	9	11	13	14	14	10	12	12	16	15	8	6
3	5	4	3	X	2	5	6	6	10	8	9	12	12	11	8	10	10	14	14	7	5
4	5	4	4	2	X	4	6	6	9	8	9	11	11	11	7	8	9	13	13	7	5
5	1	6	5	5	4	X	7	7	10	5	9	11	12	11	7	9	10	13	13	5	3
6	8	8	7	6	6	7	X	3	4	6	6	7	8	8	5	6	7	11	11	9	6
7	8	8	7	6	6	7	3	X	8	8	9	11	12	11	7	9	9	14	14	11	7
8	11	11	11	10	9	10	4	8	X	5	4	4	5	6	2	4	5	9	9	10	11
9	4	10	9	8	8	9	6	8	5	X	5	8	7	7	3	3	5	10	9	6	6
10	10	11	11	9	9	9	6	9	4	5	X	4	4	4	1	3	2	6	6	8	10
11	13	13	13	12	11	11	7	11	4	8	4	X	1	4	3	5	3	7	7	11	13
12	13	14	14	12	11	12	8	12	5	7	4	1	X	3	4	6	3	8	7	11	13
13	13	14	14	11	11	11	8	11	6	7	4	4	3	X	3	5	3	4	4	10	12
14	8	10	10	8	7	7	5	7	2	3	1	3	4	3	X	1	2	6	6	7	8
15	11	11	12	10	8	9	6	9	4	3	3	5	6	5	1	X	4	8	9	10	11
16	11	12	12	10	9	10	7	9	5	5	2	3	3	3	2	4	X	6	5	9	12
17	14	16	16	14	13	13	11	14	9	10	6	7	8	4	6	8	6	X	3	14	16
18	14	16	15	14	13	13	11	14	9	9	6	7	7	4	6	9	5	3	X	6	17
19	4	9	8	7	7	8	9	11	10	6	8	11	11	10	7	10	9	14	6	X	6
20	3	6	6	5	5	5	6	7	11	6	10	13	13	12	8	11	12	16	17	6	X

U rutu se dodaje lokacija 20 i ona trenutno glasi:  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 20$ . Postupak se ponavlja i traži se sljedeća najbliža lokacija. Iz tablice 26 vidljivo je da sada postoje dvije opcije – lokacija 3 i 4. Obje su jednako udaljene od lokacije 20. Moguće je provesti algoritam do kraja za oba slučaja te usporediti dobivene rute i izabrati kraću, međutim u ovom slučaju proizvoljno je odabrana lokacija 4, kao što je prikazano u [Tablica 28].

Tablica 28. Odabir sljedeće najbliže lokacije

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	x	6	6	5	5	5	8	8	11	4	10	13	13	13	8	11	11	14	14	4	3
1	6	X	2	4	4	6	8	8	11	10	11	13	14	14	10	11	12	16	16	9	6
2	6	2	X	3	4	5	7	7	11	9	11	13	14	14	10	12	12	16	15	8	6
3	5	4	3	X	2	3	6	6	10	8	9	12	12	11	8	10	10	14	14	7	5
4	5	4	4	2	X	4	6	6	9	8	9	11	11	11	7	8	9	13	13	7	5
5	1	6	5	5	4	X	7	7	10	5	9	11	12	11	7	9	10	13	13	5	3
6	8	8	7	6	6	7	X	3	4	6	6	7	8	8	5	6	7	11	11	9	6
7	8	8	7	6	6	7	3	X	8	8	9	11	12	11	7	9	9	14	14	11	7
8	11	11	11	10	9	10	4	8	X	5	4	4	5	6	2	4	5	9	9	10	11
9	4	10	9	8	8	9	6	8	5	X	5	8	7	7	3	3	5	10	9	6	6
10	10	11	11	9	9	9	6	9	4	5	X	4	4	4	1	3	2	6	6	8	10
11	13	13	13	12	11	11	7	11	4	8	4	X	1	4	3	5	3	7	7	11	13
12	13	14	14	12	11	12	8	12	5	7	4	1	X	3	4	6	3	8	7	11	13
13	13	14	14	11	11	11	8	11	6	7	4	4	3	X	3	5	3	4	4	10	12
14	8	10	10	8	7	7	5	7	2	3	1	3	4	3	X	1	2	6	6	7	8
15	11	11	12	10	8	9	6	9	4	3	3	5	6	5	1	X	4	8	9	10	11
16	11	12	12	10	9	10	7	9	5	5	2	3	3	3	2	4	X	6	5	9	12
17	14	16	16	14	13	13	11	14	9	10	6	7	8	4	6	8	6	X	3	14	16
18	14	16	15	14	13	13	11	14	9	9	6	7	7	4	6	9	5	3	X	6	17
19	4	9	8	7	7	8	9	11	10	6	8	11	11	10	7	10	9	14	6	X	5
20	3	6	6	5	5	5	6	7	11	6	10	13	13	12	8	11	12	16	17	6	X

Trenutna ruta je sljedeća:  $0 \rightarrow 5 \rightarrow 20 \rightarrow 4$ . Ovi koraci se ponavljaju dalje sve dok sve lokacije nisu iskorištene i povezane u rutu. U posljednjem koraku potrebno je zadnju lokaciju u ruti povezati sa skladištem. Konačna ruta glasi:

$0 \rightarrow 5 \rightarrow 20 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 14 \rightarrow 10 \rightarrow 16 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 9 \rightarrow 15 \rightarrow 8 \rightarrow 0$ .

Ukupno trajanje rute iznosi:

$$D = 1 + 3 + 5 + 2 + 3 + 2 + 8 + 3 + 7 + 1 + 2 + 3 + 1 + 3 + 4 + 3 + 6 + 6 + 3 + 4 + 11$$

$$D = 81 \text{ min}$$

Dakle, prema algoritmu najbližeg susjeda, potrebno vrijeme za rutu iznosi 81 minutu.

## 8.4.1.3. Algoritam grananja i ograničavanja

I treća metoda pomoću koje će se slagati ruta je algoritam grananja i ograničavanja. Prvi korak također predstavlja izradu tablice udaljenosti, koja je jednaka kao i za prethodan algoritam. Zatim je potrebno pronaći i i izdvojiti elemente s minimalnih vrijednostima u svakom retku, kao što je prikazano u [Tablica 29].

Tablica 29. Ponalazak minimalnih elemenata u svakom retku

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	min
0		6	6	5	5	1	8	8	11	4	10	13	13	13	8	11	11	14	14	4	3	1
1	6		2	4	4	6	8	8	11	10	11	13	14	14	10	11	12	16	16	9	6	2
2	6	2		3	4	5	7	7	11	9	11	13	14	14	10	12	12	16	15	8	6	2
3	5	4	3		2	5	6	6	10	8	9	12	12	11	8	10	10	14	14	7	5	2
4	5	4	4	2		4	6	6	9	8	9	11	11	11	7	8	9	13	13	7	5	2
5	1	6	5	5	4		7	7	10	5	9	11	12	11	7	9	10	13	13	5	3	1
6	8	8	7	6	6	7		3	4	6	6	7	8	8	5	6	7	11	11	9	6	3
7	8	8	7	6	6	7	3		8	8	9	11	12	11	7	9	9	14	14	11	7	3
8	11	11	11	10	9	10	4	8		5	4	4	5	6	2	4	5	9	9	10	11	2
9	4	10	9	8	8	5	6	8	5		5	8	7	7	3	3	5	10	9	6	6	3
10	10	11	11	9	9	9	6	9	4	5		4	4	4	1	3	2	6	6	8	10	1
11	13	13	13	12	11	11	7	11	4	8	4		1	4	3	5	3	7	7	11	13	1
12	13	14	14	12	11	12	8	12	5	7	4	1		3	4	6	3	8	7	11	13	1
13	13	14	14	11	11	11	8	11	6	7	4	4	3		3	5	3	4	4	10	12	3
14	8	10	10	8	7	7	5	7	2	3	1	3	4	3		1	2	6	6	7	8	1
15	11	11	12	10	8	9	6	9	4	3	3	5	6	5	1		4	8	9	10	11	1
16	11	12	12	10	9	10	7	9	5	5	2	3	3	3	2	4		6	5	9	12	2
17	14	16	16	14	13	13	11	14	9	10	6	7	8	4	6	8	6		3	14	16	3
18	14	16	15	14	13	13	11	14	9	9	6	7	7	4	6	9	5	3		6	17	3
19	4	9	8	7	7	5	9	11	10	6	8	11	11	10	7	10	9	14	6		6	4
20	3	6	6	5	5	3	6	7	11	6	10	13	13	12	8	11	12	16	17	6		3
Σ																						44

Sljedeći korak je oduzimanje izdvojenih vrijednosti od svih vrijednosti u pripadajućim retcima. Tako se od prvog retka oduzima 1, od drugog 2, i tako dalje. Dobivene vrijednosti prikazane su u [Tablica 30].

Tablica 30. Tablica nakon provedenog oduzimanja

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		5	5	4	4	0	7	7	10	3	9	12	12	12	7	10	10	13	13	3	2
1	4		0	2	2	4	6	6	9	8	9	11	12	12	8	9	10	14	14	7	4
2	4	0		1	2	3	5	5	9	7	9	11	12	12	8	10	10	14	13	6	4
3	3	2	1		0	3	4	4	8	6	7	10	10	9	6	8	8	12	12	5	3
4	3	2	2	0		2	4	4	7	6	7	9	9	9	5	6	7	11	11	5	3
5	0	5	4	4	3		6	6	9	4	8	10	11	10	6	8	9	12	12	4	2
6	5	5	4	3	3	4		0	1	3	3	4	5	5	2	3	4	8	8	6	3
7	5	5	4	3	3	4	0		5	5	6	8	9	8	4	6	6	11	11	8	4
8	9	9	9	8	7	8	2	6		3	2	2	3	4	0	2	3	7	7	8	9
9	1	7	6	5	5	2	3	5	2		2	5	4	4	0	0	2	7	6	3	3
10	9	10	10	8	8	8	5	8	3	4		3	3	3	0	2	1	5	5	7	9
11	12	12	12	11	10	10	6	10	3	7	3		0	3	2	4	2	6	6	10	12
12	12	13	13	11	10	11	7	11	4	6	3	0		2	3	5	2	7	6	10	12
13	10	11	11	8	8	8	5	8	3	4	1	1	0		0	2	0	1	1	7	9
14	7	9	9	7	6	6	4	6	1	2	0	2	3	2		0	1	5	5	6	7
15	10	10	11	9	7	8	5	8	3	2	2	4	5	4	0		3	7	8	9	10
16	9	10	10	8	7	8	5	7	3	3	0	1	1	1	0	2		4	3	7	10
17	11	13	13	11	10	10	8	11	6	7	3	4	5	1	3	5	3		0	11	13
18	11	13	12	11	10	10	8	11	6	6	3	4	4	1	3	6	2	0		3	14
19	0	5	4	3	3	1	5	7	6	2	4	7	7	6	3	6	5	10	2		2
20	0	3	3	2	2	0	3	4	8	3	7	10	10	9	5	8	9	13	14	3	

Sljedeći korak je pronalazak minimalnih vrijednosti u svakom stupcu. One su izdvojene i prikazane u [Tablica 31].

Tablica 31. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ
0		5	5	4	4	0	7	7	10	3	9	12	12	12	7	10	10	13	13	3	2	9
1	4		0	2	2	4	6	6	9	8	9	11	12	12	8	9	10	14	14	7	4	
2	4	0		1	2	3	5	5	9	7	9	11	12	12	8	10	10	14	13	6	4	
3	3	2	1		0	3	4	4	8	6	7	10	10	9	6	8	8	12	12	5	3	
4	3	2	2	0		2	4	4	7	6	7	9	9	9	5	6	7	11	11	5	3	
5	0	5	4	4	3		6	6	9	4	8	10	11	10	6	8	9	12	12	4	2	
6	5	5	4	3	3	4		0	1	3	3	4	5	5	2	3	4	8	8	6	3	
7	5	5	4	3	3	4	0		5	5	6	8	9	8	4	6	6	11	11	8	4	
8	9	9	9	8	7	8	2	6		3	2	2	3	4	0	2	3	7	7	8	9	
9	1	7	6	5	5	2	3	5	2		2	5	4	4	0	0	2	7	6	3	3	
10	9	10	10	8	8	8	5	8	3	4		3	3	3	0	2	1	5	5	7	9	
11	12	12	12	11	10	10	6	10	3	7	3		0	3	2	4	2	6	6	10	12	
12	12	13	13	11	10	11	7	11	4	6	3	0		2	3	5	2	7	6	10	12	
13	10	11	11	8	8	8	5	8	3	4	1	1	0		0	2	0	1	1	7	9	
14	7	9	9	7	6	6	4	6	1	2	0	2	3	2		0	1	5	5	6	7	
15	10	10	11	9	7	8	5	8	3	2	2	4	5	4	0		3	7	8	9	10	
16	9	10	10	8	7	8	5	7	3	3	0	1	1	1	0	2		4	3	7	10	
17	11	13	13	11	10	10	8	11	6	7	3	4	5	1	3	5	3		0	11	13	
18	11	13	12	11	10	10	8	11	6	6	3	4	4	1	3	6	2	0		3	14	
19	0	5	4	3	3	1	5	7	6	2	4	7	7	6	3	6	5	10	2		2	
20	0	3	3	2	2	0	3	4	8	3	7	10	10	9	5	8	9	13	14	3		
min	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	2	9

Nadalje se ponovno provodi oduzimanje, ali sada po stupcima. U većini stupaca minimalne vrijednosti su 0, te se ti stupci neće mijenjati. Stupci 8 i 13 umanjit će se za 1, stupaci 9 i 20 za 2, a stupac 19 za 3, kao što je prikazano u [Tablica 32].

**Tablica 32. Tablica nakon provedenog oduzimanja**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		5	5	4	4	0	7	7	9	1	9	12	12	11	7	10	10	13	13	0	0
1	4		0	2	2	4	6	6	8	6	9	11	12	11	8	9	10	14	14	4	2
2	4	0		1	2	3	5	5	8	5	9	11	12	11	8	10	10	14	13	3	2
3	3	2	1		0	3	4	4	7	4	7	10	10	8	6	8	8	12	12	2	1
4	3	2	2	0		2	4	4	6	4	7	9	9	8	5	6	7	11	11	2	1
5	0	5	4	4	3		6	6	8	2	8	10	11	9	6	8	9	12	12	1	0
6	5	5	4	3	3	4		0	0	1	3	4	5	4	2	3	4	8	8	3	1
7	5	5	4	3	3	4	0		4	3	6	8	9	7	4	6	6	11	11	5	2
8	9	9	9	8	7	8	2	6		1	2	2	3	3	0	2	3	7	7	5	7
9	1	7	6	5	5	2	3	5	1		2	5	4	3	0	0	2	7	6	0	1
10	9	10	10	8	8	8	5	8	2	2		3	3	2	0	2	1	5	5	4	7
11	12	12	12	11	10	10	6	10	2	5	3		0	2	2	4	2	6	6	7	10
12	12	13	13	11	10	11	7	11	3	4	3	0		1	3	5	2	7	6	7	10
13	10	11	11	8	8	8	5	8	2	2	1	1	0		0	2	0	1	1	4	7
14	7	9	9	7	6	6	4	6	0	0	0	2	3	1		0	1	5	5	3	5
15	10	10	11	9	7	8	5	8	2	0	2	4	5	3	0		3	7	8	6	8
16	9	10	10	8	7	8	5	7	2	1	0	1	1	0	0	2		4	3	4	8
17	11	13	13	11	10	10	8	11	5	5	3	4	5	0	3	5	3		0	8	11
18	11	13	12	11	10	10	8	11	5	4	3	4	4	0	3	6	2	0		0	12
19	0	5	4	3	3	1	5	7	5	0	4	7	7	5	3	6	5	10	2		0
20	0	3	3	2	2	0	3	4	7	1	7	10	10	8	5	8	9	13	14	0	

Sljedeći korak algoritma je izračun donje granice. Ona se računa kao zbroj sume minimalnih vrijednosti elemenata iz svakog retka i sume minimalnih vrijednosti elemenata iz svakog stupca i iznosi:

$$D.G. = 44 + 9 = 53$$

Zatim je potrebno izračunati kazne za svako polje čija je vrijednost jednaka nuli. Kazna za određeno polje (i,j) se računa tako da se zbroji vrijednost minimalnog elementa u i-tom retku i vrijednost minimalnog elementa u j-tom elementu, a da se pritom ne uzima u obzir polje (i,j). Prema tome, kazna za nulu u prvom retku i drugom stupcu je zbroj minimalne vrijednosti u prvom retku, što je 2, i minimalne vrijednosti u drugom stupcu, koja je 1. Dakle, vrijednost

kazne za polje (1,2) iznosi 3 i obilježava se u zagradi pored nule. Prema istom principu se računaju i kazne za ostale elemente, što je prikazano u [Tablica 33].

**Tablica 33. Izračun kazni**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		5	5	4	4	0 (0)	7	7	9	1	9	12	12	11	7	10	10	13	13	0 (0)	0 (0)
1	4		0 (3)	2	2	4	6	6	8	6	9	11	12	11	8	9	10	14	14	4	2
2	4	0 (3)		1	2	3	5	5	8	5	9	11	12	11	8	10	10	14	13	3	2
3	3	2	1		0 (3)	3	4	4	7	4	7	10	10	8	6	8	8	12	12	2	1
4	3	2	2	0 (2)		2	4	4	6	4	7	9	9	8	5	6	7	11	11	2	1
5	0 (0)	5	4	4	3		6	6	8	2	8	10	11	9	6	8	9	12	12	1	0 (0)
6	5	5	4	3	3	4		0 (4)	0 (0)	1	3	4	5	4	2	3	4	8	8	3	1
7	5	5	4	3	3	4	0 (4)		4	3	6	8	9	7	4	6	6	11	11	5	2
8	9	9	9	8	7	8	2	6		1	2	2	3	3	0 (1)	2	3	7	7	5	7
9	1	7	6	5	5	2	3	5	1		2	5	4	3	0 (0)	0 (0)	2	7	6	0 (0)	1
10	9	10	10	8	8	8	5	8	2	2		3	3	2	0 (1)	2	1	5	5	4	7
11	12	12	12	11	10	10	6	10	2	5	3		0 (2)	2	2	4	2	6	6	7	10
12	12	13	13	11	10	11	7	11	3	4	3	0 (2)		1	3	5	2	7	6	7	10
13	10	11	11	8	8	8	5	8	2	2	1	1	0 (0)		0 (0)	2	0 (1)	1	1	4	7
14	7	9	9	7	6	6	4	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	3	1		0 (0)	1	5	5	3	5
15	10	10	11	9	7	8	5	8	2	0 (0)	2	4	5	3	0 (0)		3	7	8	6	8
16	9	10	10	8	7	8	5	7	2	1	0 (0)	1	1	0 (0)	0 (0)	2		4	3	4	8
17	11	13	13	11	10	10	8	11	5	5	3	4	5	0 (0)	3	5	3		0 (1)	8	11
18	11	13	12	11	10	10	8	11	5	4	3	4	4	0 (0)	3	6	2	0 (1)		0 (0)	12
19	0 (0)	5	4	3	3	1	5	7	5	0 (0)	4	7	7	5	3	6	5	10	2		0 (0)
20	0 (0)	3	3	2	2	0 (0)	3	4	7	1	7	10	10	8	5	8	9	13	14	0 (0)	

Iz tablice se odabire element u kojem se nalazi najveća kazna. Elementi (7,6) i (6,7) imaju jednaku vrijednosti kazne, koja iznosi 4. Odabire se element (7,6). Na temelju toga se stvara prva relacija rute,  $7 \rightarrow 6$ . U sljedećem koraku se reducira tablica, na način da se uklanjaju redak i stupac elementa s najvećom kaznom. U novoj tablici se također mora prekriziti polje (6,7) kako bi se izbjeglo zatvaranje rute. Svi redovi i stupci sadrže nule te neće biti potrebno provesti oduzimanje, već se odmah mogu izračunati kazne, koje su vidljive u [Tablica 34].

Tablica 34. Izračun kazni

	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		5	5	4	4	0 (0)	7	9	1	9	12	12	11	7	10	10	13	13	0 (0)	0 (0)
1	4		0 (3)	2	2	4	6	8	6	9	11	12	11	8	9	10	14	14	4	2
2	4	0 (3)		1	2	3	5	8	5	9	11	12	11	8	10	10	14	13	3	2
3	3	2	1		0 (3)	3	4	7	4	7	10	10	8	6	8	8	12	12	2	1
4	3	2	2	0 (2)		2	4	6	4	7	9	9	8	5	6	7	11	11	2	1
5	0 (0)	5	4	4	3		6	8	2	8	10	11	9	6	8	9	12	12	1	0 (0)
6	5	5	4	3	3	4		0 (1)	1	3	4	5	4	2	3	4	8	8	3	1
8	9	9	9	8	7	8	6		1	2	2	3	3	0 (1)	2	3	7	7	5	7
9	1	7	6	5	5	2	5	1		2	5	4	3	0 (0)	0 (0)	2	7	6	0 (0)	1
10	9	10	10	8	8	8	8	2	2		3	3	2	0 (1)	2	1	5	5	4	7
11	12	12	12	11	10	10	10	2	5	3		0 (2)	2	2	4	2	6	6	7	10
12	12	13	13	11	10	11	11	3	4	3	0 (2)		1	3	5	2	7	6	7	10
13	10	11	11	8	8	8	8	2	2	1	1	0 (0)		0 (0)	2	0 (1)	1	1	4	7
14	7	9	9	7	6	6	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	3	1		0 (0)	1	5	5	3	5
15	10	10	11	9	7	8	8	2	0 (0)	2	4	5	3	0 (0)		3	7	8	6	8
16	9	10	10	8	7	8	7	2	1	0 (0)	1	1	0 (0)	0 (0)	2		4	3	4	8
17	11	13	13	11	10	10	11	5	5	3	4	5	0 (0)	3	5	3		0 (1)	8	11
18	11	13	12	11	10	10	11	5	4	3	4	4	0 (0)	3	6	2	0 (1)		0 (0)	12
19	0 (0)	5	4	3	3	1	7	5	0 (0)	4	7	7	5	3	6	5	10	2		0 (0)
20	0 (0)	3	3	2	2	0 (0)	4	7	1	7	10	10	8	5	8	9	13	14	0 (0)	

Iz tablice se može vidjeti kako najveća kazna iznosi 3 i pripada elementima u poljima (1,2), (2,1) te (3,4). Odabiru se elementi 1 i 2. To znači da se između prvog retka i drugog stupca stvara nova relacija:  $1 \rightarrow 2$ . Zatim se ponovno uklanjaju taj redak i stupac te se dobije nova reducirana matrica, koja ne sadrži barem jednu nulu u svakom retku i stupcu. U [Tablica 35] je vidljivo kako će se samo stupac 7 promijeniti. Sve vrijednosti u tom stupcu moraju se umanjiti za 4.



Tablica 35. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu

	0	1	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		5	4	4	0 (0)	7	9	1	9	12	12	11	7	10	10	13	13	0 (0)	0 (0)
2	4		1	2	3	5	8	5	9	11	12	11	8	10	10	14	13	3	2
3	3	2		0 (3)	3	4	7	4	7	10	10	8	6	8	8	12	12	2	1
4	3	2	0 (2)		2	4	6	4	7	9	9	8	5	6	7	11	11	2	1
5	0 (0)	5	4	3		6	8	2	8	10	11	9	6	8	9	12	12	1	0 (0)
6	5	5	3	3	4		0 (1)	1	3	4	5	4	2	3	4	8	8	3	1
8	9	9	8	7	8	6		1	2	2	3	3	0 (1)	2	3	7	7	5	7
9	1	7	5	5	2	5	1		2	5	4	3	0 (0)	0 (0)	2	7	6	0 (0)	1
10	9	10	8	8	8	8	2	2		3	3	2	0 (1)	2	1	5	5	4	7
11	12	12	11	10	10	10	2	5	3		0 (2)	2	2	4	2	6	6	7	10
12	12	13	11	10	11	11	3	4	3	0 (2)		1	3	5	2	7	6	7	10
13	10	11	8	8	8	8	2	2	1	1	0 (0)		0 (0)	2	0 (1)	1	1	4	7
14	7	9	7	6	6	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	3	1		0 (0)	1	5	5	3	5
15	10	10	9	7	8	8	2	0 (0)	2	4	5	3	0 (0)		3	7	8	6	8
16	9	10	8	7	8	7	2	1	0 (0)	1	1	0 (0)	0 (0)	2		4	3	4	8
17	11	13	11	10	10	11	5	5	3	4	5	0 (0)	3	5	3		0 (1)	8	11
18	11	13	11	10	10	11	5	4	3	4	4	0 (0)	3	6	2	0 (1)		0 (0)	12
19	0 (0)	5	3	3	1	7	5	0 (0)	4	7	7	5	3	6	5	10	2		0 (0)
20	0 (0)	3	2	2	0 (0)	4	7	1	7	10	10	8	5	8	9	13	14	0 (0)	
min	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nakon oduzimanja, ponovno se računaju kazne, po istom principu kao i ranije. Najveća kazna iznosi 2 i nalazi se u poljima (3,4), (4,3), (11,12) te (12,11), kao što je vidljivo iz [Tablica 36].

Tablica 36. Izračun kazni

	0	1	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		5	4	4	0 (0)	3	9	1	9	12	12	11	7	10	10	13	13	0 (0)	0 (0)
2	4		1	2	3	1	8	5	9	11	12	11	8	10	10	14	13	3	2
3	3	2		0 (2)	3	0 (0)	7	4	7	10	10	8	6	8	8	12	12	2	1
4	3	2	0 (2)		2	0 (0)	6	4	7	9	9	8	5	6	7	11	11	2	1
5	0 (0)	5	4	3		2	8	2	8	10	11	9	6	8	9	12	12	1	0 (0)
6	5	5	3	3	4		0 (1)	1	3	4	5	4	2	3	4	8	8	3	1
8	9	9	8	7	8	2		1	2	2	3	3	0 (1)	2	3	7	7	5	7
9	1	7	5	5	2	1	1		2	5	4	3	0 (0)	0 (0)	2	7	6	0 (0)	1
10	9	10	8	8	8	4	2	2		3	3	2	0 (1)	2	1	5	5	4	7
11	12	12	11	10	10	6	2	5	3		0 (2)	2	2	4	2	6	6	7	10
12	12	13	11	10	11	7	3	4	3	0 (2)		1	3	5	2	7	6	7	10
13	10	11	8	8	8	4	2	2	1	1	0 (0)		0 (0)	2	0 (1)	1	1	4	7
14	7	9	7	6	6	2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	3	1		0 (0)	1	5	5	3	5
15	10	10	9	7	8	4	2	0 (0)	2	4	5	3	0 (0)		3	7	8	6	8
16	9	10	8	7	8	3	2	1	0 (0)	1	1	0 (0)	0 (0)	2		4	3	4	8
17	11	13	11	10	10	7	5	5	3	4	5	0 (0)	3	5	3		0 (1)	8	11
18	11	13	11	10	10	7	5	4	3	4	4	0 (0)	3	6	2	0 (1)		0 (0)	12
19	0 (0)	5	3	3	1	3	5	0 (0)	4	7	7	5	3	6	5	10	2		0 (0)
20	0 (0)	3	2	2	0 (0)	0 (0)	7	1	7	10	10	8	5	8	9	13	14	0 (0)	
min	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Odabire se element (3,4) i stvara se nova relacija  $3 \rightarrow 4$ . Pritom se briše treći redak i četvrti stupac. Nova reducirana matrica ponovno neće sadržavati nule u svim retcima i stupcima te će biti potrebno provesti oduzimanje. Nakon toga ponovno se računaju kazne i prema najvećoj se povezuje nova relacija. Postupak se ponavlja sve dok se sve relacije ne povežu u konačnu rutu. U zadnjem koraku matrica je reducirana na dva retka i dva stupca, kao što je prikazano u [Tablica 37].

**Tablica 37. Reducirana matrica**

	0	20
5		0 (0)
9	0 (0)	0 (0)

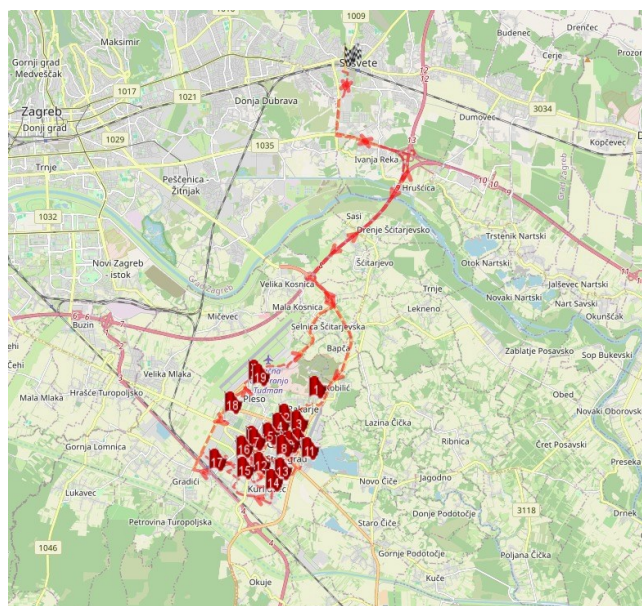
Kako bi se algoritam priveo kraju, potrebno je povezati i posljednja dva para lokacija, a iz tablice je očito da su to relacije  $5 \rightarrow 20$  i  $9 \rightarrow 0$ . Konačna ruta glasi:

$0 \rightarrow 5 \rightarrow 20 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 10 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 9 \rightarrow 0$ .

Ukupno trajanje rute iznosi 54 minute.

#### 8.4.2. Ruta 2

Odabrane lokacije za drugu rutu nalaze se na području Velike Gorice. Ruta generirana iz DPD sustava prikazana je na [Slika 30].



**Slika 30. Prikaz druge rute**

Ukupno potrebno vrijeme za dostavu na sve lokacije iznosi 40 minuta. Kao što je bio slučaj i u prethodnoj ruti, u to vrijeme nije uračunato vrijeme potrebno za dolazak iz skladišta na prvu lokaciju niti vrijeme potrebno za povratak u skladište nakon dostave. Kada se to uzme u obzir, ukupno vrijeme za prvu rutu iznosi 80 minuta. U [Tablica 38] vidljiv je redoslijed dostava po lokacijama, vremenski okviri unutar kojih je potrebno izvršiti dostavu te procijenjeno vrijeme dostave (ETA).

**Tablica 38. Dobiveni podaci o drugoj ruti**

optimised stop sequence	Address	time frame from	time frame to	ETA
1	LOKACIJA 5	13:02:00	14:02:00	13:32:00
2	LOKACIJA 18	13:04:00	14:04:00	13:34:00
3	LOKACIJA 6	13:06:00	14:06:00	13:36:00
4	LOKACIJA 19	13:08:00	14:08:00	13:38:00
5	LOKACIJA 20	13:10:00	14:10:00	13:40:00
6	LOKACIJA 11	13:12:00	14:12:00	13:42:00
7	LOKACIJA 12	13:14:00	14:14:00	13:44:00
8	LOKACIJA 17	13:17:00	14:17:00	13:47:00
9	LOKACIJA 8	13:18:00	14:18:00	13:48:00
10	LOKACIJA 16	13:19:00	14:19:00	13:49:00
11	LOKACIJA 15	13:21:00	14:21:00	13:51:00
12	LOKACIJA 14	13:24:00	14:24:00	13:54:00
13	LOKACIJA 9	13:26:00	14:26:00	13:56:00
14	LOKACIJA 10	13:27:00	14:27:00	13:57:00
15	LOKACIJA 13	13:29:00	14:29:00	13:59:00
16	LOKACIJA 1	13:31:00	14:31:00	14:01:00
17	LOKACIJA 7	13:35:00	14:35:00	14:05:00
18	LOKACIJA 2	13:38:00	14:38:00	14:08:00
19	LOKACIJA 3	13:41:00	14:41:00	14:11:00
20	LOKACIJA 4	13:42:00	14:42:00	14:12:00

Iz tablice se vidi da ruta dobivena optimizatorom glasi:

0 → 5 → 18 → 6 → 19 → 20 → 11 → 12 → 17 → 8 → 16 → 15 → 14 → 9 → 10 → 13 → 1 → 7 → 2 → 3 → 4 → 0.

#### 8.4.2.1. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta

Kao i u prethodnoj ruti, prvi algoritam je algoritam ušteda Clarka i Wrighta. Prvi korak je izrada tablice troškova, koja je prikazana u [Tablica 39].

Tablica 39. Tablica troškova za drugu rutu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	X	25	23	25	21	19	22	22	24	22	23	25	25	23	24	23	22	23	21	22	23
1		X	5	8	8	7	6	6	5	4	4	3	5	2	2	9	7	6	6	5	4
2			X	3	3	5	6	6	6	6	7	3	6	6	6	8	8	7	5	6	4
3				X	1	5	5	5	7	7	8	7	9	9	8	7	6	7	4	5	6
4					X	6	6	6	8	8	9	6	9	9	8	8	7	9	5	6	7
5						X	3	3	5	5	6	6	7	8	6	5	4	6	2	3	4
6							X	1	3	4	6	5	6	7	5	4	1	3	2	2	3
7								X	3	5	5	4	5	6	4	4	1	4	1	1	2
8									X	4	5	5	6	7	5	3	1	1	3	2	3
9										X	1	5	4	3	2	5	3	1	6	4	4
10											X	5	4	2	2	6	5	3	6	5	4
11												X	2	5	3	6	4	3	4	3	1
12													X	4	3	7	5	4	6	4	3
13														X	2	8	6	5	7	6	4
14															X	6	4	3	5	4	2
15																X	3	4	5	5	5
16																	X	3	4	3	4
17																		X	5	4	4
18																			X	2	3
19																				X	2
20																					X

Sljedeći korak je izračun ušteta. Ušteta koja bi se ostvarila povezivanjem lokacije 1 i lokacije 2 bila bi jednaka zbroju udaljenosti od skladišta do prve lokacije i od skladišta do druge lokacije umanjenom za udaljenost između prve i druge lokacije:

$$S_{1,2} = c_{1,0} + c_{0,2} - c_{1,2}$$

$$S_{1,2} = 25 + 23 - 5 = 43$$

Na isti način računaju se i preostale uštete i prikazane se u [Tablica 40].

Tablica 40. Tablica ušteda za drugu rutu

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	X	43	42	38	37	41	41	44	43	44	47	45	46	47	39	40	42	40	42	44
2		X	45	41	37	39	39	41	39	39	45	42	40	41	38	37	39	39	39	42
3			X	45	39	42	42	42	40	40	43	41	39	41	41	41	41	42	42	42
4				X	34	37	37	37	35	35	40	37	35	37	36	36	35	37	37	37
5					X	38	38	38	36	36	38	37	34	37	37	37	36	38	38	38
6						X	27	27	24	23	26	25	22	25	25	27	26	25	26	26
7							X	43	39	40	43	42	39	42	41	43	41	42	43	43
8								X	42	42	44	43	40	43	44	45	46	42	44	44
9									X	44	42	43	42	44	40	41	44	37	40	41
10										X	43	44	44	45	40	40	43	38	40	42
11											X	48	43	46	42	43	45	42	44	47
12												X	44	46	41	42	44	40	43	45
13													X	45	38	39	41	37	39	42
14														X	41	42	44	40	42	45
15															X	42	42	39	40	41
16																X	42	39	41	41
17																	X	39	41	42
18																		X	23	24
19																			X	43
20																				X

Sljedeći korak je sortiranje ušteda od najveće prema najmanjoj i stvaranje relacija među lokacijama. Najveća ušteda u tablici iznosi 48 i dobiva se povezivanjem lokacija 11 i 12. Prema tome, prva podruta glasi:  $0 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 0$ .

Sljedeća najveća ušteda iznosi 47, a ostvaruje se stvaranjem relacija između lokacija 1 i 11, lokacija 1 i 14 te lokacija 11 i 20. S obzirom da se lokacija 11 može povezati sa još samo jednom od preostalih lokacije, odabire se povezivanje sa lokacijom 1 i stvaraju se sljedeće podrute:  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 11 \rightarrow 0$  i  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 14 \rightarrow 0$ . Navedene podrute je moguće povezati sa prethodnom i dobije se podruta  $0 \rightarrow 14 \rightarrow 1 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 0$ .

Sljedeća po redu ušteda dobiva se povezivanjem sljedećih lokacija: 1 i 13, 8 i 17, 11 i 14 te 12 i 14. Lokacije 1 i 11 su već unutanji čvorovi u ruti te se ne mogu više povezivati. Također nije moguće niti povezati relaciju  $12 \rightarrow 14$  jer bi se u tom slučaju podruta zatvorila u krug. Jedina podruta koja se stvara u ovom koraku je  $0 \rightarrow 8 \rightarrow 17 \rightarrow 0$ .

Postupak se nastavlja redom i za sve preostale uštede, a konačna ruta glasi:

0 → 6 → 5 → 18 → 15 → 17 → 8 → 16 → 7 → 19 → 13 → 9 → 10 → 14 → 1 → 11 → 12  
→ 20 → 2 → 3 → 4 → 0.

Još je potrebno zbrojiti udaljenosti između svih lokacija uz pomoć tablice troškova. Prema tome, ukupno potrebno vrijeme za drugu rutu prema algoritmu ušteta Clarka i Wrighta iznosi 91 minutu.

#### 8.4.2.2. Algoritam najbližeg susjeda

Sljedeći algoritam je algoritam najbližeg susjeda. Prvi korak je izrada tablice troškova, a nakon toga se redom povezuju lokacije pronalaskom najmanjih udaljenosti, počevši od lokacije koja je najbliža skladištu. Iz [Tablica 41] može se vidjeti kako je lokacija 5 najbliža početnoj lokaciji 0, a udaljena je 19 minuta.

**Tablica 41. Odabir najbliže lokacije od početne točke**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	X	25	23	25	21	19	22	22	24	22	23	25	25	23	24	23	22	23	21	22	23
1	25	X	5	8	8	7	6	6	5	4	4	3	5	2	2	9	7	6	6	5	4
2	23	5	X	3	3	5	6	6	6	6	7	3	6	6	6	8	8	7	5	6	4
3	25	8	3	X	1	5	5	5	7	7	8	7	9	9	8	7	6	7	4	5	6
4	21	8	3	1	X	6	6	6	8	8	9	6	9	9	8	8	7	9	5	6	7
5	19	7	5	5	6	X	3	3	5	5	6	6	7	8	6	5	4	6	2	3	4
6	22	6	6	5	6	3	X	1	3	4	6	5	6	7	5	4	1	3	2	2	3
7	22	6	6	5	6	3	1	X	3	5	5	4	5	6	4	4	1	4	1	1	2
8	24	5	6	7	8	5	3	3	X	4	5	5	6	7	5	3	1	1	3	2	3
9	22	4	6	7	8	5	4	5	4	X	1	5	4	3	2	5	3	1	6	4	4
10	23	4	7	8	9	6	6	5	5	1	X	5	4	2	2	6	5	3	6	5	4
11	25	3	3	7	6	6	5	4	5	5	5	X	2	5	3	6	4	3	4	3	1
12	25	5	6	9	9	7	6	5	6	4	4	2	X	4	3	7	5	4	6	4	3
13	23	2	6	9	9	8	7	6	7	3	2	5	4	X	2	8	6	5	7	6	4
14	24	2	6	8	8	6	5	4	5	2	2	3	3	2	X	6	4	3	5	4	2
15	23	9	8	7	8	5	4	4	3	5	6	6	7	8	6	X	3	4	5	5	5
16	22	7	8	6	7	4	1	1	1	3	5	4	5	6	4	3	X	3	4	3	4
17	23	6	7	7	9	6	3	4	1	1	3	3	4	5	3	4	3	X	5	4	4
18	21	6	5	4	5	2	2	1	3	6	6	4	6	7	5	5	4	5	X	2	3
19	22	5	6	5	6	3	2	1	2	4	5	3	4	6	4	5	3	4	2	X	2
20	23	4	4	6	7	4	3	2	3	4	4	1	3	4	2	5	4	4	3	2	X

Dakle, početna relacija je  $0 \rightarrow 5$ . Zatim se pronalazi lokacija najbliža lokaciji 5, a to je lokacija 18. One su međusobno udaljene 2 minute, što je vidljivo iz [Tablica 42].

Tablica 42. Odabir sljedeće najbliže lokacije

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	X	25	23	25	21	19	22	22	24	22	23	25	25	23	24	23	22	23	21	22	23
1	25	X	5	8	8	6	6	6	5	4	4	3	5	2	2	9	7	6	6	5	4
2	23	5	X	3	3	6	6	6	6	7	3	6	6	6	6	8	8	7	5	6	4
3	25	8	3	X	1	5	5	7	7	8	7	9	9	8	7	6	7	4	5	6	
4	21	8	3	1	X	6	6	8	8	9	6	9	9	8	8	7	9	5	6	7	
5	19	7	5	5	6	X	3	3	5	5	6	6	7	8	6	5	4	6	2	3	4
6	22	6	6	5	6	3	X	1	3	4	6	5	6	7	5	4	1	2	2	2	3
7	22	6	6	5	6	1	1	X	3	5	5	4	5	6	4	4	1	4	1	1	2
8	24	5	6	7	8	3	3	3	X	4	5	5	6	7	5	3	1	1	3	2	3
9	22	4	6	7	8	4	5	4	4	X	1	5	4	3	2	5	3	1	6	4	4
10	23	4	7	8	9	6	6	5	5	1	X	5	4	2	2	6	5	3	6	5	4
11	25	3	3	7	6	5	5	4	5	5	5	X	2	5	3	6	4	3	4	3	1
12	25	5	6	9	9	7	6	5	6	4	4	2	X	4	3	7	5	4	6	4	3
13	23	2	6	9	9	8	7	6	7	3	2	5	4	X	2	8	6	5	7	6	4
14	24	2	6	8	8	5	5	4	5	2	2	3	3	2	X	6	4	3	5	4	2
15	23	9	8	7	8	5	4	4	3	5	6	6	7	8	6	X	3	4	5	5	5
16	22	7	8	6	7	4	1	1	1	3	5	4	5	6	4	3	X	3	4	3	4
17	23	6	7	7	9	5	3	4	1	1	3	3	4	5	3	4	3	X	5	4	4
18	21	6	5	4	5	2	2	1	3	6	6	4	6	7	5	5	4	5	X	2	3
19	22	5	6	5	6	3	2	1	2	4	5	3	4	6	4	5	3	4	2	X	2
20	23	4	4	6	7	4	3	2	3	4	4	1	3	4	2	5	4	4	3	2	X

Sljedeći korak je pronalazak najbliže lokacije od lokacije 18. Odabrana je lokacija 7, a međusobno su udaljene 1 minutu. Ovaj postupak se ponavlja dok sve lokacije nisu povezane u rutu. Konačna ruta glasi:

$0 \rightarrow 5 \rightarrow 18 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 17 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 13 \rightarrow 1 \rightarrow 14 \rightarrow 20 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 19 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 15 \rightarrow 0$ .

Ukupno vrijeme rute, izračunato pomoću tablice troškova iznosi 84 minute.

## 8.4.2.3. Algoritam grananja i ograničavanja

Sljedeća metoda je algoritam grananja i ograničavanja. U prvom koraku se iz tablice udaljenosti izdvajaju minimalne vrijednosti svakog retka, kao što je prikazano u [Tablica 43].

Tablica 43. Ponalazak minimalnih elemenata u svakom retku

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	min
0		25	23	25	21	19	22	22	24	22	23	25	25	23	24	23	22	23	21	22	23	19
1	25		5	8	8	7	6	6	5	4	4	3	5	2	2	9	7	6	6	5	4	2
2	23	5		3	3	5	6	6	6	6	7	3	6	6	6	8	8	7	5	6	4	3
3	25	8	3		1	5	5	5	7	7	8	7	9	9	8	7	6	7	4	5	6	1
4	21	8	3	1		6	6	6	8	8	9	6	9	9	8	8	7	9	5	6	7	1
5	19	7	5	5	6		3	3	5	5	6	6	7	8	6	5	4	6	2	3	4	2
6	22	6	6	5	6	3		1	3	4	6	5	6	7	5	4	1	3	2	2	3	1
7	22	6	6	5	6	3	1		3	5	5	4	5	6	4	4	1	4	1	1	2	1
8	24	5	6	7	8	5	3	3		4	5	5	6	7	5	3	1	1	3	2	3	1
9	22	4	6	7	8	5	4	5	4		1	5	4	3	2	5	3	1	6	4	4	1
10	23	4	7	8	9	6	6	5	5	1		5	4	2	2	6	5	3	6	5	4	1
11	25	3	3	7	6	6	5	4	5	5	5		2	5	3	6	4	3	4	3	1	1
12	25	5	6	9	9	7	6	5	6	4	4	2		4	3	7	5	4	6	4	3	2
13	23	2	6	9	9	8	7	6	7	3	2	5	4		2	8	6	5	7	6	4	2
14	24	2	6	8	8	6	5	4	5	2	2	3	3	2		6	4	3	5	4	2	2
15	23	9	8	7	8	5	4	4	3	5	6	6	7	8	6		3	4	5	5	5	3
16	22	7	8	6	7	4	1	1	1	3	5	4	5	6	4	3		3	4	3	4	1
17	23	6	7	7	9	6	3	4	1	1	3	3	4	5	3	4	3		5	4	4	1
18	21	6	5	4	5	2	2	1	3	6	6	4	6	7	5	5	4	5		2	3	1
19	22	5	6	5	6	3	2	1	2	4	5	3	4	6	4	5	3	4	2		2	1
20	23	4	4	6	7	4	3	2	3	4	4	1	3	4	2	5	4	4	3	2		1
Σ																						48

Izdvojene vrijednosti je potrebno oduzeti od svih preostalih vrijednosti u odgovarajućim retcima. Zatim se izdvajaju minimalne vrijednosti za svaki stupac, kao što je prikazano u [Tablica 44].



Tablica 44. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ
0		6	4	6	2	0	3	3	5	3	4	6	6	4	5	4	3	4	2	3	4	
1	23		3	6	6	5	4	4	3	2	2	1	3	0	0	7	5	4	4	3	2	
2	20	2		0	0	2	3	3	3	3	4	0	3	3	3	5	5	4	2	3	1	
3	24	7	2		0	4	4	4	6	6	7	6	8	8	7	6	5	6	3	4	5	
4	20	7	2	0		5	5	5	7	7	8	5	8	8	7	7	6	8	4	5	6	
5	17	5	3	3	4		1	1	3	3	4	4	5	6	4	3	2	4	0	1	2	
6	21	5	5	4	5	2		0	2	3	5	4	5	6	4	3	0	2	1	1	2	
7	21	5	5	4	5	2	0		2	4	4	3	4	5	3	3	0	3	0	0	1	
8	23	4	5	6	7	4	2	2		3	4	4	5	6	4	2	0	0	2	1	2	
9	21	3	5	6	7	4	3	4	3		0	4	3	2	1	4	2	0	5	3	3	
10	22	3	6	7	8	5	5	4	4	0		4	3	1	1	5	4	2	5	4	3	
11	24	2	2	6	5	5	4	3	4	4	4		1	4	2	5	3	2	3	2	0	
12	23	3	4	7	7	5	4	3	4	2	2	0		2	1	5	3	2	4	2	1	
13	21	0	4	7	7	6	5	4	5	1	0	3	2		0	6	4	3	5	4	2	
14	22	0	4	6	6	4	3	2	3	0	0	1	1	0		4	2	1	3	2	0	
15	20	6	5	4	5	2	1	1	0	2	3	3	4	5	3		0	1	2	2	2	
16	21	6	7	5	6	3	0	0	0	2	4	3	4	5	3	2		2	3	2	3	
17	22	5	6	6	8	5	2	3	0	0	2	2	3	4	2	3	2		4	3	3	
18	20	5	4	3	4	1	1	0	2	5	5	3	5	6	4	4	3	4		1	2	
19	21	4	5	4	5	2	1	0	1	3	4	2	3	5	3	4	2	3	1		1	
20	22	3	3	5	6	3	2	1	2	3	3	0	2	3	1	4	3	3	2	1		
min	17	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	22

U ovom slučaju većina stupaca će ostati nepromijenjena jer su im minimalne vrijednosti 0. Od prvog stupca potrebno je oduzeti 17, od trećeg i petnaestog 2, a od dvanaestoga 3. Sljedeće se na temelju minimalni vrijednosti redaka i stupaca računa donja granica koja iznosi:

$$D.G. = 48 + 22 = 70$$

Nakon toga slijedi izračun kazni, prikazan u [Tablica 45].

Tablica 45. Izračun kazni

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		6	2	6	2	0 (3)	3	3	5	3	4	6	5	4	5	2	3	4	2	3	4
1	6		1	6	6	5	4	4	3	2	2	1	2	0 (0)	0 (0)	5	5	4	4	3	2
2	3	2		0 (0)	0 (0)	2	3	3	3	3	4	0 (0)	2	3	3	3	5	4	2	3	1
3	7	7	0 (0)		0 (0)	4	4	4	6	6	7	6	7	8	7	4	5	6	3	4	5
4	3	7	0 (0)	0 (0)		5	5	5	7	7	8	5	7	8	7	5	6	8	4	5	6
5	0 (3)	5	1	3	4		1	1	3	3	4	4	4	6	4	1	2	4	0 (0)	1	2
6	4	5	3	4	5	2		0 (0)	2	3	5	4	4	6	4	1	0 (0)	2	1	1	2
7	4	5	3	4	5	2	0 (0)		2	4	4	3	3	5	3	1	0 (0)	3	0 (0)	0 (1)	1
8	6	4	3	6	7	4	2	2		3	4	4	4	6	4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	1	2
9	4	3	3	6	7	4	3	4	3		0 (0)	4	2	2	1	2	2	0 (0)	5	3	3
10	5	3	4	7	8	5	5	4	4	0 (1)		4	2	1	1	3	4	2	5	4	3
11	7	2	0 (0)	6	5	5	4	3	4	4	4		0 (0)	4	2	3	3	2	3	2	0 (0)
12	6	3	2	7	7	5	4	3	4	2	2	0 (1)		2	1	3	3	2	4	2	1
13	4	0 (0)	2	7	7	6	5	4	5	1	0 (0)	3	1		0 (0)	4	4	3	5	4	2
14	5	0 (0)	2	6	6	4	3	2	3	0 (0)	0 (0)	1	0 (0)	0 (0)		2	2	1	3	2	0 (0)
15	3	6	3	4	5	2	1	1	0 (0)	2	3	3	3	5	3		0 (0)	1	2	2	2
16	4	6	5	5	6	3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	4	3	3	5	3	0 (0)		2	3	2	3
17	5	5	4	6	8	5	2	3	0 (0)	0 (0)	2	2	2	4	2	1	2		4	3	3
18	3	5	2	3	4	1	1	0 (1)	2	5	5	3	4	6	4	2	3	4		1	2
19	4	4	3	4	5	2	1	0 (1)	1	3	4	2	2	5	3	2	2	3	1		1
20	5	3	1	5	6	3	2	1	2	3	3	0 (1)	1	3	1	2	3	3	2	1	

Najveća kazna izračunata je za elemente (0,5) i (5,0) i iznosi 3. Odabire se element (0,5) te se stvara prva relacija  $0 \rightarrow 5$ . Iz tablice se uklanja nulti redak i peti stupac, a polje (5,0) je potrebno prekriti kako se ruta ne bi zatvorila, a da pritom ne sadrži sve lokacije. U novoj tablici prvi stupac ne sadržava niti jednu nulu te je potrebno u njemu pronaći minimalnu vrijednost i oduzeti je od cijelog stupca. Potom se ponovno računaju kazne, kao što je prikazano u [Tablica 46].

Tablica 46. Izračun kazni

	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	3		1	6	6	4	4	3	2	2	1	2	0 (0)	0 (0)	5	5	4	4	3	2
2	0 (0)	2		0 (0)	0 (0)	3	3	3	3	4	0 (0)	2	3	3	3	5	4	2	3	1
3	6	7	0 (0)		0 (0)	4	4	6	6	7	6	7	8	7	4	5	6	3	4	5
4	0 (0)	7	0 (0)	0 (0)		5	5	7	7	8	5	7	8	7	5	6	8	4	5	6
5		5	1	3	4	1	1	3	3	4	4	4	6	4	1	2	4	0 (1)	1	2
6	1	5	3	4	5		0 (0)	2	3	5	4	4	6	4	1	0 (0)	2	1	1	2
7	1	5	3	4	5	0 (0)		2	4	4	3	3	5	3	1	0 (0)	3	0 (0)	0 (1)	1
8	3	4	3	6	7	2	2		3	4	4	4	6	4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	1	2
9	1	3	3	6	7	3	4	3		0 (0)	4	2	2	1	2	2	0 (0)	5	3	3
10	2	3	4	7	8	5	4	4	0 (1)		4	2	1	1	3	4	2	5	4	3
11	4	2	0 (0)	6	5	4	3	4	4	4		0 (0)	4	2	3	3	2	3	2	0 (0)
12	3	3	2	7	7	4	3	4	2	2	0 (1)		2	1	3	3	2	4	2	1
13	1	0 (0)	2	7	7	5	4	5	1	0 (0)	3	1		0 (0)	4	4	3	5	4	2
14	2	0 (0)	2	6	6	3	2	3	0 (0)	0 (0)	1	0 (0)	0 (0)		2	2	1	3	2	0 (0)
15	0 (0)	6	3	4	5	1	1	0 (0)	2	3	3	3	5	3		0 (0)	1	2	2	2
16	1	6	5	5	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	4	3	3	5	3	0 (0)		2	3	2	3
17	2	5	4	6	8	2	3	0 (0)	0 (0)	2	2	2	4	2	1	2		4	3	3
18	0 (0)	5	2	3	4	1	0 (0)	2	5	5	3	4	6	4	2	3	4		1	2
19	1	4	3	4	5	1	0 (1)	1	3	4	2	2	5	3	2	2	3	1		1
20	2	3	1	5	6	2	1	2	3	3	0 (1)	1	3	1	2	3	3	2	1	

Najveća vrijednost kazne sada iznosi 1 i dijeli ju više elemenata. Odabire se element (20,11) te se stvara sljedeća relacija  $20 \rightarrow 11$ , a iz tablice se uklanja 20. redak i 11. stupac. U reduciranoj tablici u 12. retku nema niti jedna nula te je potrebno provesti oduzimanje. Nakon toga slijedi izračun novih kazni, što je prikazano u [Tablica 47].

Tablica 47. Izračun kazni

	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	3		1	6	6	4	4	3	2	2	2	0 (0)	0 (0)	5	5	4	4	3	2
2	0 (0)	2		0 (0)	0 (0)	3	3	3	3	4	2	3	3	3	5	4	2	3	1
3	6	7	0 (0)		0 (0)	4	4	6	6	7	7	8	7	4	5	6	3	4	5
4	0 (0)	7	0 (0)	0 (0)		5	5	7	7	8	7	8	7	5	6	8	4	5	6
5		5	1	3	4	1	1	3	3	4	4	6	4	1	2	4	0 (1)	1	2
6	1	5	3	4	5		0 (0)	2	3	5	4	6	4	1	0 (0)	2	1	1	2
7	1	5	3	4	5	0 (0)		2	4	4	3	5	3	1	0 (0)	3	0 (0)	0 (1)	1
8	3	4	3	6	7	2	2		3	4	4	6	4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	1	2
9	1	3	3	6	7	3	4	3		0 (0)	2	2	1	2	2	0 (0)	5	3	3
10	2	3	4	7	8	5	4	4	0 (1)		2	1	1	3	4	2	5	4	3
11	4	2	0 (0)	6	5	4	3	4	4	4	0 (0)	4	2	3	3	2	3	2	0 (0)
12	2	2	1	6	6	3	2	3	1	1		1	0 (0)	2	2	1	3	1	0 (0)
13	1	0 (0)	2	7	7	5	4	5	1	0 (0)	1		0 (0)	4	4	3	5	4	2
14	2	0 (0)	2	6	6	3	2	3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)		2	2	1	3	2	0 (0)
15	0 (0)	6	3	4	5	1	1	0 (0)	2	3	3	5	3		0 (0)	1	2	2	2
16	1	6	5	5	6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	4	3	5	3	0 (0)		2	3	2	3
17	2	5	4	6	8	2	3	0 (0)	0 (0)	2	2	4	2	1	2		4	3	3
18	0 (0)	5	2	3	4	1	0 (0)	2	5	5	4	6	4	2	3	4		1	
19	1	4	3	4	5	1	0 (1)	1	3	4	2	5	3	2	2	3	1		1

Najveća vrijednost kazne iznosi 1 i ponovno ju dijeli više elemenata. Odabire se element (5,18) i stvara relacija  $5 \rightarrow 18$ . Iz tablice se uklanjaju 5. redak i 18. stupac te slijedi izračun kazni. Postupak se ponavlja sve dok se tablica ne reducira do kraja, to jest dok sve lokacije nisu povezane u rutu.

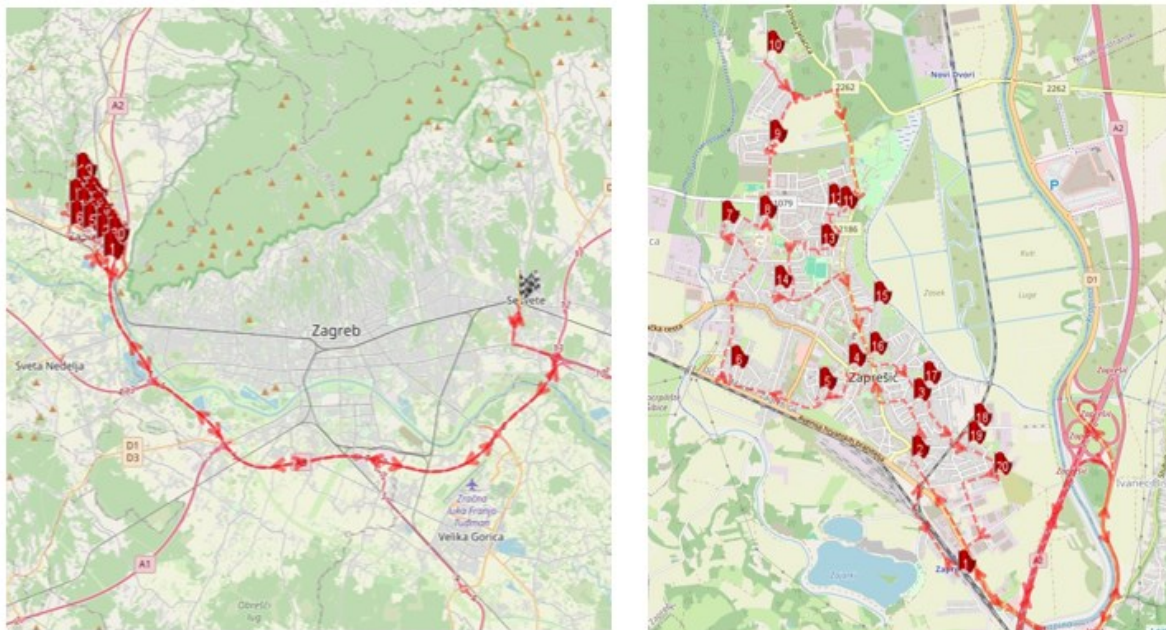
Konačna ruta glasi:

$0 \rightarrow 5 \rightarrow 18 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 17 \rightarrow 8 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 14 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0$ .

Ukupno trajanje rute iznosi 81 minutu.

### 8.4.3. Ruta 3

Odabrane lokacije za drugu rutu nalaze se na području grada Zaprešića. Na [Slika 31] prikazana je ruta dobivena DPD optimizatorom.



Slika 31. Prikaz treće rute

Vrijeme potrebno za dostavu na sve lokacije iznosi 35 minuta. Kada se tome pridoda vrijeme potrebno za dolazak na prvu lokaciju i za povratak u skladište, ukupno vrijeme dostave iznosi 133 minute. U [Tablica 48] vidljiv je redosljed dostava po lokacijama, vremenski okviri unutar kojih je potrebno izvršiti dostavu te procjenjeno vrijeme dostave (ETA).

**Tablica 48. Dobiveni podaci o trećoj ruti**

optimised stop sequence	Address	time frame from	time frame to	ETA
1	LOKACIJA 16	13:14:00	14:14:00	13:44:00
2	LOKACIJA 11	13:16:00	14:16:00	13:46:00
3	LOKACIJA 13	13:18:00	14:18:00	13:48:00
4	LOKACIJA 15	13:20:00	14:20:00	13:50:00
5	LOKACIJA 6	13:22:00	14:22:00	13:52:00
6	LOKACIJA 7	13:23:00	14:23:00	13:53:00
7	LOKACIJA 3	13:26:00	14:26:00	13:56:00
8	LOKACIJA 20	13:28:00	14:28:00	13:58:00
9	LOKACIJA 1	13:30:00	14:30:00	14:00:00
10	LOKACIJA 2	13:31:00	14:31:00	14:01:00
11	LOKACIJA 10	13:34:00	14:34:00	14:04:00
12	LOKACIJA 19	13:35:00	14:35:00	14:05:00
13	LOKACIJA 9	13:37:00	14:37:00	14:07:00
14	LOKACIJA 8	13:39:00	14:39:00	14:09:00
15	LOKACIJA 5	13:41:00	14:41:00	14:11:00
16	LOKACIJA 14	13:42:00	14:42:00	14:12:00
17	LOKACIJA 18	13:44:00	14:44:00	14:14:00
18	LOKACIJA 17	13:46:00	14:46:00	14:16:00
19	LOKACIJA 12	13:47:00	14:47:00	14:17:00
20	LOKACIJA 4	13:49:00	14:49:00	14:19:00

Iz [Tablica 48] se može očitati sljedeći redosljed rute:

0 → 16 → 11 → 13 → 15 → 6 → 7 → 3 → 20 → 1 → 2 → 10 → 19 → 9 → 8 → 5 → 14 → 18 → 17 → 12 → 4 → 0.

## 8.4.3.1. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta

Troškovi između lokacija prikazani su u [Tablica 49].

**Tablica 49. Tablica troškova za treću rutu**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	X	49	49	51	47	48	48	49	50	50	50	46	47	52	48	48	48	47	53	49	50
1		X	6	3	8	4	6	5	3	3	2	6	7	6	5	5	8	7	7	2	1
2			X	4	8	4	7	6	4	4	3	7	7	7	5	5	9	8	7	3	3
3				X	8	5	5	3	2	3	3	5	7	6	5	4	8	7	9	3	1
4					X	4	4	5	6	5	6	2	1	2	3	3	4	1	12	6	7
5						X	3	4	2	2	2	3	4	3	1	2	6	4	9	2	4
6							X	2	3	4	5	4	4	3	2	2	6	5	10	5	5
7								X	4	4	5	3	4	4	4	3	6	4	9	4	3
8									X	2	3	4	5	4	3	2	7	5	8	3	2
9										X	1	4	5	3	2	3	6	5	6	1	2
10											X	4	5	4	2	3	7	5	6	1	2
11												X	1	7	1	2	2	1	9	4	5
12													X	1	2	2	4	9	5	5	6
13														X	6	5	9	8	11	6	4
14															X	1	4	3	8	3	4
15																X	4	3	8	3	4
16																	X	4	11	6	8
17																		X	10	5	6
18																			X	6	6
19																				X	2
20																					X

U sljedećem koraku izračunate su sve uštede po istom principu kao i u prethodnim rutama, te su prikazane u [Tablica 50].

Tablica 50. Tablica troškova za treću rutu

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	X	92	97	88	93	91	93	96	96	97	89	89	95	92	92	89	89	95	96	98
2		X	96	88	93	90	92	95	95	96	88	89	94	92	92	88	88	95	95	96
3			X	90	94	94	97	99	98	98	92	91	97	94	95	91	91	95	97	100
4				X	91	91	91	91	92	91	91	93	97	92	92	91	93	88	90	90
5					X	93	93	96	96	96	91	91	97	95	94	90	91	92	95	94
6						X	95	95	94	93	90	91	97	94	94	90	90	91	92	93
7							X	95	95	94	92	92	97	93	94	91	92	93	94	96
8								X	98	97	92	92	98	95	96	91	92	95	96	98
9									X	99	92	92	99	96	95	92	92	97	98	98
10										X	92	92	98	96	95	91	92	97	98	98
11											X	92	91	93	92	92	92	90	91	91
12												X	98	93	93	91	85	95	91	91
13													X	94	95	91	91	94	95	98
14														X	95	92	92	93	94	94
15															X	92	92	93	94	94
16																X	91	90	91	90
17																	X	90	91	91
18																		X	96	97
19																			X	97
20																				X

Slijedi sortiranje ušteda, počevši od najveće te stvaranje podruta. Najveća ušteda iznosi 100 i ostvaruje se povezivanjem lokacija 3 i 20 te se stvara podruta  $0 \rightarrow 3 \rightarrow 20 \rightarrow 0$ .

Sljedeća najveća ušteda iznosi 99, a u tablici se nalazi između lokacija 3 i 8, 9 i 10 te 9 i 13. Sve tri relacije su moguće, te se stvaraju sljedeće podrute:  $0 \rightarrow 3 \rightarrow 8 \rightarrow 0$ ,  $0 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 0$ ,  $0 \rightarrow 9 \rightarrow 13 \rightarrow 0$ . One se mogu povezati međusobno i sa prethodnom te se stvaraju podrute  $0 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 20 \rightarrow 0$ , te  $0 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 0$ .

Postupak pronalaženja najvećih ušteda, na temelju kojih se povezuju lokacije, se nastavlja sve dok ruta ne sadrži sve lokacije. Konačna ruta dobivena ovim algoritmom glasi:

$0 \rightarrow 16 \rightarrow 11 \rightarrow 17 \rightarrow 4 \rightarrow 12 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 13 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 20 \rightarrow 1 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 0$ .

Ukupna udaljenost za tu rutu iznosi 141 minutu.

## 8.4.3.2. Algoritam najbližeg susjeda

Sljedeće se koristi algoritam najbližeg susjeda. Nakon izrade tablice troškova, slijedi pronalazak lokacije koja je najbliža početnoj točki, to jest skladištu. U ovom slučaju to je lokacija 11, a udaljenost iznosi 46, kao što je vidljivo u [Tablica 51].

Tablica 51. Odabir najbliže lokacije od početne točke

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	X	49	49	51	47	48	48	49	50	50	50	46	47	52	48	48	48	47	53	49	50
1	49	X	6	3	8	4	6	5	3	3	2	6	7	6	5	5	8	7	7	2	1
2	49	6	X	4	8	4	7	6	4	4	3	7	7	7	5	5	9	8	7	3	3
3	51	3	4	X	8	5	5	3	2	3	5	7	6	5	4	8	7	9	3	1	
4	47	8	8	8	X	4	4	5	6	5	6	2	1	2	3	3	4	1	12	6	7
5	48	4	4	5	4	X	3	4	2	2	2	3	4	3	1	2	6	4	9	2	4
6	48	6	7	5	4	3	X	2	3	4	5	4	4	3	2	2	6	5	10	5	5
7	49	5	6	3	5	4	2	X	4	4	5	3	4	4	4	3	6	4	9	4	3
8	50	3	4	2	6	2	3	4	X	2	3	4	5	4	3	2	7	5	8	3	2
9	50	3	4	3	5	2	4	4	2	X	1	4	5	3	2	3	6	5	6	1	2
10	50	2	3	3	6	2	5	5	3	1	X	4	5	4	2	3	7	5	6	1	2
11	46	6	7	5	2	3	4	3	4	4	4	X	1	7	1	2	2	1	9	4	5
12	47	7	7	7	1	4	4	4	5	5	5	1	X	1	2	2	4	9	5	5	6
13	52	6	7	6	2	3	3	4	4	3	4	7	1	X	6	5	9	8	11	6	4
14	48	5	5	5	3	1	2	4	3	2	2	1	2	6	X	1	4	3	8	3	4
15	48	5	5	4	3	2	2	3	2	3	3	2	2	5	1	X	4	3	8	3	4
16	48	8	9	8	4	6	6	6	7	6	7	2	4	9	4	4	X	4	11	6	8
17	47	7	8	7	1	4	5	4	5	5	5	1	9	8	3	3	4	X	10	5	6
18	53	7	7	9	12	9	10	9	8	6	6	9	5	11	8	8	11	10	X	6	6
19	49	2	3	3	6	2	5	4	3	1	1	4	5	6	3	3	6	5	6	X	2
20	50	1	3	1	7	4	5	3	2	2	2	5	6	4	4	4	8	6	6	2	X

Početna relacija je  $0 \rightarrow 11$ . Sljedeći korak je pronalazak najmanje udaljenosti do lokacije 11. Ta udaljenost iznosi 1 i moguća je za 3 relacije:  $11 \rightarrow 12$ ,  $11 \rightarrow 14$  i  $11 \rightarrow 17$ , kao što je prikazano u [Tablica 52].



Tablica 52. Odabir sljedeće najbliže lokacije

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	X	49	49	51	47	48	48	49	50	50	50	46	47	52	48	48	48	47	53	49	50
1	49	X	6	3	8	4	6	5	3	3	2	6	7	6	5	5	8	7	7	2	1
2	49	6	X	4	8	4	7	6	4	4	3	7	7	5	5	9	8	7	3	3	
3	51	3	4	X	8	5	5	3	2	3	3	5	7	6	5	4	8	7	9	3	1
4	47	8	8	8	X	4	4	5	6	5	6	2	1	2	3	3	4	1	12	6	7
5	48	4	4	5	4	X	3	4	2	2	2	3	4	3	1	2	6	4	9	2	4
6	48	6	7	5	4	3	X	2	3	4	5	4	4	3	2	2	6	5	10	5	5
7	49	5	6	3	5	4	2	X	4	4	5	3	4	4	4	3	6	4	9	4	3
8	50	3	4	2	6	2	3	4	X	2	3	4	5	4	3	2	7	5	8	3	2
9	50	3	4	3	5	2	4	4	2	X	1	4	5	3	2	3	6	5	6	1	2
10	50	2	3	3	6	2	5	5	3	1	X	4	5	4	2	3	7	5	6	1	2
11	46	6	7	5	2	3	4	3	4	4	4	X	1	7	1	2	2	1	9	4	5
12	47	7	7	7	1	4	4	4	5	5	5	1	X	1	2	2	4	9	5	5	6
13	52	6	7	6	2	3	3	4	4	3	4	7	1	X	6	5	9	8	11	6	4
14	48	5	5	5	3	1	2	4	3	2	2	1	2	6	X	1	4	3	8	3	4
15	48	5	5	4	3	2	2	3	2	3	3	2	2	5	1	X	4	3	8	3	4
16	48	8	9	8	4	6	6	6	7	6	7	2	4	9	4	4	X	4	11	6	8
17	47	7	8	7	1	4	5	4	5	5	5	1	9	8	3	3	4	X	10	5	6
18	53	7	7	9	12	9	10	9	8	6	6	9	5	11	8	8	11	10	X	6	6
19	49	2	3	3	6	2	5	4	3	1	1	4	5	6	3	3	6	5	6	X	2
20	50	1	3	1	7	4	5	3	2	2	2	5	6	4	4	4	8	6	6	2	X

Odabire se lokacija 12. Ruta sada glasi:  $0 \rightarrow 11 \rightarrow 12$ . Nadalje se lokaciji 12 traži najbliža lokacija. Postupak se ponavlja dok ruta ne sadrži sve lokacije, a na kraju se zadnja dodana lokacija povezuje sa skladištem. Konačna ruta dobivena primjenom algoritma najbližeg susjeda je sljedeća:

$0 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 4 \rightarrow 17 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 19 \rightarrow 1 \rightarrow 20 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 13 \rightarrow 2 \rightarrow 18 \rightarrow 16 \rightarrow 0$ .

Ukupno trajanje ove rute iznosi 146 minuta.

#### 8.4.3.3. Algoritam grananja i ograničavanja

Algoritam grananja i ograničavanja započinje izračunom minimalnih vrijednosti u svakom retku tablice udaljenosti, kao što je prikazano u [Tablica 53].

Tablica 53. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom retku

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	min
0		49	49	51	47	48	48	49	50	50	50	46	47	52	48	48	48	47	53	49	50	46
1	49		6	3	8	4	6	5	3	3	2	6	7	6	5	5	8	7	7	2	1	1
2	49	6		4	8	4	7	6	4	4	3	7	7	7	5	5	9	8	7	3	3	3
3	51	3	4		8	5	5	3	2	3	3	5	7	6	5	4	8	7	9	3	1	1
4	47	8	8	8		4	4	5	6	5	6	2	1	2	3	3	4	1	12	6	7	1
5	48	4	4	5	4		3	4	2	2	2	3	4	3	1	2	6	4	9	2	4	1
6	48	6	7	5	4	3		2	3	4	5	4	4	3	2	2	6	5	10	5	5	2
7	49	5	6	3	5	4	2		4	4	5	3	4	4	4	3	6	4	9	4	3	2
8	50	3	4	2	6	2	3	4		2	3	4	5	4	3	2	7	5	8	3	2	2
9	50	3	4	3	5	2	4	4	2		1	4	5	3	2	3	6	5	6	1	2	1
10	50	2	3	3	6	2	5	5	3	1		4	5	4	2	3	7	5	6	1	2	1
11	46	6	7	5	2	3	4	3	4	4	4		1	7	1	2	2	1	9	4	5	1
12	47	7	7	7	1	4	4	4	5	5	5	1		1	2	2	4	9	5	5	6	1
13	52	6	7	6	2	3	3	4	4	3	4	7	1		6	5	9	8	11	6	4	1
14	48	5	5	5	3	1	2	4	3	2	2	1	2	6		1	4	3	8	3	4	1
15	48	5	5	4	3	2	2	3	2	3	3	2	2	5	1		4	3	8	3	4	1
16	48	8	9	8	4	6	6	6	7	6	7	2	4	9	4	4		4	11	6	8	2
17	47	7	8	7	1	4	5	4	5	5	5	1	9	8	3	3	4		10	5	6	1
18	53	7	7	9	12	9	10	9	8	6	6	9	5	11	8	8	11	10		6	6	5
19	49	2	3	3	6	2	5	4	3	1	1	4	5	6	3	3	6	5	6		2	1
20	50	1	3	1	7	4	5	3	2	2	2	5	6	4	4	4	8	6	6	2		1
Σ																						76

Zatim se izdvojene vrijednosti oduzimaju od svih vrijednosti u pripadajućim retcima. Isti se postupak provodi i za stupce, kao što je vidljivo u [Tablica 54].

Tablica 54. Pronalazak minimalnih elemenata u svakom stupcu

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ
0		3	3	5	1	2	2	3	4	4	4	0	1	6	2	2	2	1	7	3	4	53
1	48		5	2	7	3	5	4	2	2	1	5	6	5	4	4	7	6	6	1	0	
2	46	3		1	5	1	4	3	1	1	0	4	4	4	2	2	6	5	4	0	0	
3	50	2	3		7	4	4	2	1	2	2	4	6	5	4	3	7	6	8	2	0	
4	46	7	7	7		3	3	4	5	4	5	1	0	1	2	2	3	0	11	5	6	
5	47	3	3	4	3		2	3	1	1	1	2	3	2	0	1	5	3	8	1	3	
6	46	4	5	3	2	1		0	1	2	3	2	2	1	0	0	4	3	8	3	3	
7	47	3	4	1	3	2	0		2	2	3	1	2	2	2	1	4	2	7	2	1	
8	48	1	2	0	4	0	1	2		0	1	2	3	2	1	0	5	3	6	1	0	
9	49	2	3	2	4	1	3	3	1		0	3	4	2	1	2	5	4	5	0	1	
10	49	1	2	2	5	1	4	4	2	0		3	4	3	1	2	6	4	5	0	1	
11	45	5	6	4	1	2	3	2	3	3	3		0	6	0	1	1	0	8	3	4	
12	46	6	6	6	0	3	3	3	4	4	4	0		0	1	1	3	8	4	4	5	
13	51	5	6	5	1	2	2	3	3	2	3	6	0		5	4	8	7	10	5	3	
14	47	4	4	4	2	0	1	3	2	1	1	0	1	5		0	3	2	7	2	3	
15	47	4	4	3	2	1	1	2	1	2	2	1	1	4	0		3	2	7	2	3	
16	46	6	7	6	2	4	4	4	5	4	5	0	2	7	2	2		2	9	4	6	
17	46	6	7	6	0	3	4	3	4	4	4	0	8	7	2	2	3		9	4	5	
18	48	2	2	4	7	4	5	4	3	1	1	4	0	6	3	3	6	5		1	1	
19	48	1	2	2	5	1	4	3	2	0	0	3	4	5	2	2	5	4	5		1	
20	49	0	2	0	6	3	4	2	1	1	1	4	5	3	3	3	7	5	5	1		
min	45	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	0	

Sada je na temelju minimalnih vrijednosti redaka i stupaca moguće izračunati donju granicu.

Ona glasi:

$$D.G. = 76 + 53 = 129$$

Slijedi izračun kazni za sva polja koja sadrže 0, što je vidljivo u [Tablica 55].

**Tablica 55. Izračun kazni**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		3	1	5	1	2	2	3	3	4	4	0 (1)	1	6	2	2	1	1	3	3	4
1	3		3	2	7	3	5	4	1	2	1	5	6	5	4	4	6	6	2	1	0 (1)
2	1	3		1	5	1	4	3	0 (0)	1	0 (0)	4	4	4	2	2	5	5	0 (0)	0 (0)	0 (0)
3	5	2	1		7	4	4	2	0 (0)	2	2	4	6	5	4	3	6	6	4	2	0 (0)
4	1	7	5	7		3	3	4	4	4	5	1	0 (0)	1	2	2	2	0 (0)	7	5	6
5	2	3	1	4	3		2	3	0 (0)	1	1	2	3	2	0 (0)	1	4	3	4	1	3
6	1	4	3	3	2	1		0 (2)	0 (0)	2	3	2	2	1	0 (0)	0 (0)	3	3	4	3	3
7	2	3	2	1	3	2	0 (2)		1	2	3	1	2	2	2	1	3	2	3	2	1
8	3	1	0 (0)	0 (0)	4	0 (0)	1	2		0 (0)	1	2	3	2	1	0 (0)	4	3	2	1	0 (0)
9	4	2	1	2	4	1	3	3	0 (0)		0 (0)	3	4	2	1	2	4	4	1	0 (0)	1
10	4	1	0 (0)	2	5	1	4	4	1	0 (0)		3	4	3	1	2	5	4	1	0 (0)	1
11	0 (1)	5	4	4	1	2	3	2	2	3	3		0 (0)	6	0 (0)	1	0 (1)	0 (0)	4	3	4
12	1	6	4	6	0 (0)	3	3	3	3	4	4	0 (0)		0 (1)	1	1	2	8	0 (0)	4	5
13	6	5	4	5	1	2	2	3	2	2	3	6	0 (1)		5	4	7	7	6	5	3
14	2	4	2	4	2	0 (0)	1	3	1	1	1	0 (0)	1	5		0 (0)	2	2	3	2	3
15	2	4	2	3	2	1	1	2	0 (0)	2	2	1	1	4	0 (0)		2	2	3	2	3
16	1	6	5	6	2	4	4	4	4	4	5	0 (1)	2	7	2	2		2	5	4	6
17	1	6	5	6	0 (0)	3	4	3	3	4	4	0 (0)	8	7	2	2	2		5	4	5
18	3	2	0 (0)	4	7	4	5	4	2	1	1	4	0 (0)	6	3	3	5	5		1	1
19	3	1	0 (0)	2	5	1	4	3	1	0 (0)	0 (0)	3	4	5	2	2	4	4	1		1
20	4	0 (1)	0 (0)	0 (0)	6	3	4	2	0 (0)	1	1	4	5	3	3	3	6	5	1	1	

Najveća kazna iznosi 2 i odgovara elementima (7,6) i (6,7). Odabire se element (6,7) i stvara se prva relacija  $6 \rightarrow 7$ . Iz tablice se uklanjaju šesti redak i sedmi stupac te se križa element (7,6). Nakon redukcije sedmi redak i šesti stupac neće sadržavati niti jednu nulu te je potrebno provesti oduzimanje. Nakon toga računaju se nove kazne, prikazane u [Tablica 56].

Tablica 56. Izračun kazni

	0	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		3	1	5	1	2	1	3	4	4	0 (1)	1	6	2	2	1	1	3	3	4
1	3		3	2	7	3	4	1	2	1	5	6	5	4	4	6	6	2	1	0 (1)
2	1	3		1	5	1	3	0 (0)	1	0 (0)	4	4	4	2	2	5	5	0 (0)	0 (0)	0 (0)
3	5	2	1		7	4	3	0 (0)	2	2	4	6	5	4	3	6	6	4	2	0 (0)
4	1	7	5	7		3	2	4	4	5	1	0 (0)	1	2	2	2	0 (0)	7	5	6
5	2	3	1	4	3		1	0 (0)	1	1	2	3	2	0 (0)	1	4	3	4	1	3
7	1	2	1	0 (0)	2	1		0 (0)	1	2	0 (0)	1	1	1	0 (0)	2	1	2	1	0 (0)
8	3	1	0 (0)	0 (0)	4	0 (0)	0 (0)		0 (0)	1	2	3	2	1	0 (0)	4	3	2	1	0 (0)
9	4	2	1	2	4	1	2	0 (0)		0 (0)	3	4	2	1	2	4	4	1	0 (0)	1
10	4	1	0 (0)	2	5	1	3	1	0 (0)		3	4	3	1	2	5	4	1	0 (0)	1
11	0 (1)	5	4	4	1	2	2	2	3	3		0 (0)	6	0 (0)	1	0 (1)	0 (0)	4	3	4
12	1	6	4	6	0 (0)	3	2	3	4	4	0 (0)		0 (1)	1	1	2	8	0 (0)	4	5
13	6	5	4	5	1	2	1	2	2	3	6	0 (1)		5	4	7	7	6	5	3
14	2	4	2	4	2	0 (0)	0 (0)	1	1	1	0 (0)	1	5		0 (0)	2	2	3	2	3
15	2	4	2	3	2	1	0 (0)	0 (0)	2	2	1	1	4	0 (0)		2	2	3	2	3
16	1	6	5	6	2	4	3	4	4	5	0 (1)	2	7	2	2		2	5	4	6
17	1	6	5	6	0 (0)	3	3	3	4	4	0 (0)	8	7	2	2	2		5	4	5
18	3	2	0 (0)	4	7	4	4	2	1	1	4	0 (0)	6	3	3	5	5		1	1
19	3	1	0 (0)	2	5	1	3	1	0 (0)	0 (0)	3	4	5	2	2	4	4	1		1
20	4	0 (1)	0 (0)	0 (0)	6	3	3	0 (0)	1	1	4	5	3	3	3	6	5	1	1	

Najveći iznos kazne je 1, a dijeli ga više elemenata. Odabire se element (20,1) te se stvara relacija  $20 \rightarrow 1$ . Zatim se ponovno reducira tablica na način da se uklanja 20. redak i 1. stupac. Također se križa element (1,20). Nakon reduciranja tablica neće sadržavati niti jednu nulu u 1. i retku te je potrebno ponovno provesti oduzimanje, a zatim izračunati kazne, što je prikazano u [Tablica 57].

Tablica 57. Izračun kazni

	0	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		1	5	1	2	1	3	4	4	0 (1)	1	6	2	2	1	1	3	3	4
1	2	2	1	6	2	3	0 (0)	1	0 (0)	4	5	4	3	3	5	5	1	0 (0)	
2	1		1	5	1	3	0 (0)	1	0 (0)	4	4	4	2	2	5	5	0 (0)	0 (0)	0 (0)
3	5	1		7	4	3	0 (0)	2	2	4	6	5	4	3	6	6	4	2	0 (0)
4	1	5	7		3	2	4	4	5	1	0 (0)	1	2	2	2	0 (0)	7	5	6
5	2	1	4	3		1	0 (0)	1	1	2	3	2	0 (0)	1	4	3	4	1	3
7	1	1	0 (0)	2	1		0 (0)	1	2	0 (0)	1	1	1	0 (0)	2	1	2	1	0 (0)
8	3	0 (0)	0 (0)	4	0 (0)	0 (0)		0 (0)	1	2	3	2	1	0 (0)	4	3	2	1	0 (0)
9	4	1	2	4	1	2	0 (0)		0 (0)	3	4	2	1	2	4	4	1	0 (0)	1
10	4	0 (0)	2	5	1	3	1	0 (0)		3	4	3	1	2	5	4	1	0 (0)	1
11	0 (1)	4	4	1	2	2	2	3	3		0 (0)	6	0 (0)	1	0 (1)	0 (0)	4	3	4
12	1	4	6	0 (0)	3	2	3	4	4	0 (0)		0 (1)	1	1	2	8	0 (0)	4	5
13	6	4	5	1	2	1	2	2	3	6	0 (1)		5	4	7	7	6	5	3
14	2	2	4	2	0 (0)	0 (0)	1	1	1	0 (0)	1	5		0 (0)	2	2	3	2	3
15	2	2	3	2	1	0 (0)	0 (0)	2	2	1	1	4	0 (0)		2	2	3	2	3
16	1	5	6	2	4	3	4	4	5	0 (1)	2	7	2	2		2	5	4	6
17	1	5	6	0 (0)	3	3	3	4	4	0 (0)	8	7	2	2	2		5	4	5
18	3	0 (0)	4	7	4	4	2	1	1	4	0 (0)	6	3	3	5	5		1	1
19	3	0 (0)	2	5	1	3	1	0 (0)	0 (0)	3	4	5	2	2	4	4	1		1

Najveća kazna ponovno je 1 i dijeli ju više elemenata. Odabrani element je (16,11) te se stvara nova relacija  $16 \rightarrow 11$ . Nakon uklanjanja 16. retka i 11. stupca potrebno je ponovno provesti oduzimanje. Potom slijedi izračun kazni i odabir nove relacije. Ti koraci se ponavljaju sve dok ruta nije kompletirana.

Konačna ruta glasi:

$0 \rightarrow 16 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 4 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 5 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 20 \rightarrow 1 \rightarrow 10 \rightarrow 2 \rightarrow 0$ .

Ukupno trajanje rute iznosi 140 minuta.

#### 8.4.4. Analiza ruta

Prije same analize ruta, iako su uz pomoć DPD optimizatora dobivena vremena trajanja ruta, za dobivene rute je potrebno izračunati trajanja i uz pomoć tablica udaljenosti za svaku rutu. Naime, vremena koja daje optimizator generirana su na temelju parametara koje kuriri postavljaju prije dostave. Nakon unosa lokacija u MDU skener, a prije nego što su se izradile

rute, odabrano je najbrže vrijeme dostave. U tom slučaju, predviđeno potrebno vrijeme dostave paketa biti će brže nego što bi to bilo kada bi se brzina dostave postavila na sporije. S obzirom da je za sve rute dobivene pomoću tri odabrana algoritma vrijeme trajanja izračunato uz pomoć istih tablica udaljenosti, usporedba će biti najpreciznija ako se i vremena trajanja onih ruta dobivenih optimizatorom također izračunaju na isti način, pomoću odgovarajućih tablica udaljenosti.

Prema tome, trajanje dobivene rute 1 iznosi 68 minuta, što je 10 minuta više od vremena koje je predvidio optimizator. Izračunato trajanje rute 2 iznosi 89 minuta, što je 9 minuta više od vremena optimizatora. I trajanje rute 3 dobiveno uz pomoć tablice udaljenosti iznosi 162 minute, što je 29 minuta duže od predviđenog trajanja. [Tablica 58] prikazuje 3 analizirane rute te trajanje dobiveno DPD optimizatorom, izračunato trajanje dobivenih ruta, te trajanje ruta dobivenih pomoću algoritma ušteta Clarka i Wrighta, algoritma najbližeg susjeda te algoritma grananja i ograničavanja.

**Tablica 58. Usporedba ruta**

RUTA	DPD OPTIMIZATOR	IZRAČUNATO TRAJANJE DOBIVENIH RUTA	ALGORITAM UŠTEDA CLARKA I WRIGHTA	ALGORITAM NAJBLIŽEG SUSJEDA	ALGORITAM GRANANJA I OGRANIČAVANJA
1	58	68	68	81	54
2	80	86	91	84	81
3	133	162	141	146	140

Iz tablice se vidi kako su za sva tri slučaja najbrže rute dobivene DPD optimizatorom. Međutim, kao što je već ranije objašnjeno, kada se trajanje tih ruta izračuna na način kao i za ostale algoritme, može se zaključiti da te rute duže traju od preostalih koje su dobivene upotrebom algoritama. Algoritam kojim su dobivena najbrža vremena ruta je algoritam grananja i ograničavanja. To je i očekivano, s obzirom da je to egzaktna metoda rješavanja problema usmjeravanja vozila, što znači da bi trebala dati optimalna rješenja. S druge strane, algoritmi

ušteda Clarka i Wrighta te algoritam najbližeg susjeda su heurističke metode, što znači da nije nužno da će za zadani skup podataka dati optimalna rješenja. To se može i vidjeti iz [Tablica 58]. Algoritmom najbližeg susjeda su, osim za drugu lokaciju, dobivene sporije rute u usporedbi s drugim algoritimima. Razlog tomu je jer je to pohlepan algoritam, to jest odluke donosi na temelju informacija koje se trenutno razmatraju, a ne uzima u obzir posljedice na krajnji rezultat niti globalne optimume. S druge strane, algoritam Clarka i Wrighta može proizvesti bolja rješenja, posebno za veće skupove podataka, jer uzima u obzir uštede prilikom formiranja ruta. Tablica također potvrđuje i to da je algoritam najbližeg susjeda najbrži za provesti u usporedbi s ostalima, te se zbog brzine izvođenja žrtvuje optimalno rješenje. Algoritam ušteda Clarka i Wrighta je nešto složeniji za izračun, duže traje, ali i daje preciznije rezultate. Konačno, algoritam grananja i ograničavanja zahtjeva znatno više vremena od prethodnih, ali zato i najčešće daje optimalna rješenja.

## ZAKLJUČAK

Nagli razvoj e-trgovine rezultirao je pomakom od tradicionalnog načina kupovine te promjenama u navikama kupaca. Oni očekuju brzu, jednostavnu i pouzdanu uslugu dostave. To stvara pritisak na tvrtke da osiguraju učinkovitost i pouzdanost u svakom koraku lanca isporuke, a posebno u posljednjoj milji. Upravljanje ovim procesom postaje još složenije s porastom broja narudžbi i raznolikosti proizvoda. Uz niz metoda i pristupa koji omogućuju tvrtkama da se nose sa brojnim izazovima koje donosi dostava u posljednoj milji, izdvaja se optimizacija ruta i izrazito je važna, posebno za logističke tvrtke treće strane te tvrtke koje se bave distribucijom paketa. Uspješna optimizacija ruta omogućuje učinkovito kretanje proizvoda do krajnjih kupaca, što rezultira smanjenjem vremena i troškova. Jedan od vodećih europskih pružatelja usluga dostave paketa je DPD. Oni se ističu među konkurencijom po svojoj visokoj razini usluge dostave, koja uključuje brzu i pouzdanu isporuku paketa. Ono na čemu inzistiraju i što ih izdvaja od ostalih je upravo njihova usluga 1HP kojom se na temelju definiranih ruta predviđa vrijeme dostave za svaki paket i to unutar vremenskog okvira od jednog sata. Za stvaranje i optimizaciju ruta u DPD-u se koristi optimizator. Sa ciljem analize ruta, provedena je usporedba između 3 dobivene rute te istih ruta dobivenih korištenjem odabranih algoritama koji se koriste za rješavanje problema trgovačkog putnika. Algoritmom grananja i ograničavanja dobivene su najbrže rute, što je bilo i za očekivati s obzirom da je to egzaktna metoda koja može pružiti optimalno rješenje. S druge strane, algoritam ušteta Clarka i Wrighta te algoritam najbližeg susjeda pripadaju u skupinu heurističkih metoda koje ne garantiraju optimalna rješenja, ali su brže za provođenje. To potvrđuju i rezultati analize, jer su rute dobivena tim algoritmima duže od onih dobivenih algoritmom grananja i ograničavanja, ali svejedno mogu ponuditi bolja rješenja od dobivene rute. I konačno, iz rezultata analize se može zaključiti da rute dobivene DPD optimizatorom nisu optimalne, to jest najbrže.



## LITERATURA

- [1] What is a Supply Chain Diagram, <https://www.edrawmax.com/article/what-is-supply-chain-diagram.html>, pristupljeno: 20.3.2024.
- [2] E-commerce as percentage of total retail sales worldwide from 2015 to 2027, <https://www.statista.com/statistics/534123/e-commerce-share-of-retail-sales-worldwide/>, pristupljeno: 5.2.2024.
- [3] Guptaa, S., Kushwaha, P.S., Badherac, U., Chatterjee, P., Santibanez Gonzalez, E., Identification of benefits, challenges, and pathways in E-commerce industries: An integrated two-phase decision-making model, *Sustainable Operations and Computers* 4 (2023), 200-218
- [4] 1PL 2PL 3PL 4PL 5PL 6PL – The Advancement of Party Logistics, <https://aklogisticsandsupplychain.com/2020/03/02/1pl-2pl-3pl-4pl-5pl-6pl-the-advancement-of-party-logistics/>, pristupljeno: 20.3.2024.
- [5] A Complete Guide to Third-Party Logistics (3PL), [A Complete Guide to Third-Party Logistics \(3PL\) | Flowium](#), pristupljeno: 25.3.2024.
- [6] Zacharia, Z.G., Sanders, N.R., Nix, N.W., The Emerging Role of the Third-Party Logistics Provider (3PL) as an Orchestrator, *Journal of Business Logistics* (2023), 32, 40-54
- [7] Last-mile delivery executive survey, Capgemini Research Institute, listopad-studeni 2018
- [8] Boysen, N., Fedtke, S., Schwerdfeger, S., Last mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective, *OR Spectrum* (2021), 43, 1–58
- [9] Last Mile Delivery Explained: Trends, Challenges, Costs & More, <https://www.merchantsfleet.com/industry-insights/what-is-last-mile-delivery/>, pristupljeno: 7.2.2024.
- [10] Wassen, M., Nazih Diab, Y., Elomri, A., Triki, C., Innovative solutions in last mile delivery: concepts, practices, challenges, and future directions, *Supply Chain Forum: An International Journal* (2023), 24:2, 151-169
- [11] Bosona, T. Urban Freight Last Mile Logistics—Challenges and Opportunities to Improve Sustainability: A Literature Review. *Sustainability* 2020, 12, 8769

- [12] What Is Last Mile Delivery? Costs & How to Optimize, <https://optimoroute.com/last-mile-delivery/#examples>, pristupljeno: 28.3.2024.
- [13] United Nations Population Fund, State of World Population 2007 – Unleashing the Potential of Urban Growth, New York, 2007
- [14] 5 Ways to Reduce Last Mile Delivery Costs, <https://dista.ai/blog/ways-to-reduce-last-mile-delivery-costs/>, pristupljeno: 28.3.2024.
- [15] Parcel vs LTL vs FTL Shipping: Understanding the Differences, <https://shipbots.com/post/parcel-vs-ltl-vs-ftl/>, pristupljeno: 11.4.2024.
- [16] 5 fundamental ways to reduce Last-mile Delivery Costs, <https://www.abivin.com/post/2018/04/12/5-fundamental-ways-to-reduce-last-mile-delivery-costs>, pristupljeno: 28.3.2024.
- [17] The Reverse Logistics Report, [Reverse Logistics & Reverse Supply Chain Research - Returns, Recalls, Repairs, and End-of-Life Returns \(businessinsider.com\)](https://www.businessinsider.com/reverse-logistics-research-returns-recalls-repairs-end-of-life-returns), pristupljeno: 12.4.2024.
- [18] Iwan, S., Kijewska, K., Lemke, J., Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution - The Results of the Research in Poland, *Transportation Research Procedia* 12 (2016), 644-655
- [19] Ormarić za pohranu, <https://www.alfa3.eu/outdoor-parcel-delivery-unit-with-48-boxes>, pristupljeno: 10.2.2024.
- [20] Garg, V., Niranjana, S., Prybutok, V., Pohlen, T., Gligor, D., Drones in last-mile delivery: A systematic review on Efficiency, Accessibility, and Sustainability, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2023), 123
- [21] Dron za dostave, <https://www.inc.com/business-insider/amazon-drone-patent-deliveries-scan-your-house.html>, pristupljeno: 10.2.2024.
- [22] Autonomni dostavni robot, <https://www.autocar.co.uk/car-news/features/food-delivery-robots-preparing-us-autonomous-cars>, pristupljeno: 12.2.2024.
- [23] Fatehi, S., Wagner, M.R., Crowdsourcing Last-Mile Deliveries. *Manufacturing & Service Operations Management* (2021), 24(2), 791-809

- [24] Esasky, A., Iltsenko, M., Jones, S., Tharakan, M., Delivery Route Optimization, Kennesaw State University, 2021
- [25] Liong, C.Y., Wan, I., Khairuddin, K., Vehicle routing problem: Models and solutions. *Journal of Quality Measurement and Analysis* (2008), 4, 205-218
- [26] Đukić, G., Mrežni problemi, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2017.
- [27] Goel, R., Maini, R., Vehicle routing problem and its solution methodologies: a survey, *Int. J. Logistics Systems and Management* 28 (2017), 4, 419-435
- [28] Lysgaard, J., Clarke & Wright's Savings Algorithm, The Arrhus School of Business, Aarhus, 1997
- [29] Clarke, G., Wright, J.W., Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research* (1964), 12, 568-581
- [30] Theuricha, F., Fischer, A., Scheithauer, G., A branch-and-bound approach for a Vehicle Routing Problem with Customer Costs, *EURO Journal on Computational Optimization* 9 (2021)
- [31] Mataija, M., Rakamarić Šegić, M., Jozić, F., Solving the traveling salesman problem using the branch and bound method, *Zbornik Veleučilišta u Rijeci* (2016), 4, 259-270