

# Rutiranje visokoregalnog viličara komisionera u zoni s više prolaza

---

**Jurčević, Marjan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:138674>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marjan Jurčević**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Marjan Jurčević

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se voditelju skladišta Damiru Šimuniću i ostalim djelatnicima tvrtke Elektrokontakt d.d. na pomoći tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja i izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Goranu Đukiću i mag. ing. mech. Tihomiru Opetuku na pomoći i savjetima pri izradi ovog diplomskog rada.

Marjan Jurčević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marjan Jurčević** Mat. br.: 0035181243

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rutiranje visokoregalnog viličara komisionera u zoni s više prolaza**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Routing of high rack order-picking truck in multi-aisle zone**

Opis zadatka:

Jedna od mogućih izvedbi paletnih skladišta jest i primjena visokoregalnih viličara unutar regalnog dijela s vrlo uskim prolazima, poznata pod nazivom VNA (eng. Very Narrow Aisle). Danas postoje razne izvedbe VNA viličara, a jednu od njih karakterizira i mogućnost komisioniranja robe unutar prolaza sa svih razina, pa i preko desetak metara visine. Time ovakve izvedbe imaju sličnost sa izvedbom automatiziranog skladišnog sustava za komisioniranje (eng. person-on-board AS/RS). No dok se kod ovih posljednjih komisioniranje događa unutar jednog prolaza, VNA visokoregalni viličari komisioneri obavljaju komisioniranje unutar više prolaza. Rutiranje (usmjeravanje) viličara u procesu komisioniranja, odnosno određivanje redoslijeda i rute prikupljanja robe iz skladišnih lokacija, može rezultirati vremenom kretanja sa značajnim utjecajem na sveukupno vrijeme ciklusa komisioniranja. Iz tog razloga su od interesa metode rutiranja s ciljem minimizacije vremena kretanja.

U radu je potrebno:

- Prikazati izvedbe skladišta s visokoregalnim viličarima komisionerima.
- Ilustrirati problem određivanja rute komisioniranja na konkretnom primjeru iz prakse.
- Napraviti pregled postojećih metoda rutiranja (u klasičnim sustavima komisioniranja s jedne razine i sustavima komisioniranja s više razina unutar jednog prolaza).
- Predložiti metode rutiranja visokoregalnih viličara komisionera unutar više prolaza, te provesti analize vremena kretanja simulacijama.

Zadatak zadan:  
10. ožujka 2016.


Rok predaje rada:  
12. svibnja 2016.

Predviđeni datum obrane:  
18., 19. i 20. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Izv.prof. dr.sc. Goran Đukić

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. KLASIČNI SKLADIŠNI SUSTAVI.....	3
2.1. Podna skladišta.....	3
2.2. Regalna skladišta.....	4
2.2.1. Podjela regalnih skladišta s obzirom na širinu prolaza.....	12
2.2.2. Logistički procesi unutar klasičnih skladišnih sustava .....	13
2.2.3. Računalom upravljani klasični skladišni sustavi .....	14
3. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI .....	15
3.1. Karuseli/vertikalni podizni moduli .....	15
3.1.1. Horizontalni karuseli.....	15
3.1.2. Vertikalni karuseli.....	16
3.1.3. Vertikalni podizni moduli .....	17
3.2. Automatizirani skladišni sustavi s fiksnim prolazom .....	18
3.2.1. Micro-load AS/RS .....	19
3.2.2. Mini-load AS/RS .....	20
3.2.3. Unit-load AS/RS .....	20
3.2.4. Person-on-board AS/RS.....	22
4. RUTIRANJE VOZILA PRI KOMISIONIRANJU .....	23
4.1. Komisioniranje u niskom regalnom skladištu.....	23
4.1.1. Metoda povratka .....	24
4.1.2. Metoda S-oblika.....	25
4.1.3. Metoda srednje točke .....	26
4.1.4. Kompozitna metoda .....	27
4.2. Komisioniranje kod AS/RS skladišnog sustava.....	28
4.2.1. Komisioniranje pomoću heuristike traka .....	29
4.2.2. Rutiranje uz heurističke metode rješavanja problema trgovačkog putnika .....	31
4.2.2.1. Opis heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika .....	31
4.2.2.2. Rutiranje kretanja S/R dizalice unutar prolaza .....	33
5. SKLADIŠNI SUSTAV PODUZEĆA ELEKTROKONTAKT d.d. ....	38
5.1. Općenito o poduzeću.....	38
5.2. Oprema visokoregalnog skladišnog sustava .....	39
5.3. Opis rada skladišnog sustava .....	46
5.4. Proračun trajanja vožnje pri komisioniranju .....	48
5.4.1. Prosječna brzina kretanja viličara .....	48

5.4.2. Rutiranje viličara pri komisioniranju .....	49
6. ANALIZA METODA RUTIRANJA VISOKOREGALNO G VILIČARA KOMISIONERA U ZONI S VIŠE PROLAZA .....	52
6.1. Primjena heurističkih metoda na problem iz prakse .....	54
6.1.1. Trenutno korištena heuristička metoda .....	55
6.1.2. X-povratna heuristička metoda .....	58
6.1.3. X-Kompozitna heuristička metoda .....	60
6.1.4. X-heuristička metoda najbližeg susjeda.....	63
6.1.5. Metoda najbližeg susjeda .....	70
6.1.6. Heuristička metoda Clarke-Wright .....	73
6.1.7. Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda .....	77
6.1.8. Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda ...	81
6.1.9. Analiza rezultata predstavljenih heurističkih metoda .....	84
6.2. Simulacija komisioniranja i analiza dobivenih rezultata .....	85
6.2.1. Izrada simulacije vremena vožnje.....	85
6.2.2. Verifikacija rezultata simulacije .....	86
6.2.3. Analiza rezultata simulacije za komisioniranje unutar zone s više prolaza.....	90
6.2.3.1. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 5 artikala .....	91
6.2.3.2. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 10 artikala .....	93
6.2.3.3. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 20 artikala .....	95
6.2.3.4. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s nasumičnim brojem artikala ....	96
6.2.4. Analiza rezultata simulacije za komisioniranje unutar jednog prolaza.....	100
6.2.4.1. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 5 artikala unutar istog prolaza	100
6.2.4.2. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s nasumičnim brojem artikala unutar istog prolaza.....	103
7. ZAKLJUČAK.....	106
LITERATURA.....	108

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Odlaganje jediničnih tereta u redove ili blokove.....	4
Slika 2.	Klasična izvedba skladišta s paletnim regalima .....	5
Slika 3.	Skladište s paletnim regalima dvostruke dubine .....	6
Slika 4.	Prolazni regal.....	7
Slika 5.	Paletni protočni regal.....	8
Slika 6.	Skladište s poličnim regalima.....	9
Slika 7.	Skladište s konzolnim regalima.....	10
Slika 8.	Skladište s prijevoznim paletnim regalima .....	11
Slika 9.	Horizontalni karusel .....	12
Slika 10.	Čeoni viličar marke Linde .....	12
Slika 11.	Automatizirani horizontalni karusel zaštićen ogradom.....	16
Slika 12.	Usporedba klasičnog poličnog regala s policama i vertikalnog karusela.....	17
Slika 13.	Sustav s 4 vertikalna podizna modula .....	18
Slika 14.	Micro-load AS/RS.....	19
Slika 15.	Skladišni sustav s 3 mini-load dizalice.....	20
Slika 16.	Klasična konfiguracija unit-load AS/RS sustava .....	21
Slika 17.	Person-on-board AS/RS .....	22
Slika 18.	Shema rutiranja komisionera po metodi povratka.....	25
Slika 19.	Shema rutiranja komisionera po metodi S-oblika .....	26
Slika 20.	Shema rutiranja komisionera po metodi srednje točke .....	27
Slika 21.	Shema rutiranja komisionera po kompozitnoj metodi .....	28
Slika 22.	Prikaz kretanja S/R dizalice kod rutiranja uz pomoć heuristike traka .....	29
Slika 23.	Ilustracija ostvarivanja ušteda .....	32
Slika 24.	Ilustracija fizičkih i vremenskih udaljenosti u regalu .....	34
Slika 25.	Shema kretanja viličara u prolazu uz rutiranje X-heuristikom.....	35
Slika 26.	Prikaz rada viličara uz heuristiku najbližeg susjeda.....	35
Slika 27.	Prikaz rada viličara uz heuristiku Clarke-Wright.....	37
Slika 28.	Shema tlocrta skladišta poduzeća Elektrokontakt .....	40
Slika 29.	Paletni regali sa 7 razina skladištenja u visinu .....	41
Slika 30.	Niski električni viličar Jungheinrich .....	42
Slika 31.	Čeoni viličar marke Still.....	43
Slika 32.	Viličar s fiksnom kupolom Jungheinrich EFX 410/413.....	44
Slika 33.	Viličar s pomičnom kupolom Yale MTC-13 .....	44
Slika 34.	Ručni terminal .....	46
Slika 35.	Zona komisioniranja jednog viličara .....	50
Slika 36.	Redoslijed posjećivanja lokacija za trenutno korištenu heurističku metodu.....	57
Slika 37.	Redoslijed posjećivanja lokacija za X-povratnu heurističku metodu .....	59
Slika 38.	Odluka o spajanju lokacija u prolazu kod kompozitne metode.....	61
Slika 39.	Redoslijed posjećivanja lokacija za X-kompozitnu heurističku metodu.....	62
Slika 40.	Postupak određivanja vremenskih udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između pretovarne stanice i neke skladišne lokacije.....	63
Slika 41.	Postupak određivanja vremenskih udaljenosti između pretovarne stanice i neke skladišne lokacije .....	64
Slika 42.	Postupak određivanja vremenskih udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između dviju skladišnih lokacija .....	65



---

Slika 43.	Postupak određivanja stvarnih vremenskih udaljenosti između skladišnih lokacija međusobno.....	67
Slika 44.	Redoslijed posjećivanja lokacija za X-heurističku metodu najbližeg susjeda .....	69
Slika 45.	Redoslijed posjećivanja lokacija za heurističku metodu najbližeg susjeda .....	72
Slika 46.	Ilustracija zatvorene podrute .....	75
Slika 47.	Redoslijed posjećivanja lokacija za heurističku metodu Clarke-Wright.....	76
Slika 48.	Grupiranje skladišnih lokacija kod metode grupiranja u prolazima po metodi najbližeg susjeda.....	78
Slika 49.	Odluka o spajanju prolaza kod metode grupiranja lokacija po prolazima po metodi najbližeg susjeda.....	79
Slika 50.	Redoslijed posjećivanja lokacija za metodu grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda.....	80
Slika 51.	Odluka o spajanju prolaza kod kompozitne metode uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda .....	82
Slika 52.	Redoslijed posjećivanja lokacija za kompozitnu metodu uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda.....	83
Slika 53.	Grafički prikaz prosječnih rezultata simulacije vremena vožnje [s] za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 5 i 20 artikala .....	99
Slika 54.	Grafički prikaz prosječnih rezultata simulacije vremena vožnje [s] za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 3 i 15 artikala koji se nalaze u istom prolazu .....	105

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Određivanje broja horizontalnih traka regala .....	30
Tablica 2. Odstupanje rješenja dobivenog heuristikom od optimalnog rješenja.....	33
Tablica 3. Tehničke karakteristike viličara Yale MTC-13 .....	45
Tablica 4. Izmjerene komponente brzine viličara .....	48
Tablica 5. Nasumično generirane skladišne lokacije s pripadajućim koordinatama.....	55
Tablica 6. Vremenske udaljenosti između početne lokacije i skladišnih lokacija s radnog naloga .....	63
Tablica 7. Vremenske udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između pojedinih skladišnih lokacija s narudžbe .....	66
Tablica 8. Stvarne vremenske udaljenosti između skladišnih lokacija s narudžbe .....	68
Tablica 9. Vremenske udaljenosti između pretovarne stanice i skladišnih lokacija s narudžbe .....	70
Tablica 10. Uštede koje se ostvaruju sparivanjem pojedinih točaka u sekundama.....	74
Tablica 11. Trajanje vožnje pri komisioniranju primjera jedne narudžbe od 10 artikala.....	84
Tablica 12. Rezultati simulacije za 10 nasumičnih narudžbi s 10 artikala koji se nalaze na istoj visini skladištenja .....	87
Tablica 13. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala koji se nalaze na istoj visini skladištenja.....	87
Tablica 14. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala koji se nalaze u prvom prolazu .....	88
Tablica 15. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala koji se nalaze u prvom prolazu i na istoj visini skladištenja .....	89
Tablica 16. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 5 artikala .....	91
Tablica 17. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 5 artikala .....	92
Tablica 18. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 10 artikala .....	93
Tablica 19. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 10 artikala .....	94
Tablica 20. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 20 artikala .....	95
Tablica 21. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 20 artikala .....	96
Tablica 22. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi nasumične veličine između 5 i 20 artikala .....	97
Tablica 23. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 5 i 20 artikala .....	98
Tablica 24. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 5 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza .....	101
Tablica 25. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 5 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza .....	102
Tablica 26. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi nasumične veličine između 3 i 15 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza.....	103
Tablica 27. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 3 i 15 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza .....	104

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
L	m	duljina regala
H	m	visina regala
$v_x$	m/s	brzina vožnje viličara, brzina u horizontalnoj ravnini
$v_y$	m/s	brzina podizanja/spuštanja vilica viličara, brzina u vertikalnoj ravnini
$d$	s	vremenska udaljenost između dviju točaka
$t_x$	s	vrijeme vožnje između dviju točaka u horizontalnoj ravnini
$t_y$	s	vrijeme vožnje između dviju točaka u vertikalnoj ravnini
$t_{x1}$	s	vrijeme vožnje između dviju skladišnih lokacija koje se nalaze u različitim prolazima, slučaj 1.
$t_{x2}$	s	vrijeme vožnje između dviju skladišnih lokacija koje se nalaze u različitim prolazima, slučaj 2.
$u_{ij}$	s	ušteda u sekundama koja se ostvaruje sparivanjem točaka i,j
$d_{Pi}$	s	vremenska udaljenost točke i od pretovarne stanice P
$d_{Pj}$	s	vremenska udaljenost točke j od pretovarne stanice P
$d_{ij}$	s	vremenska udaljenost točke i od točke j

## **SAŽETAK**

U ovom radu dan je pregled podjele klasičnih i automatiziranih skladišnih sustava te su prikazane metode komisioniranja u niskim regalnim skladišnim sustavima i u automatiziranim AS/RS person-on-board skladišnim sustavima. Izvršena je analiza rada računalom upravljano visokoregalnog skladišnog sustava u poduzeću Elektrokontakt d.d. te je ispitan potencijal primjene heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika pri nastojanjima minimizacije trajanja operacije komisioniranja.

Ključne riječi: skladišni sustav, visokoregalni skladišni sustav, komisioniranje, problem trgovačkog putnika, rutiranje (usmjeravanje) vozila

## **SUMMARY**

This paper gives an overview of classic and automated storage systems and presents methods of order-picking for the low rack storage systems and for the AS/RS person-on-board storage systems. A high-rack storage system with a warehouse management system in the Elektrokontakt company has been analysed and the potential for application of heuristic methods used for solving the traveling salesman problem in efforts to minimize the duration of the order-picking process has been estimated.

Key words: storage system, high-rack storage system, order-picking, traveling salesman problem, vehicle routing

## 1. UVOD

Tehnička logistika podrazumijeva rješenja tehnike i tehnologije kretanja i mirovanja materijala u procesima proizvodnje ili u procesima uslužnih djelatnosti. Sama logistika je vrlo važan dio svake tvrtke, bilo da svojom djelatnošću podržava proizvodnju ili omogućuje distribuciju i prodaju gotovih proizvoda te je vrlo važna njena točnost i pravovremenost. Glavni zadatak logistike je stoga osiguravanje raspoloživosti određenog materijala u određenoj količini i s pravim informacijama na točno određenom mjestu u točno određeno vrijeme, a glavni cilj tehničke logistike je minimizacija troškova logistike uz maksimizaciju točnosti i preciznosti.

S logističkog stajališta skladište je čvor ili točka na logističkoj mreži na kojem se roba prije svega prihvaća i prosljeđuje u nekom drugom smjeru unutar mreže. Glavne tehničke funkcije skladišta su, dakle, skladištenje i distribucija materijala kako bi se omogućilo prostorno i vremensko uravnoteženje tokova materijala. Svaki skladišni sustav predviđen je za određene jedinične terete kojima se može lako i brzo rukovati. Najviše zastupljeni jedinični tereti u skladištima su palete. Pri proizvodnji najčešće se jedna paleta, sanduk ili kutija popunjava određenom količinom istovrsnog proizvoda.

U današnjem svijetu područje logistike je pred sve većim izazovima. U sve više globaliziranom gospodarstvu i tržištu pokušavaju se minimizirati zalihe i organizirati "Just-in-time" proizvodnja. To znači smanjenje broja artikala u pojedinim narudžbama, a u isto vrijeme povećanje ukupnog broja narudžbi. Takve male i česte narudžbe velik su izazov kod organizacije logistike i rada skladišta. Narudžbe korisnika mogu biti manje od jediničnih tereta skladišnog sustava te je za izvršavanje naredbe potrebno izuzeti određeni broj artikala, primjerice kutija ili pojedinačnih artikala, s jediničnog tereta skladišta, primjerice palete, sanduka ili kutije. Taj proces naziva se komisioniranje, a u praksi je također prisutan i anglizam "pikiranje" izveden od engleskog naziva za komisioniranje "order-picking". Komisioniranje se smatra najdugotrajnijim i najskupljim procesom unutar skladišnog sustava. Globalni trendovi nagoviještaju sve veću zastupljenost procesa komisioniranja u skladišnim sustavima, stoga je potrebno osigurati učinkovito komisioniranje kako bi se zadržala konkurentnost poduzeća na tržištu. [1][2]

Ostvarivanje učinkovitijeg komisioniranja odnosi se na skraćivanje trajanja operacije komisioniranja budući da visoki troškovi komisioniranja proizlaze ponajviše od cijene radnog sata radnika u skladištu. Kako bi se postiglo učinkovito komisioniranje razvijene su različite metode komisioniranja za pojedine vrste skladišnih sustava, kao što su metoda S-oblika ili kompozitna metoda kod komisioniranja u niskim regalnim skladištima ili heuristika traka kod komisioniranja u prolazu AS/RS visokoregalnog skladišnog sustava. Problem komisioniranja može se promatrati i kao poseban slučaj problema trgovačkog putnika za čije rješavanje postoje već razvijene metode. Složenost problema trgovačkog putnika eksponencijalno raste s porastom točaka koje je potrebno posjetiti. U slučaju komisioniranja točke se odnose na skladišne lokacije koje je potrebno posjetiti pri komisioniranju te izvršiti izuzimanje robe na njima. Kod velikog broja točaka rješavanje problema može biti dugotrajno te se često koriste heurističke metode kojima se problem može riješiti brzo i uz prihvatljivo odstupanje od optimalnog rješenja.

U poglavljima 2 i 3 prikazati će se različite izvedbe klasičnih i automatiziranih skladišnih sustava s posebnim naglaskom na visokoregalne skladišne sustave čije je poznavanje važno za razumijevanje procesa komisioniranja. Primjena heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika za rutiranje komisionera prikazati će se u poglavlju 4. U tom poglavlju analizirati će se problematika komisioniranja u niskom regalnom skladištu i u AS/RS skladišnom sustavu gdje se komisioniranje odvija po načelu čovjek robi. Poglavlje 5 posvećeno je prikazu skladišnog sustava poduzeća Elektrokontakt d.d. koje je izvedeno kao visokoregalno skladište s uskim prolazima. Uvidom u skladišni sustav poduzeća Elektrokontakt utvrđeno je da se komisioner kreće kroz prolaze između regala kao kod komisioniranja u niskim regalnim skladištima, ali je unutar prolaza proces komisioniranja sličan procesu kod komisioniranja u AS/RS skladišnim sustavima. Motivacija za rad proizašla iz tog uvida je želja da se predloži jedinstvena metoda komisioniranja koja bi obuhvatila komisioniranje u prolazima između regala te kretanje između tih prolaza. U poglavlju 6 ispituje se primjena određenih heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika na problem iz prakse. Konačno, u poglavlju 7 iznose se zaključci rada.

## 2. KLASIČNI SKLADIŠNI SUSTAVI

Klasične skladišne sustave karakterizira oslanjanje na ljudske resurse pri uskladištenju ili odlaganju (eng. storage), iskladištenju ili izuzimanju (eng. retrieval), komisioniranju (eng. order-picking) i popisivanju zaliha (eng. inventory) skladišta. Pri odlaganju i izuzimanju kod ove vrste skladišnih sustava radnici su potpomognuti različitim vozilima i napravama. U današnje vrijeme za praćenje stanja zaliha klasičnih skladišta koriste se uglavnom računalni programi, u koje radnici unose promjene stanja ručno i to ne nužno u trenutku u kojem se ta promjena događa. Unošenje promjena stanja na skladištu uvijek u trenutku kada se ta promjena dogodi karakteristika je računalom upravljanih skladišnih sustava. Važno je napomenuti da računalom upravljane skladišne sustave ne možemo u potpunosti smatrati automatiziranim skladišnim sustavima budući da je u njima samo kretanje informacija automatizirano, dok se za kretanje roba ovi skladišni sustavi, kao i klasični skladišni sustavi, oslanjaju na ljudsku snagu.

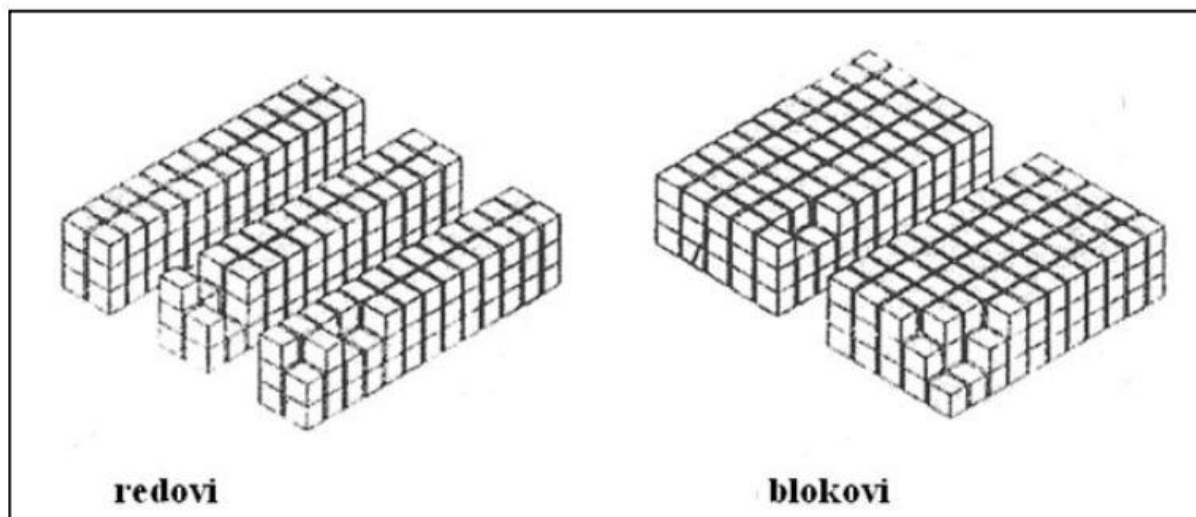
U skupinu klasičnih skladišnih sustava spadaju podna skladišta, skladišta s regalima različitih dimenzija i nosivosti, visokoregalna skladišta za palete i skladišta s protočnim regalima za palete ili manje jedinične terete. [2][3]

### 2.1. Podna skladišta

Podna skladišta nemaju opremu za skladištenje, odnosno smještaj materijala. Jedinice skladištenja mogu se oblikovati ovisno o vrsti robe, dostupnim pomoćnim sredstvima i dostupnoj skladišnoj površini.

Sipki materijal može se odlagati gomilanjem materijala na određenoj plohi u hrpe ili kupove, a komadne skladišne jedinice mogu se odlagati nasumično, bez određenog rasporeda ili u redove i blokove. Odlaganje u redove podrazumijeva postojanje transportnih puteva koji omogućuju pristup bilo kojoj jedinici skladištenja, dok odlaganje u blokove omogućava učinkovitije korištenje skladišne površine, ali zato nije omogućen izravan pristup svim jedinicama skladištenja. Na slici 1. ilustrirano je odlaganje jediničnih tereta u redove i u blokove. [2]





Slika 1. Odlaganje jediničnih tereta u redove ili blokove

## 2.2. Regalna skladišta

Pojam regalnih skladišta obuhvaća mnogo raznovrsnih izvedbi ovisno o vrsti regala korištenim u njima. Same tehničke izvedbe skladišta najčešće se nazivaju upravo prema nazivu sredstava za skladištenje, koja se smatraju glavnom komponentom skladišnog sustava.

**Paletni regali** predviđeni su za skladištenje paleta kao jediničnih tereta. Materijal se odlaže/izuzima uz primjenu posebne opreme (paleta) i pomoću transportnih sredstava (viličara). Regali su najčešće postavljeni u redove s odlaganjem jedne palete po dubini regala te je time osiguran izravan pristup svakoj jedinici skladištenja. Visine regala najčešće iznose 6 do 7,5 metara, iako su moguće visine do 12 metara, a u iznimnim slučajevima i do 15 metara.

U ovim regalima uobičajena su dva načina odlaganja paleta u regale; kod poprečnog odlaganja kraća stranica palete odlaže se po dubini regala, a kod podužnog odlaganja duža stranica palete odlaže se po dubini regala. Iskoristivost skladišne površine iznosi 30 do 40 %, a moguća je iskoristivost skladišnih lokacija u regalima do 100% budući da je osiguran izravan pristup svakoj jedinici skladištenja. [2]

Na slici 2. prikazana je klasična izvedba regalnog skladišta s paletnim regalima jednostruke dubine.



**Slika 2. Klasična izvedba skladišta s paletnim regalima**

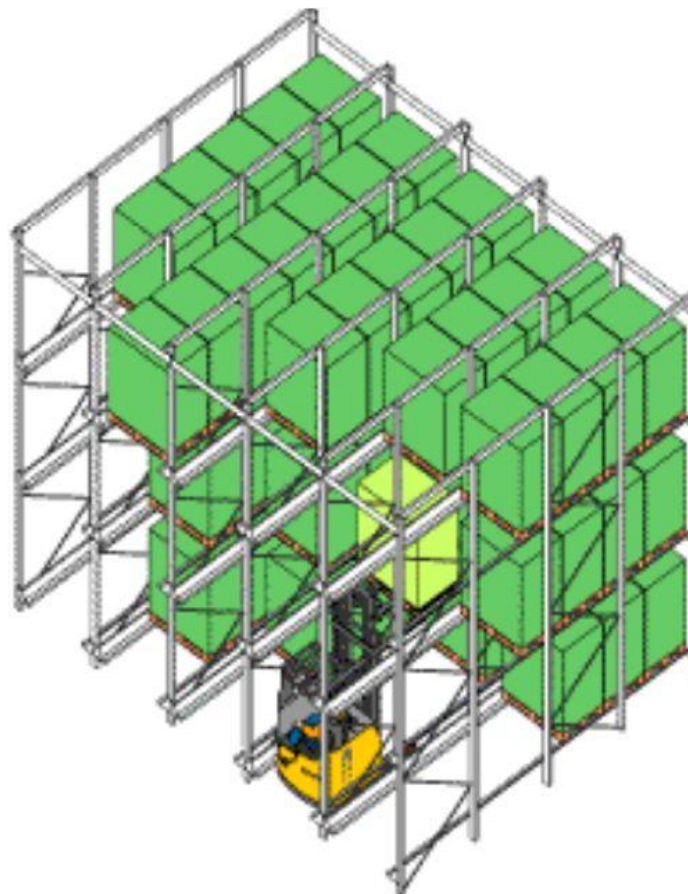
Kako bi se povećala iskoristivost skladišne površine moguća je primjena **paletnih regala dvostruke dubine** (eng. Double-deep pallet rack). Kod ovih regala odlažu se dvije palete po dubini regala. Nedostatci korištenja ovih regala su potreba korištenja posebnih transportnih sredstava tj. viličara s teleskopskim vilicama i nemogućnost izravnog pristupa svakoj jedinici skladištenja. Zbog nemogućnosti pristupa svakoj jedinici skladištenja otežano je provođenje FIFO načela (eng. First In First Out). [2] Skladište s paletnim regalima dvostruke dubine prikazano je na slici 3.



**Slika 3. Skladište s paletnim regalima dvostruke dubine**

**Prolazni regali** (eng. drive-in, drive-through rack) omogućuju veću iskoristivost skladišne površine od regala dvostruke dubine te ne zahtijevaju korištenje viličara s teleskopskim vilicama. Ovi regali imaju vertikalne nosače (stupove) koji su međusobno spojeni poprečnim veznicima i na kojima se nalaze nosači paleta. Duljine regala najčešće su predviđene za skladištenje 8 do 10 paleta po dubini. Iskoristivost skladišne površine je oko 75 %, ali popunjenost samih skladišnih lokacija najčešće se kreće oko 60 %. Na slici 4. prikazan je prolazni regal s viličarem unutar regala. [2]

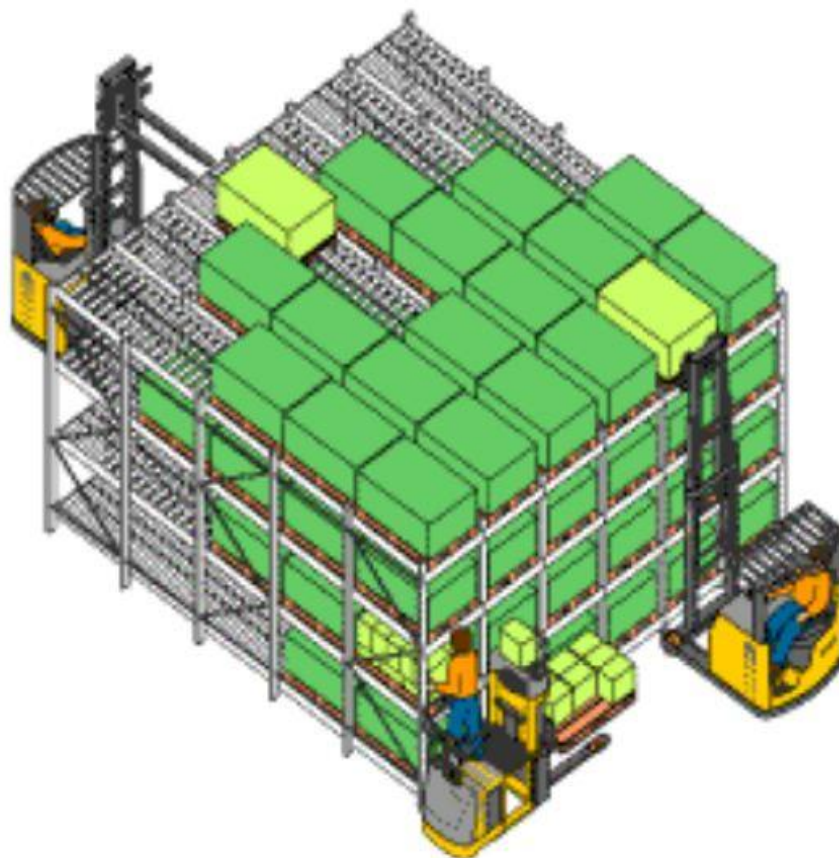




**Slika 4. Prolazni regal**

Najveći nedostatak ovakvih regala je nemogućnost izravnog pritupa velikom broju jedinica skladištenja te nemogućnost provedbe FIFO načela.

**Protočni regali** omogućuju dinamičko skladištenje istovrsnog komadnog materijala. Ovakve izvedbe regala koriste se za skladištenje paleta, sanduka, kutija i sl. Rukovanje materijalom uvijek se ostvaruje prema FIFO načelu. Dinamičko skladištenje ostvareno je kretanjem materijala voznom stazom bez pogona (gravitacijski protočni regali) ili s pogonom. Vozna staza s pogonom podrazumijeva korištenje sredstava neprekidnog toka (valjčane, lančane ili trakaste staze) ili prekinutog transporta (posebno izvedena vozila koja se kreću ispod jediničnog tereta). Iskoristivost skladišne površine iznosi 75 %, a popunjenost skladišnih lokacija najčešće je oko 70 %. Na slici 5. prikazan je paletni protočni regal u kojem se može vršiti i komisioniranje pojedinačnih artikala. [2]



**Slika 5. Paletni protočni regal**

**Polični regali** predviđeni su za odlaganje materijala izravno na police te se najčešće koriste u skladišnim sustavima s učestalim komisioniranjem. Skladište s poličnim regalima prikazano je na slici 6.



**Slika 6. Skladište s poličnim regalima**

**Konzolni regali** koriste se za skladištenje materijala s jednom ili dvije karakteristične izmjere kao što su cijevi, profili, šipke i sl. Ukupna visina ovih regala najčešće je do 80 metara, a duljine konzolnih nosača najčešće su do 3 metra. Standardne izvedbe ovih regala su fleksibilne te je moguće mijenjati visinu pojedinih razina skladištenja. [2]

Na slici 7. prikazano je skladište s konzolnim regalima.





**Slika 7. Skladište s konzolnim regalima**

**Prijevozni regali** omogućuju vrlo visoku iskoristivost skladišne površine budući da minimiziraju potrebu za transportnim putevima. Iskoristivost skladišne površine je oko 85 %, a iskoristivost skladišnih lokacija unutar regala je i do 100 %. Prijevozni regali sastoje se od paletnih, poličnih ili konzolnih regala koji su postavljeni na pokretna postolja kojima se omogućuje pravocrtno kretanje. Prema načinu pomicanja mogu biti izvlačni ili razmični. Pomicanjem, tj. izvlačenjem ili razmicanjem regala, ostvaruje se pristup bilo kojoj jedinici skladištenja. Budući da treba više vremena za pomicanje regala i ostvarivanje izravnog pristupa materijalu prijevozni regali koriste se u skladištima gdje je učestalost odlaganja i izuzimanja znatno manja u usporedbi s ostalim vrstama regala. [2]

Na slici 8. prikazano je skladište s prijevoznim paletnim regalima.



**Slika 8. Skladište s prijevoznim paletnim regalima**

**Karuseli** (eng. carousel) su okretni ili optočni regali koji se sastoje od fiksnog broja spremnika koji rotiraju u vertikalnoj ili u horizontalnoj ravnini i tako tvore vertikalni odnosno horizontalni karusel. Ovi regali najčešće se primjenjuju za materijal manjih težina i dimenzija. Okretanje karusela odvija se ručno ili pomoću elektromotora, a ukoliko elektromotorom upravlja računalo karusel se smatra automatiziranim skladišnim sustavom. [2] Automatizirani karuseli opisati će se u poglavlju 3.1.

Na slici 9. prikazan je horizontalni karusel gdje se okretanje karusela odvija ručno.





Slika 9. Horizontalni karusel

### 2.2.1. Podjela regalnih skladišta s obzirom na širinu prolaza

Postoje tri vrste prolaza s obzirom na njegovu širinu; široki prolaz (eng. Wide Aisle, WA), uski prolaz (eng. Narrow Aisle, NA) i vrlo uski prolaz (eng. Very Narrow Aisle, VNA). [2]

**Široki prolazi (WA)** najčešće su zastupljeni te se u njima koriste čeonu viličari kojima je potrebno mnogo prostora u prolazu za obavljanje uskladištenja/izuzimanja. Širina ovih prolaza najčešće je između 3,35 i 3,65 metara. Čeonu viličar marke Linde prikazan je na slici 3.



Slika 10. Čeonu viličar marke Linde

**Uski prolazi (NA)** zamišljeni su s ciljem smanjenja površine prolaza između regala u skladištu. Na taj način moguće je skladištiti više robe u objektu iste površine u odnosu na skladišne sustave sa širokim prolazima. Upotreba ovih prolaza u skladištu zahtijeva upotrebu skupljih viličara koji mogu raditi u užim prolazima, stoga je preporučljivo izvršiti analizu kojom će se utvrditi isplativost prednosti koje pružaju uski prolazi u odnosu na široke. Širina ovakvih prolaza najčešće je između 2,4 i 3 metara.

**Vrlo uski prolazi (VNA)** predstavljaju vrhunac minimizacije širine prolaza u visokoregalnim skladištima. Vrlo uski prolazi imaju širinu manju od 1,8 metara. Viličari za rad u vrlo uskim prolazima tek su neznatno širi od paleta koje trebaju izuzeti ili uskladištiti. [2]

### **2.2.2. Logistički procesi unutar klasičnih skladišnih sustava**

Postoje tri osnovna logistička procesa unutar skladišnog sustava:

- Uskladištenje jediničnih tereta
- Izuzimanje jediničnih tereta
- Komisioniranje

Uskladištenje podrazumijeva odlaganje jednog jediničnog tereta, palete, na jednu od slobodnih lokacija u skladištu. Za izvođenje ove operacije koriste se različite vrste viličara ovisno o visini regala i masi jediničnih tereta. U pravilu se jedinični tereti veće mase odlažu na niže skladišne lokacije u regalima. Skladišna operacija izuzimanja jediničnih tereta također se obavlja viličarima.

Komisioniranje podrazumijeva izuzimanje tereta koji su manji od jediničnih tereta u skladišnom sustavu. Izuzimaju se pojedinačni artikli s palete u skladištu, a da se pritom sama paleta ne miče sa svoje skladišne lokacije. Radni nalozi kod komisioniranja mogu sadržavati veći broj različitih vrsta artikala zbog čega će postojati potreba za obilaskom većeg broja skladišnih lokacija unutar skladišta. Radnici će pritom gubiti znatan dio vremena na kretanje između različitih lokacija u skladištu. Budući da plaće zaposlenika imaju znatan udio u operativnim troškovima skladišnog sustava, operacija komisioniranja smatra se logističkom

operacijom koja izaziva najveći trošak. Trošak komisioniranja ne donosi nikakvu dodatnu vrijednost te se ulažu znatni naponi za smanjenje troškova koje ta operacija izaziva.

Najčešći pristup tom problemu su pokušaji minimizacije trajanja operacije komisioniranja čime se postiže veća produktivnost radnika. U skladišnim sustavima gdje postoji velik broj radnih naloga s manjim brojem stavaka određen broj radnih naloga se spaja u jedan te se po njemu vrši komisioniranje. Primjenom ovog jednostavnog rješenja moguće je u jednoj operaciji komisioniranja riješiti velik broj radnih naloga te tako minimizirati vrijeme koje radnici trebaju provesti obavljajući tu operaciju. Ovo rješenje pak ima nedostatak što se nakon komisioniranja treba provesti proces sortiranja komisionirane robe na pojedinačne narudžbe. Prednosti uvođenja ovog rješenja ponekad nisu dovoljno velike da bi opravdale dodatni trošak sortiranja, stoga je potrebno prije uvođenja analizirati problem. [2]

### **2.2.3. Računalom upravljani klasični skladišni sustavi**

Integracija informacijske tehnologije s logističkim sustavom podrazumijeva povezanost svake odluke u logističkom procesu s pripadajućim informacijama iz informacijskog sustava. Taj informacijski sustav koristi se za prikupljanje, obradu, pohranu i distribuciju podataka i omogućuje povećanje učinkovitosti tijekom informacija u svim segmentima poslovanja.

Informacijski sustavi u logistici omogućuju povezivanje rukovanja materijalom, distribucije i prodaje, planiranja proizvodnje, kontrole kvalitete i održavanja. Sustavi za upravljanje skladištem ili WMS (eng. Warehouse Management System) podrazumijevaju povezanost informacijskog sustava sa svakom operacijom kojom se mijenja stanje na skladištu. To znači bilježenje svih operacija i njihovih posljedica u realnom vremenu, tj. u trenutku kada se one i dogode. Korištenjem ove vrste sustava moguće je imati dostupne podatke o trenutnom stanju na skladištu, vremenu zaprimanja robe i druge relevantne informacije u bilo kojem trenutku i s bilo kojeg mjesta. Svako uskladištenje ili izuzimanje popraćeno je radnjom koja povezuje fizičku promjenu u skladištu sa zapisom u informacijskom sustavu. Ta radnja može biti skeniranje RFID koda, bar koda ili QR koda, ali činjenica da se ta radnja događa u isto vrijeme kad i fizička promjena u skladištu i činjenica da se ta promjena bilježi u informacijskom sustavu kojem se može pristupiti s bilo kojeg mjesta čini skladište računalom upravljanim skladištem. [2]

### 3. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI

Postoji mnogo različitih vrsta automatiziranih skladišnih sustava koje se međusobno znatno razlikuju. Stoga je razvijena osnovna podjela automatiziranih skladišnih sustava na dva segmenta: [2][3]

- karusele/vertikalne podizne module
- automatizirane skladišne sustave s fiksnim prolazom

#### 3.1. Karuseli/vertikalni podizni moduli

Karuseli su, kao što je ranije spomenuto, dinamički skladišni sustavi koji se sastoje od fiksnog broja spremnika koji rotiraju u horizontalnoj ili vertikalnoj ravnini i tako tvore horizontalni odnosno vertikalni karusel.

##### 3.1.1. Horizontalni karuseli

Horizontalni karuseli razvili su se od konfekcijskih konvejera karakterističnih za kemijske čistionice. Umjesto vješalica ova vrsta karusela ima spremnike (najčešće žičane košare) koji rotiraju po tračnicama. Najznačajnija prednost koju horizontalni karusel pruža je ušteda vremena pri komisioniranju. Pogonski sustav karusela rotira sve spremnike te dovodi spremnik s traženim artiklima ispred radnika koji tada vrši komisioniranje. [2][3]

Korištenjem karusela eliminirana je potreba za kretanjem radnika. Moguće su i izvedbe gdje jedan radnik posluhuje dva ili više karusela u isto vrijeme čime se minimizira vrijeme čekanja radnika. Upotrebom karusela olakšan je i nadzor radnika budući da stoje uvijek na istom mjestu. Horizontalni karusel zaštićen ogradom prikazan je na slici 4.



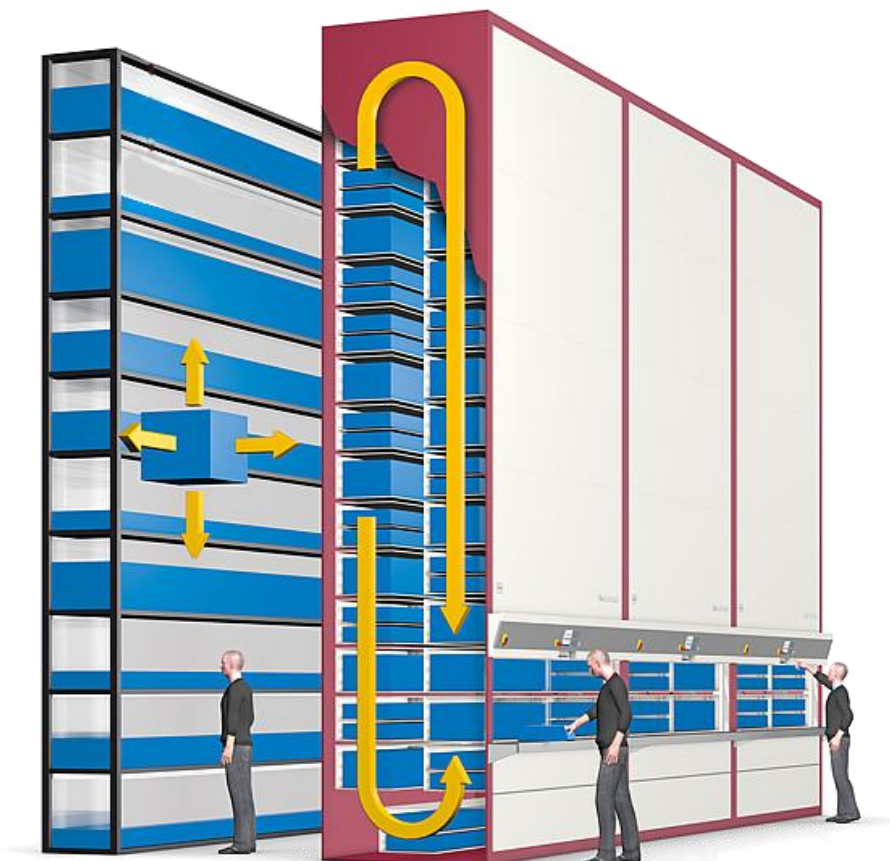
**Slika 11. Automatizirani horizontalni karusel zaštićen ogradom**

### **3.1.2. Vertikalni karuseli**

Vertikalni karuseli sastoje se od fiksnog broja spremnika koji su mehanički povezani i koji rotiraju u vertikalnoj ravnini. Vrlo su slični horizontalnim karuselima po načelu rada; rotiraju se svi spremnici dok traženi spremnik nije ispred radnika. Vertikalni karuseli omogućuju iskorištavanje inače teško iskoristivog visinskog prostora. Mogu se koristiti u povezivanju više katova nekog proizvodnog postrojenja ili distribucijskog središta. [2][3]

U usporedbi s nekim drugim skladišnim sustavima vertikalni karusel omogućuje pristup robi s ergonomski idealne visine što je vidljivo na slici 12.





**Slika 12. Usporedba klasičnog poličnog regala s policama i vertikalnog karusela**

### **3.1.3. Vertikalni podizni moduli**

Vertikalni podizni moduli (eng. Vertical Lift Module, VLM) su automatizirani skladišni sustavi koji se sastoje od dvaju regala zatvorenih u kućište između kojih je jedan prolaz. Automatski uređaj s elevatorom (shuttle) kreće se tim prolazom između regala te obavlja izuzimanje/odlaganje robe. Jedan pojedinačni vertikalni podizni modul može imati više automatskih uređaja s elevatorom i više otvora za izuzimanje. Izvedbe s više otvora za izuzimanje mogu povezivati više katova nekog postrojenja kao i ranije spomenuti vertikalni karuseli. [2][3]

Ova vrsta automatiziranih skladišnih sustava omogućava veliku iskorištenost prostora (osobito u visinu), ergonomičnost pri rukovanju, veliku brzinu izuzimanja robe i sigurnost uskladištene robe. Moguće je postići visoku produktivnost radnika korištenjem inačica s više

automatiziranih uređaja s elevatorom. Sustav s 4 vertikalna podizna modula u nizu prikazan je na slici 13.



**Slika 13. Sustav s 4 vertikalna podizna modula**

### **3.2. Automatizirani skladišni sustavi s fiksnim prolazom**

Ovakvi automatizirani skladišni sustavi sastoje se od sustava regala između kojih je prolaz sa S/R dizalicom (eng. storage/retrieval, S/R) koja može manipulirati materijalom (paletama, kutijama ili sl.) bez operatera koji bi upravljao njenim kretanjem, što znači da su operacije izuzimanja i uskladištenja potpuno automatizirane. Osnovni dijelovi ovog sustava su regali, dizalice, prolazi između regala, pretovarna stanica, a neke izvedbe imaju i pozicije za ručno izuzimanje materijala s paleta.

Regali su najčešće metalne konstrukcije s mjestima za pohranu materijala (najčešće paleta). Dizalice su potpuno automatizirane i mogu se samostalno kretati i izuzimati ili odlagati materijal. Prolazi se nalaze između regala i dizalica se njima kreću. Na pretovornoj stanici dizalica odlaže materijal koji je ranije izuzela iz regala i preuzima materijal koji treba uskladištiti u regal. [4]

Pojam AS/RS (eng. Automated Storage/Retrieval System) u užem smislu obuhvaća upravo ovakve sustave. S obzirom na vrstu jediničnih tereta/uskladištenog materijala načinjena je podjela AS/RS sustava:

1. Micro-load
2. Mini-load
3. Unit-load
4. Person-on-board sustavi

### 3.2.1. *Micro-load AS/RS*

U ovim skladišnim sustavima skladište se mali artikli čija masa ne prelazi 50 kg. Najčešće se ne komisionira čitav sadržaj jednog spremnika nego korisnik izuzima potrebnu količinu materijala, nakon čega dizalica vraća taj spremnik natrag u regal. Duljine regala najčešće su između 12 i 60 m, a visine između 3 i 12 m. [3] Na slici 14. prikazan je micro-load sustav koji se nalazi u sklopu knjižnice jednog američkog sveučilišta.



**Slika 14. Micro-load AS/RS**



### 3.2.2. Mini-load AS/RS

U ovim skladišnim sustavima skladište se mali spremnici čija se masa najčešće kreće između 50 i 250 kg, a u iznimnim slučajevima može doseći i do 500 kg. Duljine regala ovakvih sustava najčešće su između 12 i 60 m, a visine između 3 i 15 m. [3] Mini-load sustav s 3 prolaza i s po jednom dizalicom u svakom prolazu prikazan je na slici 15.



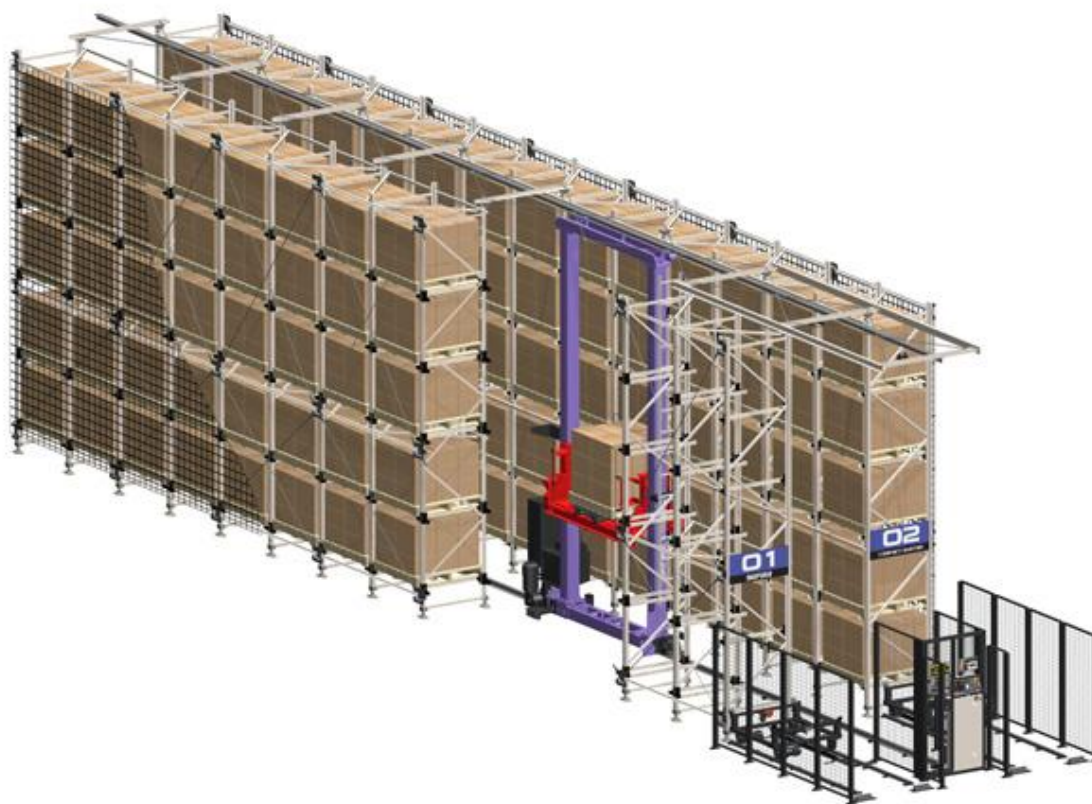
Slika 15. Skladišni sustav s 3 mini-load dizalice

### 3.2.3. Unit-load AS/RS

Unit-load sustavi predviđeni su za rukovanje većim i težim teretima kao što su palete ili spremnici paletnih dimenzija. Visine regala najčešće se kreću između 10 i 50 m, a duljina može doseći i do 290 m. Brzina vožnje dizalice u prolazu može varirati ovisno o vrsti dizalice i proizvođaču i u većini slučajeva je između 2,5 i 3 m/s. Brzina podizanja prihvatne stanice, tj. vilica, najčešće je između 0,6 i 0,75 m/s. [3]

Klasična konfiguracija unit-load AS/RS sustava ima regale jednostruke dubine s prolazima između njih, a u svakom pojedinom prolazu nalazi se jedna AS/RS dizalica s jednom

prihvatnom stanicom. Klasična konfiguracija unit-load AS/RS sustava prikazana je na slici 16.



**Slika 16. Klasična konfiguracija unit-load AS/RS sustava**

Ovakvi skladišni sustavi koriste se kao dio velikih logističkih lanaca i omogućuju najvišu razinu zaštite, nadzora nad zalihama i radom te najveće protoke na relativno malenoj skladišnoj površini. Kod potrebe za velikim protokom skladišnog sustava, unit-load sustavi omogućuju velik protok uz minimalne operativne troškove iz čega proizlazi prednost njihova korištenja nad klasičnim skladišnim sustavima. Za izgradnju unit-load AS/RS sustava potrebno je planirati protočni i ukupni skladišni kapacitet, budući da je uvođenje promjena u sustav nakon njegove izgradnje otežano i iziskuje znatna financijska sredstva.

Zbog velikih investicijskih troškova izgradnje ovakvih sustava i obujma planiranja koji je potrebno izvesti prije početka izgradnje, ovakve sustave u pravilu koriste veliki proizvođači s jasno definiranom poslovnom i logističkom strategijom. Primjeri korisnika ovakvih sustava u Hrvatskoj su: Kraš d.d., Franck d.d. i Podravka d.d..

### 3.2.4. *Person-on-board AS/RS*

Iako su person-on-board sustavi u biti modifikacija gore navedenih vrsta AS/RS sustava, oni su i posebna podskupina unutar ove podjele. Razlog tomu je specifičan proračun ovih sustava gdje S/R dizalica putuje između većeg broja skladišnih lokacija prije povratka na pretovarnu stanicu. Najčešća je primjena ovakvih sustava u okviru mini-load i unit-load sustava. Slika 17. prikazuje S/R dizalicu na kojoj se nalazi radnik koji može komisionirati pojedinačne artikle ili kutije s paleta u regalu, a dizalica također ima mogućnost izuzimanja/odlaganja cijelih paleta. [3]



Slika 17. **Person-on-board AS/RS**

## 4. RUTIRANJE VOZILA PRI KOMISIONIRANJU

Komisioniranje se može promatrati kao poseban oblik problema trgovačkog putnika. Kako bi se uvidjela povezanost problema trgovačkog putnika s procesom komisioniranja u skladišnim sustavima potrebno je poznavati definiciju problema trgovačkog putnika.

Problem trgovačkog putnika odnosi se na trgovačkog putnika koji mora posjetiti određeni broj gradova. Gradovi su međusobno povezani, a svaka poveznica između dvaju pojedinih gradova ima svoj trošak koji se odnosi na duljinu putovanja. Trgovački putnik treba posjetiti sve gradove i pritom minimizirati troškove putovanja. Pri rješavanju tog problema stvara se graf s točkama koje predstavljaju gradove i koje su međusobno povezane linijama, a duljina linija predstavlja troškove kretanja između dvaju pojedinih točaka odnosno gradova. Opis problema trgovačkog putnika pojavljuje se često kod logistike i transporta, npr. kod rutiranja dostavnih vozila ili kod komisioniranja.

Optimalno rješenje je jednostavno odrediti za mali broj točaka, ali porastom njihova broja složenost problema raste eksponencijalno te određivanje optimalnog rješenja može biti dugotrajno. Za probleme s većim brojem točaka razvijene su određene heurističke metode koje omogućuju brzo rješavanje problema, ali pritom pružaju suboptimalno rješenje, odnosno rutu s većim troškovima. U slučaju komisioniranja u skladišnom sustavu važno je brzo rješavanje problema, stoga su razvijene različite heurističke metode za različite izvedbe skladišnih sustava. [1]

U ovom poglavlju opisati će se heurističke metode korištene pri komisioniranju u niskom regalnom skladištu, gdje se komisioner kreće između većeg broja prolaza između regala i metode korištene pri komisioniranju u person-on-board AS/RS skladišnom sustavu unutar jednog prolaza.

### 4.1. Komisioniranje u niskom regalnom skladištu

Komisioniranje vrši radnik koji se kreće konstantnom brzinom. Pretpostavlja se da visina, na kojoj se nalazi roba koju treba komisionirati, ne utječe znatno na trajanje komisioniranja.

Komisioniranje u velikom skladištu s velikim brojem regala podrazumijeva dugotrajno kretanje radnika. Kako bi se proces komisioniranja ubrzao te se i povećala produktivnost radnika, razvijene su sljedeće heurističke metode rutiranja komisionera:

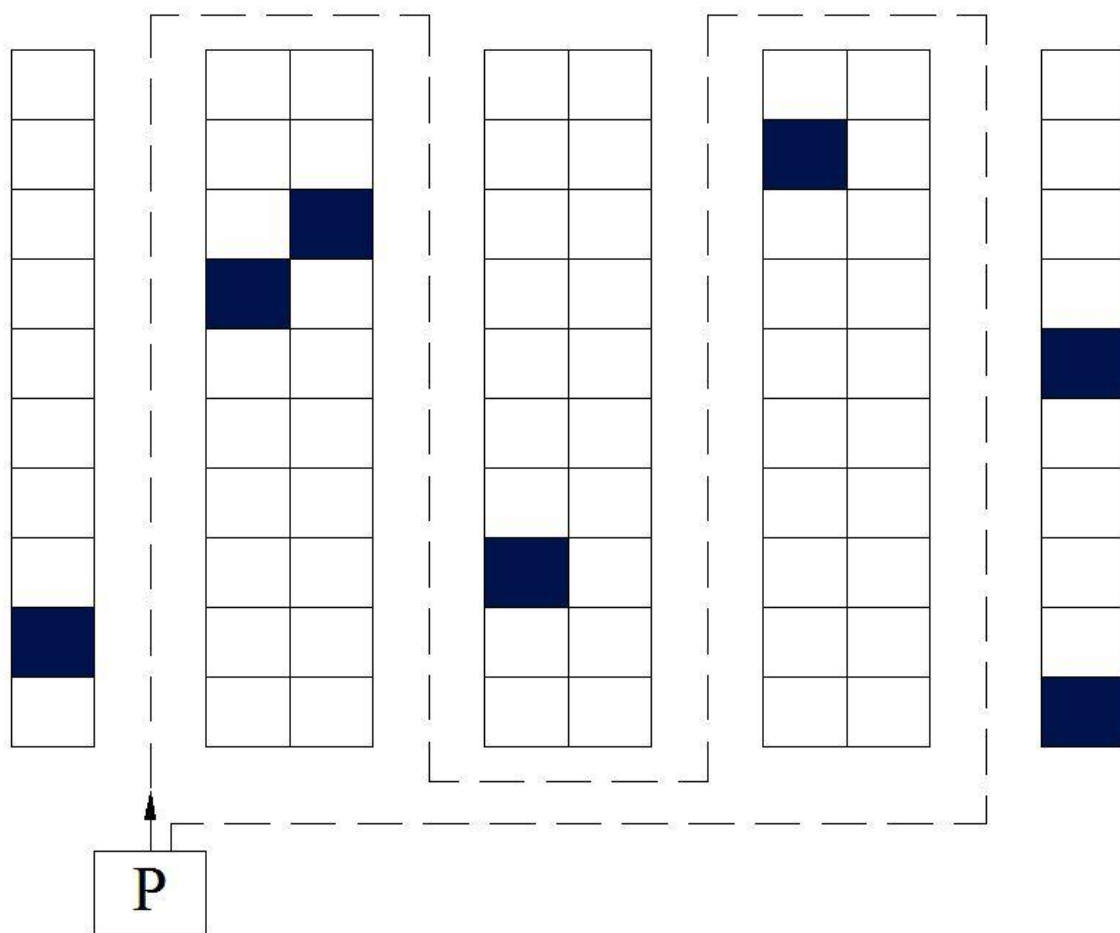
- Metoda povratka
- Metoda S-oblika
- Metoda srednje točke
- Kompozitna metoda

#### **4.1.1. Metoda povratka**

Metoda povratka naziva se još i povratnom metodom u nekim izvorima (eng. Return method). Kod ove metode komisioniranje se vrši za svaki prolaz zasebno uz povratne puteve. Komisioner ulazi u svaki prolaz u kojem se nalaze artikli koje treba komisionirati, obilazi sve skladišne lokacije koje je potrebno obići te se nakon toga vraća na transportni put s kojeg je ušao u prolaz i obavlja komisioniranje u preostalim redovima.

Ova metoda komisioniranja u većini slučajeva pruža lošija rješenja od ostalih metoda komisioniranja koje će se u nastavku predstaviti. Na slici 18. prikazana je shema kretanja komisionera usmjeravanog po metodi povratka. [1]





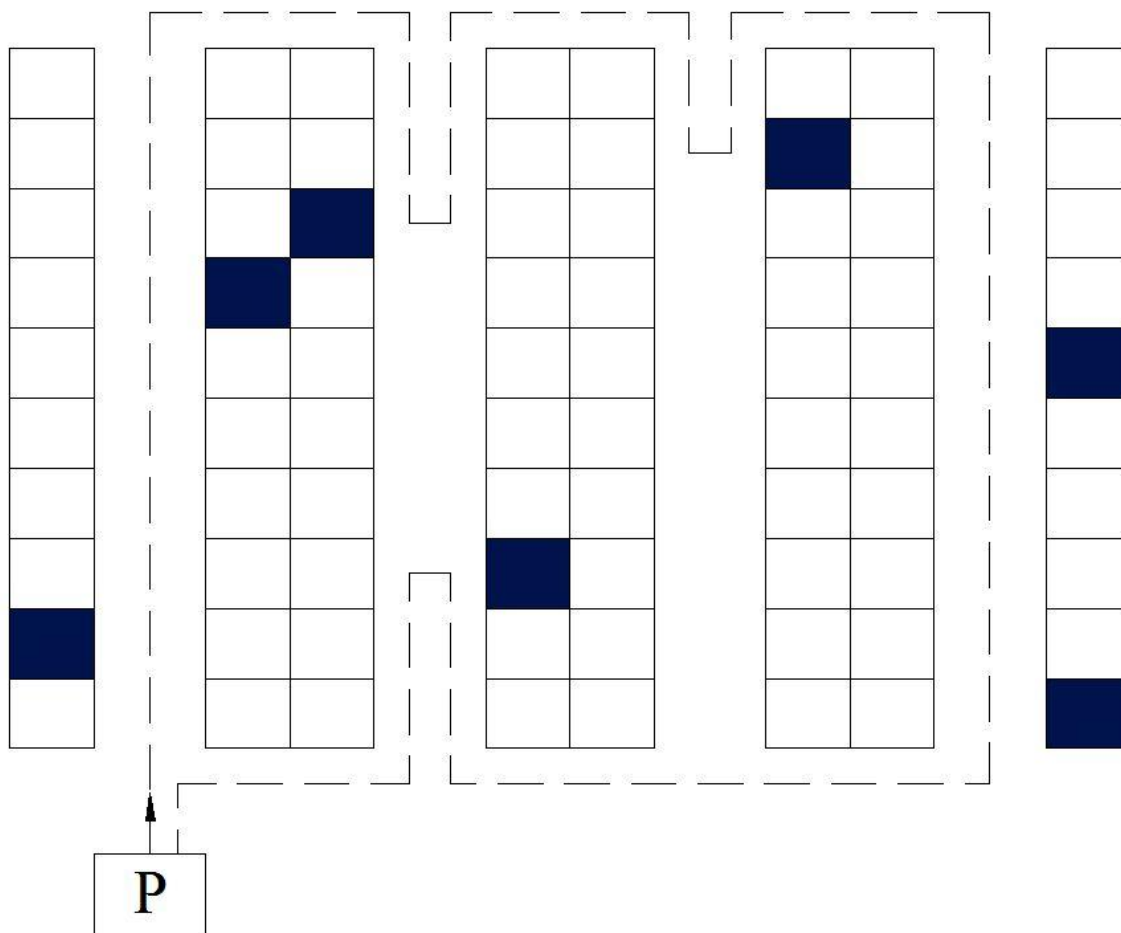
Slika 19. Shema rutiranja komisionera po metodi S-oblika

#### 4.1.3. Metoda srednje točke

Komisioniranje se kod metode srednje točke (eng. Midpoint method) vrši uz povratne puteve do polovine prolaza. Kod rutiranja ovom metodom komisioner se također služi transportnim putevima s obju strana prolaza. Obilaze se sve lokacije do polovine prolaza između regala i to s obju strana prolaza.

Metoda srednje točke također je jednostavna za primjenu i u slučajevima kad ima malo artikala u pojedinom prolazu daje zadovoljavajuća rješenja. Na slici 20. prikazana je shema kretanja komisionera uz rutiranje metodom srednje točke. [1]





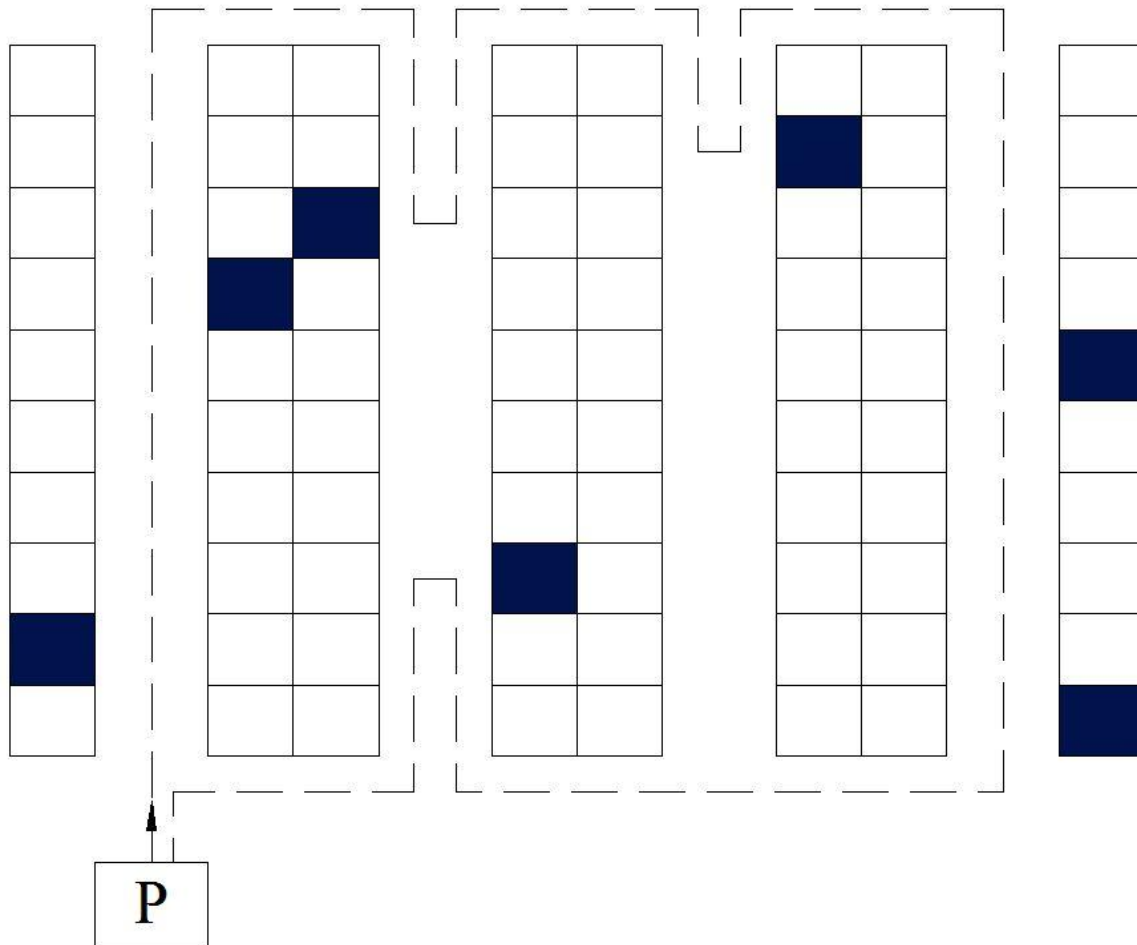
Slika 20. Shema rutiranja komisionera po metodi srednje točke

#### 4.1.4. Kompozitna metoda

Ova metoda koristi metodu S-oblika i metodu srednje točke pri komisioniranju. Za svaki prolaz sa artiklima koje je potrebno komisionirati odabire se prikladnija metoda. Komisioner se kreće do polovine prolaza ili prelazi prolaz u potpunosti, ovisno o slučaju. Kompozitna metoda stoga daje zadovoljavajuća rješenja neovisno o zastupljenosti artikala po prolazima.

Na slici 21. prikazana je shema kretanja komisionera kod primjene kompozitne metode rutiranja komisionera. [1]





Slika 21. Shema rutiranja komisionera po kompozitnoj metodi

#### 4.2. Komisioniranje kod AS/RS skladišnog sustava

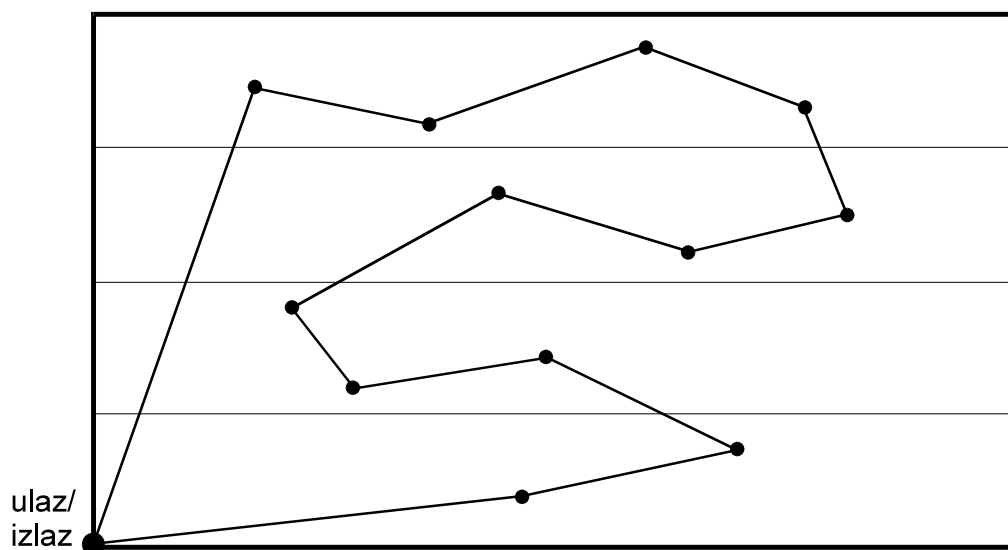
Za komisioniranje u AS/RS skladišnim sustavima koriste se najčešće person-on-board S/R dizalice opisane u poglavlju 3.2.4.. Te dizalice imaju kupolu za smještaj radnika koji vrši komisioniranje kutija ili pojedinačnih artikala s jedinica skladištenja. Komisioniranje se može vršiti i u drugim izvedbama AS/RS skladišnih sustava i to dovođenjem jediničnog tereta iz regala na kraj prolaza gdje se obavlja komisioniranje kutija ili pojedinačnih artikala nakon čega se jedinični teret vraća u regal. [3]

Kod person-on-board AS/RS skladišnih sustava najčešće je svakom prolazu pridružena po jedna S/R dizalica te se optimizacija kretanja dizalice gleda isključivo za kretanje dizalice unutar jednog prolaza. Iako izvedbe sustava koji imaju mogućnost rada jedne dizalice u više od jednog prolaza jesu moguće, mijenjanje prolaza pri radu pokušava se minimizirati.

U sljedećim poglavljima predstaviti će se komisioniranje pomoću heuristike traka te komisioniranje pomoću heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika. Iako su te metode razvijane prvenstveno za uporabu pri komisioniranju u person-on-board AS/RS skladišnim sustavima, u posljednje vrijeme sve se više ispituje njihova primjena u računalom upravljanim visokoregalnim skladišnim sustavima. Kod računalom upravljanih visokoregalnih skladišnih sustava moguće je upotrijebiti računalo za izračunavanje učinkovite rute komisioniranja, budući da su podaci o količini materijala i podaci o točnoj lokaciji pojedinih materijala unutar skladišta pohranjeni unutar informacijskog sustava.

#### 4.2.1. Komisioniranje pomoću heuristike traka

AS/RS skladišni sustavi imaju vrlo visoke regale, stoga se u svrhu optimizacije kretanja regal dijeli u više horizontalnih traka. Regal podijeljen u horizontalne trake te kretanje S/R dizalice prikazani su na slici 22. [3]



Slika 22. Prikaz kretanja S/R dizalice kod rutiranja uz pomoć heuristike traka

Broj horizontalnih traka određuje se prema tablici 1. [3]

Tablica 1. Određivanje broja horizontalnih traka regala

<i>Broj skladišnih lokacija koje treba posjetiti (n)</i>	<i>Broj traka (k)</i>
1 - 24	2
25 - 72	4
73 - 145	6
146 - 242	8

Sljedećim formulama moguće je procijeniti trajanje vožnje pri komisioniranju. [3]

$$E(k, n, T, Q) = T \left[ 2kA + kB(n-1) + \frac{k-1}{k} Q \right]$$

$$Q = \min \left( \frac{t_x}{T}, \frac{t_y}{T} \right)$$

$$T = \max(t_x, t_y)$$

$$t_x = \frac{L}{v_x}$$

$$t_y = \frac{H}{v_y}$$

gdje je:

$Q$  - faktor oblika regala

$T$  - vremenski faktor

$v_x$  - brzina vožnje

$v_y$  - brzina podizanja vilica

$L$  - duljina regala

$H$  - visina regala

$$A = \frac{C}{2} + \frac{1 - (1 - C)^{n+2}}{C(n+1)(n+2)}$$

$$B = \frac{C}{3} + \frac{2nC + 6C - 2 + 2(1 - C)^{n+3}}{C^2(n+1)(n+2)(n+3)}$$

$$C = \frac{Q}{k^2}$$

#### **4.2.2. Rutiranje uz heurističke metode rješavanja problema trgovačkog putnika**

Egzaktne metode rješavanja problema trgovačkog putnika uvijek daju optimalno rješenje, ali je, zbog složenosti problema s velikim brojem točaka, njihova primjena u praksi ograničena. Razvijene su, stoga, heurističke metode rješavanja problema trgovačkog putnika koje mogu pružiti zadovoljavajuće aproksimativno rješenje uz kratko vrijeme računanja. [4]

##### **4.2.2.1. Opis heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika**

Metoda najbližeg susjeda jedna je od najjednostavnijih heurističkih metoda za rješavanje problema trgovačkog putnika. Vrlo je jednostavna za primjenu, pouzdana i ne zahtijeva značajne resurse računala za rješavanje. Metode umetanja najudaljenijeg i najjeftinijeg nešto su složenije te u većini slučajeva pružaju bolja rješenja od metode najbližeg susjeda. Metoda Clarke-Wright složenija je od prethodno spomenutih metoda te u većini slučajeva pruža znatno bolja rješenja u odnosu na njih. [4]

Kako bi se utvrdila prikladna heuristička metoda potrebno je razmotriti:

- složenost problema (broj točaka)
- zadovoljavajuće vrijeme potrebno za računanje rute
- raspoložive resurse informacijskog sustava

#### **Metoda najbližeg susjeda**

Slijede koraci pri rješavanju problema metodom najbližeg susjeda

1. Gleda se točka koja je najbliža početnoj točki te se ona dodaje ruti
2. Prethodno dodanoj točki traži se najbliža sljedeća točka te se dodaje ruti
3. Prethodni korak se ponavlja dok ruta nije popunjena te se na kraju ruti dodaje put do početne točke, odnosno pretovarne stanice

Rute određene ovom heurističkom metodom u prosjeku su veće za 22 % od optimalne rute, tj. najkraće moguće rute. [4]

### Algoritam umetanja najudaljenijeg

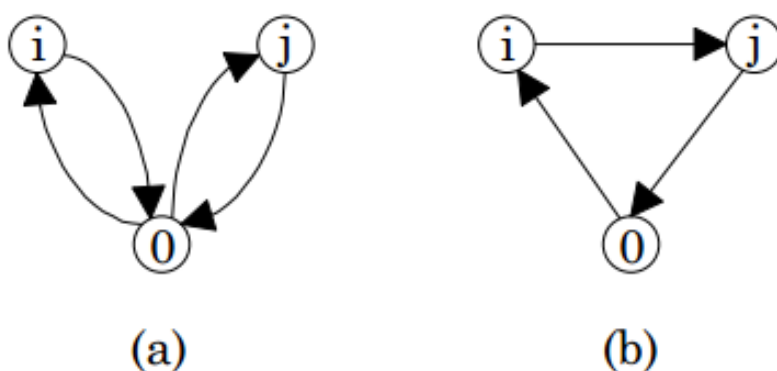
Algoritam umetanja najudaljenijeg pridružuje mreži točku koja je najudaljenija od neke već pridružene točke. Na taj način nastoji se minimizirati vjerojatnost pojavljivanja dugih povratnih puteva. [4]

### Algoritam umetanja najjeftinijeg

Algoritam umetanja najjeftinijeg uzima u obzir udaljenost između dviju točaka koje se već nalaze u mreži, tj. između točke iz koje će se sljedeća točka posjetiti i točke koju će se posjetiti nakon te točke. Uzimajući u obzir te dvije udaljenosti pridružuje se točka koja će minimalno povećati ukupan put u ruti. Algoritam "pohlepno" uzima "najjeftinije" točke u prvim koracima te postoji vjerojatnost da će točke u posljednjim koracima algoritma biti "skupe", tj. da će uvelike povećati ukupan put u ruti. [4]

### Metoda Clarke-Wright

Stvara se tablica udaljenosti između pojedinih skladišnih lokacija. Pri traženju rješenja problema ova metoda polazi od najgoreg mogućeg rješenja: posjećuje se jednu po jednu točku te se komisioner svaki put vraća na početnu lokaciju što je prikazano pod slovom "a" na slici 23. "0" označava početnu točku dok su "i" i "j" bilo koje dvije točke koje je potrebno posjetiti. Kako bi se došlo do povoljnijeg rješenja prvo se računaju uštede koje je moguće ostvariti sparivanjem dviju točaka što je prikazano pod slovom "b" na slici 23.



Slika 23. Ilustracija ostvarivanja ušteta

Nakon što su izračunate uštede za sve parove "i" "j" oblikovanje rute polazi od dodavanja točaka ruti koje imaju najveću uštedu. Svakim dodavanjem ušteda, neke druge uštede treba izostaviti iz odabira jer svaka točka u ruti treba imati samo jedan ulaz i jedan izlaz.

Nakon što su sve točke dodane ruti zbrajaju se udaljenosti između njih te se izračunava ukupna duljina rute. Istraživanja su pokazala da su ukupne duljine rute dobivene ovom heurističkom metodom u prosjeku veće za 12 % od optimalnog rješenja problema. [4]

U tablici 2. prikazano je empirijski određeno prosječno odstupanje rješenja dobivenog algoritmom od optimalnog rješenja problema. [4]

**Tablica 2. Odstupanje rješenja dobivenog heuristikom od optimalnog rješenja**

<i>Algoritam</i>	<i>Odstupanje od optimalnog rješenja</i>
<b>Algoritam najbližeg susjeda</b>	~22%
<b>Algoritam umetanja najudaljenijeg</b>	~14%
<b>Clarke-Wright algoritam</b>	~12%

#### 4.2.2.2. Rutiranje kretanja S/R dizalice unutar prolaza

Znanstvena istraživanja pokazala su da pri komisioniranju unutar jednog prolaza rutiranje metodom najbližeg susjeda može pružiti rutu s kraćim trajanjem od heuristike traka. Ispitivane su također izvedbe gdje se heuristika traka kombinira s heuristikom najbližeg susjeda, tj. redosljed obilaženja unutar iste trake određuje se po heuristici najbližeg susjeda. [6][7]

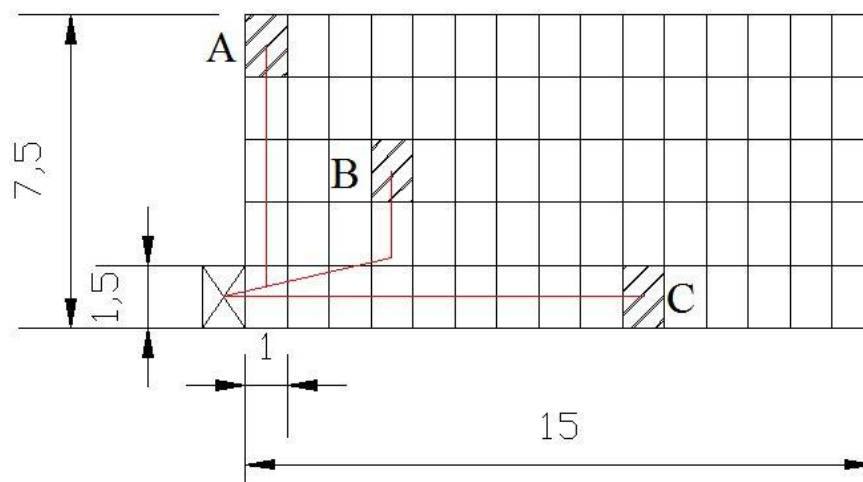
### Vremenske udaljenosti

Budući da se brzine vertikalne i horizontalne komponente kretanja znatno razlikuju kod korištenih komisionera, viličara, umjesto fizičkih udaljenosti koristiti će se vremenske udaljenosti.

Na slici 24. prikazane su 3 točke unutar jednog regala koje se nalaze na različitim fizičkim i vremenskim udaljenostima od početne točke. Crvenim linijama označene su linije kretanja

komisionera od pretovarne stanice, u donjem lijevom kutu regala, do svake od triju točaka.

Pretpostavljena horizontalna komponenta brzine iznosi 1,7 m/s, a vertikalna 0,4 m/s.



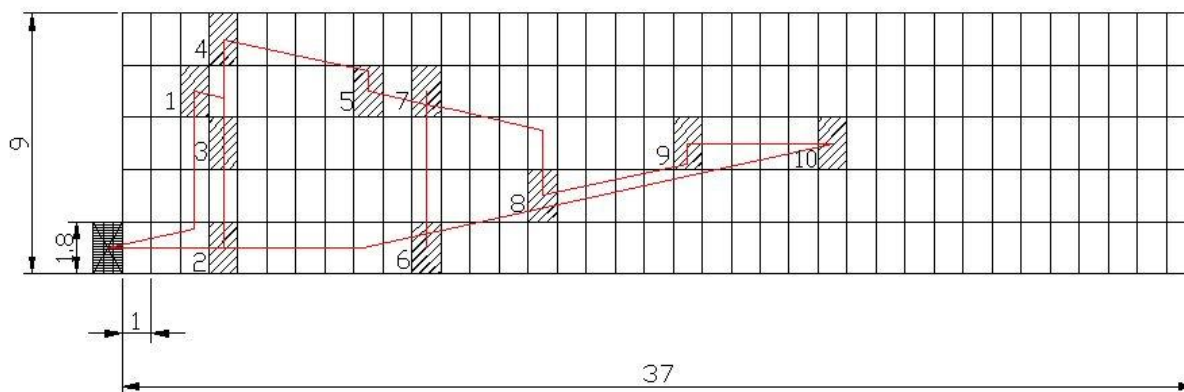
Slika 24. Ilustracija fizičkih i vremenskih udaljenosti u regalu

Točka A udaljena je 6,08 metara od pretovarne stanice, ali je viličaru potrebno 15 sekundi da stigne do nje ako počinje kretanje od pretovarne stanice. Točka B udaljena je 5 metara od pretovarne stanice, ali vremenska udaljenost iznosi 7,5 sekundi. Točka C ima najveću fizičku udaljenost od pretovarne stanice i ona iznosi 10 metara, ali je vremenska udaljenost najmanja i iznosi 5,9 sekundi.

Budući da prioritet pri komisioniranju ima trajanje ciklusa u odnosu na ukupni prijeđeni put, pri optimizaciji trajanja ciklusa razmatraju se vremenske udaljenosti umjesto fizičkih. Korištenje vremenskih udaljenosti naziva se još i korištenjem Čebišovljevih udaljenosti u nekim izvorima. [8]

### X-heuristika

X-heuristika je vrlo jednostavna za primjenu te je često korištena metoda rutiranja u klasičnim skladišnim sustavima s niskim ili visokim regalima. Na slici 25. prikazana je shema kretanja viličara uz rutiranje X-heuristikom. Skladišne lokacije koje je potrebno posjetiti osjenčane su, brojevi uz njih označavaju redosljed posjećivanja, a crvena linija označava put kretanja viličara unutar regala. Dimenzije regala i skladišnih lokacija na shemi prikazane su u metrima.

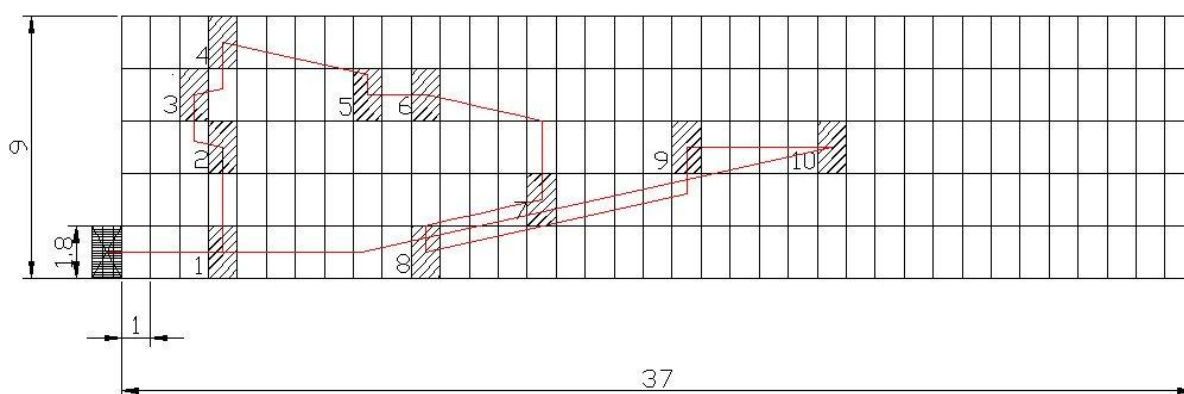


**Slika 25. Shema kretanja viličara u prolazu uz rutiranje X-heuristikom**

Znatan nedostatak X-heuristike može biti prioritet posjećivanja lokacija po x-osi. Ukoliko se dvije lokacije nalaze na istom mjestu na x-osi određivanje prvenstva posjećivanja određuje se po y-osi što može uzrokovati povratne vertikalne puteve. Taj nedostatak X-heuristike vidljiv je kod posjećivanja lokacija s brojevima 1, 2, 3 i 4. Prvo se posjećuje lokacija na četvrtoj razini skladištenja što bi odgovaralo visini od 5,4 metra, a potom se posjećuje lokacija na najnižoj razini skladištenja, da bi potom uslijedilo ponovno kretanje viličara u visinu zbog posjećivanja lokacija s brojevima 3 i 4. Ako uzmemo u obzir da je brzina podizanja vilica kod viličara uvijek poprilično malena, kretanja između prvih četiriju lokacija u ovom slučaju uzrokuje znatan gubitak vremena. Slično neučinkovito kretanje u visinu vidljivo je i kod kretanja između lokacija 5, 6 i 7.

### Heuristika najbližeg susjeda

Na sljedećoj slici prikazano je komisioniranje istog radnog naloga uz rutiranje heuristikom najbližeg susjeda.



**Slika 26. Prikaz rada viličara uz heuristiku najbližeg susjeda**



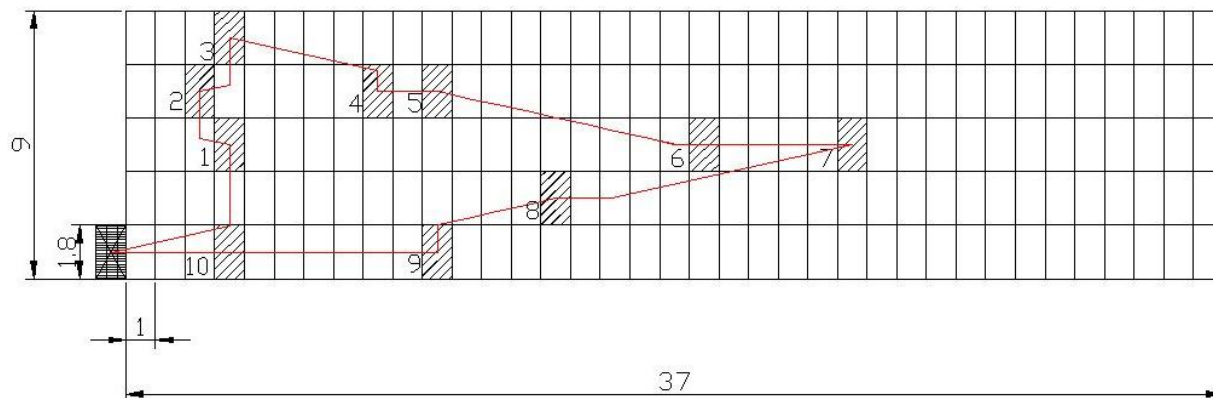
Posjećivanje prvih četiriju lokacija znatno je učinkovitije obavljeno u ovom slučaju, ali je zato došlo do nepotrebnog povratnog puta kod posjećivanja lokacija broj 7, 8, 9 i 10. Uzrok tomu je tzv. "pohlepnost" metode najbližeg susjeda koja izborom najkraćeg puta između dviju lokacija uzrokuje kasnije pojavljivanje znatno dužih puteva u ruti. U ovom slučaju ta je pojava vidljiva kad je algoritam nakon posjećivanja lokacije s brojem 7 odlučio posjetiti lokaciju s brojem 8, iako je to uzrokovalo nepotrebne povratne puteve. Naime, heuristika najbližeg susjeda uvijek odabire najbližu lokaciju prethodnoj lokaciji kao sljedeću lokaciju koja će se posjetiti. U ovom slučaju očito je da bi bilo bolje posjetiti lokacije 9 i 10 prije lokacije 8, koju bi se moglo posjetiti pri povratnom putu do pretovarne stanice.

Rutiranjem heuristikom najbližeg susjeda bi se u ovom slučaju postiglo kraće trajanje komisioniranja u odnosu na X-heuristiku, ali "pohlepnost" algoritma najbližeg susjeda ostavlja mogućnost neučinkovitog rutiranja te se i dalje traže druge metode rutiranja unutar regala.

### **Heuristika Clarke-Wright**

Heuristička metoda Clarke-Wright za razliku od prethodnih dviju heurističkih metoda ne započinje graditi rutu po kriteriju udaljenosti od početne lokacije, nego počinje od najgoreg rješenja koje nastoji optimizirati. Najgore rješenje sastoji se od posjećivanja lokacija s povratnim putevima, a optimizacija se svodi na sparivanje lokacija te skraćivanje rute. Kriterij sparivanja su uštede koje se računaju posebno za svaki par točaka.

Na slici 27. prikazano je komisioniranje zadanog radnog naloga uz heuristiku Clarke-Wright. Vidljivo je da je horizontalna komponenta brzine učinkovito korištena za razliku od X-heuristike te da nema povratnih puteva uslijed "pohlepnosti" algoritma kao kod heuristike najbližeg susjeda. Nadalje, zbog sveobuhvatnog razmatranja svih točaka pri dodavanju ruti vidljivo je da je posjećivanje lokacija gotovo jednako zastupljeno i kod povratnog puta do pretovarne stanice, što također utječe na skraćivanje trajanja ciklusa.



**Slika 27. Prikaz rada viličara uz heuristiku Clarke-Wright**

Nameće se zaključak da heuristika Clarke-Wright, kod gustog rasporeda skladišnih lokacija koje treba posjetiti unutar regala, postiže znatno kraće trajanje ciklusa komisioniranja u odnosu na X-heuristiku i heuristiku najbližeg susjeda.

## 5. SKLADIŠNI SUSTAV PODUZEĆA ELEKTROKONTAKT d.d.

Cilj ovog rada je predložiti jedinstvenu metodu komisioniranja koja bi obuhvatila komisioniranje unutar prolaza između visokih regala te kretanje između tih prolaza. Rezultati analize različitih metoda komisioniranja mogu se verificirati na konkretnom slučaju odnosno skladišnom sustavu poduzeća Elektrokontakt d.d..

U ovom poglavlju opisati će se korištena oprema u skladišnom sustavu i rad samog sustava s posebnim naglaskom na rutiranje viličara pri komisioniranju.

### 5.1. Općenito o poduzeću

Elektrokontakt d.d. vodeći je hrvatski proizvođač elektroinstalacijskog materijala. Tvrtka je osnovana davne 1926. godine i danas ima oko 1000 zaposlenika uz godišnji prihod od približno 70 mil. eura. [9][10]

Proizvodni program čini elektroinstalacijski program te dijelovi za različite kućanske aparate. Tvrtka ostvaruje većinu svojih prihoda izvozom dijelova za kućanske aparate i u tom području drže najveći tržišni udio u Europi, a sve se više razvija i globalno poslovanje. Naime, matični koncern tvrtke Elektrokontakt, E.G.O., u posljednje vrijeme izgradio je podružnice u Kini i Južnoj Americi. Velika pažnja posvećuje se razvoju poslovanja tvrtke i povećanju učinkovitosti te je u tu svrhu razvijen program Everest koji podiže svijest zaposlenika o tome koliko je važna kvaliteta te kako se ona postiže.

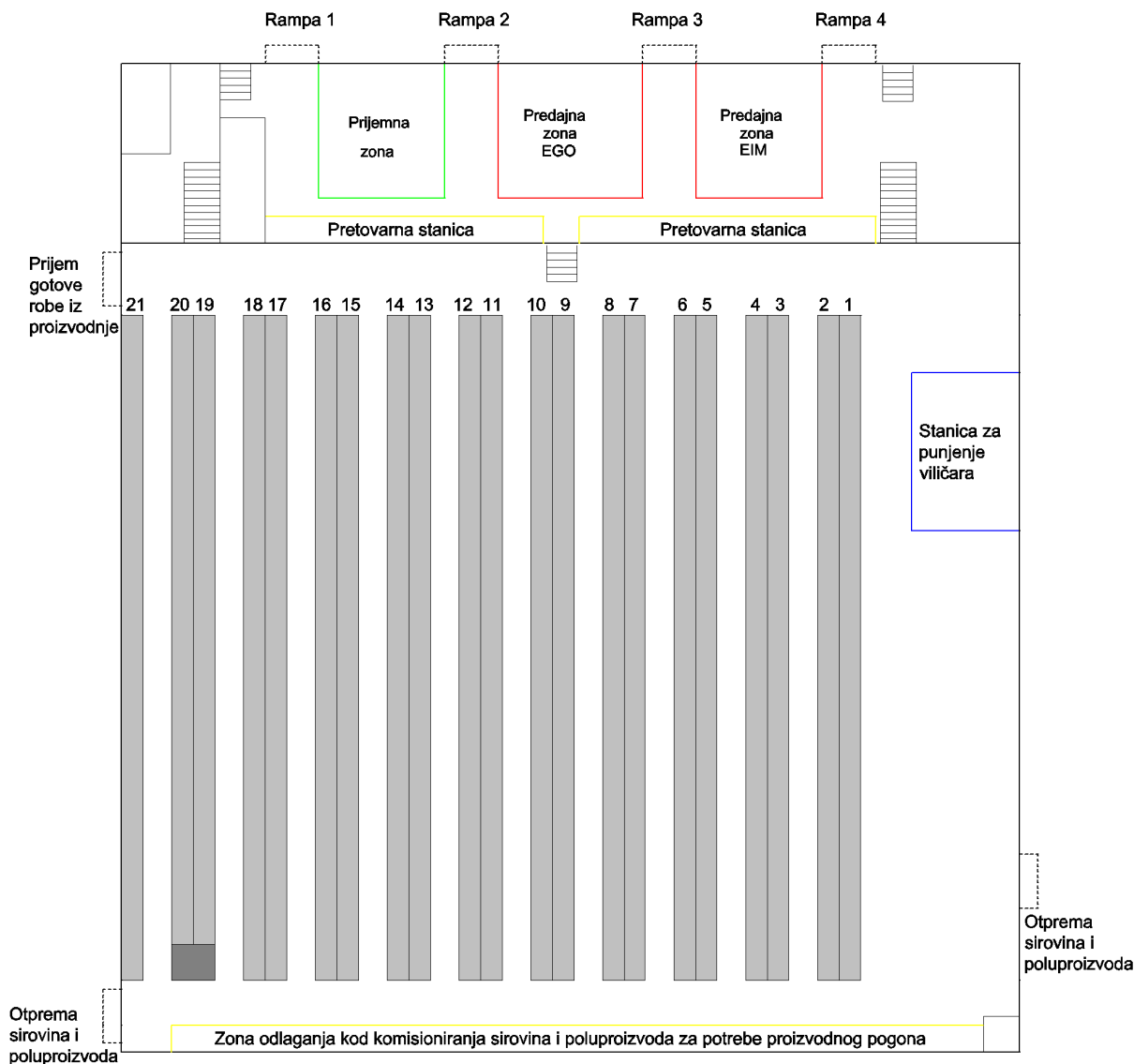
Proizvodi ovog poduzeća izvoze se i ugrađuju u kućanske aparate diljem svijeta. Poduzeće se kontinuirano razvijalo pred tržišnim izazovima. Nastoji se postići sve viši stupanj automatizacije u proizvodnji kako bi se snizili troškovi te su zato razvijena rješenja koja je poduzeće uspjelo prodati i drugim tvrtkama. Važnu ulogu u poslovanju ima i logistika. U posljednje vrijeme sve veći izazov postaje trend naručivanja manjih narudžbi. Naručitelji nastoje minimizirati količinu sirovina u skladištu i stoga češće naručuju manje količine sirovina. Ovaj trend predstavlja izazov za logistički sustav zbog većeg broja narudžbi i zbog potrebe za komisioniranjem, koje je najskuplji i najdugotrajniji proces unutar skladišnog sustava.

## 5.2. Oprema visokoregalnog skladišnog sustava

Opremu skladišta čine regali, ručni i električni viličari prijemno-predajne zone, električni viličari za rad u vrlo uskim prolazima i informacijski sustav skladišta. Budući da je u jednom trenutku moguć rad velikog broja ručnih i čeonih viličara usko grlo sustava čine viličari za rad u vrlo uskim prolazima te će njihov rad biti pobliže analiziran.

Skladište tvrtke Elektrokontakt d.d. prostire se na 2750 m<sup>2</sup>, pravokutnog je oblika i ima dimenzije 50 x 55 m. U njemu se skladište sirovine, poluproizvodi i gotovi proizvodi. Postoje 4 rampe za prilaz kamiona kojima se dopremaju sirovine i poluproizvodi i otpremaju gotovi proizvodi. [10]

Unutar skladišta nalazi se 21 visoki regal, što znači da u skladištu postoji 11 prolaza između regala kojima se viličari za rad u uskim prolazima kreću. Regali u skladištu imaju ukupnu visinu od otprilike 10,5 metara na kojoj imaju po 5 ili 7 razina skladištenja u visinu. Broj razina skladištenja u visinu može se mijenjati ovisno o potrebama poduzeća, tj. visinama paleta s artiklima. Ukupan broj skladišnih lokacija može se stoga mijenjati, a u poduzeću trenutna konfiguracija regala odgovara iznosu od otprilike 4500 skladišnih lokacija. Na slici 28. prikazana je shema tlocrta skladišta poduzeća Elektrokontakt.



**Slika 28. Shema tlocrta skladišta poduzeća Elektrokontakt**

Duljina svih regala u skladištu, izuzev dvaju regala, je 37 metara, a na toj duljini nalazi se 37 skladišnih lokacija. Izuzetak među regalima po duljini su regali br. 19 i 20 koji su dugi 35 metara, a na njihovom kraju nalazi se radna stanica. Regali se međusobno također razlikuju i po nosivosti. Jedna vrsta regala ima skladišne lokacije nosivosti 600 kilograma, a druga 1000 kilograma. Širina svakog pojedinog regala iznosi 1,2 metara, a razmak između regala, odnosno širina prolaza iznosi 1,6 metara, što spada u vrlo uske prolaze. Paletni regali prikazani su na slici 29.



**Slika 29. Paletni regali sa 7 razina skladištenja u visinu**

Poduzeće posjeduje električne i motorne čeone viličare koji se koriste za transport materijala unutar i izvan skladišta. Unutar skladišta također se koriste ručni viličari i niski električni viličari. Utovar, odnosno istovar kamiona obavlja se pomoću niskih električnih viličara. Niski električni viličar korišten za utovar, odnosno istovar kamiona prikazan je na slici 30.



**Slika 30. Niski električni viličar Jungheinrich**

Električni i motorni čeoní viličari koriste se za transport materijala između proizvodnih pogona i skladišta. Čeoní viličar marke Still korišten u poduzeću Elektrokontakt d.d. prikazan je na slici 31.





**Slika 31. Čeoni viličar marke Still**

Uskladištenje i izuzimanje materijala iz regala u skladištu obavlja se isključivo viličarima za rad u vrlo uskim prolazima, budući da je za rad u prolazima između regala prikladna samo ta vrsta viličara. Poduzeće posjeduje 3 viličara za rad u uskim prolazima marke Yale MTC-13 koji se koriste za uskladištenje i izuzimanje cijelih paleta i komisioniranje pojedinačnih kutija sa skladišnih lokacija. Prolazi između regala u skladištu široki su samo 1,6 metara što omogućuje minimizaciju širine transportnih puteva u skladištu. Korišteni viličari imaju kupole pomične po visini (eng. man-up), gdje se radnik nalazi u kupoli koja se podiže zajedno sa zakretnim vilicama što omogućuje preciznije pozicioniranje vilica pri uskladištenju ili izuzimanju te se također smatra i ergonomski boljim rješenjem od viličara s fiksnom kupolom (eng. man-down). Velika prednost viličara s pomičnom kupolom je mogućnost obavljanja komisioniranja u skladištu. Nedostatak viličara s pomičnom kupolom u odnosu na viličare s fiksnom kupolom je potreba za podizanjem dodatne mase radnika i same kupole. Model viličara s fiksnom kupolom prikazan je na slici 32., dok je model viličara s pomičnom kupolom kakve koristi i Elektrokontakt d.d. prikazan na slici 33.



Slika 32. Viličar s fiksnom kupolom Jungheinrich EFX 410/413



Slika 33. Viličar s pomičnom kupolom Yale MTC-13

U tablici 3. prikazane su tehničke značajke viličara prema katalogu proizvođača. Nosivost viličara iznosi 1300 kg. [11]

**Tablica 3. Tehničke karakteristike viličara Yale MTC-13**

<b>Marka i model viličara</b>	<b>Yale MTC-13</b>
<b>Brzina vožnje viličara, utovaren/prazan</b>	10,4/10,5 km/h
<b>Brzina podizanja vilica, utovaren/prazan</b>	0,41/0,45 m/s
<b>Brzina spuštanja vilica, utovaren/prazan</b>	0,5/0,45 m/s

Važan dio hardvera informacijskog logističkog sustava ili WMS-a (eng. Warehouse Management System) su ručni terminali koje koriste operateri viličara. Ručni terminali bežično su povezani sa središnjim informacijskim sustavom u kojem se bilježe sve promjene i koji služi za izdavanje radnih naloga. Radnici uz pomoć ručnog terminala preuzimaju određeni radni nalog, nakon čega im se na zaslonu ispisuje koju robu je potrebno izuzeti i njena lokacija u skladištu. Radnik na viličaru očitava bar-kod te lokacije te unosi u ručni terminal količinu koju je izuzeo s nje. U slučaju obavljanja komisioniranja na zaslonu ručnog terminala prikazuje se sljedeća skladišna lokacija koju treba posjetiti i količina robe koju je potrebno izuzeti s nje. Ručni terminal korišten u poduzeću Elektrokontakt d.d. prikazan je na slici 34. [10]



**Slika 34. Ručni terminal**

### **5.3. Opis rada skladišnog sustava**

Postoje 3 vrste operacija koje VNA viličar može izvršavati: uskladištenje, izuzimanje i komisioniranje. Uskladištenje i izuzimanje podrazumijevaju rukovanje paletama kao jediničnim teretima, a komisioniranje podrazumijeva stvaranje jedne nove palete s artiklima koji se nalaze na više različitih paleta u skladištu. Proces komisioniranja najzanimljiviji je kod analize i optimizacije budući da traje najduže od svih operacija i ima najdulje transportne puteve.

Pri uskladištenju i izuzimanju operateri viličara očitavaju bar-kodove na paletnim mjestima i na samim paletama kako bi se u informacijskom sustavu zabilježila svaka promjena stanja. Pri Person-on-board komisioniranju operateri očitavaju bar-kod svakog paletnog mjesta na kojem obavljaju izuzimanje kutija. [10]

### **Uskladištenje**

Uskladištenje podrazumijeva posjećivanje jedne slobodne skladišne lokacije u skladištu. Viličar preuzima jednu paletu koju je potrebno uskladištiti te ju odlaže na slobodnu skladišnu lokaciju. Radnik koji upravlja viličarem potom treba pomoću ručnog terminala zabilježiti promjenu stanja. Očitavanjem bar-koda palete koju odlaže i skladišne lokacije na koju je ona odložena, promjena stanja se bilježi u središnjem informacijskom sustavu. Skladišni prostor podijeljen je u nekoliko zona s obzirom na vrstu proizvoda, poluproizvoda ili sirovina. Unutar tih zona palete se odlažu nasumično, a u slučaju velike popunjenosti skladišta palete je moguće odložiti na bilo koju slobodnu lokaciju.

### **Izuzimanje**

Radnik na viličaru preuzima radni nalog koji mu se ispisuje na zaslonu ručnog terminala. Nakon toga na zaslonu se ispisuje roba koju je potrebno izuzeti te njena lokacija u skladištu. Radnik s viličarem dolazi do skladišne lokacije, obavlja izuzimanje te uz pomoć ručnog terminala, očitavanjem bar-koda, bilježi promjenu stanja u skladištu. Nakon toga viličar prevozi robu do tražene lokacije: predajne zone proizvodnog pogona ili utovarne rampe.

### **Komisioniranje**

Proces komisioniranja moguće je podijeliti na više zasebnih operacija. Postoji vožnja viličara između pretovarne stanice i između pojedinih lokacija na kojima je potrebno izvršavati komisioniranje. Trajanje vožnje viličara ovisi o brzini viličara (brzina vožnje i brzina podizanja vilica) i o rutiranju viličara. Dobrim rutiranjem viličara moguće je skratiti trajanje vožnje. Značajan dio trajanja ciklusa komisioniranja odnosi se na pripremne radnje koje radnik, koji upravlja viličarem, treba obaviti (očitanje bar-koda, ručno unošenje promjena na pojedinoj skladišnoj lokaciji u ručni terminal) i na samo izuzimanje robe sa skladišne lokacije. Komisioniranje se vrši po principu "čovjek-robi" (eng. person-on-board) što znači da se radnik koji upravlja viličarem podiže prema skladišnoj lokaciji gdje obavlja izuzimanje lakih tereta.

Proces komisioniranja započinje kada radnik koji upravlja viličarem uoči radni nalog na ručnom terminalu te ga preuzme. Nakon što je jedan radnik na viličaru preuzeo određeni radni nalog, drugi radnici nemaju mogućnost preuzimanja tog radnog naloga na svojim ručnim terminalima. Na ručnom terminalu ispisuje se artikl koji je potrebno preuzeti, količina koju je

potrebno preuzeti i lokacija artikla u skladištu. Nakon što radnik s viličarem stigne na određenu skladišnu lokaciju koristi čitač bar-koda kako bi potvrdio preuzimanje određene robe s lokacije, preuzima potrebnu količinu te pomoću čitača bar-koda unosi u informacijski sustav bar-kod palete na koju je stavio tu robu, tj. palete na viličaru. Podatci se pohranjuju u informacijskom sustavu te je moguće u bilo kojem trenutku znati sastav određene palete u skladištu.

## 5.4. Proračun trajanja vožnje pri komisioniranju

### 5.4.1. Prosječna brzina kretanja viličara

Vrijednosti u katalogu proizvođača odnose se na maksimalne vrijednosti brzine koje viličar može postići. Budući da je pri radu viličara potrebno određeno vrijeme za ubrzavanje i usporavanje viličara, pri proračunu trajanja vožnje viličara koristiti će se empirijski određene vrijednosti prosječne brzine.

Na krajevima prolaza iz sigurnosnih razloga postavljeni su magneti koji onemogućuju brzu vožnju viličara te tako osiguravaju sigurno izlaženje viličara iz prolaza. Budući da u katalogu proizvođača nisu dostupne vrijednosti ubrzanja viličara u vožnji i pri podizanju vilica, prosječne brzine kretanja dobivene su mjerenjem vremena potrebnog da viličar u cijelosti prijeđe prolaz te mjerenjem vremena podizanja odnosno spužtanja vilica viličara.

Izmjerena vremena vožnje i podizanja vilica otprilike su jednaka te iznose otprilike 22 s što znači da je faktor oblika regala približno jednak vrijednosti 1, što odgovara Square-in-time regalima. Ponavljanja mjerenja nisu bila dovoljno brojna za statističku analizu te precizno određivanje prosječnih brzina kretanja. Empirijskim metodama utvrđene brzine kretanja viličara dane su u tablici 4.

**Tablica 4. Izmjerene komponente brzine viličara**

<b>Marka i model viličara</b>	<b>Yale MTC-13</b>
<b>Brzina vožnje viličara, utovaren/prazan</b>	1,7 m/s
<b>Brzina podizanja/spužtanja vilica, utovaren/prazan</b>	0,4 m/s

#### **5.4.2. Rutiranje viličara pri komisioniranju**

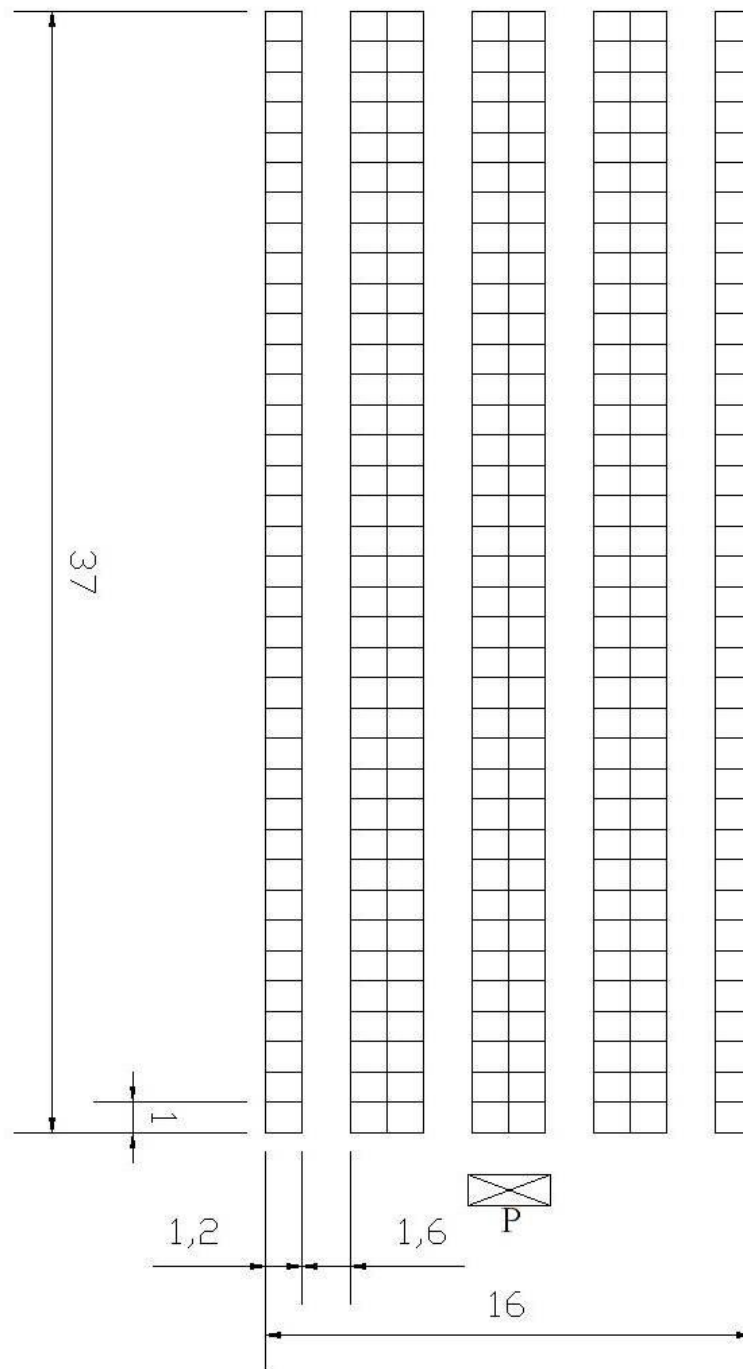
Pri svakom radnom nalogu informacijski sustav radnicima na viličarima daje informacije o artiklu koje je potrebno izuzeti, potrebnu količinu te lokaciju artikla u skladištu. U skladištu je primjenjeno načelo FIFO (eng. First-In-First-Out) što znači da ukoliko postoji više paleta koje sadrže istu vrstu artikala prioritet će pri izuzimanju imati ona paleta koja najduže vremena stoji u skladištu. [10]

Pri komisioniranju artikala s većeg broja skladišnih lokacija sekvencioniranje posjećivanja lokacija ima velik utjecaj na trajanje vožnje pri komisioniranju.

Kod vršne opterećenosti skladišnog sustava važno je posvetiti pažnju prepoznavanju uskog grla sustava. U slučaju povećane potrebe za komisioniranjem usko grlo sustava postaju upravo viličari za rad u uskim prolazima. Pri analizi trajanja vožnje pri komisioniranju pretpostaviti će se rad svih triju viličara koje poduzeće posjeduje i rad svakog pojedinog viličara u samo jednom dijelu skladišne zone. Analiza postojeće heuristike rutiranja viličara izvršiti će se stoga za 4 prolaza u skladištu, tj. 8 regala u kojima će se obavljati komisioniranje.

Tlocrt jednog takvog segmenta skladišta s dimenzijama danim u metrima prikazan je na slici 35. Pretovarna stanica označena je slovom P te se nalazi na donjem kraju skladišne zone u sredini.





Slika 35. Zona komisioniranja jednog viličara

Informacijski sustav koristi X-heuristiku za rutiranje vozila pri komisioniranju unutar prolaza. U informacijskom sustavu koji upravlja komisioniranjem nije predviđeno izuzimanje artikala pri komisioniranju u prolazu iz obaju regala s istim prolazom te se usmjeravanje vrši za svaki regal posebno. Zbog toga postoji vjerojatnost neučinkovitog kretanja komisionera kod većeg broja lokacija u istom prolazu, ali u različitim regalima.

Rutiranje između pojedinih prolaza provodi se po kompozitnoj metodi gdje komisioniranje započinje od prvog prolaza slijeva te se slijeva nadesno redom obilaze svi prolazi koji sadrže artikle koje je potrebno komisionirati. Iako se rutiranje između prolaza odvija po kompozitnoj metodi u praksi, zbog zasebnog rutiranja za svaki pojedini regal, rute mogu u mnogim slučajevima nalikovati rutiranju između prolaza po povratnoj metodi. Korištena metoda rutiranja između prolaza opisana je u poglavlju 4.1.4., a metoda komisioniranja unutar prolaza opisana je u poglavlju 4.2.2.2.. [10]

Tijekom izrade ovog rada došlo je do određenih promjena u skladišnom sustavu poduzeća Elektrokontakt d.d.. Kako bi se minimiziralo trajanje ciklusa komisioniranja preraspoređena je roba unutar skladišta; artikli su raspoređeni po skupinama te se svaka skupina nalazi u zasebnom prolazu unutar skladišta. Na taj način se potreba za rutiranjem između prolaza pojavljuje jako rijetko budući da je većina artikala na pojedinoj narudžbi gotovo uvijek unutar istog prolaza. Također, planirana je promjena informacijskog sustava koji upravlja skladišnim sustavom čime će se možda promijeniti postojeće metode rutiranja.

Budući da je tema ovog diplomskog rada rutiranje vozila u zoni s više prolaza, a preraspodjela artikala u velikoj većini slučajeva uzrokuje komisioniranje unutar samo jednog prolaza izvršiti će se analiza primjene heurističkih metoda trgovačkog putnika na komisioniranje u zoni s više prolaza na primjeru skladišta tvrtke Elektrokontakt. Prikazati će se također rezultati i performanse tih metoda kod komisioniranja unutar jednog prolaza te će se pružiti usporedbe s trenutno korištenom heurističkom metodom.

## 6. ANALIZA METODA RUTIRANJA VISOKOREGALNO G VILIČARA KOMISIONERA U ZONI S VIŠE PROLAZA

Proces komisioniranja u visokoregalnom skladištu može se usporediti s komisioniranjem u niskom regalnom skladištu zbog potrebe za komisioniranjem u više prolaza, ali i sa komisioniranjem u AS/RS skladišnim sustavima zbog značajne visine regala.

Kod računalom upravljano skladišta svaka promjena se automatski bilježi u središnjem računalu i svaka skladišna operacija potpomognuta je središnjim računalom. Kod izuzimanja iz baze podataka uzimaju se informacije o lokaciji robe koju je potrebno izuzeti, a kod uskladištenja računalo prikazuje slobodna skladišna mjesta. Kod komisioniranja iz baze podataka se očitava više skladišnih lokacija koje sadrže robu koju je potrebno komisionirati. Budući da računalo u bazi podataka ima i podatke o točnoj lokaciji svake robe moguće je iskoristiti računalo za određivanje redoslijeda prikupljanja, tj. za oblikovanje rute. Budući da se komisioniranje u skladištu poduzeća Elektrokontakt vrši po FIFO (eng. First-In-First-Out) načelu za svaku pojedinu vrstu robe određuje se po jedna skladišna lokacija s tom vrstom robe. Iznimka su slučajevi kada na jednoj skladišnoj lokaciji ne postoji dovoljna količina robe za ispunjavanje narudžbe te se u tom slučaju posjećuju dvije lokacije sa istom vrstom robe.

Problem određivanja redoslijeda prikupljanja možemo prikazati kao problem trgovačkog putnika te iskoristiti neke od razvijenih metoda za njegovo rješavanje za oblikovanje rute. Prvi korak u rješavanju problema trgovačkog putnika jest izračunavanje udaljenosti između točaka koje je potrebno posjetiti. U ovom prilagođenom slučaju točke predstavljaju skladišne lokacije, a umjesto fizičkih udaljenosti između pojedinih točaka koristiti će se vremenske udaljenosti. Na području komisioniranja jednog viličara, prikazanom na slici 35., analizirati će se ciklus komisioniranja jednog nasumičnog radnog naloga i to za rutiranje:

- trenutno korištenom heurističkom metodom
- heurističkom metodom povratka uz rutiranje unutar prolaza po X-heuristici (X-povratna heuristika)
- kompozitnom heurističkom metodom uz rutiranje unutar prolaza po X-heuristici (X-kompozitna heuristika)

- heurističkom metodom najbližeg susjeda koja ne uzima u obzir visinsku razinu skladištenja (X-Heuristika najbližeg susjeda)
- heurističkom metodom najbližeg susjeda koja uzima u obzir visinsku razinu skladištenja (Heuristika najbližeg susjeda)
- heurističkom metodom Clarke-Wright
- metodom grupiranja skladišnih lokacija unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda uz rutiranje između prolaza po kompozitnoj heurističkoj metodi (Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda)
- kompozitnom metodom uz rutiranje unutar prolaza po heurističkoj metodi najbližeg susjeda (Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda)

Posljednje dvije metode hibridi su kompozitne metode i metode najbližeg susjeda. Kompozitna metoda koristi se za rutiranje između prolaza kako bi se osiguralo posjećivanje prolaza s lijeva nadesno te se tako izbjegli eventualni povratni putevi koji bi se mogli pojaviti korištenjem isključivo metode najbližeg susjeda. Metoda najbližeg susjeda koristi se kako bi se postiglo učinkovito rutiranje unutar pojedinih prolaza uvažavanjem trajanja vertikalnih kretanja komisionera, tj. podizanja i spuštanja vilica viličara. Slijedi opis ovih dviju hibridnih heurističkih metoda, a u poglavlju 6.1. prikazati će se njihov rad na konkretnom primjeru narudžbe.

**Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda** započinje provođenjem grupiranja unutar pojedinih prolaza. Grupiranje se provodi za svaki prolaz koji sadrži artikle koje je potrebno komisionirati posebno i započinje od skladišne lokacije u tom prolazu koja je najbliža početku prolaza. Toj početnoj točki pridružuje se točka u tom prolazu koja joj je najbliža po kriteriju vremenskih udaljenosti. Prethodni postupak se ponavlja dok nisu dodane sve točke unutar jednog prolaza. Nakon što su grupirane sve točke u svim prolazima potrebno je povezati rute u prolazima, koje imaju po dva slobodna kraja, s početnom točkom i međusobno. Povezivanje se provodi po kompozitnoj metodi i započinje od prvog prolaza koji sadrži artikle koje je potrebno komisionirati nakon čega se u rutu povezuju ostali prolazi te se na kraju dodaje povratni put do početne lokacije.

**Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda** ne započinje grupiranjem lokacija kao prethodna metoda. Prolazi se obilaze slijeva nadesno te rutiranje započinje posjećivanjem prvog prolaza slijeva koji sadrži skladišne lokacije koje je potrebno posjetiti. Kad komisioner posjeti tu prvu lokaciju u prolazu daljnje rutiranje unutar tog prolaza odvija se po metodi najbližeg susjeda te se ruti dodaje točka koja je najbliža prethodno dodanoj točki. Taj postupak se ponavlja dok nisu dodane sve točke unutar tog prolaza nakon čega se pomoću kompozitne metode određuje hoće li viličar u sljedeći prolaz koji sadrži artikle koje je potrebno komisionirati ući s gornje ili donje strane prolaza. Nakon ulaska u sljedeći prolaz rutiranje unutar njega ponovno se provodi po metodi najbližeg susjeda, a put do sljedećeg prolaza određuje se pomoću kompozitne metode. Prethodno opisani postupak se ponavlja dok nije završeno komisioniranje svih artikala nakon čega se ruti dodaje put do početne lokacije.

### **6.1. Primjena heurističkih metoda na problem iz prakse**

Udaljenost pojedinih skladišnih lokacija unutar istog prolaza prilično je jednostavno utvrditi. Računa se fizička udaljenost između dviju točaka po x-osi te se ta razlika zatim dijeli s brzinom vožnje po x-osi. Također se računa i razlika udaljenosti tih istih točaka po visini, tj. y-osi, koja se dijeli s brzinom kretanja po y-osi. Veća od tih dviju vrijednosti predstavlja vrijeme potrebno za pomicanje od jedne do druge točke te se smatra vremenskom udaljenošću između tih točaka. Nakon što su poznate vremenske udaljenosti između svih točaka međusobno, moguće je primijeniti heurističke metode rješavanja problema trgovačkog putnika za rutiranje viličara pri komisioniranju.

Primjer s nasumično generiranim lokacijama riješiti će se odabranim heurističkim metodama rješavanja problema trgovačkog putnika, kako bi se demonstriralo njihovo djelovanje na specifičnom primjeru iz prakse. Pretpostaviti će se rad svih triju viličara te rad pojedinih viličara u zoni s 4 prolaza. Brzine vožnje viličara i podizanja vilica korištene u proračunu su empirijski određene vrijednosti prikazane u tablici 4.. Broj razina skladištenja u visinu je 7; pretpostavlja se da je visina najniže skladišne lokacije 0 metara, a ostalim skladišnim lokacijama visina je višekratnik visine 1,3 metra, što znači da visina najviše razine skladištenja iznosi 9,1 m. Ukupna visina samih regala viša je od 9,1 metara za visinu palete na najvišoj razini skladištenja. Za kretanje između prolaza pretpostaviti će se konstantno vrijeme

potrebno za izlazak viličara iz jednog prolaza te ulazak u drugi. To kretanje počinje na prvoj ili posljednjoj skladišnoj lokaciji u prolazu u kojem se viličar nalazi, a završava na prvoj ili posljednjoj skladišnoj lokaciji u prolazu koji se sljedeći posjećuje. U slučaju da se viličar kreće između susjednih prolaza vrijeme kretanja iznosi 20 sekundi, ukoliko se između početnog prolaza i sljedećeg prolaza koji se posjećuje nalazi još jedan prolaz vrijeme kretanja iznosi 24 sekunde, a ukoliko se između početnog i sljedećeg prolaza nalaze dva prolaza vrijeme kretanja iznosi 28 sekundi.

U tablici 5. prikazane su nasumično generirane skladišne lokacije s pripadajućim koordinatama koje označavaju njihovu poziciju unutar prolaza. Redni broj regala u kojem se nalaze pojedine skladišne lokacije prikazan je u trećem redu tablice pod "broj regala". Koordinata "r" označava broj prolaza unutar kojeg se nalazi skladišna lokacija, koordinata "x" označava broj razine skladištenja u horizontalnom prostoru te se iz koordinate "x" može izvesti udaljenost skladišne lokacije od početka prolaza. Koordinata "y" označava broj razine skladištenja u visinu.

**Tablica 5. Nasumično generirane skladišne lokacije s pripadajućim koordinatama**

<i>Nasumično generirane skladišne lokacije</i>										
<i>Br. skladišne lokacije</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>Broj regala</i>	5	4	7	6	3	8	6	1	3	8
<i>r</i>	3	2	4	3	2	4	3	1	2	4
<i>x</i>	17	5	21	25	20	34	1	22	9	20
<i>y</i>	6	7	2	2	5	5	5	4	2	5

### **6.1.1. Trenutno korištena heuristička metoda**

Kako bi se rezultati i performanse različitih metoda mogli usporediti s postojećim stanjem izračunati će se trajanje vožnje viličara pri komisioniranju iste narudžbe za rutiranje trenutnom korištenom heurističkom metodom.

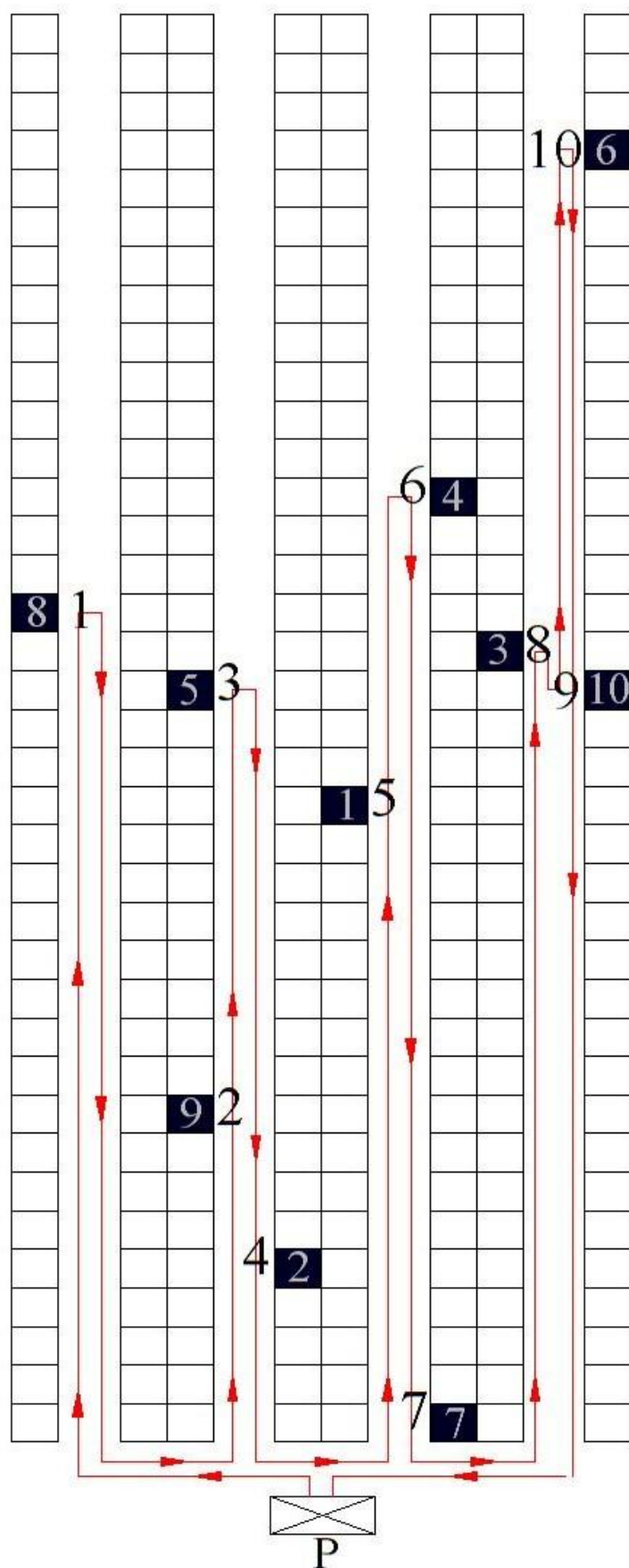
Komisioniranje započinje od prvog regala koji sadrži lokacije koje je potrebno posjetiti što je u ovom slučaju regal br. 1 nakon kojeg se komisioniranje nastavlja od prvog sljedećeg regala

u kojem se nalaze artikli koje je potrebno komisionirati. Rutiranje unutar prolaza provodi se po X-heuristici za svaki regal zasebno. Ovaj postupak se ponavlja dok komisioniranje u regalima nije završeno nakon čega se komisioner vraća na početnu lokaciju, tj. pretovarnu stanicu.

Na slici 36. prikazan je redoslijed posjećivanja skladišnih lokacija za zadani radni nalog. Brojevi uz skladišne lokacije koje je potrebno posjetiti označavaju redoslijed posjećivanja lokacija, a brojevi unutar skladišnih lokacija označavaju broj skladišne lokacije koji je s koordinatama svake pojedine lokacije prikazan u tablici 5. Crvenim linijama sa strelicama prikazano je kretanje viličara komisionera. Trajanje vožnje viličara prilikom komisioniranja uz rutiranje trenutno korištenom metodom procijenjeno je na 245,21 sekundi.

Kao što je ranije spomenuto, preraspodjelom robe unutar skladišta tvrtke Elektrokontakt d.d. vjerojatnost potrebe za rutiranjem između prolaza pri komisioniranju vrlo je mala te će se u praksi u velikoj većini slučajeva odvijati komisioniranje unutar jednog prolaza. U iznimnim slučajevima dogoditi će se komisioniranje unutar dvaju prolaza uslijed spajanja radnih naloga.



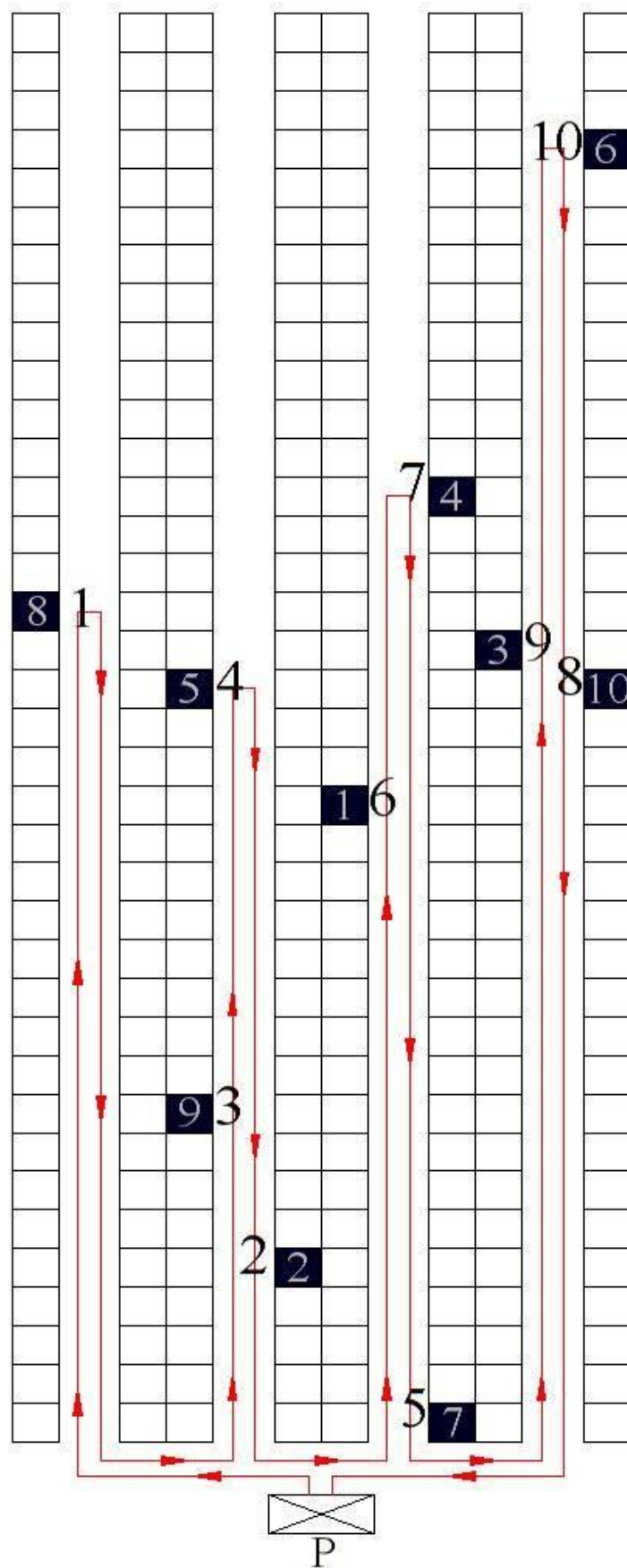


Slika 36. Redosljed posjećivanja lokacija za trenutno korištenu heurističku metodu

### **6.1.2. X-povratna heuristička metoda**

Kao što je u nazivu metode navedeno, ova heuristička metoda usmjerava komisionere po metodi povratka kada se komisioneri kreću između prolaza, a pri komisioniranju unutar prolaza komisioneri se usmjeravaju po X-heuristici. Komisioniranje započinje u prvom prolazu slijeva koji sadrži skladišne lokacije koje treba posjetiti. U slučaju ovog radnog naloga to je prvi prolaz koji sadrži jednu lokaciju koju treba posjetiti. Viličar se kreće do te skladišne lokacije, obavlja se komisioniranje te se viličar vraća na početak prolaza i ulazi u sljedeći prolaz sa skladišnim lokacijama koje treba posjetiti. Postupak se ponavlja dok nisu prikupljeni svi artikli, nakon čega se viličar vraća na početnu lokaciju, tj. pretovarnu stanicu.

Na slici 37. prikazano je kretanje komisionera, a trajanje vožnje pri komisioniranju ove narudžbe X-povratnom metodom iznosi 258,85 sekundi.



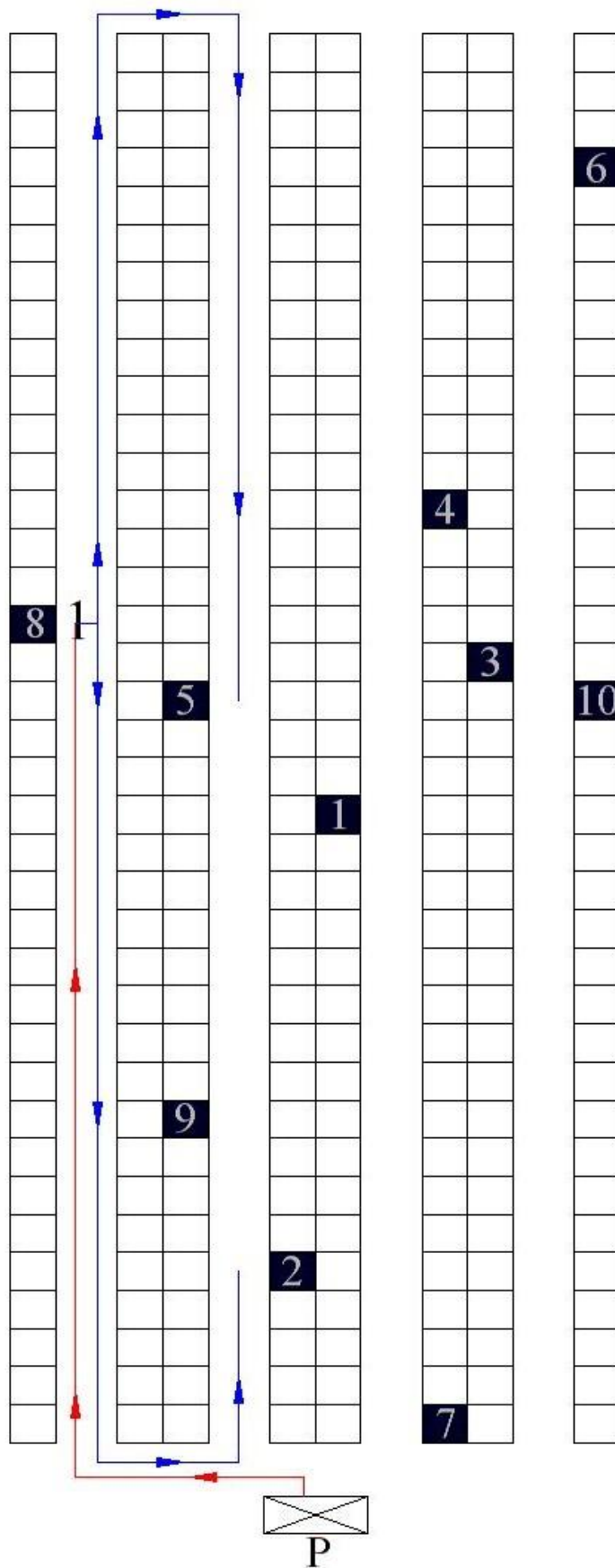
Slika 37. Redosljed posjećivanja lokacija za X-povratnu heurističku metodu

### **6.1.3. X-Kompozitna heuristička metoda**

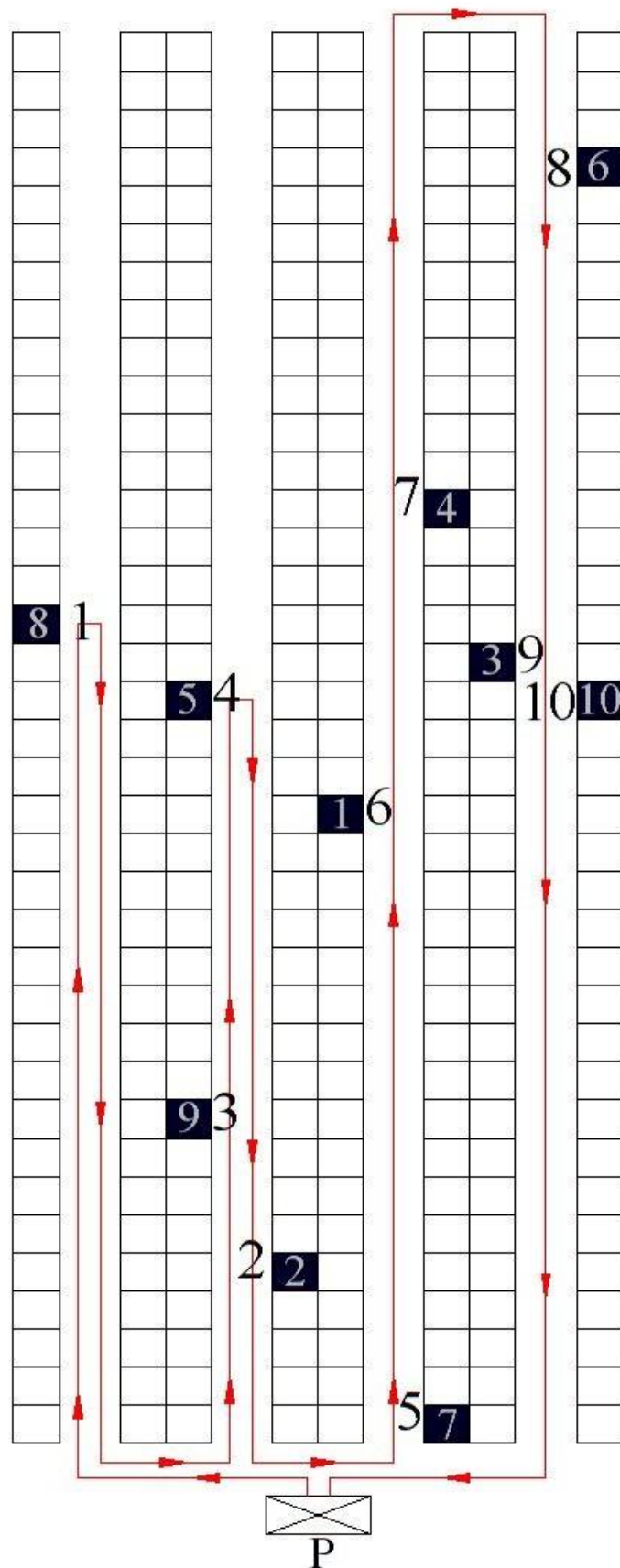
Kompozitna metoda započinje komisioniranje u prvom prolazu slijeva te prelazi prolaz u cijelosti ili se nakon obavljanja komisioniranja u jednom prolazu vraća na početak prolaza. Postupak se ponavlja za sve prolaze u kojima postoje artikli koje je potrebno posjetiti.

Komisioniranje, kao i kod metode povratka, započinje od prvog prolaza gdje se posjećuje lokacija br. 8 i nastavlja se u sljedećem prolazu koji sadrži lokacije koje je potrebno posjetiti. U ovom slučaju drugi prolaz sadrži više skladišnih lokacija koje je potrebno posjetiti. Izračunava se udaljenost od posljednje dodane lokacije (lokacija br. 8 u prvom prolazu) do lokacija koje se nalaze najbliže početku sljedećeg prolaza (lokacija br. 2) i najbliže kraju sljedećeg prolaza (lokacija br. 5). Ruti se dodaje ona lokacija koja ima manju udaljenost od prethodno dodane, u ovom slučaju lokacija br. 2. Ovaj korak metode prikazan je plavim linijama na slici 38. Unutar prolaza rutiranje viličara se vrši po X-heuristici, tj. prehodno dodanoj točki uvijek se dodaje točka najbliža u horizontalnoj ravnini.

Trajanje vožnje pri komisioniranju kod rutiranja ovom metodom iznosi 234,15 sekundi, a kretanje komisionera prikazano je na slici 39.



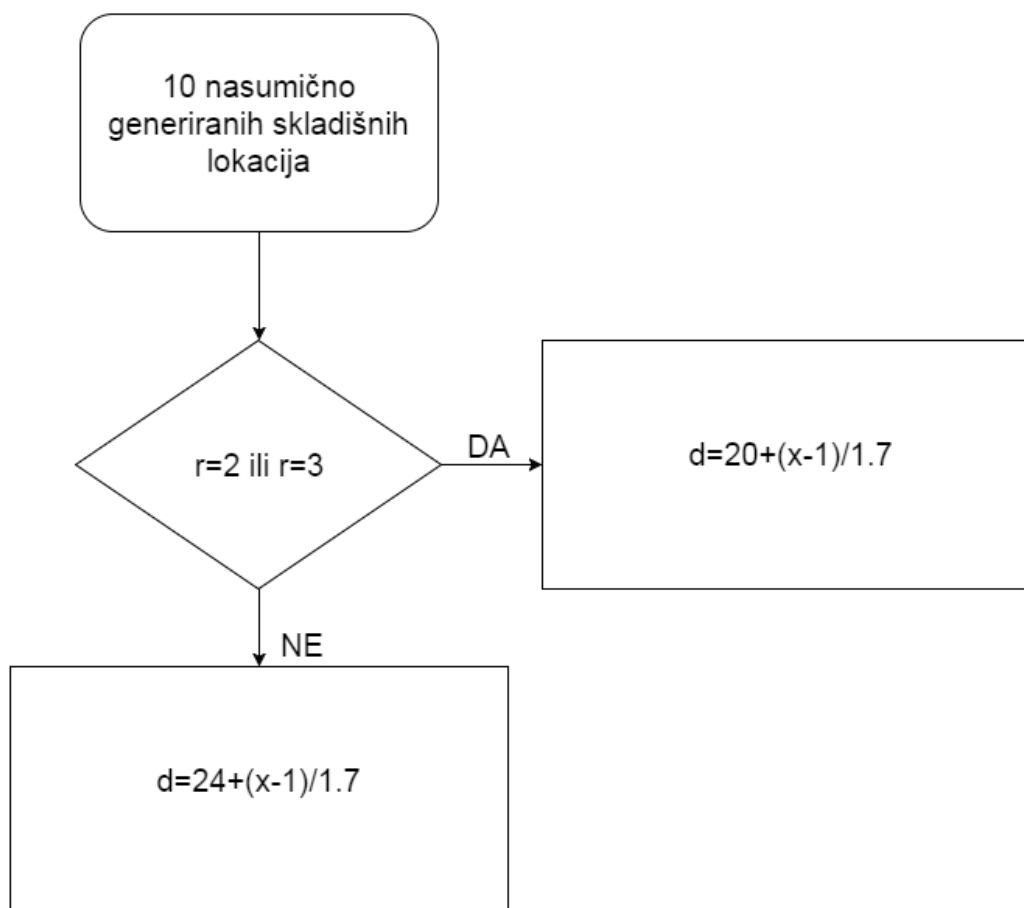
Slika 38. Odluka o spajanju lokacija u prolazu kod kompozitne metode



Slika 39. Redosljed posjećivanja lokacija za X-kompozitnu heurističku metodu

#### 6.1.4. X-heuristička metoda najbližeg susjeda

Prvi korak kod ove metode je određivanje skladišne lokacije koja je najbliža pretovarnoj stanici, ukoliko se zanemari visinska razina skladištenja. Postupak za računanje vremenskih udaljenosti u horizontalnoj ravnini prikazan je na sljedećoj slici.



**Slika 40.** Postupak određivanja vremenskih udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između pretovarne stanice i neke skladišne lokacije

Vremenske udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini za zadanu narudžbu dane su u sljedećoj tablici.

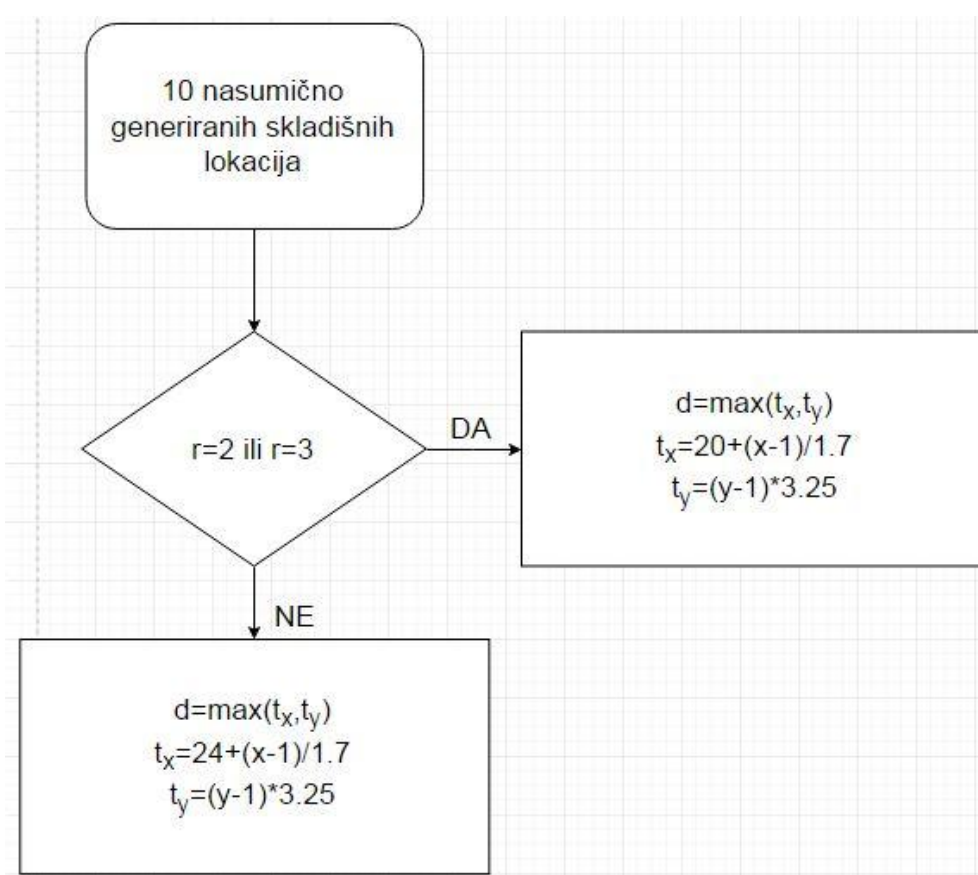
**Tablica 6.** Vremenske udaljenosti između početne lokacije i skladišnih lokacija s radnog naloga

Lokacija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>P</b>	29,41	22,35	35,76	34,12	31,18	41,41	20	36,35	24,71	35,18



U ovoj tablici najkraća vremenska udaljenost kod kretanja u horizontalnoj ravnini je udaljenost do skladišne lokacije br. 7 i iznosi 20 sekundi te će se ta lokacija dodati ruti. Udaljenost između pretovarne stanice i lokacije br. 7 može biti veća nego što je prikazano u tablici 6. zbog velike razlike visina i potrebe za podizanjem vilica. Stoga je potrebno izračunati stvarnu vremensku udaljenost između pretovarne stanice i lokacije br. 7.

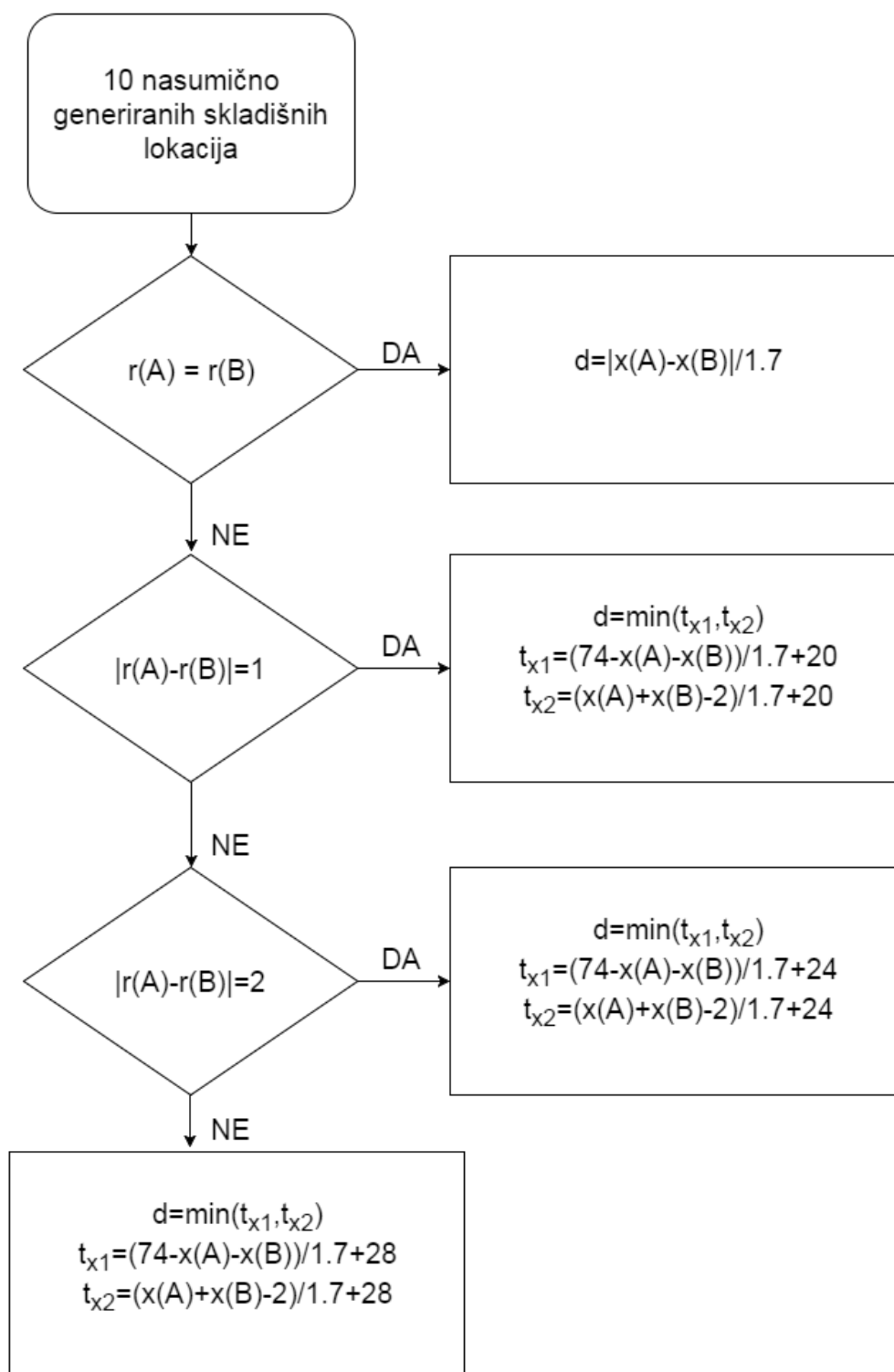
Postupak za računanje stvarne vremenske udaljenosti između pretovarne stanice i skladišnih lokacija prikazan je na slici 41.



**Slika 41. Postupak određivanja vremenskih udaljenosti između pretovarne stanice i neke skladišne lokacije**

Uvrštavanjem koordinata skladišne lokacije br. 7 te računanjem jednadžbi utvrđeno je da vremenska udaljenost iznosi 20 sekundi. Taj iznos dodaje se ukupnom trajanju vožnje prilikom komisioniranja te se nastavlja izračunavanje rute.

Sljedeći korak je pridruživanje točke ruti koja je najbliža prethodno dodanoj točki kada se razmatraju vremenske udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini. Postupak izračunavanja vremenskih udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između dviju skladišnih lokacija međusobno prikazan je na slici 42.



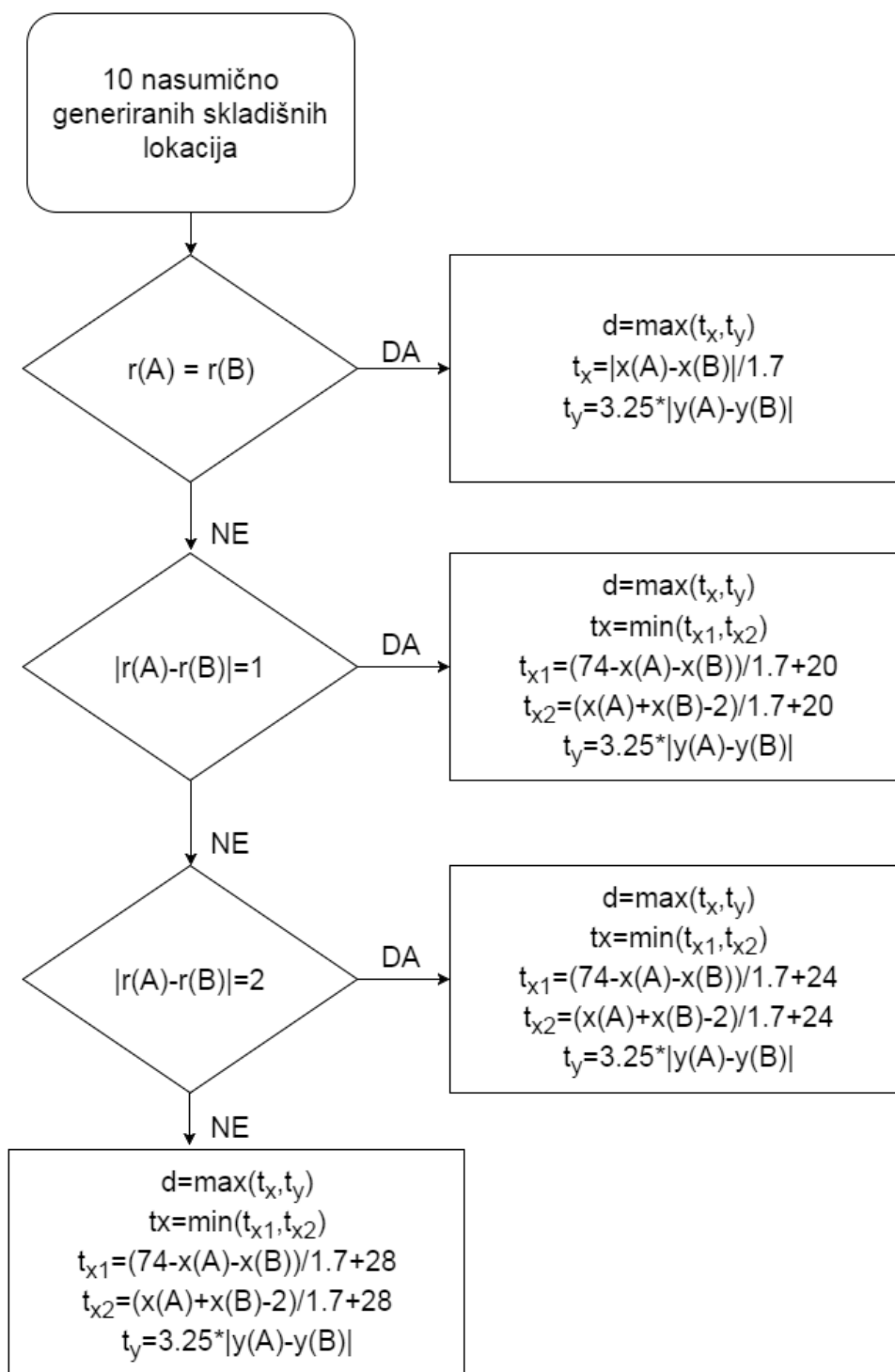
**Slika 42.** Postupak određivanja vremenskih udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između dviju skladišnih lokacija

Vremenske udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između svih skladišnih lokacija prikazane su u tablici 7.

**Tablica 7. Vremenske udaljenosti kod kretanja u horizontalnoj ravnini između pojedinih skladišnih lokacija s narudžbe**

<i>Lokacija</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>1</i>	-	31,76	41,18	4,71	40,59	33,53	9,41	44,59	34,12	40,59
<i>2</i>		-	38,12	36,47	8,82	44,59	22,35	34,71	2,35	37,53
<i>3</i>			-	36,47	43,41	7,65	31,76	46,24	40,47	0,59
<i>4</i>				-	37,06	28,82	14,12	39,88	38,82	37,06
<i>5</i>					-	35,76	31,18	38,82	6,47	44
<i>6</i>						-	39,41	38,59	42,24	8,24
<i>7</i>							-	36,35	24,71	31,18
<i>8</i>								-	37,06	46,82
<i>9</i>									-	39,88

Udaljenosti prikazane u tablici 7 služe za određivanje redoslijeda posjećivanja lokacija po kriteriju minimalne udaljenosti, ali stvarne vremenske udaljenosti između pojedinih lokacija mogu biti veće zbog potrebe za podizanjem ili spuštanjem vilica. Potrebno je stoga izračunati vremenske udaljenosti između skladišnih lokacija bez zanemarivanja kretanja u vertikalnoj ravnini, tj. podizanja i spuštanja vilica. Postupak za određivanje stvarnih vremenskih udaljenosti prikazan je na slici 43., a stvarne vremenske udaljenosti između pojedinih lokacija prikazane su u tablici 8.



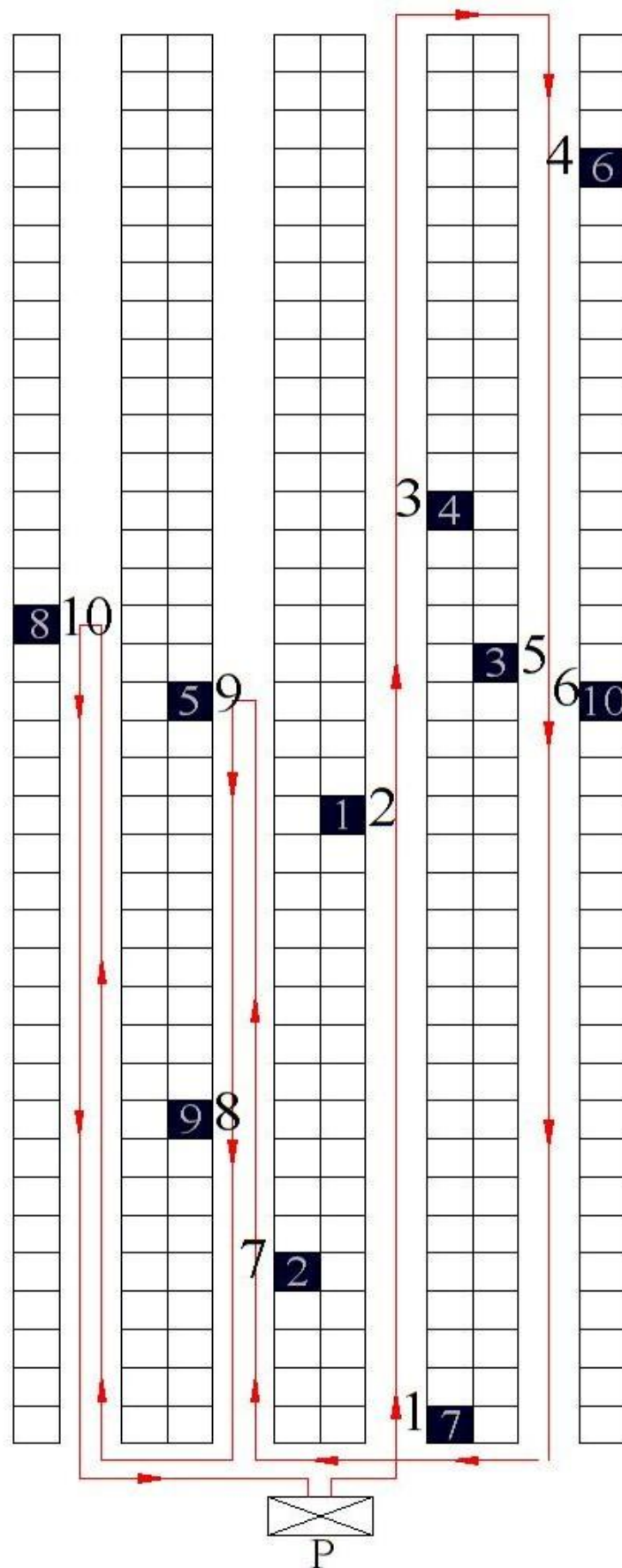
Slika 43. Postupak određivanja stvarnih vremenskih udaljenosti između skladišnih lokacija međusobno

Tablica 8. Stvarne vremenske udaljenosti između skladišnih lokacija s narudžbe

Lokacija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	31,76	41,18	13	40,59	33,53	9,41	44,59	34,12	40,59
2		-	38,12	36,47	8,82	44,59	22,35	34,71	16,25	37,53
3			-	36,47	43,41	9,75	31,76	46,24	40,47	9,75
4				-	37,06	28,82	14,12	39,88	38,82	37,06
5					-	35,76	31,18	38,82	9,75	44
6						-	39,41	38,59	42,24	8,24
7							-	36,35	24,71	31,18
8								-	37,06	46,82
9									-	39,88

U sljedećem koraku ruti se dodaje lokacija br. 1 koja je od točke br. 7 "udaljena" 9,41 sekundi. Udaljenost između ovih lokacija ista je u tablicama 7. i 8. te je u ovom koraku stvarno dodana najbliža lokacija. U sljedećem koraku dodana je lokacija br. 4 kojoj je stvarna vremenska udaljenost veća nego što je to procijenjeno određivanjem udaljenosti isključivo kod kretanja u horizontalnoj ravnini (tablica 7.) te postoji mogućnost neučinkovitog rutiranja kod velikih razlika visina skladišnih lokacija koje treba posjetiti.

Postupak dodavanja lokacija u rutu ponavlja se dok nisu dodane sve točke te se na kraju ukupnom trajanju vožnje pri komisioniranju dodaje vremenska udaljenosti između posljednje dodane lokacije i pretovarne stanice. Ukupno trajanje vožnje komisionera kod rutiranja ovom metodom iznosi 229,44 sekunde, a njegovo kretanje prikazano je na slici 44.



Slika 44. Redoslijed posjećivanja lokacija za X-heurističku metodu najbližeg susjeda

### 6.1.5. Metoda najbližeg susjeda

Prvi korak kod ove metode je određivanje skladišne lokacije koja je najbliža početnoj lokaciji, ali se u ovom slučaju ne zanemaruje kretanje u vertikalnoj ravnini, tj. podizanje i spuštanje vilica. Postupak za računanje vremenskih udaljenosti između početne točke odnosno pretovarne stanice i bilo koje skladišne lokacije prikazan je u prethodnom poglavlju na slici 41.

Vremenske udaljenosti između početne lokacije i skladišnih lokacija koje treba posjetiti zaokružene na drugu decimalu prikazane su u sljedećoj tablici.

**Tablica 9. Vremenske udaljenosti između pretovarne stanice i skladišnih lokacija s narudžbe**

<i>Lokacija</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<b>P</b>	29,41	22,35	35,76	34,12	31,18	41,41	20	36,35	24,71	35,18

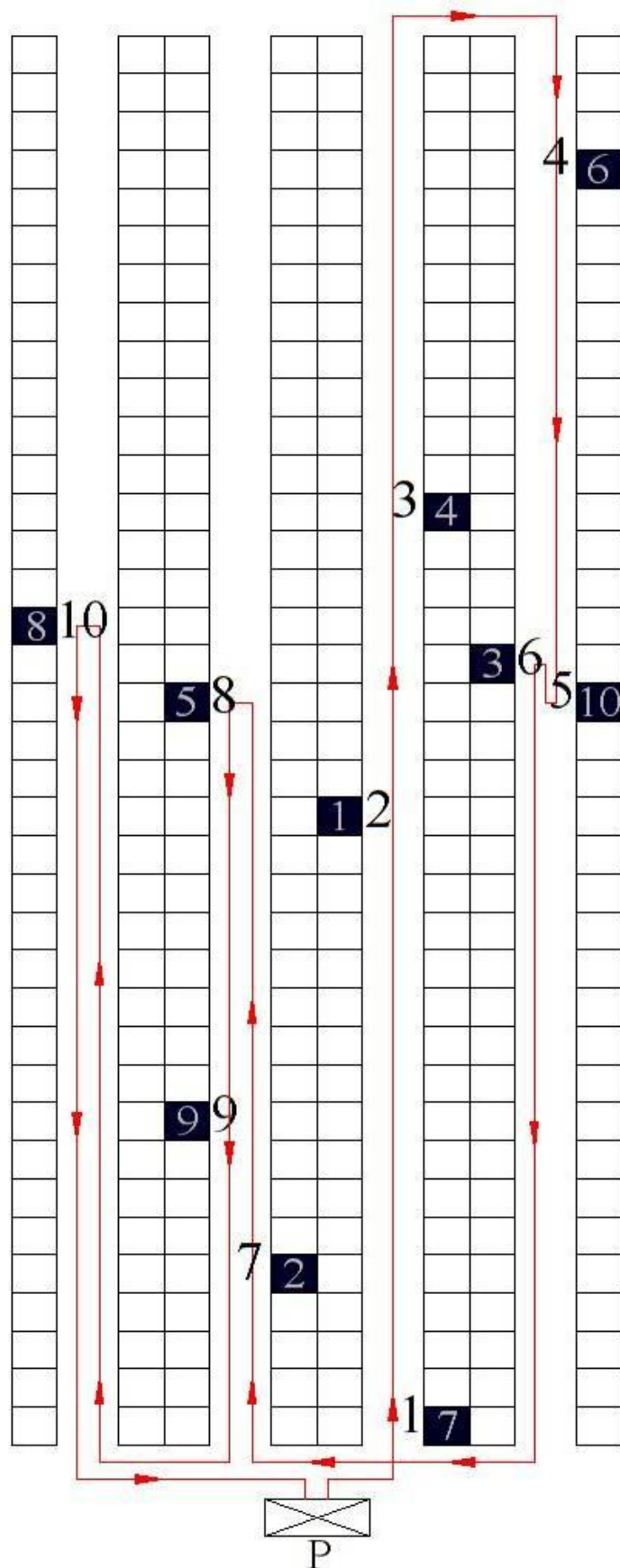
Najkraća vremenska udaljenost od pretovarne stanice do neke skladišne lokacije je udaljenost do lokacije br. 7 i iznosi 20 sekundi. Stoga ruti dodajemo tu točku, a ukupnom trajanju vožnje pri komisioniranju dodajemo 20 sekundi.

Sljedeći korak metode najbližeg susjeda je pridruživanje ruti točke koja je najbliža prethodno dodanoj točki. Prvo je potrebno izračunati vremenske udaljenosti između svih točaka s radnog naloga međusobno. Postupak računanja udaljenosti između skladišnih lokacija prikazan je u prethodnom poglavlju na slici 43., a vremenske udaljenosti između skladišnih lokacija prikazane su u tablici 8.

Lokacija, odnosno točka koja je prethodno dodana je točka br. 7 te je potrebno pronaći u tablici 8. lokaciju najbližu lokaciji br. 7, a da ta lokacija nije već ranije dodana u rutu. Taj postupak ponavlja se dok nisu sve skladišne lokacije koje je potrebno posjetiti dodane u rutu. Na kraju se ruti dodaje povratni put od posljednje dodane skladišne lokacije do pretovarne stanice.

Na slici 45. prikazan je redosljed posjećivanja skladišnih lokacija za generiranu rutu. Ukupno trajanje vožnje komisionera u ovom bi slučaju iznosilo 219,32 sekundi što je poboljšanje u odnosu na metodu najbližeg susjeda koja pri rutiranju ne uzima u obzir visinu skladišnih lokacija od 4,41 %.





Slika 45. Redosljed posjećivanja lokacija za heurističku metodu najbližeg susjeda

Kod posjećivanja lokacija s brojevima 7, 8 i 9 viličar se kreće najmanjim vremenskim udaljenostima. Naime, zato što se te lokacije nalaze na različitim razinama skladištenja u visinu, sljedeća lokacija u ruti je ona lokacija do koje viličar može najbrže doći. U ovom slučaju s lokacije br. 7 viličar će brže doći do lokacije s br. 8 u odnosu na lokaciju br. 9. Lokacija br. 8 je fizički udaljenija po horizontalnoj osi, ali je znatno bliža po vertikalnoj osi. Ista pojava prisutna je kod lokacija s brojevima 4, 5 i 6. Uzimanje u obzir visina skladišnih lokacija u ovom primjeru pruža učinkovitije komisioniranje od iste metode koja ne uzima u obzir visine skladišnih lokacija.

#### **6.1.6. Heuristička metoda Clarke-Wright**

Kod ove heurističke metode dodavanje točaka ruti odvija se temeljem ušteta ostvarenih sparivanjem dviju točaka u odnosu na zbroj dvaju povratnih puteva od početne točke do tih dviju točaka. [5] Postupak za izračun ušteta u sekundama dan je u sljedećoj formuli:

$$u_{ij} = d_{Pi} + d_{Pj} - d_{ij}$$

gdje je:

$u_{ij}$  – ušteta koja se ostvaruje sparivanjem točaka  $i, j$

$d_{Pi}$  – vremenska udaljenost točke  $i$  od pretovarne stanice  $P$

$d_{Pj}$  – vremenska udaljenost točke  $j$  od pretovarne stanice  $P$

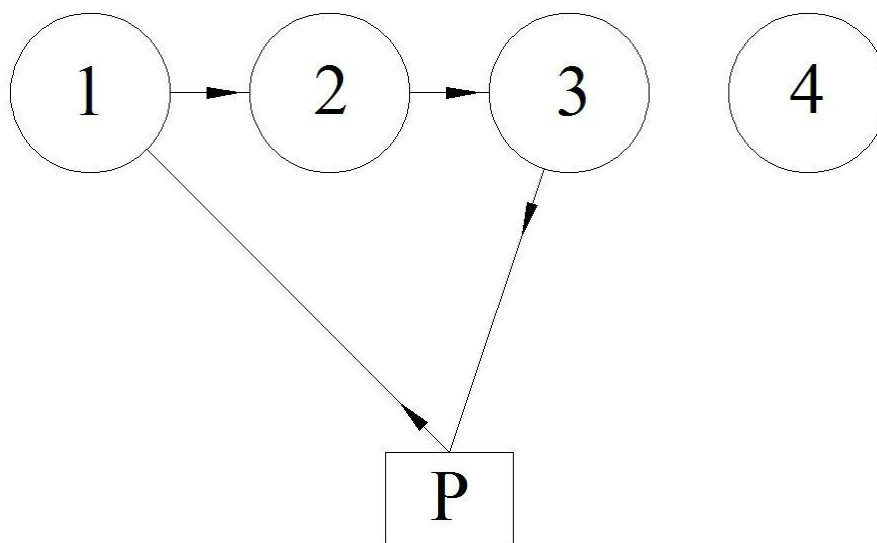
$d_{ij}$  – vremenska udaljenost točke  $i$  od točke  $j$

Potrebno je odabrati najveću uštedu koju je moguće ostvariti, a prije toga potrebno izračunati sve moguće uštete. U tablici 10. prikazane su sve uštete koje je moguće ostvariti u navedenom primjeru.

**Tablica 10. Uštede koje se ostvaruju sparivanjem pojedinih točaka u sekundama**

<b>Lokacija</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	-	20	24	50,53	20	39,29	40	21,18	20	24
<b>2</b>		-	20	20	44,71	21,18	20	24	30,81	20
<b>3</b>			-	33,42	23,53	69,43	24	25,88	20	61,19
<b>4</b>				-	28,24	48,71	40	30,59	20	32,24
<b>5</b>					-	38,82	20	28,71	46,13	22,35
<b>6</b>						-	24	41,18	25,88	70,35
<b>7</b>							-	20	20	24
<b>8</b>								-	24	24,71
<b>9</b>									-	20

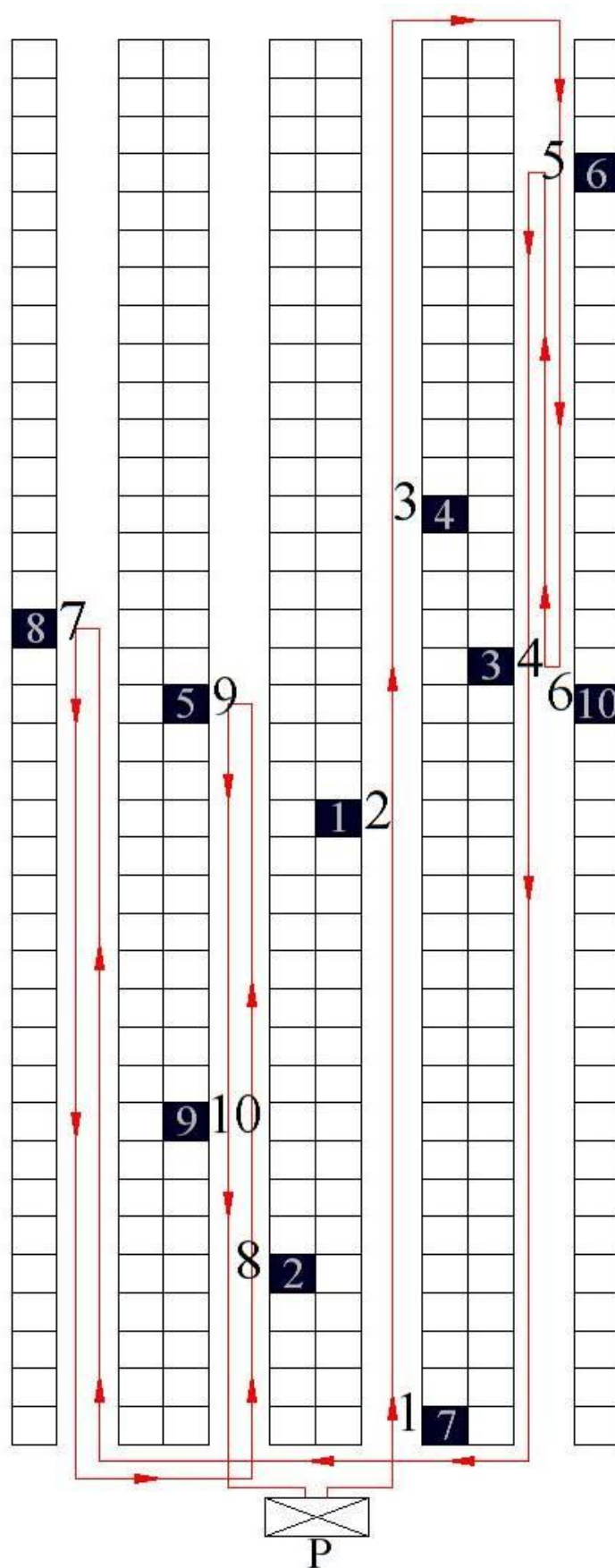
Najveća ušteta u tablici je 70,35 sekundi i ostvaruje se sparivanjem točaka 6 i 10. Te dvije točke se dodaju ruti, a ukupnom trajanju vožnje se dodaje vremenska udaljenost između njih. Nakon ovog koraka traži se sljedeća najveća ušteta, a pritom se pazi da se točke čijim sparivanjem se ostvaruje ta ušteta ne dodaju po treći puta u rutu (svaka točka može imati po jedan ulaz i jedan izlaz). Potrebno je također paziti da se te dvije točke ne nalaze na istoj podruti. U tom bi slučaju stvorio zatvoreni krug te ne bi postojala mogućnost povezivanja s početnom točkom, što je ilustrirano na slici 46.. Točke pod brojevima 1, 2 i 3 dodane su u rutu, a ukoliko bi točke 1 i 3 ostvarivale međusobno najveći iznos uštete ne bi ih se smjelo povezati zato što je ruti potrebno dodati još točku 4 i zato što krajevi rute trebaju ostati slobodni kako bi se mogli na kraju povezati s pretovarnom stanicom P. [5]



Slika 46. Ilustracija zatvorene podrute

Sljedeća najveća ušteda je 69,43 sekundi koja se ostvaruje sparivanjem točaka 3 i 6. Točka 3 ima slobodne i ulaz i izlaz, a točka 6 ima slobodan izlaz. Dodavanjem tih točaka neće se stvoriti zatvorena podruta, što znači da se te točke mogu dodati ruti. Vremenska udaljenost između njih dodaje se ukupnom trajanju vožnje prilikom komisioniranja.

Ovaj postupak se ponavlja dok nisu dodane sve točke u rutu nakon čega je potrebno prepoznati točke na krajevima rute te ih povezati s početnom točkom P i dodati pripadajuće vremenske udaljenosti ukupnom trajanju vožnje. Na slici 47. prikazan je redoslijed posjećivanja skladišnih lokacija za generiranu rutu. Ukupno trajanje vožnje komisionera u ovom bi slučaju iznosilo 221,68 sekundi.

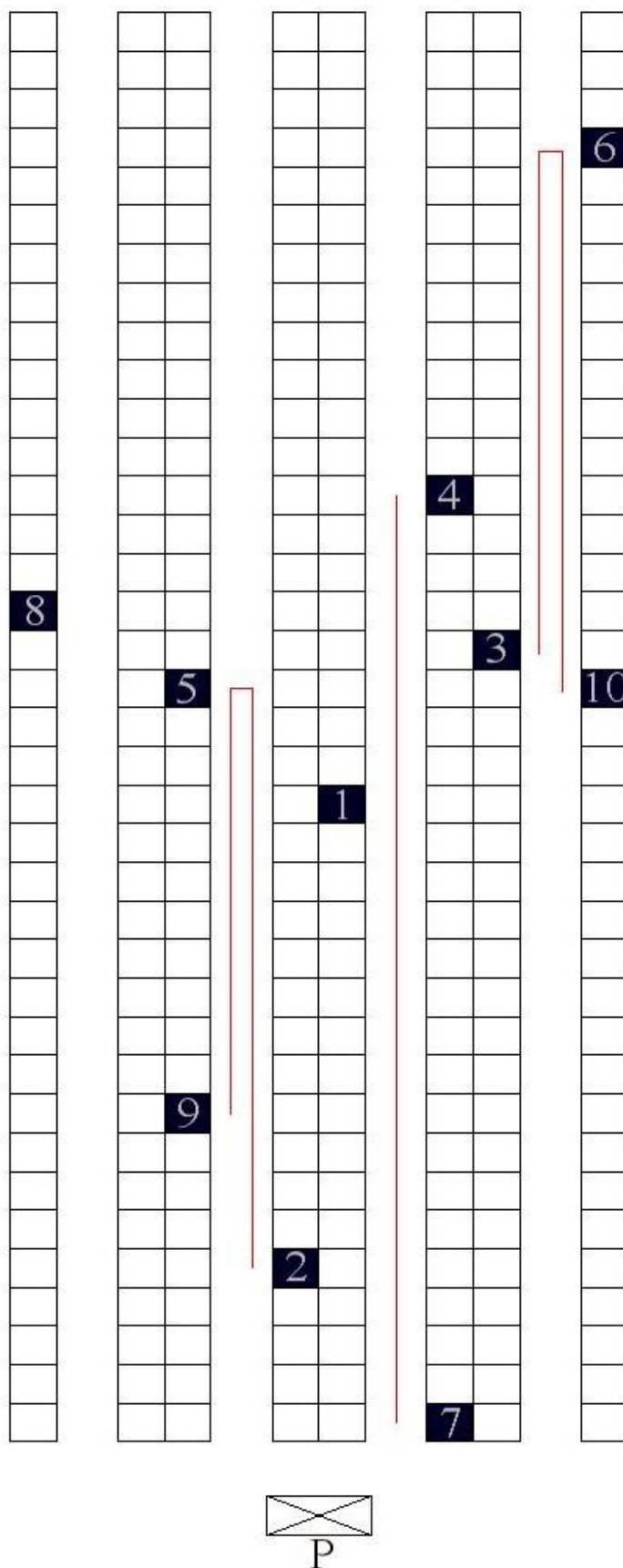


Slika 47. Redoslijed posjećivanja lokacija za heurističku metodu Clarke-Wright

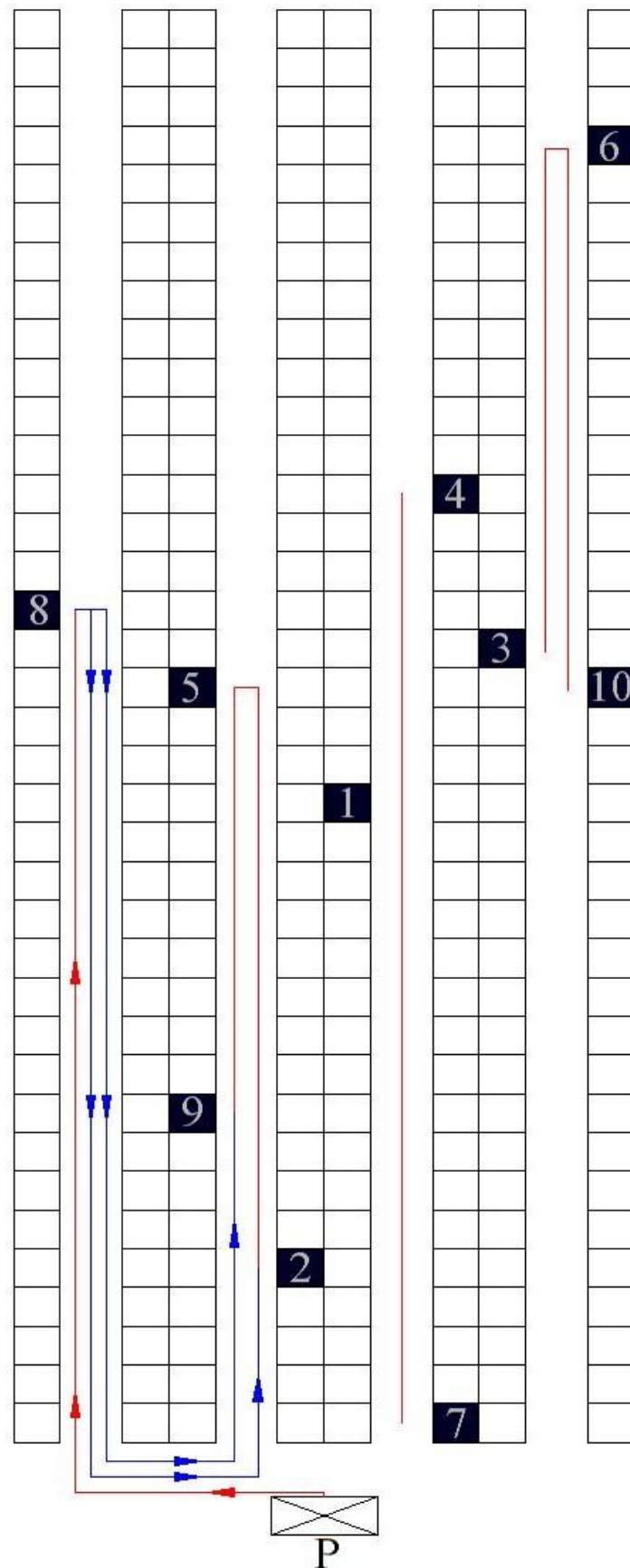
### **6.1.7. Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda**

Prvi korak kod ove metode je grupiranje skladišnih lokacija unutar svakog prolaza po metodi najbližeg susjeda. Grupiranje u svakom prolazu započinje od skladišne lokacije koja je najbliža početku regala. U prvom prolazu nalazi se samo jedna skladišna lokacija te nije potrebno provoditi grupiranje. U drugom prolazu grupiranje započinje od skladišne lokacije br. 2 kojoj se pridružuje sljedeća lokacija po kriteriju najmanje vremenske udaljenosti što je u ovom slučaju lokacija br. 5. Nakon toga prethodni postupak se ponavlja te se dodaje sljedeća skladišna lokacija s najmanjom vremenskom udaljenošću od prethodno dodane lokacije. U ovom slučaju to je skladišna lokacija br. 9 koja je ujedno i posljednja skladišna lokacija u ovom prolazu. Postupak grupiranja skladišnih lokacija po prolazima se ponavlja u svakom prolazu koji sadrži artikle koje je potrebno komisionirati. U trećem prolazu grupiranje započinje od skladišne lokacije br. 7, a u četvrtom prolazu od skladišne lokacije br. 10.

Grupiranje skladišnih lokacija u ovom primjeru prikazano je na slici 48. Na kraju grupiranja skladišnih lokacija u prolazima postoje u svakom prolazu po dva slobodna kraja grupiranih lokacija. Iznimka je prvi prolaz u kojem se nalazi samo jedna skladišna lokacija te se u tom prolazu dva slobodna kraja grupiranja nalaze u istoj točki. Slobodne krajeve u prolazima potrebno je spojiti u jednu jedinstvenu rutu što će se učiniti kompozitnom metodom. Prvi korak kompozitne metode je spajanje pretovarne stanice s prvim prolazom u kojem se nalaze artikli koje je potrebno komisionirati. To je, u ovom slučaju, prvi prolaz s lokacijom br. 8. U slučaju kada bi se u prvom prolazu nalazilo više skladišnih lokacija koje je potrebno posjetiti te bi ruta unutar prolaza imala dva slobodna kraja, pretovarna stanica bi se u prvom koraku spojila sa slobodnim krajem koji se nalazi bliže početku regala te se tako, ujedno, nalazi i bliže samoj pretovarnoj stanici. Sljedeći korak ove metode je spajanje rute u prvom prolazu sa sljedećim prolazom koji sadrži artikle koje je potrebno komisionirati. U ovom slučaju to je drugi prolaz koji ima slobodne krajeve na skladišnim lokacijama br. 9 i 5. Određuje se udaljenost posljednje dodane lokacije u prvom prolazu, lokacije br. 8, i lokacija br. 9 i 5. Ruta se povezuje s lokacijom br. 2 koja je bliža lokaciji br. 8 iz prvog prolaza. Ovaj korak metode prikazan je plavim linijama na slici 49.



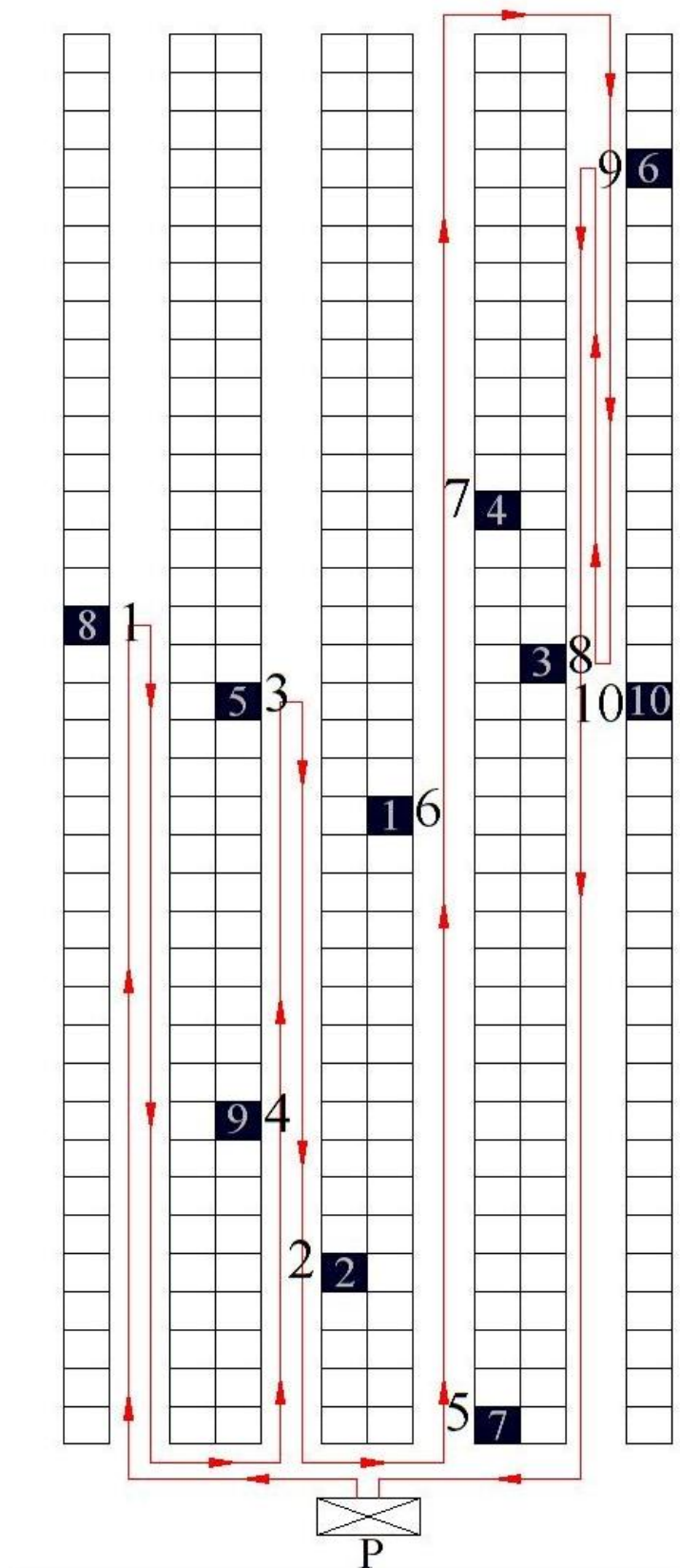
**Slika 48. Grupiranje skladišnih lokacija kod metode grupiranja u prolazima po metodi najbližeg susjeda**



**Slika 49. Odluka o spajanju prolaza kod metode grupiranja lokacija po prolazima po metodi najbližeg susjeda**



Na slici 50. prikazana je konačna ruta komisionera, a trajanje vožnje komisionera kod rutiranja ovom metodom iznosi 226,38 sekundi.



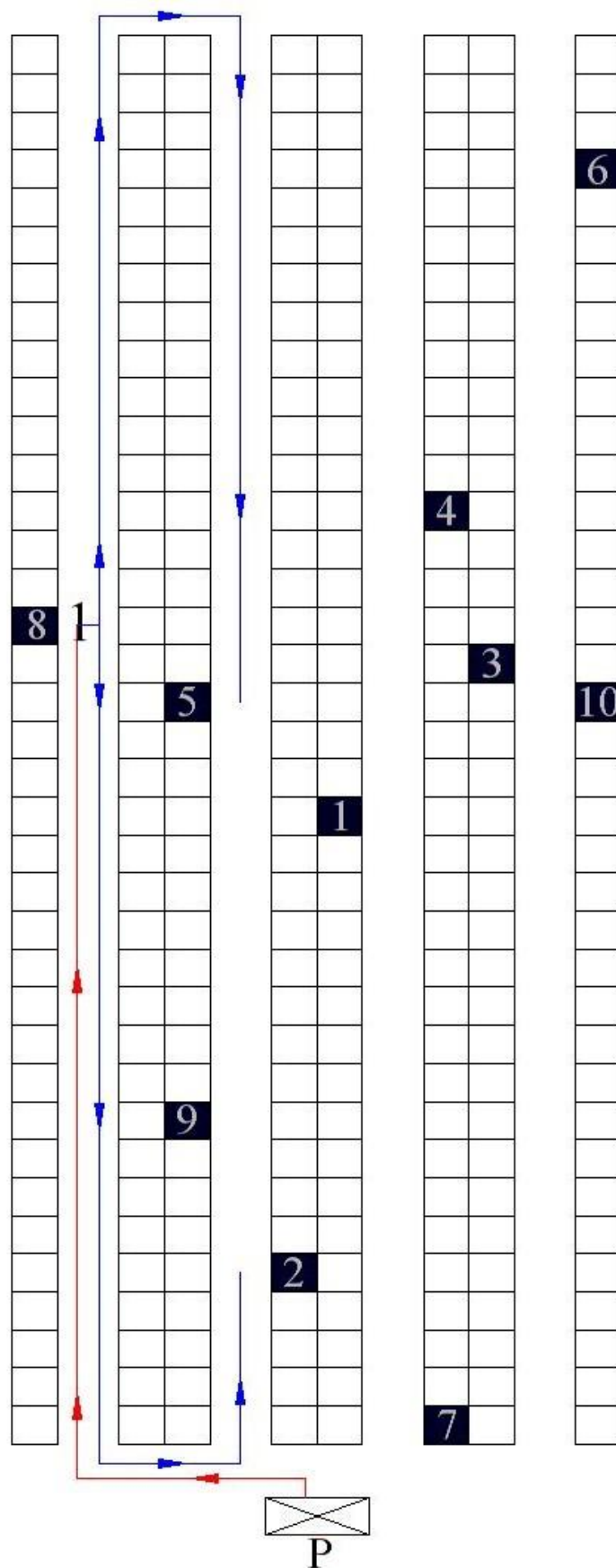
Slika 50. Redoslijed posjećivanja lokacija za metodu grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda

### **6.1.8. Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda**

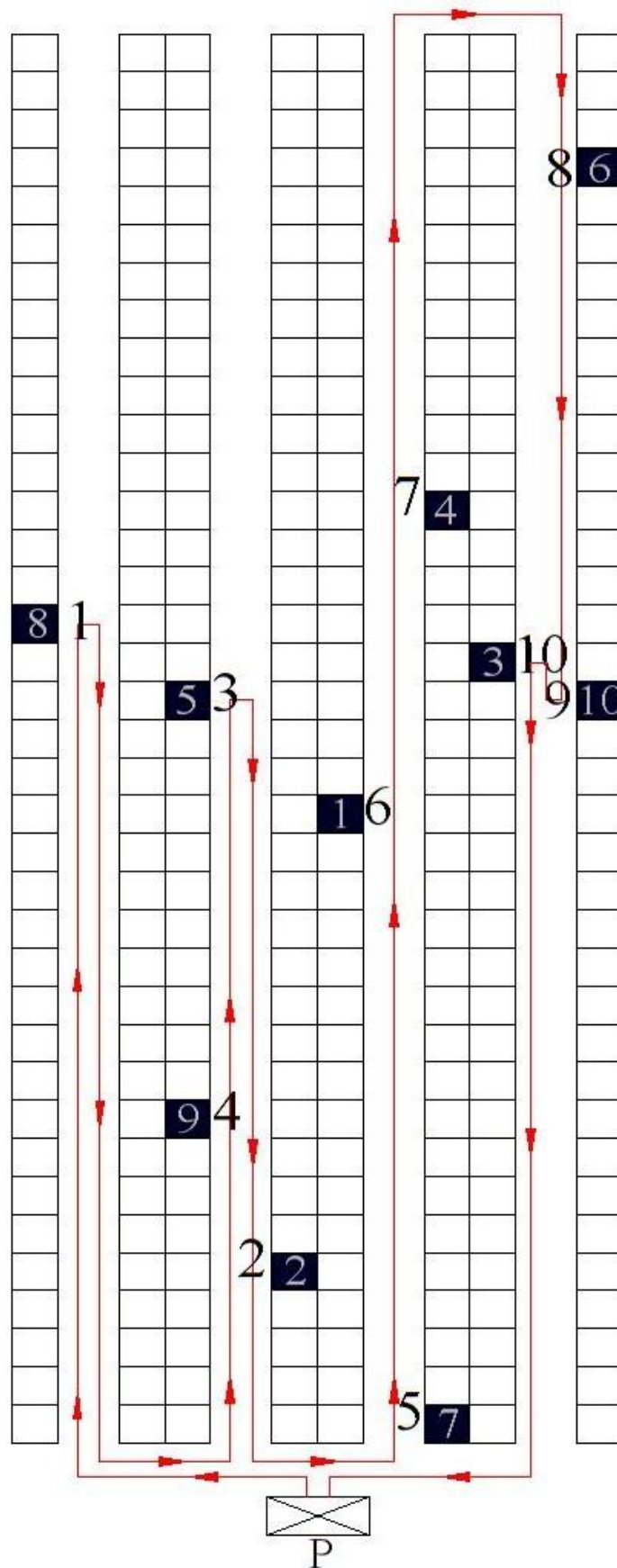
Kod ove metode prvo se posjećuje lokacija u prvom prolazu slijeva koji sadrži artikle koje je potrebno posjetiti te se nakon toga provodi usmjeravanje viličara do ostalih lokacija u tom prolazu po metodi najbližeg susjeda. U ovom primjeru to je skladišna lokacija br. 8 u prvom prolazu, a budući da je to jedina lokacija u tom prolazu ne provodi se usmjeravanje po metodi najbližeg susjeda unutar prolaza. Od posljednje dodane lokacije u prolazu određuje se je li bliža toj lokaciji ona lokacija u sljedećem prolazu koja se nalazi najbliže početku regala ili najbliže kraju regala. Ovaj korak metode prikazan je na slici 51. i odnosi se na spajanje lokacija u prvom i drugom prolazu.

Lokacija br. 8 posljednja je dodana točka u prvom prolazu te se za dodavanje sljedeće točke razmatraju dvije točke u sljedećem prolazu: lokacije br. 2 i 5. U ovom slučaju udaljenost između lokacija 8 i 2 manja je od udaljenosti između lokacija 8 i 5 te se ruti dodaje točka 2. Potom se rutiranje unutar drugog prolaza provodi po metodi najbližeg susjeda od lokacije br. 2 dok nisu dodane sve lokacije u tom prolazu nakon čega se od posljednje dodane točke razmatra spajanje s trećim prolazom. Ovaj postupak se ponavlja dok nisu sve lokacije dodane u rutu te se na kraju ruti dodaje povratni put do pretovarne stanice.

Trajanje vožnje kod komisioniranja u ovom slučaju iznosi 219,32 sekundi, a cjelovita ruta komisionera prikazana je na slici 52.



**Slika 51. Odluka o spajanju prolaza kod kompozitne metode uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda**



**Slika 52. Redoslijed posjećivanja lokacija za kompozitnu metodu uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda**

### 6.1.9. Analiza rezultata predstavljenih heurističkih metoda

Trajanje vožnje prilikom komisioniranja zadane narudžbe prikazano je u tablici 11. Najkraće trajanje vožnje pri komisioniranju postignuto je heurističkom metodom najbližeg susjeda koja uzima u obzir visine skladišnih lokacija i kompozitnom metodom uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda.

Tablica 11. Trajanje vožnje pri komisioniranju primjera jedne narudžbe od 10 artikala

<i>Heuristička metoda</i>	<i>Trajanje vožnje [s]</i>	<i>Razlika u odnosu na trenutno korištenu metodu</i>
<b>Trenutno korištena heuristička metoda</b>	245,21	0
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	258,85	+ 5,56 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	234,15	- 4,51 %
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	229,44	- 6,43 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	219,32	- 10,56 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	221,68	- 9,60 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	226,38	- 7,68 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	219,32	- 10,56 %

Kako bi se mogli donijeti općenitiji zaključci potrebno je simulirati generiranje većeg broja narudžbi i rutiranje prethodno opisanim metodama te izvršiti analizu prikupljenih podataka.

## 6.2. Simulacija komisioniranja i analiza dobivenih rezultata

Kako bi se mogle usporediti generirane rute izrađena je simulacija koja će za iste narudžbe generirati rute za svaku od heurističkih metoda opisanih u prethodnom poglavlju te će se izračunati trajanje vožnje pri komisioniranju za svaku od generiranih ruta.

### 6.2.1. Izrada simulacije vremena vožnje

Zadaće simulacije su:

1. Generirati narudžbu komisioniranja gdje treba posjetiti veći broj skladišnih lokacija (generirane lokacije moraju biti nasumične te njihov položaj unutar skladišta mora biti nedvosmisleno određen)
2. Izračunati vremenske udaljenosti od početne lokacije do svih ostalih lokacija te vremenske udaljenosti između svih drugih lokacija međusobno. Rezultate pohraniti u memoriju računala
3. Izvršiti rutiranje vozila po odabranim heurističkim metodama
4. Izračunati trajanje vožnje pri komisioniranju
5. Izračunati prosječno trajanje vožnje pri komisioniranju za dovoljno velik broj radnih naloga

Simulacija će se izraditi u programskom paketu MATLAB.

### Generiranje nasumičnih skladišnih lokacija

Nasumične skladišne lokacije dobivene su generiranjem nasumičnih brojeva unutar MATLAB-a. Nedvosmisleno određivanje položaja svake generirane skladišne lokacije unutar regala riješeno je dodjeljivanjem triju veličina „r“, „x“ i „y“. Prva veličina „r“ određuje u kojem prolazu se nalazi skladišna lokacija, druga veličina „x“ određuje udaljenost po horizontalnoj osi koja se proteže dužinom prolaza između regala, a treća veličina „y“ određuje na kojoj se visini u regalu nalazi skladišna lokacija.

Koordinate nasumičnih lokacija generiraju se pomoću naredbe "randi" koja označava uniformno distribuirane nasumične cijele brojeve (eng. uniformly distributed pseudorandom integers).

### **Računanje udaljenosti između lokacija u skladištu**

Koordinate „r“, „x“, „y“ integrirane su u formule koje računaju udaljenosti između početne točke do svake generirane nasumične lokacije te se dobiveni rezultati spremaju se u memoriju. Zatim se računaju udaljenosti između svih skladišnih lokacija međusobno, a rezultati se pohranjuju u matricu.

### **Rutiranje (usmjeravanje) vozila**

Za zadani radni nalog procjenjuje se trajanje vožnje viličara pri komisioniranju jedne nasumične narudžbe za slučajeve rutiranja po heurističkim metodama opisanim u poglavlju 6.1.. Moguće je procijeniti trajanje vožnje kod komisioniranja pojedinačnih narudžbi veličine do 20 artikala za svaku od metoda predstavljenih u poglavlju 6.1.. Također, moguće je odrediti prosječno trajanje vožnje pri komisioniranju kod određenog broja narudžbi.

#### **6.2.2. Verifikacija rezultata simulacije**

Nakon izrade simulacije potrebno je verificirati njene rezultate prije analize dobivenih rezultata. Budući da je potrebno ispitati mnogo različitih slučajeva veličina narudžbi i rasporeda artikala u regalima to je dugotrajan proces.

Jedan od pristupa verifikaciji je "ručno" rješavanje narudžbi te uspoređivanje s rezultatima simulacije. Pri verifikaciji ove simulacije ispitano je nekoliko desetaka narudžbi ovim pristupom.

Simulaciju je također moguće verificirati uspoređivanjem rezultata različitih metoda za rasporede artikala za koje trebaju imati iste rezultate, kao primjerice kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po X-heuristici, metoda grupiranja unutar prolaza po heuristici najbližeg susjeda i kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda u slučaju kada su sve skladišne lokacije koje je potrebno posjetiti na istoj razini skladištenja. U sljedećoj tablici dani su rezultati simulacije za komisioniranje 10 narudžbi s 10 artikala.

**Tablica 12. Rezultati simulacije za 10 nasumičnih narudžbi s 10 artikala koji se nalaze na istoj visini skladištenja**

<b>Metoda</b>	<b>X - Kompozitna heuristička metoda</b>	<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>
<b>Trajanje vožnje [s]</b>	176,2353	176,2353	176,2353
	188	188	188
	191,5294	191,5294	191,5294
	173,8824	173,8824	173,8824
	192,7059	192,7059	192,7059
	144	144	144
	169,1765	169,1765	169,1765
	192,7059	192,7059	192,7059
	195,0588	195,0588	195,0588
	192,7059	192,7059	192,7059

Rezultati u tablici 12. potvrđuju ispravnost simulacije. Kako bi se simulacija dodatno ispitala generirano je po 10 000 nasumičnih narudžbi za slučajev narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala za koje je izračunato prosječno trajanje vožnje prilikom komisioniranja te su rezultati prikazani u tablici 13.

**Tablica 13. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala koji se nalaze na istoj visini skladištenja**

<b>Metoda</b>	<b>Prosječno trajanje vožnje [s] (5 artikala)</b>	<b>Prosječno trajanje vožnje [s] (10 artikala)</b>	<b>Prosječno trajanje vožnje [s] (20 artikala)</b>
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	165,7619	214,7786	246,5734
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	145,5831	181,3736	193,9711
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	141,1260	177,4370	195,5064
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	141,1260	177,4370	195,5064
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	140,8007	181,1658	217,5643
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	145,5831	181,3736	193,9711
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	145,5831	181,3736	193,9711



U slučaju kada se svi artikli nalaze na istoj visini skladištenja X- heuristika najbližeg susjeda i heuristika najbližeg susjeda pružaju iste rute što je i slučaj kod rezultata simulacije. Rezultati za metode koje su hibridi kompozitne metode i metode najbližeg susjeda također imaju jednaka rješenja. Ovakav pristup verifikaciji simulacije pogodan je za uočavanje grešaka koje se javljaju u jako rijetkim slučajevima, a značajno utječu na prosječnu vrijednost rezultata.

Rezultati u tablici 13. sugeriraju da metoda Clarke-Wright pruža najbolja rješenja kod narudžbi s malim brojem artikala, kod narudžbi s 10 artikala najbolje rezultate u prosjeku postiže metoda najbližeg susjeda, a kod velikih narudžbi s 20 artikala najbolje rezultate postižu metode koje koriste kompozitnu metodu za rutiranje između prolaza.

U slučaju kada bi svi artikli koje treba posjetiti bili u istom prolazu ciklus komisioniranja imao bi isto trajanje za rutiranje X-povratnom i X-kompozitnom metodom. Također, dvije metode koje koriste kompozitnu heurističku metodu za rutiranje između prolaza i metodu najbližeg susjeda za rutiranje unutar prolaza u tom bi slučaju pružile jednake rute. Uvidom u tablicu 14. gdje su prikazana prosječna trajanja vožnje pri komisioniranju za svaku metodu rutiranja kod 10 000 narudžbi s 5, 10 i 20 artikala mogu se potvrditi prethodne tvrdnje.

**Tablica 14. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala koji se nalaze u prvom prolazu**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje</i>	<i>Prosječno trajanje</i>	<i>Prosječno trajanje</i>
	<i>vožnje [s]</i> <i>(5 artikala)</i>	<i>vožnje [s]</i> <i>(10 artikala)</i>	<i>vožnje [s]</i> <i>(20 artikala)</i>
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	102,6710	139,5178	213,4963
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	102,6710	139,5178	213,4963
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	102,6710	139,5178	213,4963
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	94,9990	111,7360	137,2521
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	91,7758	104,4838	124,6276
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	94,9990	111,7360	137,2521
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	94,9990	111,7360	137,2521

Iz rezultata tablice 14. vidljivo je da iste rezultate pružaju metode koje posjećuju lokacije po X-osi i metode koje posjećuju lokacije prema metodi najbližeg susjeda uzimajući u obzir pritom visinu skladištenja. Potonje metode pružaju rute s kraćim trajanjem što osobito dolazi do izražaja kod velikih narudžbi s 20 artikala gdje su velike razlike visina skladišnih lokacija vjerojatnije. Vidljivo je, također, da metoda Clarke-Wright ostvaruje najbolje rezultate kod komisioniranja unutar jednog prolaza neovisno o veličini narudžbe. Razlog tomu je težnja te metode da ravnomjerno posjećuje lokacije pri prvotnom kretanju u prolazu i pri povratnom putu, što je opisano i ilustirano ranije u poglavlju 4.2.2.2. na slici 27.

Ukoliko bi se sve skladišne lokacije koje treba posjetiti nalazile u istom prolazu i na istoj visini skladištenja svih 7 metoda rutiranja pružile bi isto rješenje što je nužno provjeriti pri verifikaciji simulacije. Velik broj nasumičnih narudžbi generiran je za taj slučaj te su rezultati prikazani u tablici 15.

**Tablica 15. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi s po 5, 10 i 20 artikala koji se nalaze u prvom prolazu i na istoj visini skladištenja**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (5 artikala)</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (10 artikala)</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (20 artikala)</i>
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	83,7536	86,9238	88,8111
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	83,7536	86,9238	88,8111
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	83,7536	86,9238	88,8111
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	83,7536	86,9238	88,8111
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	83,7536	86,9238	88,8111
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	83,7536	86,9238	88,8111
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	83,7536	86,9238	88,8111

Nakon završene verifikacije simulacije može se pristupiti analizi njenih rezultata te izvođenju zaključaka o metodama rutiranja.

### **6.2.3. Analiza rezultata simulacije za komisioniranje unutar zone s više prolaza**

Analiza rezultata već je započeta u prethodnom poglavlju saznanjima o superiornosti metode Clarke-Wright u slučajevima kada se svi artikli nalaze u jednom prolazu i kada se artikli ne nalaze na istoj visini skladištenja. Ukoliko su artikli ravnomjerno raspoređeni po prolazima, ali se nalaze na istoj visini skladištenja razlike između ispitivanih metoda nisu konzistentne.

U stvarnosti artikli su često raspoređeni po svim prolazima i ne nalaze se na istim visinama skladištenja stoga su najvrijednija saznanja kod ispitivanja takvih narudžbi. Budući da niti jedna metoda ne pruža konzistentno bolja rješenja uvesti će se veličina minimalnog trajanja vožnje. Ta veličina odnosi se na najkraće trajanje vožnje pri komisioniranju koje je odredila jedna od ispitivanih metoda.

Važno je, također, pri analizi rezultata procijeniti udio trajanja vožnje u ukupnom trajanju ciklusa komisioniranja kako bi se mogao procijeniti učinak primjenjenih metoda na ukupno skraćivanje trajanja ciklusa komisioniranja. Samu procjenu trajanja pripremnih radnji pri komisioniranju na svakoj skladišnoj lokaciji i trajanja izuzimanja na skladišnim lokacijama teško je izvršiti zbog značajnog utjecaja radnika na trajanje i zbog različitih dimenzija i masa artikala koje je potrebno komisionirati. Nadalje s određene skladišne lokacije može biti potrebno izuzeti jako male količine robe, a s neke druge velike količine robe. U ovom radu pretpostaviti će se fiksno trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na svakoj skladišnoj lokaciji od 25 sekundi.

Analiza rezultata provesti će se za narudžbe s 5, 10 i 20 artikala po narudžbi i za narudžbe nasumične veličine od 5 do 20 artikala. Pružiti će se uvid u procjenu trajanja vožnje kod 20 pojedinačnih narudžbi te tablica s prosječnim trajanjem vožnje kod 10 000 pojedinačnih narudžbi. Važno je dodatno naglasiti da se rezultati dobiveni simulacijom i prikazani u tablicama odnose isključivo na trajanje vožnje pri komisioniranju, a ne na ukupno trajanje ciklusa komisioniranja. Ukupno trajanje ciklusa može se dobiti zbrajanjem trajanja vožnje i trajanja pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim lokacijama.

## 6.2.3.1. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 5 artikala

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati simulacije za 20 narudžbi veličine 5 artikala. Minimalno trajanje vožnje postignuto nekom od ispitivanih metoda masno je otisnuto.

**Tablica 16. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 5 artikala**

Metoda / Broj narudžbe	$\bar{X}$ - povratna heuristička metoda	$\bar{X}$ - kompozitna heuristička metoda	$\bar{X}$ - heuristika najbližeg susjeda	Heuristika najbližeg susjeda	Heuristička metoda Clarke - Wright	Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda	Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda
1	250,69	<b>171,87</b>	174,69	174,69	<b>171,87</b>	<b>171,87</b>	<b>171,87</b>
2	196,71	<b>136,71</b>	<b>136,71</b>	<b>136,71</b>	<b>136,71</b>	<b>136,71</b>	<b>136,71</b>
3	226,82	<b>173,88</b>	<b>173,88</b>	<b>173,88</b>	<b>173,88</b>	<b>173,88</b>	<b>173,88</b>
4	141,43	141,43	141,43	141,43	<b>139,94</b>	141,43	141,43
5	178,56	177,38	<b>166,79</b>	<b>166,79</b>	<b>166,79</b>	177,38	177,38
6	180,63	157,10	157,10	157,10	<b>155,93</b>	157,10	157,10
7	215,06	<b>159,76</b>	163,76	163,76	<b>159,76</b>	<b>159,76</b>	<b>159,76</b>
8	151,68	151,68	<b>132,85</b>	<b>132,85</b>	137,56	151,68	151,68
9	156,72	<b>143,78</b>	<b>143,78</b>	<b>143,78</b>	<b>143,78</b>	<b>143,78</b>	<b>143,78</b>
10	198,12	160,47	<b>126,35</b>	<b>126,35</b>	<b>126,35</b>	160,47	160,47
11	126,57	<b>111,28</b>	<b>111,28</b>	<b>111,28</b>	124,22	<b>111,28</b>	<b>111,28</b>
12	253,35	191,00	<b>172,18</b>	<b>172,18</b>	<b>172,18</b>	191,00	191,00
13	197,88	<b>153,18</b>	<b>153,18</b>	<b>153,18</b>	<b>153,18</b>	<b>153,18</b>	<b>153,18</b>
14	138,97	126,03	126,03	<b>117,12</b>	127,74	127,74	127,74
15	172,24	142,82	<b>134,59</b>	<b>134,59</b>	144,00	142,82	142,82
16	189,68	152,03	152,03	152,03	<b>148,97</b>	152,03	152,03
17	160,04	<b>140,04</b>	<b>140,04</b>	<b>140,04</b>	<b>140,04</b>	<b>140,04</b>	<b>140,04</b>
18	132,94	<b>121,18</b>	<b>121,18</b>	<b>121,18</b>	128,49	<b>121,18</b>	<b>121,18</b>
19	118,12	118,12	118,12	110,44	<b>108,06</b>	110,44	110,44
20	156,44	119,97	119,97	<b>118,18</b>	<b>118,18</b>	<b>118,18</b>	121,15

Kod veličine narudžbi od 5 artikala vidljivo je da se najkraća ruta u većini slučajeva postiže uz metodu Clarke-Wright. X-heuristika najbližeg susjeda i heuristika najbližeg susjeda pružaju najkraću rutu u više od 50 % slučajeva narudžbi. Kod narudžbi veličine 5 artikala različite heurističke metode mogu postići isto rješenje koje je ujedno i minimalno rješenje među ispitivanim metodama.

U tablici 17. prikazani su prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 5 artikala, a u prvom redu tablice "Minimalno trajanje" označava prosjek masno otisnutih minimalnih trajanja kod 10 000 narudžbi. Prosječno trajanje vožnje je najkraće kod metode Clarke-Wright dok je prosječno trajanje vožnje kod metoda X-heuristike najbližeg susjeda i heuristike najbližeg susjeda tek neznatno dulje. Vrlo mala razlika između X-heuristike najbližeg susjeda i heuristike najbližeg susjeda navodi na zaključak da su rijetki slučajevi s duljim trajanjem vertikalnog kretanja viličara, podizanja vilica, u odnosu na horizontalno kretanje, vožnju viličara. Trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim lokacijama iznosi 125 sekundi i isto je za svaku od prikazanih metoda budući da ovisi isključivo o broju skladišnih lokacija koje je potrebno posjetiti. Ukupno trajanje ciklusa komisioniranja može se dobiti zbrajanjem trajanja pripremnih radnji i izuzimanja i trajanja vožnje.

**Tablica 17. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 5 artikala**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (5 artikala)</i>	<i>Razlika u odnosu na X - kompozitnu heurističku metodu</i>
<b>Minimalno trajanje</b>	145,26	- 4,43 %
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	172,38	+ 13,42 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	151,98	0
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	147,72	- 2,81 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	147,38	- 3,03 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	146,62	- 3,53 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	151,59	- 0,26 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	151,56	- 0,28 %

## 6.2.3.2. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 10 artikala

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati simulacije za 20 narudžbi s 10 artikala.

**Tablica 18. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 10 artikala**

Metoda / Broj narudžbe	X - povratna heuristička metoda	X - kompozitna heuristička metoda	X - heuristika najbližeg susjeda	Heuristika najbližeg susjeda	Heuristička metoda Clarke - Wright	Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda	Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda
1	263,72	<b>206,07</b>	<b>206,07</b>	<b>206,07</b>	<b>206,07</b>	<b>206,07</b>	<b>206,07</b>
2	263,75	<b>217,87</b>	230,87	<b>217,87</b>	219,82	<b>217,87</b>	<b>217,87</b>
3	224,59	203,41	207,41	211,81	<b>197,50</b>	203,41	203,41
4	239,13	239,13	220,07	218,56	<b>201,62</b>	214,56	214,56
5	219,04	219,04	207,04	207,04	<b>201,40</b>	219,04	219,04
6	250,13	200,72	<b>184,72</b>	185,31	190,29	200,72	200,72
7	248,29	245,94	214,65	214,65	<b>209,24</b>	245,94	245,94
8	204,19	201,84	<b>166,54</b>	171,25	191,78	201,84	201,84
9	270,93	243,87	226,79	<b>216,43</b>	220,47	220,19	220,19
10	243,13	218,43	<b>190,19</b>	202,82	196,63	218,43	218,43
11	245,79	<b>216,38</b>	220,38	220,38	<b>216,38</b>	<b>216,38</b>	<b>216,38</b>
12	278,96	197,78	208,84	208,84	<b>195,90</b>	197,78	197,78
13	199,41	186,47	<b>173,53</b>	174,71	181,12	184,99	184,99
14	213,47	<b>149,94</b>	<b>149,94</b>	<b>149,94</b>	168,76	<b>149,94</b>	<b>149,94</b>
15	270,22	211,40	214,93	214,93	<b>198,40</b>	211,93	211,40
16	194,72	184,13	162,96	<b>158,81</b>	<b>158,81</b>	179,99	179,99
17	225,26	213,50	213,50	197,81	<b>192,54</b>	197,81	197,81
18	228,91	193,62	163,50	172,60	<b>157,56</b>	204,37	187,68
19	288,82	212,35	211,18	201,37	<b>192,74</b>	213,13	212,88
20	258,74	211,68	226,74	217,85	<b>203,44</b>	216,32	211,03

Slično kao i u prethodnom slučaju, najbolje rezultate najčešće ostvaruje metoda Clarke-Wright. Slučajevi gdje različite metode dolaze do istog rješenja, koje je ujedno i minimalno, znatno su rjeđi kod ove veličine narudžbi. Uvidom u prosječno trajanje vožnje kod 10 000 narudžbi u tablici 19. vidljivo je da u prosjeku heuristika najbližeg susjeda ostvaruje neznatno bolje rezultate od metode Clarke-Wright što navodi na zaključak da heuristika Clarke-Wright u slučajevima kada ne postiže najbolje rješenje, tj. minimalno rješenje, može znatno odstupati od istoga. Trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim lokacijama iznosi u ovom slučaju 250 sekundi.

**Tablica 19. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 10 artikala**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (10 artikala)</i>	<i>Razlika u odnosu na X - kompozitnu heurističku metodu</i>
<b>Minimalno trajanje</b>	194,71	- 5,74 %
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	240,31	+ 16,33 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	206,57	0
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	202,84	- 1,81 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	199,37	- 3,49 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	199,97	- 3,2 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	203,8	- 1,34 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	203	- 1,73 %

## 6.2.3.3. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 20 artikala

U tablici 20. prikazani su rezultati simulacije za 20 narudžbi s 20 artikala.

**Tablica 20. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 20 artikala**

Metoda / Broj narudžbe	$\bar{X}$ - povratna heuristička metoda	$\bar{X}$ - kompozitna heuristička metoda	$\bar{X}$ - heuristika najbližeg susjeda	Heuristika najbližeg susjeda	Heuristička metoda Clarke - Wright	Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda	Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda
1	350,16	296,04	296,04	<b>283,13</b>	283,56	286,47	286,47
2	345,84	282,31	286,31	254,59	<b>248,24</b>	254,40	256,44
3	304,24	<b>237,18</b>	241,18	242,60	256,53	242,41	238,60
4	328,56	285,03	303,15	271,43	<b>264,18</b>	267,43	267,43
5	335,62	286,21	286,21	263,26	258,82	267,03	<b>253,81</b>
6	307,01	282,31	276,93	262,97	258,91	<b>255,41</b>	258,97
7	321,72	285,25	289,25	268,74	259,10	<b>251,49</b>	264,74
8	312,50	248,97	261,21	246,35	251,46	263,78	<b>239,75</b>
9	316,79	262,68	262,68	249,53	272,38	247,46	<b>239,78</b>
10	308,19	250,54	250,54	<b>242,69</b>	265,26	259,50	256,53
11	316,90	253,37	257,37	245,49	269,91	252,60	<b>241,49</b>
12	352,12	295,65	295,65	283,03	278,85	<b>267,12</b>	274,79
13	379,85	319,85	327,85	269,21	<b>249,81</b>	264,76	273,56
14	325,59	298,53	263,76	<b>232,26</b>	257,00	259,94	261,71
15	351,90	290,72	290,72	270,06	274,18	281,57	<b>263,00</b>
16	348,50	277,91	281,91	278,26	<b>261,91</b>	280,76	287,79
17	280,15	260,15	251,21	244,31	<b>231,12</b>	242,04	242,04
18	329,09	260,85	282,09	253,00	257,12	<b>244,12</b>	244,15
19	328,65	295,71	299,79	275,38	<b>270,06</b>	274,88	284,79
20	301,94	251,35	259,35	265,62	249,72	<b>242,63</b>	<b>242,63</b>



Kod ovako velikog broja artikala po narudžbi razlike između visina skladišnih lokacija sve su češće te metode u jako rijetkim slučajevima uspijevaju doći do istog rješenja koje je ujedno i minimalno trajanje vožnje. Metode koje najčešće uspijevaju pružiti minimalno trajanje su metoda najbližeg susjeda, metoda Clarke-Wright te dvije metode koje su hibridi kompozitne metode i metode najbližeg susjeda. Same razlike u rješenjima tih pet metoda mogu biti poprilično velike što se može zaključiti i iz prosječnih rezultata za 10 000 narudžbi gdje svaka od tih metoda odstupa od prosjeka minimalnog trajanja vožnje za otprilike 10 sekundi. Trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim lokacijama u slučaju narudžbi s 20 artikala iznosi 500 sekundi. Ukupno vrijeme računanja rješenja svih metoda za 10 000 narudžbi veličine 20 artikala iznosilo je približno 68 sekundi te se nameće zaključak da je vrijeme računanja rješenja svih metoda za jednu pojedinačnu narudžbu zanemarivo.

**Tablica 21. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 20 artikala**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (20 artikala)</i>	<i>Razlika u odnosu na X - kompozitnu heurističku metodu</i>
<b>Minimalno trajanje</b>	250,55	- 8,3 %
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	325,85	+ 19,26 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	273,23	0
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	275,37	+ 0,78 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	257,37	- 5,8 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	261,63	- 4,25 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	259,95	- 4,86 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	258,26	- 5,48 %

#### 6.2.3.4. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s nasumičnim brojem artikala

Budući da veličina narudžbi u stvarnosti može varirati u ovom poglavlju ispitati će se performanse ispitivanih heurističkih metoda za veličine narudžbi između 5 i 20 artikala. Veličine narudžbi uniformno su raspodijeljene između 5 i 20 artikala po narudžbi.

**Tablica 22. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi nasumične veličine između 5 i 20 artikala**

Metoda / Broj narudžbe	X - povratna heuristička metoda	X - kompozitna heuristička metoda	X - heuristika najbližeg susjeda	Heuristika najbližeg susjeda	Heuristička metoda Clarke - Wright	Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda	Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda
1	218,24	167,65	167,65	<b>161,74</b>	196,13	<b>161,74</b>	<b>161,74</b>
2	174,34	133,16	<b>132,46</b>	<b>132,46</b>	<b>132,46</b>	133,16	133,16
3	155,24	155,24	152,18	152,18	<b>148,18</b>	155,24	155,24
4	248,24	217,65	201,18	<b>193,41</b>	200,25	211,12	216,75
5	248,37	<b>188,37</b>	207,66	207,66	195,12	<b>188,37</b>	<b>188,37</b>
6	289,84	<b>240,43</b>	248,43	244,71	259,32	250,28	250,28
7	274,51	245,10	243,93	<b>232,41</b>	248,18	250,06	250,06
8	279,19	227,43	233,34	<b>224,18</b>	237,68	227,12	227,12
9	312,93	289,40	289,40	281,82	<b>242,97</b>	269,84	269,84
10	242,57	221,40	211,75	210,57	217,59	<b>206,63</b>	<b>206,63</b>
11	207,78	<b>192,49</b>	193,66	193,66	<b>192,49</b>	<b>192,49</b>	<b>192,49</b>
12	347,66	268,84	268,50	<b>240,06</b>	279,16	<b>240,06</b>	<b>240,06</b>
13	303,76	270,82	270,82	251,04	<b>243,84</b>	251,04	257,49
14	214,62	193,44	196,97	201,65	205,15	<b>193,41</b>	<b>193,41</b>
15	161,78	161,78	161,78	161,78	<b>154,72</b>	161,78	161,78
16	218,24	197,06	201,06	<b>183,63</b>	<b>183,63</b>	<b>183,63</b>	<b>183,63</b>
17	267,53	<b>205,18</b>	213,18	214,32	228,71	206,32	206,32
18	242,60	219,07	223,07	223,07	<b>211,99</b>	219,07	219,07
19	308,04	242,16	246,16	260,22	255,54	256,22	<b>235,63</b>
20	253,59	221,82	232,41	216,25	<b>207,09</b>	216,25	216,25

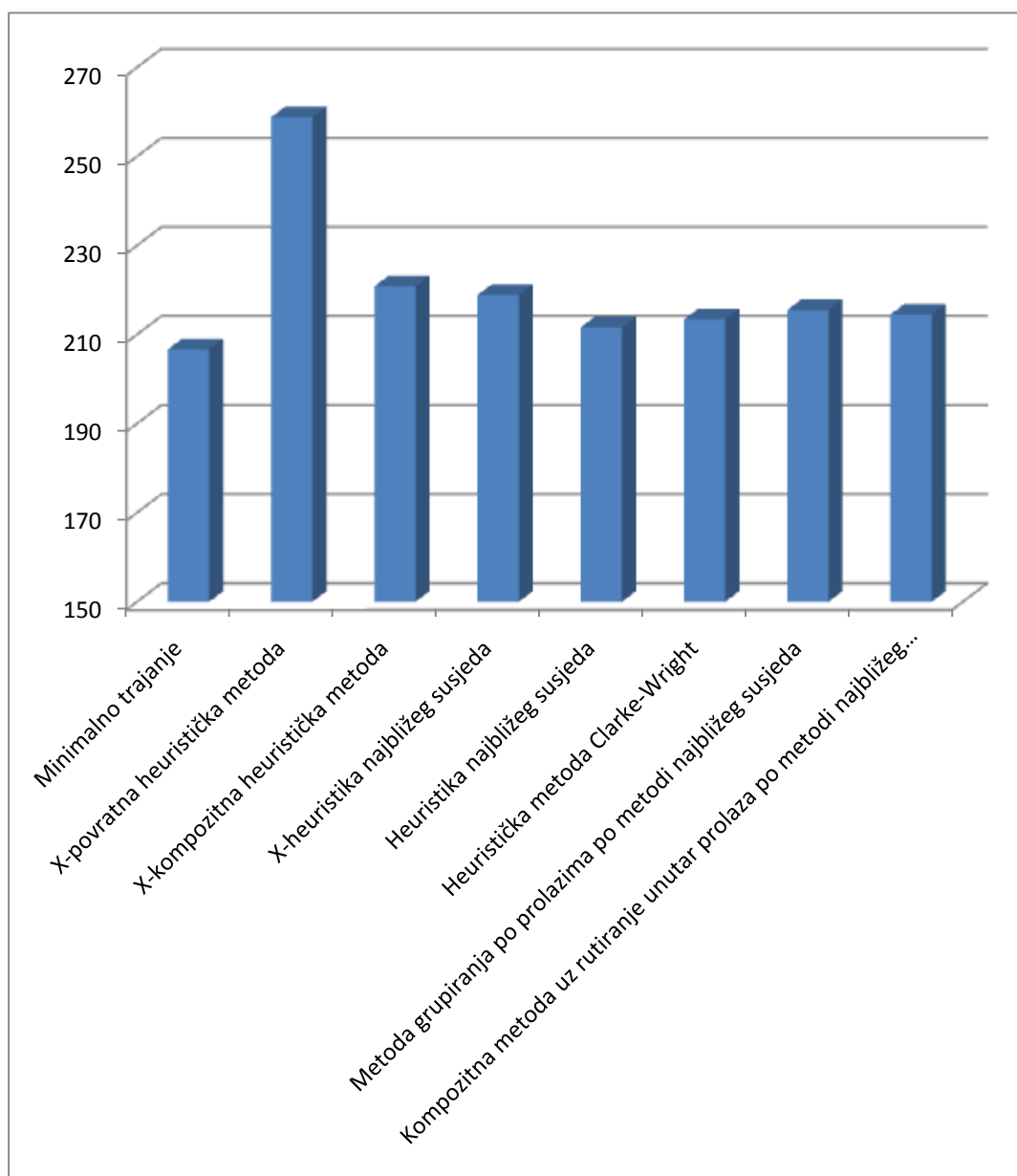
Iz rezultata simulacije u tablici 22. vidljivo je da minimalno rješenje, kao i u prethodnim slučajevima, u većini slučajeva pruža jedna od posljednjih 5 metoda. Uvidom u tablicu 23., gdje su prikazani prosječni rezultati za 10 000 narudžbi, vidljivo je da prosjek minimalnih

rješenja odstupa od 5 najboljih metoda za 5 do 9 sekundi. Trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim lokacijama različito je za svaku veličinu narudžbi i u ovom slučaju iznosi prosječno 312,45 sekundi. Vrijeme računanja rješenja svih metoda za 10 000 narudžbi kod nasumičnih veličina narudžbi je približno 37 sekundi što znači da je vrijeme računanja rješenja svih metoda za jednu narudžbu zanemarivo.

**Tablica 23. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 5 i 20 artikala**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (5-20 artikala)</i>	<i>Razlika u odnosu na X - kompozitnu heurističku metodu</i>
<b>Minimalno trajanje</b>	206,69	- 6,41 %
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	258,81	+ 17,19 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	220,84	0
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	218,91	- 0,87 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	211,64	- 4,17 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	213,42	- 3,36 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	215,51	- 2,41 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	214,51	- 2,87 %

Sveukupni rezultati simulacije pokazuju da niti jedna od ispitivanih metoda sama za sebe ne može pružiti kontinuirano znatno bolja rješenja od X-kompozitne heuristike. U odnosu na često korištenu X-kompozitnu heurističku metodu moguće je ispitivanim metodama postići znatno kraće trajanje vožnje pri komisioniranju, u prosjeku kraće za 6,41 % ukoliko se koristi najkraća ruta dobivena nekom od ispitivanih metoda. Loši rezultati najjednostavnije X-povratne heuristike koja u prosjeku pruža za 17,19 % dugotrajnije rute od X-kompozitne heuristike pokazuju da primjena te jednostavne metode može znatno smanjiti produktivnost komisionera. Rezultati iz tablice 23. grafički su prikazani na sljedećoj slici.



**Slika 53.** Grafički prikaz prosječnih rezultata simulacije vremena vožnje [s] za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 5 i 20 artikala

Budući da je svaka od ispitivanih metoda prilično jednostavna te da za generiranje rute nisu potrebni značajni informacijski resursi i rješenje se može dobiti u zanemarivom vremenu moguće je iskoristiti određen broj metoda za generiranje više ruta kojima bi se procijenilo trajanje i potom komisioniranje obavilo po ruti s najkraćim trajanjem. Metode koje pružaju bolja rješenja od X-kompozitne heurističke metode su X-heuristika najbližeg susjeda, heuristika najbližeg susjeda, metoda Clarke-Wright i dvije metode koje su hibridi kompozitne metode i metode najbližeg susjeda.

#### **6.2.4. Analiza rezultata simulacije za komisioniranje unutar jednog prolaza**

Simulacija trenutno korištene heurističke metode izvedena je na sličan način kao i simulacija X-kompozitne metode. Kod trenutno korištene heurističke metode prvo se posjećuju skladišne lokacije jednog regala unutar prolaza nakon čega se donosi odluka o nastavku komisioniranja lokacija iz sljedećeg regala unutar tog prolaza od njegovog početka ili kraja. Odluka ovisi o udaljenosti između posljednje dodane točke iz prvog regala i dviju skladišnih lokacija iz drugog regala i to najbliže i najudaljenije lokacije od početka tog regala.

##### **6.2.4.1. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s 5 artikala unutar istog prolaza**

Rezultati simulacije za 20 nasumičnih narudžbi veličine 5 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza prikazani su u tablici 24.

**Tablica 24. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi veličine 5 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza**

Metoda / Broj narudžbe	Trenutno korištena heuristička metoda	X - povratna heuristička metoda	X - kompozitna heuristička metoda	X - heuristika najbližeg susjeda	Heuristika najbližeg susjeda	Heuristička metoda Clarke - Wright	Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda	Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda
1	101,04	104,94	104,94	104,94	<b>78,91</b>	<b>78,91</b>	<b>78,91</b>	<b>78,91</b>
2	121,13	112,81	112,81	112,81	100,68	<b>98,91</b>	100,68	100,68
3	<b>84,21</b>	91,85	91,85	91,85	86,84	86,84	86,84	86,84
4	90,93	77,99	77,99	77,99	77,99	<b>72,69</b>	77,99	77,99
5	109,28	119,93	119,93	119,93	<b>90,37</b>	<b>90,37</b>	<b>90,37</b>	<b>90,37</b>
6	<b>82,38</b>	88,32	88,32	88,32	85,38	85,35	85,38	85,38
7	87,71	87,46	87,46	87,46	87,46	<b>82,10</b>	87,46	87,46
8	100,99	95,69	95,69	95,69	<b>81,21</b>	<b>81,21</b>	<b>81,21</b>	<b>81,21</b>
9	95,72	98,38	98,38	98,38	94,51	<b>89,84</b>	94,51	94,51
10	85,72	83,93	83,93	83,93	78,35	<b>66,84</b>	78,35	78,35
11	93,00	98,04	98,04	98,04	94,18	<b>91,82</b>	94,18	94,18
12	93,37	103,40	103,40	103,40	97,76	<b>87,74</b>	97,76	97,76
13	101,01	111,97	111,97	111,97	101,24	<b>93,31</b>	101,24	101,24
14	85,04	92,75	92,75	92,75	89,44	<b>83,87</b>	89,44	89,44
15	100,43	100,43	100,43	100,43	<b>94,49</b>	<b>94,49</b>	<b>94,49</b>	<b>94,49</b>
16	99,56	99,56	99,56	99,56	<b>84,49</b>	89,75	<b>84,49</b>	<b>84,49</b>
17	104,85	105,50	105,50	105,50	94,29	<b>89,53</b>	94,29	94,29
18	93,00	87,12	87,12	87,12	<b>82,97</b>	<b>82,97</b>	<b>82,97</b>	<b>82,97</b>
19	105,78	109,93	109,93	109,93	100,43	<b>88,01</b>	100,43	100,43
20	106,96	106,96	106,96	106,96	<b>81,85</b>	<b>81,85</b>	<b>81,85</b>	<b>81,85</b>

Iz rezultata tablice 24. vidljivo je da u većini slučajeva najkraću rutu pruža metoda Clarke-Wright. Uz rijetke iznimke, metode koje uzimaju u obzir visinu skladišnih lokacija pružaju kraće rute od ostalih metoda. Trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim

lokacijama isto kao i u slučaju narudžbi veličine 5 artikala u poglavlju 6.2.3.1. i iznosi 125 sekundi. U tablici 25. nalaze se prosječni rezultati simulacije za 10 000 nasumičnih narudžbi.

**Tablica 25. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi veličine 5 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (5 artikala)</i>	<i>Razlika u odnosu na trenutno korištenu heurističku metodu</i>
<b>Trenutno korištena heuristika</b>	93,89	0
<b>Minimalno trajanje</b>	83,62	- 10,94 %
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	94,77	+ 0,94 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	94,77	+ 0,94 %
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	94,77	+ 0,94 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	87,10	- 7,23 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	83,90	- 10,64 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	87,10	- 7,23 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	87,10	- 7,23 %

Najbolje rezultate u prosjeku ostvaruje metoda Clarke-Wright te metode koje uzimaju u obzir visinu skladišnih lokacija. Mala razlika prosjeka minimalnih trajanja i prosjeka metode Clarke-Wright ukazuju na to da u velikoj većini slučajeva ta metoda postiže minimalno rješenje. Zanimljivo je da među metodama koje ne uzimaju u obzir visinu skladišnih lokacija najbolje rezultate pruža upravo trenutno korištena heuristička metoda. Razlog tomu je komisioniranje po zasebnim regalima čime se postiže ravnomjerno posjećivanje skladišnih lokacija pri prvotnom putu u prolazu i pri povratnom putu što utječe na skraćanje trajanja komisioniranja kod komisioniranja unutar jednog prolaza.

#### 6.2.4.2. Analiza rezultata simulacije za narudžbe s nasumičnim brojem artikala unutar istog prolaza

Značajno skraćanje trajanja vožnje pri komisioniranju postignuto je za male narudžbe veličine 5 artikala, a potencijal ušteda raste s povećanjem broja artikala u narudžbi. U sljedećim tablicama prikazani su rezultati za narudžbe nasumične veličine između 3 i 15 artikala.

**Tablica 26. Rezultati simulacije vremena vožnje [s] za 20 pojedinačnih narudžbi nasumične veličine između 3 i 15 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza**

Metoda / Broj narudžbe	Trenutno korištena heuristička metoda	X - povratna heuristička metoda	X - kompozitna heuristička metoda	X - heuristika najbližeg susjeda	Heuristika najbližeg susjeda	Heuristička metoda Clarke - Wright	Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda	Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda
1	142,12	143,91	143,91	143,91	<b>89,78</b>	<b>89,78</b>	<b>89,78</b>	<b>89,78</b>
2	122,65	141,50	141,50	141,50	115,13	<b>97,46</b>	115,13	115,13
3	130,85	174,28	174,28	174,28	123,37	<b>119,84</b>	123,37	123,37
4	71,49	71,49	71,49	71,49	71,49	<b>70,59</b>	71,49	71,49
5	168,68	163,35	163,35	163,35	131,26	<b>96,87</b>	131,26	131,26
6	110,18	143,91	143,91	143,91	114,57	<b>95,69</b>	114,57	114,57
7	151,87	147,41	147,41	147,41	108,44	<b>102,16</b>	108,44	108,44
8	150,66	187,62	187,62	187,62	<b>103,93</b>	106,34	<b>103,93</b>	<b>103,93</b>
9	112,28	112,28	112,28	112,28	96,00	<b>88,32</b>	96,00	96,00
10	115,84	124,10	124,10	124,10	108,63	<b>93,96</b>	108,63	108,63
11	127,32	131,75	131,75	131,75	112,53	<b>104,82</b>	112,53	112,53
12	92,72	84,24	84,24	84,24	<b>73,87</b>	<b>73,87</b>	<b>73,87</b>	<b>73,87</b>
13	99,84	99,84	99,84	99,84	<b>86,59</b>	87,99	<b>86,59</b>	<b>86,59</b>
14	132,65	127,07	127,07	127,07	112,56	<b>99,84</b>	112,56	112,56
15	128,31	142,09	142,09	142,09	114,51	<b>97,46</b>	114,51	114,51
16	137,94	150,38	150,38	150,38	108,07	<b>98,04</b>	108,07	108,07
17	131,19	121,44	121,44	121,44	106,31	<b>98,63</b>	106,31	106,31
18	88,26	90,12	90,12	90,12	<b>83,03</b>	<b>83,03</b>	<b>83,03</b>	<b>83,03</b>
19	148,84	131,19	131,19	131,19	<b>92,72</b>	93,34	<b>92,72</b>	<b>92,72</b>
20	<b>54,43</b>	58,88	58,88	58,88	55,04	55,04	55,04	55,04

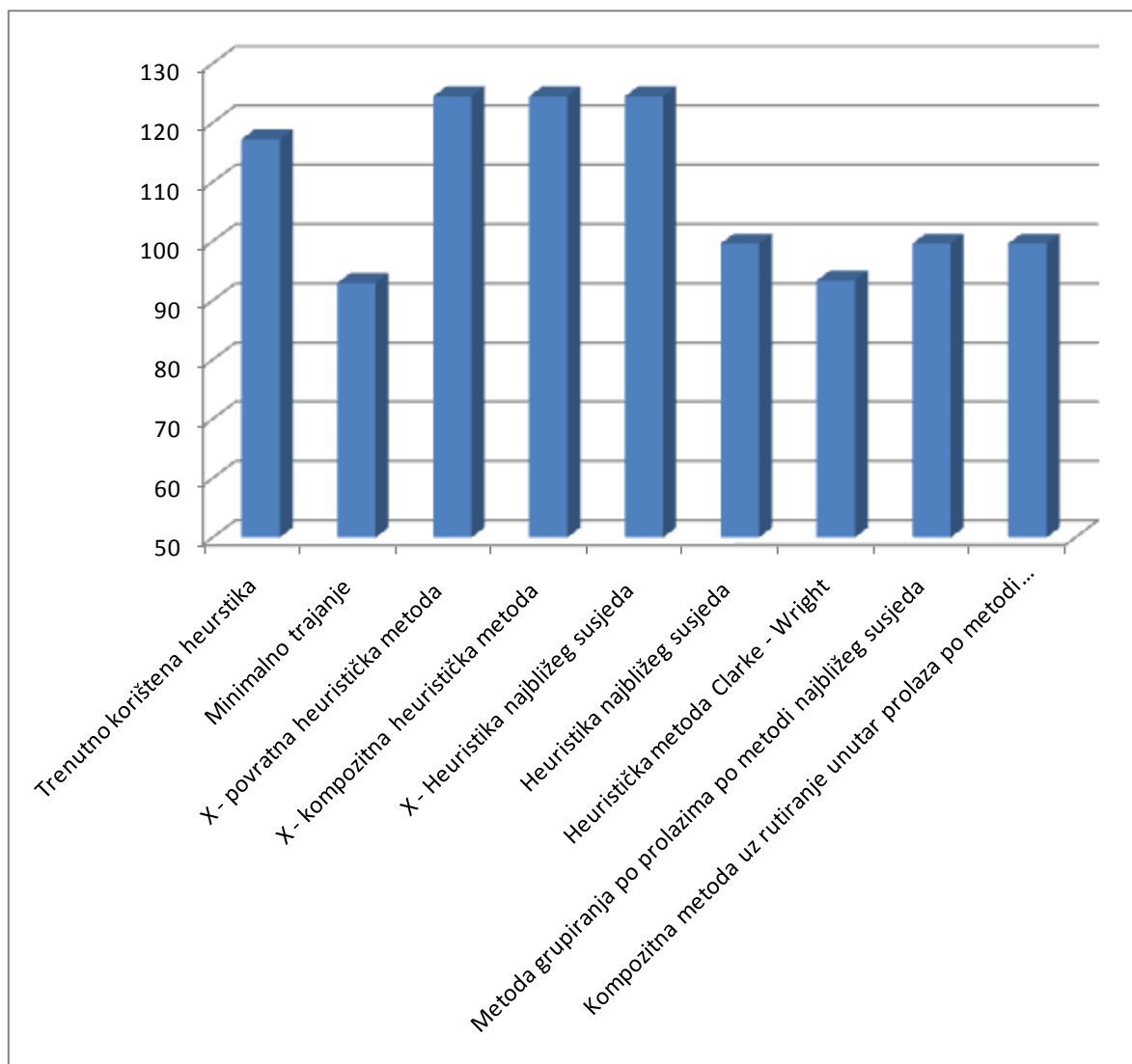


Kod većih narudžbi razlike između pojedinih metoda postaju sve izraženije i potencijal za skraćivanje trajanja vožnje postaje sve veći. Prosječno trajanje pripremnih radnji i izuzimanja na skladišnim lokacijama u ovom slučaju iznosi 225,33 sekundi. U tablici 27. prikazani su prosječni rezultati simulacije iz kojih je vidljiv potencijal za skraćivanjem trajanja vožnje.

**Tablica 27. Prosječni rezultati simulacije za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 3 i 15 artikala koji se nalaze unutar istog prolaza**

<i>Metoda</i>	<i>Prosječno trajanje vožnje [s] (3-15 artikala)</i>	<i>Razlika u odnosu na trenutno korištenu heurističku metodu</i>
<b>Trenutno korištena heuristika</b>	117,21	0
<b>Minimalno trajanje</b>	92,96	- 20,69 %
<b>X - povratna heuristička metoda</b>	124,46	+ 6,19 %
<b>X - kompozitna heuristička metoda</b>	124,46	+ 6,19 %
<b>X - Heuristika najbližeg susjeda</b>	124,46	+ 6,19 %
<b>Heuristika najbližeg susjeda</b>	99,62	- 15,01 %
<b>Heuristička metoda Clarke - Wright</b>	93,36	- 20,13 %
<b>Metoda grupiranja po prolazima po metodi najbližeg susjeda</b>	99,62	- 15,01 %
<b>Kompozitna metoda uz rutiranje unutar prolaza po metodi najbližeg susjeda</b>	99,62	- 15,01 %

Rezultati iz tablice 27. grafički su prikazani na slici 54.



**Slika 54.** Grafički prikaz prosječnih rezultata simulacije vremena vožnje [s] za 10 000 narudžbi nasumične veličine između 3 i 15 artikala koji se nalaze u istom prolazu

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu simulacijom su ispitane performanse sedam različitih heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika na praktičnom problemu rutiranja viličara pri komisioniranju u skladišnoj zoni s više prolaza. Rezultati simulacije pokazuju da je moguće heurističkim metodama rješavanja problema trgovačkog putnika postići bolja rješenja od rješenja u praksi često korištene X-kompozitne heurističke metode. Iako niti jedna metoda sama po sebi ne ostvaruje značajno bolja rješenja od X-kompozitne heurističke metode korištenjem većeg broja jednostavnih metoda moguće je postići značajno prosječno skraćenje trajanja vožnje kod komisioniranja narudžbi s 5 do 20 artikala po narudžbi od približno 6,4 %. Ukupno prosječno skraćenje ciklusa komisioniranja, uz pretpostavljeno trajanje pripremnih radnji i izuzimanja po jednoj skladišnoj lokaciji od 25 sekundi, iznosilo bi 2,65 %. Budući da je vrijeme računanja jedne rute za ispitivane metode zanemarivog trajanja u praksi bi bilo moguće korištenje "paketa" heurističkih metoda gdje bi računalo odredilo veći broj ruta tim metodama, procijenilo njihovo trajanje te bi se predložila ruta komisioniranja s najkraćim trajanjem. Na taj način ne bi se ostvarila samo prosječno bolja rješenja nego i bolja, ili barem ista, rješenja za svaku pojedinačnu narudžbu.

Kod skladišnog sustava tvrtke Elektrokontakt d.d. gdje se komisioniranje u većini slučajeva odvija unutar jednog prolaza moguće je također primjenom heurističkih metoda postići skraćenje ciklusa komisioniranja. U slučaju komisioniranja unutar jednog prolaza najbolje rezultate postiže metoda Clarke-Wright čijom bi se primjenom u prosjeku ostvarilo skraćenje trajanja vožnje kod komisioniranja narudžbi veličine 5 artikala za približno 10,5 %, a ako bi se pretpostavilo trajanje pripremnih radnji i izuzimanja po svakoj skladišnoj lokaciji od 25 sekundi, ukupno trajanje ciklusa komisioniranja kod ove veličine narudžbi skratilo bi se u prosjeku za približno 4,5 %. Budući da složenost problema trgovačkog putnika s porastom broja točaka eksponencijalno raste kod većih narudžbi potencijal skraćjenja trajanja vožnje također eksponencijalno raste. U slučaju nasumične veličine narudžbi između 3 i 15 artikala vrijeme vožnje bi se primjenom metode Clarke-Wright u odnosu na trenutno korištenu heuristiku skratilo u prosjeku za čak 20 %, a ukupno trajanje ciklusa komisioniranja u tom bi se slučaju skratilo za 6,79 %.

Ovim istraživanjem potvrđen je potencijal primjenjivosti algoritama rješavanja problema trgovačkog putnika pri minimizaciji trajanja procesa komisioniranja u računalom upravljanoj visokoregalnoj skladištu. Istraživanje komisioniranja u zoni s više prolaza provedeno je s malim brojem relativno jednostavnih metoda koje se suvremenim računalima mogu riješiti u zanemarivom vremenu te je njihovim objedinjavanjem postignuta ušteda u trajanju vožnje od prosječno 6,5 % u odnosu na često korištenu X-kompozitnu metodu rutiranja što nije nezatno, a ukupno trajanje ciklusa komisioniranja moguće je skratiti za 2,65 %. Stoga se nameće zaključak da trajanje vertikalnih kretanja komisionera u visokoregalnim skladišnim sustavima nije zanemarivo te da se primjenom heurističkih metoda rješavanja problema trgovačkog putnika može ostvariti skraćanje trajanja vožnje kod komisioniranja, a tako i skraćanje trajanja cijelog ciklusa komisioniranja.

## LITERATURA

- [1] Đukić G. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje: Doktorska disertacija: „*Istraživanje komisioniranja u regalnim skladištima*“, 2004.
- [2] Đukić G. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje: Predavanja iz kolegija: „*Tehnička logistika*“, 2013.
- [3] Đukić G. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje: Predavanja iz kolegija: „*Posebna poglavlja tehničke logistike*“, 2013.
- [4] Roodbergen K. J., Iris F. A.: „*A survey of literature on automated storage and retrieval systems*“, 2008.
- [5] Đukić G., Štefanić N. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje: Predavanja iz kolegija: „*Operacijska istraživanja I*“, 2013.
- [6] Đukić G., Opetuk T., Cajner H., Lerher T., Jelić A.: „*Routing of VNA man-up turret trucks and vertical order pickers*“, 2014.
- [7] Jelić A. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje: Diplomski rad: „*Analiza primjene algoritama trgovačkog putnika kod komisioniranja unutar visokoregalnog skladišta s vrlo uskim prolazima*“, 2015.
- [8] Khojasteh Y., Son, Jae-Dong: „*A travel time model for order picking systems in automated warehouses*“, 2016.
- [9] <http://www.elektrokontakt.hr/>, 12.3.2016.
- [10] Materijali iz poduzeća Elektrokontakt d.d. i konzultacije sa zaposlenicima
- [11] <http://www.yale.com/>, 11.4.2016.