Istraživanje komisioniranja u regalnim skladištima

Đukić, Goran

Doctoral thesis / Disertacija

2004

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:235:673696

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ISTRAŽIVANJE KOMISIONIRANJA U REGALNIM SKLADIŠTIMA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: Prof.dr.sc. **Čedomir Oluić** **GORAN ĐUKIĆ**

ZAGREB, 2004.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 658.286

Ključne riječi: Logistika, skladišni sustavi, sustavi za komisioniranje, metode komisioniranja, metode routinga, metode dodjeljivanja mjesta odlaganja, metode spajanja narudžbi, optimalni prostorni raspored skladišta

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Prof.dr.sc. Čedomir Oluić

Broj stranica: 111

Broj slika: 74

Broj tablica: 38

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 89

Datum obrane: 29.04.2004.

Povjerenstvo: Dr.sc. Božo Vranješ, red. prof., predsjednik Povjerenstva
Dr.sc. Čedomir Oluić, red. prof., voditelj magistarskog rada
Dr.sc. Dragutin Ščap, red. prof., član Povjerenstva
Dr.sc. Vilim Ferišak, red. prof., Ekonomski fakultet, Zagreb, član Povjerenstva
Dr.sc. Dubravko Majetić, docent, član Povjerenstva

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Čedomiru Oluiću na velikoj pomoći, uloženom trudu, savjetima i razumijevanju koje mi je pružio tijekom izrade rada.

Također se zahvaljujem prof. dr. sc. Boži Vranješu, prof.dr. Dragutinu Ščapu, prof. dr. sc. Vilimu Ferišaku i doc. dr. sc. Dubravku Majetiću na korisnim savjetima i sugestijama pri konačnom oblikovanju rada.

Hvala i mojoj supruzi, roditeljima i rodbini, te svim prijateljima i kolegama sa Zavoda za industrijasko inženjerstvo Fakulteta strojarstva i brodogradnje, koji su mi bili podrška cijelo vrijeme izrade rada.

Mojem Svenu

SADRŽAJ

Str.

PREDGOVOR i

SAŽETAK ii

SUMMARY iii

KLJUČNE RIJEČI iv

KEY WORDS iv

1. UVOD 1

1.1. Definicija problema, sadašnje stanje i cilj istraživanja 2

1.2. Metodologija i plan rada 4

2. OBLIKOVANJE SUSTAVA ZA KOMISIONIRANJE 6

2.1. Skladišni sustavi 6

2.2. Oblikovanje skladišnih sustava 7

2.3. Sustavi za komisioniranje 9

2.3.1. Komisioniranje prema principu "čovjek robi" 10

2.3.2. Komisioniranje prema principu "roba čovjeku" 11

2.4. Skladišne metode 12

2.4.1. Metode routinga 12

2.4.2. Metode dodjeljivanja mjesta odlaganja 14

2.4.3. Metode organizacije komisioniranja 15

2.4.4. Sortiranje i ostale skladišne metode 16

3. METODE ROUTINGA 19

3.1. Definicije metoda routinga i algoritmi proračuna puta komisioniranja 20

3.2. Analiza performansi metoda routinga 28

3.2.1. Performanse osnovnih heurističkih metoda routinga 29

3.2.2. Performanse naprednih heurističkih metoda routinga 34

3.2.3. Usporedba performansi heurističkih metoda i optimalnog algoritma 37

3.2.4. Utjecaj položaja ulaza/izlaza te širine prolaza na put komisioniranja 38

3.3. Analitički pristup određenju prosječnog vremena vožnje komisionera sa slučajnim rasporedom odlaganja 39

3.3.1. Analitički modeli puta komisioniranja sa slučajnim rasporedom odlaganja 39

3.3.2. Analiza modela puta komisioniranja sa slučajnim rasporedom odlaganja i usporedba rezultata sa simulacijama 42

4. METODE DODJELJIVANJA MJESTA ODLAGANJA 44
4.1. Definicije metoda odlaganja 44
4.2. Analiza performansi metoda dodijeljenog rasporeda odlaganja u kombinaciji s metodama routinga 46
4.2.1. Određivanje najpovoljnijeg tipa odlaganja za odabranu metodu routinga 48
4.2.2. Usporedba metoda routinga s dodijeljenim rasporedom odlaganja 68
4.2.3. Odlaganje po zonama 70
4.3. Analitički pristup određenju prosječnog vremena vožnje komisionera s dodijeljenim rasporedom odlaganjem 72
4.3.1. Analitički modeli puta komisioniranja s dodijeljenim rasporedom odlaganja 72
4.3.2. Analiza modela puta komisioniranja s dodijeljenim rasporedom odlaganja i usporedba rezultata sa simulacijama 74
5. METODE SPAJANJA NARUDŽBI 77
5.1. Definicije i algoritmi metoda spajanja narudžbi 77
5.2. Analiza metoda spajanja narudžbi 82
5.2.1. Algoritmi temeljne narudžbe 86
5.2.2. Algoritmi uštede 90
5.2.3. Smanjenje puta komisioniranja primjenom metoda spajanja narudžbi 93
5.2.4. Utjecaj metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja na performanse algoritama spajanja narudžbi 95
6. OPTIMALNI PROSTORNI RASPORED ZONE KOMISIONIRANJA 96
6.1. Određenje optimalnog broja prolaza zone komisioniranja 96
6.2. Utjecaj optimalnog broja prolaza na odluke projektanta 102
7. SINTEZA I GENERALIZACIJA 104
8. ZAKLJUČAK 109

LITERATURA v
KRATKI ŽIVOTOPIS x
SHORT BIOGRAPHY xi

PREDGOVOR

Logistika, kao jedno relativno novije područje, s elementima brojnih disciplina: ekonomije, tehnike, informatike, ekologije... , prepuno je brojnih "otoka" otvorenih istraživanju i razvijanju naprednijih modela, metoda i principa. Kako je svaki logistički sustav vrlo složen, sastavljen od brojnih podsustava s međusobnom interakcijom, ne iznenađuje, i u teoriji i u praksi, naglasak na potrebu holističkog pristupa rješavanju logističkih problema.

Jedan od najznačajnijih tehničkih sustava logistike je skladišni sustav. Sam po sebi, i taj je sustav vrlo složen, s nekoliko podsustava, od kojih je najznačajniji sustav za komisioniranje. Proučavajući problem oblikovanja sustava za komisioniranje, uviđa se kontinuirani rast utjecaja vremena komisioniranja, a time i troškova u ukupnim troškovima skladištenja.
Brojni strani literaturni izvori u posljednje vrijeme, prezentirajući razvijene metode i modele komisioniranja, potvrda su aktualnosti ove problematike. Međutim, većina tih radova posvećena je automatiziranim visokoregalnim skladištima. S obzirom na brojnost instaliranih klasičnih regalnih skladišta, te njihovih visokih fiksnih i varijabilnih troškova, klasična regalna skladišta zavrijeđuju i na teorijskom planu odgovarajuću pažnju. Dodatno, u istraživanju pojedinih metoda i modela često je zanemarena njihova međusobna interakcija, koja u pravilu predstavlja „sivu“ zonu i budi znatiželju za spoznajom.
S druge strane, određeni poticaj je i to što do danas ne postoje značajniji radovi na hrvatskom jeziku o toj problematici, pa je nedovoljno poznavanje i primjena optimizacijskih modela i metoda u praksi. To stanje predstavlja i ograničenje bržem razvoju logistike i logističkih lanaca, ali i drugih procesa globalizacije kod nas.

Sve to navelo me na istraživanje komisioniranja u regalnim skladištima, s ciljem određenja onih metoda, ali i poglavito njihovih kombinacija, koje će minimizirati najznačajniju komponentu vremenskog ciklusa komisioniranja – vrijeme kretanja komisionara.

S obzirom na brojnost različitih metoda komisioniranja, zbog sistematskog pristupa ali i njihovih značajki iste su podijeljene su tri grupe, te istražene zasebno i u kombinacijama. Na takav način, imajući u vidu definirane u radu relativne efekte primjene pojedinih metoda, projektanti skladišta mogu odabrati jednu ili više metoda koje će u određenoj mjeri, zbog uvažavanja i drugih zahtjeva i ograničenja u projektu, optimalizirati proces komisioniranja.

Potvrdom, na temelju rezultata ovog istraživanja, velikog potencijala povećanja efikasnosti skladišnog, a time i cjelokupnog logističkog procesa, uvjeren sam da će primjena analiziranih metoda i definiranih njihovih najboljih kombinacija naći primjenu i u hrvatskim skladištima.

SAŽETAK

Komisioniranje, prikupljanja materijala iz skladišnih lokacija prema zahtjevu korisnika, po troškovima i vremenu najznačajniji je proces u skladištima. To je poglavito slučaj u klasičnim regalnim skladištima, u kojima gotovo 90% ukupnog vremena te oko 55% troškova skladištenja otpada na komisioniranje.

S obzirom na činjenicu da gotovo 50% vremena komisioniranja čini vrijeme kretanja komisionera, osim preoblikovanja sustava za komisioniranje kao logično rješenje nameće se promjena organizacije komisioniranja i primjena različitih metoda komisioniranja s ciljem skraćenja puteva komisioniranja.

U radu su s tom svrhom analizirane brojne postojeće metode komisioniranja, podijeljene u tri grupe: metode routinga, metode dodjeljivanja mjesta odlaganja i metode spajanja narudžbi. S ciljem potpune minimizacije puta komisioniranja, istražene su i definirane najbolje kombinacije pojedinih metoda komisioniranja. Osim definiranih potencijala smanjenja puta komisioniranja za brojna različita skladišta, određeni su i relativni efekti primjene pojedinih metoda odnosno njihovih kombinacija.

S obzirom na važnost prostornog rasporeda po predmet istraživanja, u radu su za primjenu tijekom projektiranja skladišta predloženi model i smjernice oblikovanja optimalnog prostornog rasporeda prema kriteriju minimalnog puta komisioniranja.

SUMMARY

Order-picking, process of retrieving items from storage locations in response to a specific customer request, is the most important process in the warehouses regarding costs and times. This is especially a case in the conventional warehouses, with almost 90% of total time spent on order-picking activities and 55% of all operating cost attributed to order-picking.

As the 50% of total order picking time is spent on traveling, beside order-picking system redesign there is also a solution with organizational changes and application of various order-picking methods to reduce travel distances.

In this thesis many existing order-picking methods are analyzed, grouped as routing methods, storage methods and orderbatching methods. With the goal of total minimization of order-picking travel distances, the best combinations of those methods are investigated and defined. Along with the potentials of reducing order-picking travel distances, the relative effects using some particular or a combination of methods are determined.

According to the influence of the warehouse layout on the described problem, in this thesis there is also a suggested model and design guidelines of optimal layout to minimize order-picking travel distances presented.

KLJUČNE RIJEČI

Logistika, skladišni sustavi, sustavi za komisioniranje, metode komisioniranja, metode routinga, metode dodjeljivanja mjesta odlaganja, metode spajanja narudžbi, optimalni prostorni raspored skladišta

KEY WORDS

Logistics, warehouse systems, order-picking systems, order-picking methods, routing methods, storage methods, orderbatching methods, optimal warehouse layout

1. UVOD

Komisioniranje, kao segment logističkog procesa i jedan od osnovnih skladišnih procesa, postoji koliko postoje i skladišta. Kroz povijest svrha mu je ostala ista: prikupljanje materijala iz skladišnih lokacija prema zahtjevima korisnika [1]. Danas o komisioniranju postoje u literaturi brojni radovi, kojima se nedvojbeno pokazuje njegov veliki potencijal za smanjenje logističkih troškova i povećanje produktivnosti [2].

Zbivanja na područjima proizvodnje i prometa imaju, pored drugih, i sljedeću zajedničku karakteristiku: raste značaj logistike. Takav trend je posljedica novih koncepcija u gospodarenju resursima i upravljanju njihovim tokovima.

Pojednostavljeno, zadatak logistike je "osigurati potreban materijal (proizvod), adekvatne kvalitete, na pravom mjestu, u pravo vrijeme, uz minimalne troškove" [3, str. 11]. Tradicionalno, dvije osnovne logističke aktivnosti su transport i držanje zaliha. Transportiranjem materijala s jedne lokacije na drugu, te uskladištenjem zaliha do trenutka kada nam trebaju, osigurava se materijal na pravom mjestu u pravo vrijeme. Kako je svako skladište samo dio većeg logističkog lanca, i komisioniranje je logistički podproces u funkciji osiguranja potrebnog materijala na pravom mjestu u pravo vrijeme. No što se to promjenilo u posljednjih nekoliko godina da je komisioniranju data tolika važnost?

Dinamičan i intenzivan razvoj znanosti, kao i bitne promjene na tržištu rezultiraju brojnim novim trendovima, koncepcijama i rješenjima i na području logističkih sustava i procesa. Jedan od - i za logistiku - najvažnijih trendova je orijentiranost korisniku. Ovaj trend očituje se i u novim razmišljanjima o smislu i svrsi postojanja poduzeća: primarni je smisao postojanja svakog poduzeća zadovoljenje kupca, stvarajući za njega vrijednost za koju on drži da je veća od iznosa koji za nju plaća, te veća od vrijednosti koju tome kupcu za isti iznos mogu ponuditi konkurenti [4, str. 5]. Takav stav može se očitati i u definiciji marketinškog koncepta, koji drži da "postizanje ciljeva poduzeća ovisi o određenju potreba i želja ciljanog tržišta te njihovo zadovoljenje efektivnije i efikasnije od konkurencije" [5, str. 22]. Utjecaj spomenutog trenda vidljiv je i iz najnovije definicije logistike američke udruge CLM *(Council of Logistics Management)*, koja definira logistiku kao "dio procesa logističkog lanca koji planira, implementira i kontrolira efikasan i efektivan tijek i skladištenje roba, usluga, i s njima povezanih informacija, između točke izvora i točke potrošnje, u smislu ispunjenja zahtjeva korisnika" [6]. U navedenim definicijama uočava se određena sličnost, što ne iznenađuje. Marketinški koncept zahtijeva od poduzeća integraciju četiri elementa: pravi proizvod, adekvatna cijena, odgovarajuća promocija i dostupnost na pravom mjestu[1]. Zadatak logistike je u podršci osiguranja dostupnosti materijala (proizvoda) na pravom mjestu [3]. Pri tome spomenuto treba ostvariti efektivno i efikasno[2]. Efikasan sustav je uspješan (djelotvoran), koji radi na najbolji mogući način – s minimalnim troškovima, dok je efektivan sustav adekvatan u ispunjenju svrhe, odnosno onaj koji ostvaruje namjeravani ili očekivani rezultat – ostvarenje zadovoljstva korisnika. Ti ciljevi, što je u skladu s definicijom logistike, ostvaruju se i odgovarajućim rješenjima skladišta, pri čemu se po važnosti ističu rješenja oblikovanja komisioniranja, što je i glavni predmet ovoga rada.

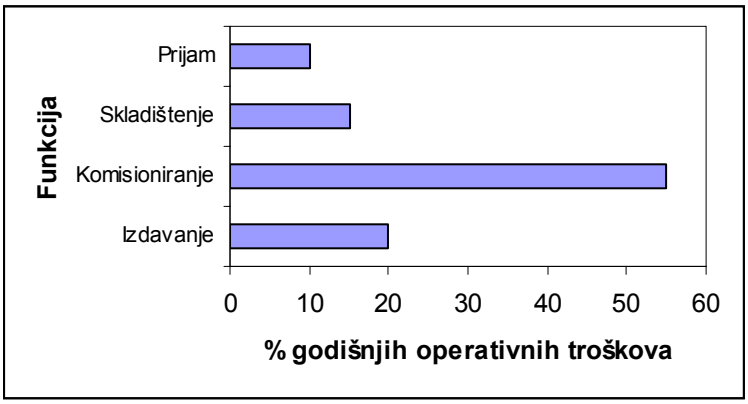
Što se skladišta tiče, brojna tehnološka dostignuća, kao što su automatizirani skladišni i transportni sustavi, elektronička razmjena podataka (EDI - eng. *Electronic Data Interchange*),

[1] Tzv. "4 P" – *eng.* ***p****roduct,* ***p****rice,* ***p****romotion,* ***p****lace* – proizvod, cijena, promocija, distribucija.

[2] Efikasan (lat. *efficiens*) – uspješan djelotvoran, prema *Klaić, Riječnik stranih riječi, Nakladni zavod MH, Zagreb, 1978.,* eng. *efficient* – radeći i funkcionirajući na najbolji mogući način i s najmanje gubitaka, prema *Webster's Encyclopedic Unabridged Dictionary of the English Language, Gramercy Books, NY, 1989.*
Efektivan (lat. *effectivus)* – stvaran, realan, istinit, pravi, prema *Klaić, Riječnik stranih riječi, Nakladni zavod MH, Zagreb, 1978.,* eng. *effective* – adekvatan u ispunjenju svrhe, onaj koji proizvodi namjeravani ili očekivani rezultat, prema *Webster's Encyclopedic Unabridged Dictionary of the English Language, Gramercy Books, NY, 1989..*

kompjuterski sustavi upravljanja skladištem (WMS - eng. *Warehouse Management System*), Internet,... omogućuju bržu i pouzdaniju dostavu narudžbi u skladište i materijala korisnicima. Kako je elektronički proces naručivanja brz, očekuje se i brža dostava proizvoda [7]. Pri tome ostaju aktualni zahtjevi na točnost narudžbe, kvalitetu materijala i odgovarajuću cijenu, što je direktna veza komisioniranja i zadovoljstva korisnika.

Promjene na tržištu izravno se odražavaju na proizvodnju, a očituju se npr.: povećanjem asortimana proizvoda, skraćenjem vijeka trajanja proizvoda, ..., što zajedno s novim proizvodnim koncepcijama (*Lean production*, *Just in time production*), ima znatnog utjecaja i na skladišta. Povećava se broj proizvoda na skladištu, a zahtjevaju se češće dostave manjih količina. To općenito znači da je broj izlaznih transakcija iz skladišta daleko veći od ulaznih, pa je, uz povećan kapacitet i protok u skladištu, sve veći udio vremena komisioniranja (i do 90% u klasičnim skladištima) u ukupnom vremenu svih aktivnosti u skladištu. I većina troškova u skladištu stvara se upravo pri komisioniranju, kao što prikazuje slika 1-1.



Slika 1-1. Raspodjela troškova skladišnih operacija [2]

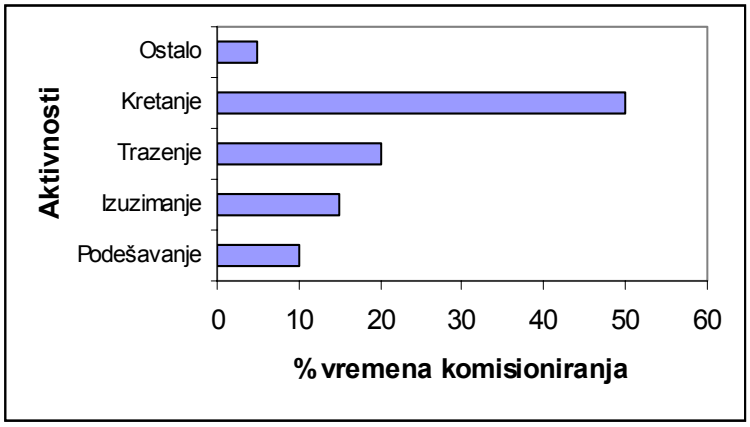
Evidentno je da povećanje efikasnosti skladištenja najveći potencijal ima upravo u smanjenju troškova komisioniranja. Ti troškovi nikako nisu zanemarivi s obzirom na činjenicu da ukupni logistički troškovi razvijenih zemalja iznose oko 20% bruto nacionalnog dohotka, a od toga samo na skladištenje otpada do 28% [1].

1.1. Definicija problema, sadašnje stanje i cilj istraživanja

Poznato je da se efikasno i efektivno komisioniranje nastoji postići samim oblikovanjem skladišta, odnosno pripadajućeg podsustava za komisioniranja, kao i odabirom načina izvođenja pojedinih operacija - metoda skladištenja, poglavito metoda komisioniranja.

U osnovi se rješenja komisioniranja, kao rezultat oblikovanja, mogu podijeliti u dvije grupe. Prva grupa bazira se na kretanju radnika koji obavlja poslove komisioniranja - komisionera (s ili bez transportnog sredstva) do svake lokacije na kojoj treba izuzeti materijal iz narudžbe. Takvi sustavi nazivaju se sustavi komisioniranja prema principu "čovjek robi" (*eng. picker-to-part systems*). Druga grupa bazira se na kretanju materijala do komisionera, pa se takvi sustavi nazivaju sustavi prema principu "roba čovjeku" (*eng. part-to-picker systems*). U sustavima prema principu "čovjek robi" materijali su najčešće uskladišteni u regalima s rasporedom u redove (u praksi i literaturi koristi se i naziv skladišta s prolazima).

Neovisno o izvedbi sustava za komisioniranje, od ukupnog vremena komisioniranja prosječno se oko 50% utroši na kretanje, kao što prikazuje slika 1-2, pa su u skladu s tom činjenicom i napori iznalaženja takvih riješenja koji će to kretanje minimizirati.



Slika 1-2. Raspodjela vremena komisioniranja [2]

Definiranje potrebne opreme i prostornog rasporeda zone komisioniranja s ciljem minimizacije vremena komisioniranja nije moguće provesti bez razmatranja i definiranja određenih načina izvođenja operacija komisioniranja. Stoga i ne čudi usmjerenost istraživanja prezentiranih u literaturi upravo na ovaj segment oblikovanja – metode usmjerene minimizaciji vremena kretanja prilikom komisioniranja. Primjena tih metoda moguća je i kod unapređenja postojećih skladišta (zona komisioniranja), što je dodatni razlog interesa teorije i prakse.

Jedan od načina smanjenja puta, a time i vremena komisioniranja, je primjenom određene metode routinga[3] (određivanje redoslijeda i puta prikupljanja). Za to su razvijene brojne heurističke i, za neke slučajeve, optimizacijske metode /[7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]/. Neki rezultati njihove primjene u praksi pokazuju mogućnost uštede vremena vožnje pri komisioniranju i do 35% u odnosu na rješenja bez uporabe tih metoda [15]. No, svaka metoda routinga ima svoje prednosti i nedostatke pa rezultira boljim ili lošijim rezultatom u nekom konkretnom primjeru, ovisno o veličini skladišta, prostornom rasporedu (*eng. layout*), veličini narudžbe (broju lokacija izuzimanja proizvoda) i dr. Stoga je potrebno definirati koju je metodu u konkretnom slučaju najpogodnije primjeniti. Ovaj je zaključak izravno u svezi jednoga od temeljnih zadataka ovoga istraživanja.

Drugi način mogućeg smanjenja puta komisioniranja primjena je metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja materijalima u skladištu. Dokazano je da metode dodijeljenog rasporeda odlaganja smanjuju vrijeme komisioniranja u odnosu na slučajni raspored odlaganja, međutim postoje razni tipovi odlaganja i ostaje otvoreno pitanje koji je tip odlaganja najpogodniji za pojedinu metodu routinga, te koje kombinacije tih metoda rezultiraju najboljim rješenjima u konkretnim situacijama. Prezentirana istraživanja u literaturi /[16], [17], [18], [19], [20]/ uglavnom se svode na određenje mogućnosti smanjenja vremena komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja.
Također je, usprkos poznatim određenim nedostacima dodijeljenog rasporeda odlaganja, nedovoljna pažnja posvećena alternativnom odlaganju po zonama.

Komisioniranje grupe narudžbi - spajanje narudžbi (*eng. batching*) i/ili komisioniranje po zonama (*eng. zoning*) treći je način smanjenja puta, odnosno vremena komisioniranja razmatran u literaturi /[17], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]/. Analize ovakvih organizacija komisioniranja pokazale su značajne mogućnosti smanjenja vremena

[3] Routing - postupak određivanja redoslijeda i rute prikupljanja materijala prilikom komisioniranja, u hrvatskom jeziku nema adekvatan odnosno u praksi općeprihvaćen prijevod (jedan bi mogao biti "usmjeravanje"). Autor ovog rada odlučio je, zbog preglednosti i povezanosti s riječju ruta, zadržati originalni termin (kao npr. software, hardware, branch & bound metoda, cluster analiza,...), bez pretenzija na konačnost takve odluke.

komisioniranja, što je potkrijepljeno i s rezultatima primjene u praksi [28]. Međutim, većina analiza metoda spajanja narudžbi u tim je radovima napravljena u ovisnosti samo o veličini skupa narudžbi i pravilu dodjeljivanja pojedinih narudžbi nekom skupu, uglavnom za postupak slučajnog odlaganja i jednu odabranu metodu routinga. Pri tome ostaje neriješeno nekoliko važnih pitanja, kao npr., izbor metode kojom će spajanja narudžbi rezultirati najboljim rješenjem ovisno o metodi routinga, utjecaj unaprijed dodijeljenog odlaganja na performanse metoda spajanja narudžbi, koji je u tom slučaju najbolji tip odlaganja ponovno u ovisnosti o odabranoj metodi routinga, te konačno koja je najbolja kombinacija svih spomenutih metoda u nekom konkretnom slučaju koja rezultira potpunom minimizacijom puta (vremena) komisioniranja.

Sva navedena pitanja tvore domenu za definiranje osnovne teze ovoga rada da za određene izvedbe regalnih skladišta i skladišnih procesa u njima postoje bolja rješenja komisioniranja od postojećih. Kao glavni parametar za vrednovanje odabran je put komisioniranja.
Za napomenuti je da su inserti stanja istraživanja navedeni i na pojedinim mjestima drugih poglavlja u ovome radu.

1.2. Metodologija i plan rada

Uvažavajući činjenicu o značajnom udjelu vremena kretanja u ukupnom vremenu komisioniranja, kao i udjelu troškova komisioniranja u ukupnim troškovima skladištenja, u ovom radu se polazi od pretpostavke da se minimizacijom prijeđenog puta prilikom komisioniranja mogu ostvariti znatne uštede na vremenu komisioniranja. Logična je posljedica smanjenje troškova komisioniranja, odnosno ukupnih troškova skladištenja te konačno smanjenje logističkih troškova.

Kako najveći potencijali smanjenja puta komisioniranja leži u primjeni metoda komisioniranja, istraživanje i njihova analiza glavni je predmet ovoga rada. No osim poznavanja pojedinih metoda i njihovih performansi, potrebno je analizirati i njihove međusobne interakcije, te je za cilj istraživanja odabrano određenje najboljih kombinacija raznih metoda komisioniranja s ciljem da se za određeni skup regalnih skladišta definira optimalno rješenje prema kriteriju minimalnog puta komisioniranja. Za očekivati je da će rješenje osim na operativne procese skladištenja u praksi, imati implikacija i na fazu oblikovanja novih skladišnih sustava.

Stoga se u radu kreće od analize pojedinih metoda komisioniranja ka analizi njihovih kombinacija, nadvladavajući time u literaturi često zamijećeno izoliranje pojedinih metoda od ostalih, te time postignutih suboptimalnih rješenja. S obzirom da performanse, kako pojedinih metoda tako i kombinacija metoda, često vrlo značajno ovise o konkretnom slučaju, analiziraju se brojne situacije s obzirom na kapacitet skladišta (zone komisioniranja), prostorni raspored, veličine narudžbi, protoke, kapacitete komisionera i dr. Sama kompleksnost problema (mnogo utjecajnih varijabli i raznih metoda) ne omogućava primjenu analitičkog određenja optimalnog riješenja (samo za neke parcijalne probleme moguće je analitičko određenje puta komisioniranja, no bez mogućnosti optimalizacije), pa je u istraživanju i analizi korištena simulacija. Verifikacija dobijenih rezultata temelji se na njihovoj usporedbi i konzistentnosti s rezultatima parcijalnih analiza prezentiranih u relevantnim istraživanjima u literaturi.

U skladu s navedenim, kompozicija je rada kako slijedi. Poglavlje 2. nastavak je ovog uvodnog razmatranja, a s ciljem rasprave o terminologiji[4] i definicijama. Dat je prikaz oblikovanja skladišta, odnosno sustava za komisioniranje, te rješenja komisioniranja koja se koriste u praksi, kao i pregled skladišnih metoda s naglaskom na za rad relevantne metode komisioniranja. Rasprava o metodama prožeta je pregledom postojećih dostupnih literaturnih

[4] O logistici na hrvatskom jeziku ima vrlo malo literature, tako da standardno stručno nazivlje ostaje otvoreno pitanje. To je razlog što autor ovog rada navodi i izvorno nazivlje na engleskom jeziku.

izvora. Poglavlje 3. posvećeno je metodama routinga, definicijama i analizi performansi, za slučajni raspored odlaganja i komisioniranje jedne narudžbe. U poglavlju 4. prikazuju se metode dodjeljivanja mjesta odlaganja, a istraživanje se temelji na usporedbi kombinacija metoda routinga i dodjeljivanja mjesta odlaganja. Rezultat su određenja najboljih kombinacija metoda routinga i načina odlaganja. Dodatno, analizira se i u prethodnom podpoglavlju spomenuto odlaganje po zonama kao alternativno rješenje. U poglavlju 5. prezentiraju su definicije i algoritmi postojećih metoda spajanja narudžbi. Analiza algoritama napravljena je u ovisnosti o metodama routinga za slučajno odlaganje, a naknadno se uvodi i dodijeljeno odlaganje (u poglavlju 4. definirani najbolji tipovi odlaganja za pojedine metode routinga). Kako vrijeme komisioniranja ne ovisi samo o odabranim metodama komisioniranja već i o prostornom rasporedu, u poglavlju 6. prikazan je utjecaj prostornog rasporeda na vrijeme komisioniranja, te modeli određivanja optimalnog prostornog rasporeda zone komisioniranja. Sistematizacija i generalizacija rezultata, popraćena određenjem relativnih efekata primjene metoda komisioniranja čime se zaokružuje istraživanje performansi kombinacija u radu razmatranih metoda komisioniranja, dana je u poglavlju 7. Uz kratki sumarni pregled onog što je napravljeno u radu, u zaključku se daju i smjernice daljnjeg istraživanja.

2. OBLIKOVANJE SUSTAVA ZA KOMISIONIRANJE

Analogno poznatoj zakonitosti da "funkcija izgrađuje organe", i za komisioniranje kao skladišni proces prikupljanja materijala iz skladišnih lokacija potreban je određeni sustav za komisioniranje (kao jedan od skladišnih podsustava). Oblikovanje sustava za komisioniranje sastavni je dio oblikovanja skladišnog sustava. S tog razloga se u ovom poglavlju prvo daje sažet prikaz skladišnih sustava i njihovog oblikovanja, a u nastavku slijedi pregled sustava za komisioniranje, te operativnih postupaka u skladištu.

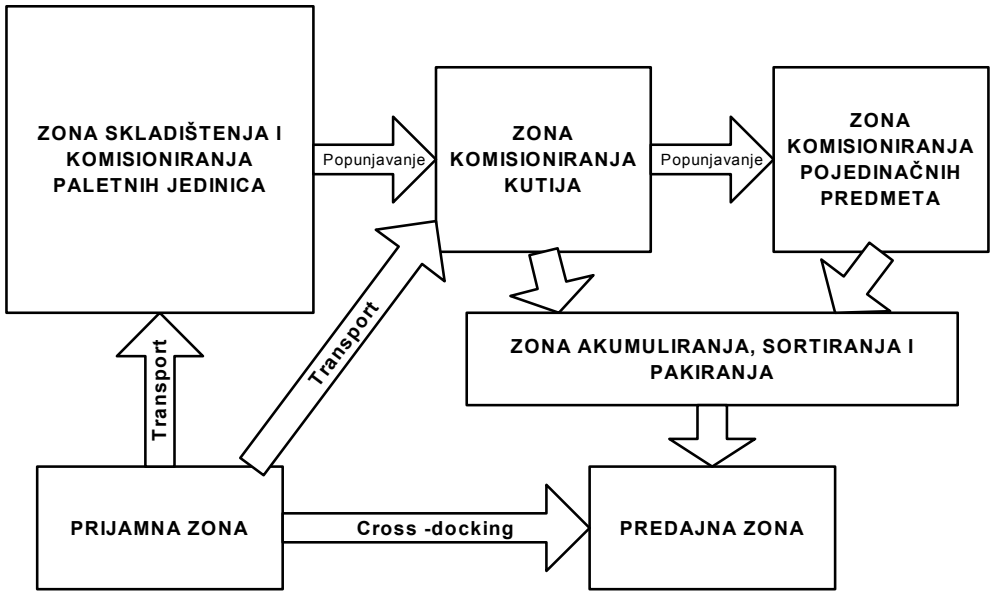
2.1. Skladišni sustavi

Skladišni sustavi su mjesta uređena i opremljena za privremeno i sigurno odlaganje, čuvanje, pripremu i izdavanje materijala [30]. Iz ranije navedene definicije logistike CLM-a, kao dijela procesa logističkog lanca u kojem se planira, implementira i kontrolira efikasan i efektivan tijek i skladištenje roba, usluga, i s njima povezanih informacija, između točke izvora i točke potrošnje u smislu ispunjenja zahtjeva korisnika, vidljivo je da su skladišni sustavi integralni dio logističkog lanca (logistički podsustav) koji služi za skladištenje materijala na i između točaka izvora i potrošnje, i kao takvi bitni su za ostvarenje zadovoljstva korisnika i minimizacije ukupnih troškova. No, kako skladištenje samo po sebi predstavlja trošak, a materijalu se ne povećava vrijednost, otvara se pitanje potrebe skladištenja. Zbog dinamike i nesigurnosti današnjeg tržišta, industrijska poduzeća bez zaliha su idealizirano stanje, a realno je da se zalihama ostvaruje dinamičko uravnoteženje tokova materijala, kako na relaciji dobavljači – proizvođači, tako i u poduzeću na relacijama između proizvodnih pogona i između radnih mjesta unutar pogona. Čak i u stabilnim tržištima određene su zalihe (a time i skladišta) u poduzećima potrebne zbog smanjenja ukupnih troškova [31]. U području prometa distribucijska skladišta ostvaruju dinamičko uravnoteženje na relaciji proizvođači – potrošači, akumuliranjem i sjedinjavanjem proizvoda s različitih mjesta proizvodnje, bilo od jednog poduzeća bilo od više njih, ili pak mogu biti raspoređena tako da skraćuju transportne udaljenosti da se udovolji zahtjevu za brzom dostavom korisnicima [7].

Poznato je da se skladištenjem (u funkciji privremenog odlaganja) ne povećava vrijednost materijalu (osim ako materijal starenjem ne dobiva na vrijednosti, no ovdje se misli na povećanje vrijednosti promjenom oblika), ali skladištenjem se materijalu povećava prostorna i vremenska raspoloživost (imati materijal tamo gdje je potreban i kada je potreban). Ovdje treba napomenuti da s obzirom na trend logistike dodane vrijednosti (eng. *value added logistics*), koja predstavlja jedno od novih rješenja, danas se procesi tako strukturiraju da se mnoge aktivnosti, kao montaža proizvoda, kontrola kvalitete, pakiranje i dr. obavljaju u skladištu, a time se i direktno materijalu povećava vrijednost [7]. Treba podsjetiti na to da su i pojedini klasični procesi u strojogradnji imali pripremu nekih materijala u skladištu (npr. Krojenje, rezanje,...), a i pakiranje je vrlo često bilo locirano u skladištima.

Izuzetno je veliki broj raznih kriterija sistematizacije skladišta [30]. Takva rasprava za ovaj rad nije nužna, pa se samo prema kriteriju osnovne funkcije u logističkom lancu navodi podjela na dvije vrste skladišta: distribucijska skladišta i proizvodna skladišta. U distribucijskom skladištu sakupljaju se proizvodi od više proizvođača i dostavljaju brojnim korisnicima prema njihovim narudžbama. Proizvodno skladište koristi se za skladištenje i distribuciju sirovina, poluproizvoda i gotovih proizvoda, ali i drugih roba (alati, rezervni dijelovi,...) u proizvodnom okružju, a komisioniranje je na temelju naloga za izdavanje. U ovom se radu, neovisno da li se radi o nalogu za izdavanje ili narudžbi kupca, koristi termin narudžba.

Neovisno o vrsti, svako skladište sastoji se od određenih zona, a tijek materijala između i unutar pojedinih zona ostvaruje se pojedinim podprocesima. Na slici 2-1. prikazane su najčešće, odnosno tipične zone te glavni tokovi materijala u skladištu.



Slika 2-1. Tipične skladišne zone i tijek materijala [2]

Od dobavljača/pogona pristigle pošiljke istovaruju se u prijamnoj zoni, a nakon prijama materijal se transportira u zonu skladištenja ili direktno u predajnu zonu. U potonjem slučaju radi se o tzv. *crossdockingu*. Materijali najčešće ulaze u skladište oblikovani u paletne jedinice. Izuzimanje paleta iz skladišne zone, koja je u tom slučaju ujedno i zona komisioniranja paletnih jedinica (eng. *pallet picking area*) inicirano je ili potrebom dostave cijele palete kupcu ili potrebom popunjavanja zone komisioniranja kutija[9] (eng. *case picking area*). Izuzimanje materijala iz te zone inicirano je, analogno prethodnom slučaju, ispunjavanjem narudžbe korisnika ili potrebom popunjavanja zone komisioniranja pojedinačnih predmeta[10] (eng. *item picking area*). Zone mogu biti strukturirane centralizirano ili decentralizirano – na više površina, a isto tako moguće je i nepostojanje određene zone u nekom skladištu. Izuzeti materijali iz zona komisioniranja prema narudžbama korisnika transportiraju se do zone akumuliranja, sortiranja i pakiranja ili direktno u predajnu zonu. Postojanje ove zone ovisi o karakteristikama narudžbi korisnika i odabranim metodama komisioniranja. S tim u svezi mogući su razni slučajevi, npr:

- jedna narudžba sadrži materijale (proizvode) od kojih se neki izuzimaju iz zone komisioniranja kutija a neki iz zone komisioniranja pojedinačnih predmeta. Prikupljeni proizvodi spajaju se u zoni akumuliranja prije slanja korisniku;
- komisioner prikuplja istovremeno proizvode iz više narudžbi, pa ih je prije samog izdavanja potrebno odijeliti – sortirati;
- pojedinačni proizvodi stavljaju se u kutije, kutije na palete, te se nakon paletizacije odvoze u predajne zonu gdje se utovaruju u sredstva vanjskog transporta.

Oprema koja se koristi za odlaganje materijala u skladištu kao i sredstva za rukovanje materijalom kojima se ostvaruje tijek materijala (a to je ujedno i oprema sustava za komisioniranje) detaljnije su objašnjeni u podpoglavlju 2.3.

2.2. Oblikovanje skladišnih sustava

Ukupni troškovi skladištenja jednim su dijelom determinirani projektiranim, odnosno izvedenim rješenjem skladišta, a drugim dijelom ovise od izabranih metoda koje se koriste u skladišnim procesima. Već je ranije naglašeno da je rješenje komisioniranja sastavni dio

[9] Eng. *case*=kutija, u daljnjem tekstu koristi se termin komisioniranje kutija
[10] Eng. *item*=pojedinačni predmet (proizvod), u daljnjem tekstu koristi se termin komisioniranje pojedinačnih predmeta. U literaturi se ponekad koristi i termin komisioniranje količina manjih od kutije (eng. *less-than-case picking*).

projekta skladišta, pa se navedena činjenica odnosi i na njega. Polazeći od funkcije skladišta, određivanje veličine i oblika skladišta, opreme i prostornog rasporeda, na način da se ostvari efikasan i efektivan tijek i skladištenje materijala, zadatak je oblikovanja, odnosno projektiranja, skladišnih sustava[11]. U literaturi se (poglavito u izvorima iz SAD-a) vrlo često oblikovanje skladišta opisuje u kontekstu donošenja odluka, te se shodno klasifikaciji odluka[12] oblikovanje skladišnog sustava poistovjećuje s taktičkim odlučivanjem [34]. Međutim, odluke o izboru opreme, veličini i obliku skladišta te prostornom rasporedu nemoguće je donijeti bez odabira načina na koji će odabrani sustav funkcionirati.
Pravila koja određuju kako se različite skladišne aktivnosti (operacije) izvršavaju - u daljnjem tekstu nazivaju se skladišne metode - prema klasifikaciji skladišnih odluka svrstavaju se u operativne odluke. Većina spomenutih metoda utječe na izbor opreme, a time i na veličinu skladišta [32]. Također performanse neke odabrane metode ovise o prostornom rasporedu, te zanemarivanje razmatranja metoda u skladištu prilikom određenja prostornog rasporeda može dovesti do potpuno neadekvanih rješenja [7].
Shodno navedenom, izbor opreme i određivanje prostornog rasporeda na temelju taktičkih odluka, odnosno izbor skladišnih metoda na temelju operativnih odluka, međusobno su zavisni te je prema tome oblikovanje skladišnih sustava rezultat i taktičkih i operativnih odluka [2], [7], [35]. Ova rasprava relevantna je samo sa teorijskog stajališta, dok u praksi projektant, slijedeći uobičajene metodologije oblikovanja, neminovno uzima u obzir i skladišne metode prilikom određivanja navedenih elemenata oblikovanja.

Opisane međuzavisnosti prostornog rasporeda, opreme, oblika i veličine skladišta te skladišnih metoda, kao i potencijano veliki broj alternativa rješenja razlog su velikih problema u razvoju općeg analitičkog modela oblikovanja skladišta [36]. S druge strane, simulacijom se ne mogu obuhvatiti sve moguće alternative u procesu oblikovanja. Pristup pomoću ekspertnih sustava također je upitan zbog nedostatka znanja [32]. To je vjerojatno i razlog što je autor ovoga rada u literaturi našao mali broj radova orijentiranih oblikovanju cjelokupnog skladišta[13], dok je najviše radova posvećeno analizi i optimizaciji nekog izoliranog i dobro definiranog problema [39].

Rasprava o skladišnim metodama u poglavljima 3., 4. i 5. usmjerena je analizi njihova utjecaja na put komisioniranja, dok se u poglavlju 6. prikazuje veza metoda komisioniranja i rješenja prostornog rasporeda zone komisioniranja, a time i prostornog rasporeda cjelokupnog skladišta.

[11] Navedeni zadaci nisu strogo definirana podjela u literaturi. *Tompkins et al.* [2] navode slijedeće tri osnovne zadaće oblikovanja: oblikovanje prostornog rasporeda (layouta), oblikovanje podsustava, te oblikovanje sustava za rukovanje materijalom. Pod oblikovanjem podsustava podrazumjeva projektiranje građevinskog objekta, te ventilacijskog, električnog, svjetlosnog, sanitarnog i sigurnosnog sustava. Pod oblikovanjem sustava za rukovanje materijalom podrazumjeva se odabir opreme u skladištu – sredstava za skladištenje, transportnih sredstava i pomoćne opreme.
S druge strane, *Roodbergen* [7] definira podjelu oblikovanja skladišta na temelju problema koji se opisuju u literaturi kao određivanje veličine skladišta, opreme u skladištu i prostornog rasporeda skladišta. Takva podjela prikazana je i u *Choe & Sharp* [32]. Vrlo slično, *Ashayeri & Gelders* [33] definiraju podjelu oblikovanja skladišta na određenje sredstava za skladištenje, transportne opreme i prostornog rasporeda skladišta. U tim podjelama oblikovanje podsustava, definirano u *Tompkins et al.* [2], isključeno je iz oblikovanja skladišnih sustava. U tom slučaju može se govoriti o tehnološom projektu oblikovanja skladišnog sustava, dok izvedbeni projekt mora imati elaborirane projekte i tih podsustava.
[12] Misli se na klasifikaciju odluka prema vremenu na koje se odnose (strateške, taktičke i operativne odluke)
[13] Većina tih radova posvećena je oblikovanju sustava s komisioniranjem paletnih jedinica. Iznimka su *Yoon & Sharp* [35], [37], koji definiraju opću proceduru za oblikovanje skladišnog sustava s naglaskom na komisioniranje manjih jedinica, odnosno *Brynzer et al.* [38] koji predlažu metodologiju usporedbe varijanti takvih sustava.

2.3. Sustavi za komisioniranje

S obzirom na pojedine podprocese u skladištu (prepoznatljive na slici 2-1) može se govoriti o podsustavima prijama, odlaganja-skladištenja, komisioniranja i izdavanja materijala. U većini literaturnih izvora autori gotovo jednako definiraju komisioniranje (onako kao što je definirano i u ovom radu), dok se definicija sustava za komisioniranje ne nalazi tako često. Razlozi mogu biti u svezi činjenica da je komisioniranje kao podproces zastupljen u svakom skladišnom procesu, a da se pri tome posebice ne osniva podsustav komisioniranja. Naime, iste komponente (sredstva) obavljaju aktivnosti u različitim podprocesima.

Iz opisa skladišnih sustava, u brojnim radovima, ne može se uočiti determiniranost broja i vrsta zona i aktivnosti u skladištima. Njihovo postojanje uvjetovano je raznim izvedbama skladišta u smislu opreme (sredstava za skladištenje i sredstava za rukovanje materijalom/transportnih sredstava), karakteristika materijala, karakteristika narudžbi i odabranih metoda u skladištu. Međutim, nekonzistentnost prikaza i nepostojanje opće definicije sustava za komisioniranje u literaturi nije rezultat brojnih mogućih izvedbi skladišnih sustava (pa tako i rješenja komisioniranje), već, po osobnom sudu autora ovog rada, određene subjektivnosti pojedinih autora i njihove želje za naglaskom određenog problema.

Choe & Sharp [32] koriste termin oblikovanje skladišta (eng. *warehouse* design) ukoliko je glavna funkcija u skladištu izuzimanje (a time i komisioniranje) paletnih jedinica. Zbog veće kompleksnosti komisioniranja u slučajevima s izuzimanjem jedinica manjih od palete (kutija i pojedinačnih proizvoda), naglašavaju problem kao oblikovanje sustava za komisioniranje (eng. *orderpicking system design*). Prihvaćaju opću strukturu sustava za komisioniranje danu u *Yoon & Sharp* [35], koja pokriva sve moguće zone i tijekove materijala unutar skladišta, čime se ne naglašava nikakva razlika između sustava za komisioniranje i cjelokupnog skladišnog sustava. *Gray et al.* [40] u svom radu opisuju širok spektar modela oblikovanja komisioniranja. Također definiraju pojam komisioniranja, međutim ne koriste pojam sustav za komisioniranje već konsolidacijsko skladište (eng. *consolidation warehouse*), pod kojim smatraju proizvodno skladište gotovih proizvoda ili distribucijsko skladište. *Roodbergen* [7] koristi pojam sustav za komisioniranje kao sinonim za sredstva za skladištenje u trenucima kada želi naglasiti proces izuzimanja materijala iz tih sredstava. Pojam sredstva za skladištenje prihvaćen je u *Oluić* [30] kao jedna od komponenti skladišnog sustava, te predstavlja vrstu regala koja se koristi za skladištenje. Ostale komponente skladišnog sustava su (uz naravno objekte skladišta) transportna sredstva, sredstva za odlaganje materijala (palete, kutije,...), pomoćna i dodatna oprema. Slične podjele uvriježene su i u radovima drugih autora[14]. *Tompkins et al.* [2] također koriste različite termine, ovisno o izuzimanju paletnih količina ili količina manjih od palete. Ukoliko se radi o izuzimanju paletnih jedinica, sredstva za skladištenje nazivaju sustav za skladištenje i izuzimanje (eng. *storage/retrieval system*), dok u slučaju izuzimanja manjih količina od palete ta ista sredstva nazivaju sustav za komisioniranje.

Kako se proces komisioniranja, i paletnih jedinica i jedinica manjih od palete, obavlja u svim tipovima skladišta, autor ovog rada nije sklon definiranju sustava za komisioniranje prema tom kriteriju. Isto tako, uvažavajući činjenicu da je proces komisioniranja jedan od podprocesa skladišnog procesa, sustav za komisioniranje jedan je od skladišnih podsustava.

[14] Pri tome se misli na smisao podjele, no čitatelja se upozorava na problem terminologije koji može nastati pri prevođenju. Tako je najčešća podjela: *storage equipment*, *handling equipment*, *auxiliary equipment*. Pod *storage equipment* podrazumjevaju se regali – sredstva za skladištenje, dok bi pokušaj direktnog prijevoda eventualno rezultirao terminima kao što su sustav za skladištenje ili sustav za odlaganje, poistovjećujući to sa skladišnim sustavom ili sredstvima za odlaganje (eng. *storage* – skladištenje, odlaganje). Pod *handling equipment* podrazumjevaju se transportna sredstva u skladištu (skraćeno od *material handling equipmet* – oprema za rukovanje materijalom). Naziv rukovanje materijalom u širem smislu obuhvaća osim transportne tehnike i svu ostalu skladišnu tehniku, te tehniku pakiranja [30]. Pod *auxiliary equipment* podrazumjeva se sva ostala oprema, u koju uključuju i sredstva za odlaganje (eng. *storage module* [41] ili *storage unit* [39]), kao što su palete, sanduci i dr.

S polazištem od procesa komisioniranja, za potrebe ovog rada sustav za komisioniranje se definira kao: sva oprema za uskladištenje materijala pripremljenog za izuzimanje, transportna oprema koja se koristi pri izuzimanju, te ostala (pomoćna i dodatna oprema). Budući da postoji veći broj raznih tipova, kako sredstava za skladištenje tako i transportnih sredstava, prihvaćena definicija sustava za komisioniranje implicira postojanje ogromnog broja različitih sustava za komisioniranje. Kako je ipak u većini radova opis sustava za komisioniranje temeljen na vrsti sredstva za skladištenje, takav je dan i u ovom radu. Pri tome su sustavi podijeljeni u grupe prema principu kretanja materijala/komisionera, spomenutog u uvodnom poglavlju.

Iako neki autori smatraju i sustav za akumuliranje i sortiranje sastavnim dijelom sustava za komisioniranje (koji je i uvjetovan određenim rješenjima komisioniranja), shodno prihvaćenim definicijama to je zaseban sustav i u ovom radu se neće detaljnije razmatrati.

2.3.1. Komisioniranje prema principu "čovjek robi"

U komisioniranju prema principu "čovjek robi" (eng. *picker-to-part*) komisioner se kreće, hodajući ili vozeći se na transportnom sredstvu, do lokacije(a) sa koje treba izuzeti materijal. Kako se aktivnost izuzimanja najčešće obavlja u prolazima između regala, ova grupa sustava vrlo se često naziva i sustavi "u prolazima" (eng. *in-the-aisle*).

Podno skladištenje predstavlja najjednostavniji oblik skladištenja. Materijal je uskladišten na paletama koje leže na podu odnosno naslożene jedna na drugu, a izuzimanje materijala je isključivo u paletnim količinama, najčešće primjenom klasičnih izvedbi viličara. Budući da bilo koji način skladištenja treba omogućiti izravan pristup svakoj vrsti materijala, to vrijedi i za podna skladišta, pa se ovisno o veličini asortimana koristi raspored u blokove ili u redove. U praksi najčešći način skladištenje materijala na paletama je odlaganje u regale. **Paletni regali** sa svojom konstrukcijom omogućuju odlaganje paleta na više razine nego podno skladištenje, istovremeno omogućujući pristup svakoj paleti (što podrazumijeva i pristup svakom materijalu). U principu je nekoliko jediničnih regala spojeno tako da čine redove, između kojih su prolazi za transportna sredstva i radnike. Osim ovih prolaza postoje i glavni prolazi (prednji, stražnji i eventualno jedan ili više poprečnih prolaza, vidi sliku 3-1.), koji služe za promjenu prolaza između regala, mimoilaženje i/ili okretanje transportnog sredstva. Komisioniranje se obavlja ili pomoću transportne opreme izuzimanjem ukupne količine na paleti, ili ručno izuzimanjem sa regala količina manjih od ukupne količine na paleti (s najnižih razina regala), ili kombinirano izuzimanjem ukupne količine na paleti pomoću transportnog sredstva, te spuštanjem na nižu razinu i ručnog izuzimanja potrebne količine[15]. Pri tome se za transport izuzetog materijala koriste razna kolica ili viličar za komisioniranje. S ciljem bolje iskoristivosti površine i prostora, kao i ostvarenja drugih zahtjeva skladištenja, umjesto paletnih regala mogu se koristiti i drugačije izvedbe. Kod rješenja s **prolaznim regalima** isti su postavljeni u blok – kompaktnu rešetkastu konstrukciju kroz koju prolaze transportna sredstva. Kod ove izvedbe nema nema posebnih prolaza između regala, kao kod skladišta s paletnim regalima, budući da su ovi prolazi sastavni dio površine za skladištenje (naravno da postoje glavni prolazi). Ako opisana izvedba treba zadovoljiti princip izravnog pristupa svakoj vrsti materijala, jasno je da se u tom slučaju može skladištiti mali asortiman materijala. U izvedbama s **protočnim paletnim regalima** palete se također nalaze jedna do druge, krećući se prolazima - stazama od mjesta ulaza u regal s jedne strane do mjesta izuzimanja s druge strane regala. Kretanje paleta po stazi ostvaruje se pogonjenim valjcima ili gravitacijom. Ovakva izvedba regala ne omogućuje izravno izuzimanje svake palete u sustavu, ali treba osigurati pristup svakoj vrsti materijala u sustavu, te je pogodna u situacijama visokog protoka paletnih jedinica. S ciljem omogućavanja izuzimanja svake paletne jedinice u sustavu, a uz zadržavanje visoke iskoristivosti prostora, koriste se i

[15] U posljednja dva slučaja zona komisioniranja kutija fizički je ista zona kao i zona skladištenja i komisioniranja paletnih količina.

izvedbe s **prijevoznim regalima**. Izvedba regala u dijelu odlaganja jediničnih tereta identična je paletnom regalu, a razlika je jedino u pokretnom postolju na kojem je regal. Redovi regala postavljeni su tako da čine kompaktnu cjelinu, pri čemu se pristup materijalu – prolaz – stvara pomicanjem reda regala (izvlačenjem ili razmicanjem). U strojogradnji se vrlo često skladište materijali koji zbog svojih dimenzija i oblika nisu pogodni za skladištenje na paletama (šipke, limovi, cijevi,...), pa se takvi materijali odlažu u **konzolne regale** ili u posebno izvedene stalke. Prostorni raspored konzolnih regala u skladištu ima istu strukturu kao paletni regali.
Transportna sredstva koja se koriste za odlaganje i izuzimanje paleta (kao i cijevi, šipki, limova) isključivo su različite izvedbe viličara s mogućnošću dizanja na više razine. Visina regala (broj razina) ograničeni su tehničkom izvedbom transportnog sredstva.

Ukoliko su jedinice skladištenja kutije i pojedinačni predmeti, koriste se polični regali, ladični regali, protočni regali za kutije i automatizirani sustavi s čovjekom komisionerom na automatskoj dizalici. **Polični regali** su najjednostavniji i najčešće korišteni sustav za količine manje od palete. Regali su slične konstrukcije kao i paletni, uz dodatak polica. I raspored regala je sličan kao kod paletnih, s nekoliko regala u redu i prolazima između redova. Izvedbe s prijevoznim poličnim regalima koriste se u slučajevima kada se želi bolja iskoristivost prostora, ali uz niže iznose protoka. **Ladični regali** najčešći su sustav za skladištenje i komisioniranje malih pojedinačnih prodmeta. Omogućuju veću iskoristivost prostora od poličnih regala, ali su i skuplji. Raspored ladičnih regala sličan je rasporedu poličnih regala. Kao i u slučaju komisioniranja paleta, u sitacijama s komisioniranjem kutija visokim protokom, kao pogodan sustav koriste se **gravitacijski protočni regali** za kutije. Ovakva izvedba također omogućuje dobru iskoristivost prostora, no zahtjeva uniformne veličine i oblike kutija. Izuzimanje materijala iz prikazanih sustava za skladištenje kutija i pojedinačnih predmeta isključivo je ručno, pa se problem primjene regala s više razina u praksi rješava primjenom viličara za komisioniranje ili, ako je moguće, izvedbom podestnog skladišta. U poluautomatiziranom visokoregalnom sustavu (eng. *person-on-board S/RS)* visokoregalni viličar (koristi se i naziv visokoregalna dizalica) kreće se između regala s čovjekom koji izuzima kutije ili pojedinačne predmete ručno. Ovi sustavi imaju dobru iskoristivost površine, ali su i znatno skuplji od ostalih opisanih sustava.
Za transport izuzetih dijelova tijekom komisioniranja (osim u posljednjem opisanom slučaju) koriste se razne izvedbe kolica ili viličara. Poseban slučaj je izvedba sustava za komisioniranje sa konvejerima (eng. *pick-to-belt system*) [42], kod kojih se nakon ručnog izuzimanja kutija ili pojedinačnih predmeta oni stavljaju na konvejer i odvoze iz zone komisioniranja.

2.3.2. Komisioniranje prema principu "roba čovjeku"

U sustavima komisioniranja prema principu "roba-čovjeku" (eng. *part-to picker*) materijal koji treba izuzeti kreće se do komisionera. Mjesto izuzimanja nalazi se na kraju prolaza, pa se ovi sustavi još nazivaju i sustavi "na kraju prolaza" (eng. *end-of-aisle*).

Najpoznatiji primjer ovakvog sustava su visokoregalna automatizirana skladišta - eng. *AS/RS* (*automated storage retrieval system*). U ovim sustavima automatska visokoregalna dizalica (visokoregalni viličar) izuzima paletu iz visokog regala, te je dovozi do mjesta komisioniranja na fiksnoj lokaciji na kraju prolaza. U slučaju komisioniranja paletnih količina, cijela paleta se odvozi u predajnu zonu viličarem ili sustavom konvejera. U slučaju komisioniranja kutija, čovjek komisioner na fiksnoj lokaciji izuzima potrebnu količinu, a ostatak materijala na paleti automatska dizalica prevozi i odlaže natrag u regal. Ista metoda koristi se i za komisioniranje malih pojedinačnih predmeta u tzv. *miniload AS/RS* sustavima. Mali pojedinačni predmeti odloženi su u regalu u posebnim sanducima umjesto na paletama. Ovi sustavi znatno su manjih dimenzija od paletnih visokoregalnih automatiziranih sustava.

Za skladištenje i komisioniranje malih predmeta koriste se i optočni regali - karuseli[16]. Karusel je regal koji se sastoji od serije ladica koje rotiraju horizontalno ili vertikalno, donoseći određenu ladicu (lokaciju) do fiksnog mjesta izuzimanja. Jedna od novijih izvedbi rješenja sustava za komisioniranje malih dijelova su vertikalni podizni moduli (eng. *vertikal lift module system-VLMS*) [43], [44]. Izvedba je slična vertikalnom karuselu, ali ladice ne rotiraju. Sredstvo za odlaganje/izuzimanje ("ekstraktor") slično kao kod *AS/RS* sustava izuzima cijelu ladicu i dovozi je do mjesta za izuzimanje predmeta. Nakon toga ladica se vraća na svoje mjesto u modulu. Zbog samo vertikalnog kretanja sredstva za odlaganje/izuzimanje ladica, ovi sustavi nazivaju se još i vertikalni podizni *AS/RS* sustavi (eng. *vertical lift AS/RS*).

Osim prikazanih sustava za komisioniranje, posebna vrsta su potpuno automatizirani sustavi komisioniranja. Proces komisioniranja sastoji se od dolaženja mehanizma do određene lokacije, izuzimanja materijala (najčešće se radi o materijalima manjih i uniformnih dimenzija) i stavljanja istih na konvejer.

2.4. Skladišne metode

Način na koji se određena operacija obavlja u skladištu definiran je određenom metodom ili algoritmom[17] [7]. Glavni cilj većine metoda u skladištu je obaviti operaciju u što kraćem vremenu. Kako najveći udio vremena u komisioniranju otpada na kretanje (vidi sliku 1-2), na tu komponentu je usmjerena pozornost većine autora, te je razvijeno dosta metoda. Međutim, većina od njih analizira automatizirane skladišne sustave, dok su klasični uglavnom zanemareni [39]. S obzirom da automatizacija nije uvijek prihvatljivo rješenje, što zbog svojih najčešće visokih investicijskih troškova, što zbog nefleksibilnosti rekonfiguracije automatiziranih sustava [32], a također i zbog velikog broja instaliranih klasičnih sustava u praksi, potonji zahtjevaju više pozornosti.

U nastavku se ukratko opisuju skladišne metode, pri čemu se veća pozornost pridaje onim metodama koji utječu na smanjenje vremena komisioniranja.

2.4.1. Metode routinga

Metodama routinga određuje se redoslijed prikupljanja i smjer kretanja pri komisioniranju, s ciljem smanjenja puta (znači i vremena) komisioniranja. Problemi određivanja dobrog redoslijeda prikupljanja i smjera kretanja mogu biti u praksi jednostavni, ali i izuzetno složeni. S teorijskog i praktičkog stajališta najjednostavniji je slučaj komisioniranja cijelih paleta jednostrukim radnim ciklusom. Jednostruki radni ciklus (eng. *single command*, SC) podrazumjeva jedno odlaganje ili jedno izuzimanje po ciklusu. Problem je malo složeniji u sustavima s dvostrukim ciklusom. Dvostruki ciklus (eng. *dual command*, DC) sastoji se od jednog odlaganja i jednog izuzimanja palete, što smanjuje ukupno vrijeme kretanja. Minimizacija tog vremena temelji se na određenju redoslijeda prikupljanja definiranjem parova odlaganje-izuzimanje. Kod klasičnih paletnih i poličnih regalnih skladišta ovaj se problem temelji na jednostavnom određenju takvih parova za koje je ukupni put minimalan.

[16] U literaturi na njemačkom jeziku samo se regali s optokom u horizontalnoj ravnini nazivaju karuseli, dok se za regale s optokom u vertikalnoj ravnini koristi naziv paternoster. U literaturi na engleskom jeziku ne radi se terminološka razlika između ta dva osnovna tipa optočnih regala, te se za oba koristi naziv karusel..

[17] U literaturi se za skup načina obavljanja neke operacije koriste termini eng. *operating policies* ili *eng. operating strategies*. Neki konkretni način pak, ovisno o autoru, definira se kao eng. *policy, strategy, method, algorithm, procedure* ili *rule*, bez jasno definirane razlike između tih termina.

Prema *Klaić, Riječnik stranih riječi, Nakladni zavod MH, Zagreb, 1978.* su: metoda-način djelovanja, planski postupak za postignuće nekog cilja; procedura-način rada, postupak; algoritam-pravilan postupak pri računanju. U slučaju formaliziranog, korak-po-korak i najčešće matematičkog postupka, najčešće se koristi termin algoritam. Ako se radi o opisu načina izvršenja neke operacije, češći je termin metoda, dok se rjeđe koriste termini procedura ili pravilo. Tako se u uvom radu autor opredjelio za termin metoda, a u slučajevima matematički definirane metode koristi za termin algoritam. Da se naglasi usmjerenost metode na određenje načina obavljanja neke operacije u skladištu, naziva ih **skladišne metode**.

Kod automatiziranih visokoregalnih skladišta (*AS/RS*)[18] redoslijed dolazećih paleta (redoslijed odlaganja) je obično kompliciranо mijenjati [32], te se problem postavlja tako da je redoslijed odlaganja konstanta, a cilj je riješiti redoslijed izuzimanja. Za razliku od klasičnih skladišta, zbog simultanog kretanja automatizirane dizalice u dva smjera (kretanje dizalice opisuje se Čebiševim koordinatama), kod *AS/RS* sustava minimizira se vrijeme a ne put kretanja[19]. *Graves et al*. [45] analiziraju potencijal smanjenja puta komisioniranja s dvostrukim ciklusom za tzv. kvadratni oblik regala u vremenu[20], dok *Han et al*. [49] za opći oblik regala analiziraju performanse tri najčešće heurističke metode određivanja redoslijeda izuzimanja. Zaključuju da je primjenom pravilne metode određivanja redoslijeda izuzimanja moguće postići 5-8%-tno smanjenje vremena vožnje u dvostrukom ciklusu. *Lee & Schaefer* [50] predlažu algoritam koji, na temelju prezentiranih rezultata analize, rezultira optimalnim ili približno optimalnim rješenjem te s dodatnim smanjenjem vremena od 5% u usporedbi s heurističkim metodama. U slučaju da se pojavljuje slobodno vrijeme automatske dizalice između dva jednostruka ciklusa, određenje njene pozicije s ciljem maksimizacije protoka definirano je s tzv. "dwell-point" postupkom, što se obrađuje u *Peters et al.* [51]. Smanjenje vremena radnog ciklusa odlaganja/izuzimanja moguće je i primjenom eng. *multti-shuttle* dizalica, kod kojih je zbog dva ili tri para vilica moguće ostvariti četverostruke odnosno šesterostruke radne cikluse. Heurističke metode određenja redoslijeda odlaganja i izuzimanja, a s ciljem minimizacije vremena kretanja dizalice, za takve se sustave obrađuju u *Meller & Mungwatana* [52], *Keserla & Peters* [53] i *Malmborg* [54].

Najveći potencijal smanjenja vremena komisioniranja postoji u sustavima prema principu čovjek-robi s višestrukim radnim ciklusom (eng. *multi command,* MC). U takvim slučajevima čovjek, s ili bez transportnog sredstva, prikuplja više različitih materijala iz narudžbe, a cilj metode routinga je određenje "dobre" rute prikupljanja. Problem određivanja najkraće rute prikupljanja zapravo je poseban slučaj u literaturi poznatog problema trgovačkog putnika (eng. *traveling salesman problem*). Taj je problem teško rješiv, pa samo za jedan oblik klasičnog regalnog skladišta s prolazima postoji optimalni algoritam (*Rattlif & Rosenthal* [11]). U praksi se češće koriste razne heurističke metode, od kojih su metode routinga za klasična regalna skladišta prikazane i analizirane u poglavlju 3. ovog rada.

U visokoregalnim skladištima prikupljanje materijala višestrukim ciklusom obavlja se kombinacijom transportno sredstvo - radnik. Radnik-komisioner se nalazi na visokoregalnoj automatskoj dizalici koja se kreće od lokacije do lokacije unutar prolaza regala, pa se iz tog razloga takvi sustavi nazivaju eng. *person on-board S/RS* sustavi. I za ove sustave koriste se heurističke metode routinga. Najčešća u praksi je tzv. band heuristika [2]. Regal se podijeli u nekoliko traka (paralelnih dijelova), a visokoregalni viličar obavlja komisioniranje traku po traku uzduž *x*-osi, krećući se “cik-cak”. *Guenov & Reaside* [55] definirali su optimalni broj traka i izraze za procjenu vremena kretanja, kako za slučajno odlaganje tako i za odlaganje po zonama, u ovisnosti o površini regala i broju lokacija koje dizalica treba posjetiti. Rezultat primjene heurističkih metoda routinga je vrlo blizu optimalnom rješenju [32].

U sustavima s karuselima proces komisioniranja može se opisati izuzimanjem jednostrukim ciklusom, jer nakon izuzimanja jedinice materijala slijedi rotacija regala. Ključni problem minimizacije vremena komisioniranja u takvim sustavima je određenje redoslijeda izuzimanja [32], što je predmet rada u *Bartholdi & Platzman* [56].

[18] U literaturi se često *AS/R*S sustavi s dvostrukim ciklusom nazivaju “*interleaving* sustavi” [45], odnosno “*interleaving”* je sinonim za kretanje dizalice između mjesta odlaganja i mjesta izuzimanja [46].
[19] Način određivanja vremena radnog ciklusa u *AS/RS* sustavima prikazan je u *Bozer & White* [47]. Pregledni rad na temu modela *AS/RS* sustava dan je u *Sarker & Babu* [48].
[20] Kvadratni oblik regala u vremenu *AS/RS* sustava je onaj kod kojeg je vrijeme kretanja automatske dizalice od početka do kraja regala u vertikalnom i horizontalnom smjeru jednako.

2.4.2. Metode dodjeljivanja mjesta odlaganja

Podrazumjeva se da prije izuzimanja materijala iz skladišta u procesu komisioniranja isti moraju biti uskladišteni – odloženi na određene lokacije. Ova pretpostavka naglašava da sa stajališta vremena radnih ciklusa postoji povezanost između metoda izbora mjesta odlaganja i metoda komisioniranja. Do danas su razvijeni brojni načini dodjeljivanja lokacija pojedinim materijalima, a mogu se podijeliti u tri grupe [2]: slučajni raspored odlaganja (eng. *random storage*), dodijeljeni raspored odlaganja (eng. *dedicated storage*) i odlaganje po zonama (eng. *class-based storage*)[21], definirani kao metode dodjeljivanja mjesta odlaganja (eng. *storage policies* ili *storage assignment methods*).

Kod slučajnog rasporeda odlaganja materijala nema dodijeljenih (rezerviranih) lokacija pojedinim materijalima. Pri tome se koriste dvije metode. Metodom potpuno slučajnog rasporeda (eng. *purely randomized assignment - PRA*) materijal se odlaže na slučajno odabrano slobodno mjesto. Metodom najbliže slobodne lokacije (eng. *closest open location - COL*) materijal se odlaže u najbližu slobodnu lokaciju. U slučaju visoke popunjenosti skladišta i FIFO principa (eng. *First In - First Out*, prvi ulazi - prvi izlazi), nakon određenog vremena distribucija materijala po lokacijama skladišta i po ovoj metodi postaje slučajna, te se za praktičnu uporabu ove metode mogu smatrati ekvivalentnima [32], [58]. Glavna karakteristika metoda slučajnog rasporeda odlaganja je minimizacija potrebnog broja mjesta odlaganja, odnosno površine skladišne zone.

Kod dodijeljenog rasporeda odlaganja svaki materijal odlaže se na za to predviđeno/ rezervirano mjesto. Osim grupiranja materijala prema određenim karakteristikama i sličnosti, dodijeljeni raspored odlaganja najčešće za cilj ima minimizaciju vremena odlaganja/ izuzimanja. Metodom odlaganja prema protoku (eng. *full-turnover storage*) materijali s najvišim protokom odlažu se bliže ulaz/izlazu, i obrnuto. Jedna od najčešće korištenih metoda baziranih na minimizaciji kretanja, a prema tom kriteriju i najefikasnija [13], je tzv. COI (eng. *cube-per-order index*) metoda. Materijalima s manjim omjerom potrebnog broja lokacija i protoka dodjeljuju se lokacije bliže ulazu/izlazu, čime se minimizira kretanje pri odlaganju/izuzimanju. Negativna strana dodijeljenog rasporeda odlaganja je ta što je za svaki materijal potrebno rezervirati broj lokacija za maksimalnu količinu zaliha, čime je povećan ukupni potrebni broj lokacija u skladištu te je manja iskoristivost prostora u odnosu na situacije sa slučajnim odlaganjem. Povećanje potrebnog skladišnog prostora kod dodijeljenog rasporeda odlaganja ovisi o promjenama protoka i količine zaliha materijala (potražnje), i u nekim situacijama slučajni raspored odlaganja može rezultirati i do 30% manjim potrebni prostorom nego je to slučaj sa dodijeljenim rasporedom odlaganja [77].

Metode koje pokušavaju optimizirati odlaganje materijala prema oba kriterija spadaju u treću grupu postupaka dodjeljivanja lokacija – odlaganje po zonama, i zapravo su hibrid prva dva načina odlaganja. Materijali su podijeljeni u grupe (klase) na temelju protoka (ili prema vrijednosti COI). Svakoj klasi dodijeljena je određena zona odlaganja, a odlaganje materijala unutar zone je prema slučajnoj metodi. Na taj način ponovno se materijali s visokim protokom odlažu bliže ulaz/izlazu, čime se smanjuje vrijeme kretanja i koristi prednost dodijeljenog rasporeda odlaganja, dok se slučajnim odlaganjem unutar zona istovremeno koristi karakteristika slučajnog rasporeda odlaganja – minimalni zahtjevi za skladišnim prostorom. S obzirom na oba kriterija, odlaganje po zonama je negdje između dva osnovna načina odlaganja, ovisno o broju i veličini zona, kriteriju podjele u klase, zakrivljenosti ABC krivulje protoka, distribuciji protoka i vrsti radnog ciklusa. Broj zona u praksi je najčešće tri (i korespondira s tri klase dobijene ABC analizom), premda u nekim slučajevima veći broj zona

[21] I kod definiranja nazivlja pojedinih metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja pojavile su se nedoumice. Iako postoje pojedini prijedlozi nazivlja, npr. *Ferišak* [57] slučajni raspored odlaganja naziva *potpuno slobodno korištenje prostora*, dok dodijeljeni raspored odlaganja opisuje *sustavom smještaja robe na fiksna mjesta,* zbog jednostavnijeg povezivanja s originalnim nazivljem na engleskom jeziku autor ovog rada odlučio se za ovakav, nešto direktniji prijevod.

može dati dodatno smanjenje vremena kretanja [7]. Prema *Choe & Sharp* [60] i *Choe & Sharp* [61], uporaba metode odlaganja po zonama znatno smanjuje vrijeme kretanja (koje je približno optimalnom koje se postiže dodijeljenim rasporedom odlaganja), sa samo 3-5 klasa, dok su *Rosenblatt & Roll* [62], simulacijom na konkretnom primjeru, pokazali da je povećanje potrebnog prostora sa odlaganjem po zonama neznatno u odnosu na slučajni raspored odlaganja, sve dok broj zona nije veći od 6. Način određivanja optimalnih granica zona u regalu *AS/RS* sustava, za slučaj jednostrukog ciklusa, prikazali su *Rosenblatt & Eynan* [63]. *Guenov & Reaside* [55] pomoću simulacija analiziraju odlaganje po zonama u *AS/RS* sustavu za višestruki radni ciklus, dok *Van den Berg & Gademann* [46], također za *AS/RS* sustave, analiziraju odlaganje po zonama u kombinaciji s metodama routinga.
Kod karusela je problem nešto drugačiji. Naime, rotacijom karusela mijenja se udaljenost lokacije do ulaza/izlaza. *Lim et al.* [64] predlažu tzv. eng. *"organ pipe arrangment"* metodu rasporeda odlaganja, koja minimizira vrijeme rotiranja karusela. U slobodno odabranu lokaciju odlaže se materijal s najvećim protokom. Ostali materijali, poredani po padajućem redoslijedu prema protoku odlažu se naizmjenično lijevo i desno (iznad i ispod) od te početne lokacije.
Za odlaganje materijala u *VLMS* sustavima mogu se koristiti istovjetne metode odlaganja kao i za *AS/RS* sustave.

2.4.3. Metode organizacije komisioniranja

Na efikasnost komisioniranja bitan utjecaj imaju priprema, odnosno organizacija izvođenja aktivnosti komisioniranja. Odabir metode organizacije komisioniranja ovisi, međutim, o brojnim faktorima: karakteristikama proizvoda, ukupnom broju narudžbi, veličini narudžbe (broj proizvoda po narudžbi), broju proizvoda na skladištu, prioritetima,…, a poglavito o tome da li se radi o komisioniranju paleta, kutija ili manjih dijelova. Vrlo često se u skladištu koriste i kombinacije raznih načina organiziranja zbog različitih karakteristika materijala i narudžbi.

Osnovna metoda organiziranja komisioniranja je prema narudžbi (eng. *order-picking by order* [59], iako se u literaturi se za ovu metodu koriste i drugačiji nazivi, kao npr. eng. *basic order picking* [28] ili eng. *single order picking* [2]). Po ovoj metodi čovjek-komisioner prikuplja materijal sa samo jedne narudžbe, odnosno narudžba komisioniranja (eng. *picking order* ili *picking list*) jednaka je narudžbi korisnika (eng. *customer order*). Nakon što se prikupi sav materijal, preuzima se nova narudžba. Ova metoda pogodna je za slučajeve s manjim brojem narudžbi po jedinici vremena, ali s većim brojem izuzimanja po narudžbi. U slučaju manjeg broja izuzimanja po narudžbi vrlo je veliki udio vremena kretanja komisionera u ukupnom vremenu komisioniranja, dok s većim brojem narudžbi u jedinici vremena dolazi do većeg broja komisionera unutar područja komisioniranja te do usporavanja procesa zbog gužve. U takvim se slučajevima koriste druge dvije metode komisioniranja.

Komisioniranje grupe narudžbi (eng. *batch picking*) je metoda organizacije komisioniranja kojom se više narudžbi korisnika spoji u jednu narudžbu komisioniranja. Komisioner prikuplja u jednoj ruti materijal iz cijele grupe. Ovisno o broju izuzimanja po narudžbi korisnika, karakteristikama materijala i kapacitetu vozila, narudžba komisioniranja najčešće se sastoji od 4-12 narudžbi korisnika [28]. Na taj se način znatno smanjuje prosječno vrijeme kretanja pri komisioniranju u procesima s manjim brojem izuzimanja po narudžbi korisnika. Kako se istovremeno prikuplja materijal iz više narudžbi, iste je potrebno sortirati. Jedan od načina je da komisioner odvaja pojedine materijala odmah na vozilu – istovremeno komisioniranje i sortiranje (tzv. eng. *sort-while-pick* sustavi), ili se materijali naknadno sortiraju. Glavni problem u oblikovanju sustava komisioniranja grupa narudžbi je određivanje grupa na način da se minimizira vrijeme komisioniranja, za što se koriste brojne metode spajanja (metode grupiranja), detaljno objašnjene i analizirane u poglavlju 5.

Treća metoda organizacije komisioniranja je po zonama (eng. *zoning* ili *zone picking*). U komisioniranju prema ovoj metodi područje komisioniranja podijeljeno je u zone, i svakom

komisioneru dodijeljena je jedna zona. Svaki komisioner prikuplja materijal iz narudžbe u njegovoj zoni. Pri tome je problem, da se tako razdijeljeni materijali iz jedne narudžbe moraju spojiti prije izdavanja, riješen u praksi na dva načina, što definira dva tipa komisioniranja po zonama. Prvi tip komisioniranja po zonama je tzv. progresivno komisioniranje po zonama (eng. *progresive zoning* [32]), kod kojeg se prikupljeni materijal u jednoj zoni predaje komisioneru u slijedećoj zoni. Ovakvo komisioniranje naziva se i eng. *pick-and-pass* komisioniranje [7]. Drugi tip komisioniranja po zonama je tzv. paralelno komisioniranje (eng. *parallel picking* [7], a u literaturi se koriste i nazivi eng. *synchronized zoning* [32]) odnosno eng. *wave picking* [28]). Komisioneri u svim zonama počinju istovremeno prikupljati materijal iz narudžbe u njihovim zonama, te se nakon prikupljanja svi materijali spajaju u jednu narudžbu. Ovaj tip komisioniranja po zonama rezultira kraćim vremenom prikupljanja narudžbe, ali zbog gubitka integriteta narudžbe potreban je sustav za sortiranje [32]. U praksi je vrlo čest slučaj komisioniranja po zonama grupe narudžbi. Kombinacija ove dvije metode poglavito je pogodna u sustavima s velikim brojem narudžbi u jedinici vremena, a malim brojem izuzimanja po narudžbi. U oblikovanju komisioniranja po zonama najveći je problem određenja broja i veličine zona, s ciljem da se ostvari jednako opterećenje komisionera po zonama. Literatura o oblikovanju zona komisioniranja vrlo je rijetka, bez definiranih modela i metoda određivanja veličine zona. Jedna od alternativa je primjena dinamičkog dodjeljivanja komisionera zonama. Primjer ovakvog načina su tzv. "bucket brigade" [65], [66]. Primjena ove metode može se objasniti na primjeru komisioniranja unutar jednog prolaza. Prvi komisioner prima narudžbu i prikuplja dio materijala, te zatim prikupljeni materijal i djelomično ispunjenu narudžbu predaje slijedećem komisioneru u prolazu. On nastavlja s prikupljanjem, te nakon određenog vremena predaje sve slijedećem, i tako do zadnjeg komisionera u prolazu. Nakon što zadnji komisioner prikupi preostali materijal iz narudžbe, sav materijal (kompletno ispunjenu narudžbu) stavlja na konvejer. U nekom trenutku svaki komisioner radi na odvojenoj narudžbi. Nakon što zadnji završi prikupljanje i stavi materijal na konvejer, odlazi do prethodnog i uzima njegovu narudžbu. Ovaj pak odlazi do sebi prehodnog, i tako sve do prvog. Prvi uzima novu narudžbu. Na taj način ovaj sustav sam ostvaruje balans radnog opterećenja komisionera.

U sustavima komisioniranja malih dijelova primjenjuju se sve metode organizacije komisioniranja, ovisno o faktorima navedenim u početku ovog podpoglavlja. U sustavima komisioniranja kutija također je moguća primjena sve tri metode organizacije komisioniranja, no najčešće je kapacitet vozila limitirajući faktor u primjeni komisioniranja grupe narudžbi [67]. U sustavima komisioniranja paletnih jedinica komisioniranje je isključivo po metodi komisioniranja prema narudžbi[22] (jedna paleta), ali je također moguća organizacija rada viličara po zonama.

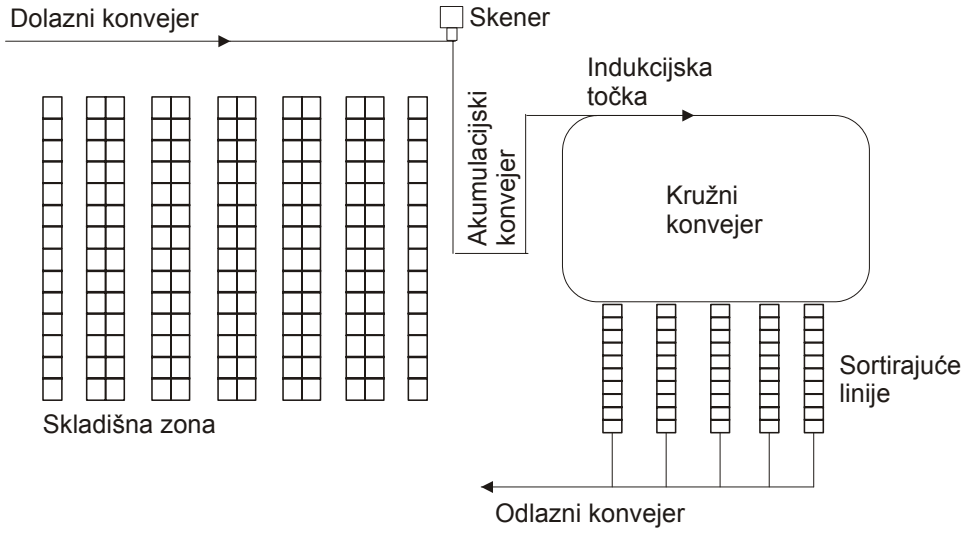
2.4.4. Sortiranje i ostale skladišne metode

Metode dodjeljivanja mjesta odlaganja, metode komisioniranja i metode routinga imaju direktan utjecaj na funkciju komisioniranja smanjenjem vremena kretanja pri komisioniranju. Procesu komisioniranja prethode i slijede drugi skladišni potprocesi. Načini izvođenja tih procesa također su definirani nekim metodama, koje, zbog međusobne veze potprocesa, imaju manje ili više utjecaja i na komisioniranje.

Metode u skladištu koje imaju najizravniju vezu s ukupnom funkcijom komisioniranja su metode sortiranja. Primjena organizacije komisioniranja po zonama i/ili komisioniranja grupe narudžbi neizostavno povlači za sobom potrebu sortiranja. Iako je to moguće u samom procesu prikupljanja (spomenuti *sort-while-pick* i *pick-and-pass* sustavi), alternativno je rješenje naknadno sortiranje pomoću sustava za sortiranje. U praksi, mnogi distribucijski centri koriste takav način komisioniranja i sortiranja [67]. Na slici 2-2 prikazana je općenita

[22] Podrazumjeva se da se ne koriste specijalni tipovi viličara s mogućnošću zahvata više paleta (npr. "*twin shuttle*" *AS/RS*), odnosno rješenja s naslagivanjem paleta.

shema sustava za sortiranje. Nakon prikupljanja materijala u zoni komisioniranja, isti se stavljaju na konvejer kojim odlaze do sustava za sortiranje. Nakon puštanja na kružni konvejer,materijali se skreću u određenu sortirajuću liniju. Ukoliko nekom materijalu nije dodjeljena sortirajuća linija, on recirkulira u sustavu do oslobađanja i dodjeljivanja prazne sortirajuće linije. Način puštanja materijala na kružni konvejer sustava za sortiranje određen je metodom puštanja vala (eng. *wave release strategy*). Efekti dvije metode – valovi s prekrivanjem i bez prekrivanja (eng. *overlaping* i *non-overlaping waves*) istraživani su u *Bozer et al.* [68]. Metodom puštanja vala bez prekrivanja, novi val materijala se pušta na kružni konvejer tek nakon što su svi materijali iz prethodnog vala sortirani. Suprotno, metodom puštanja vala s prekrivanjem, novi val se pušta na konvejer ranije (što se u istraživanju pokazalo kao bolja metoda). Način dodjeljivanja pojedine sortirajuće linije određenoj narudžbi određuje se metodom dodjeljivanja linije (eng. *line assignment strategy*). U istom su radu *Bozer et al.*[68] definirali i testirali četiri heurističke metode dodjeljivanja linija narudžbi. Dodatno, dvije od njih istražuje *Johnson* [67], te daje analitički izraz za procjenu vremena sortiranja u takvim sustavima. Algoritam za optimalno dodjeljivanje linija narudžbama, ovisno o zahtjevima punjenja kamiona u predajnoj zoni skladišta, prezentiran je u *Meller* [69]. Algoritam minimizira vrijeme recirkuliranja materijala na kružnom konvejeru.



Slika 2-2. Shematski prikaz sustava za sortiranje [54]

U slučaju da se prikupljaju materijali u različitim područjima u skladištu, tijekovi prikupljenog materijala moraju se spojiti. Način spajanja može se definirati nekom metodom spajanja prikupljenog materijala (eng. *merge policy*) [7]. Modeli troškova manualnih i automatiziranih sustava za sortiranje predmet su rada u *Rusell* [59].

U skladištima izvedenim s fizički odvojenim zonama skladištenja odnosno komisioniranja, od znatnog utjecaja na troškove (količinu rada, vrijeme povezano s komisioniranjem) ima veličina pojedine zone. Zbog visokih investicijskih troškova sustava za komisioniranje, te zbog linearne povezanosti veličine tog prostora s vremenom kretanja pri komisioniranju [70], u zoni komisioniranja nalaze se samo manje količine materijala[23]. Pri tome je problem određenje optimalne veličine prostora za komisioniranje (vrste i količine materijala), u literaturi poznat kao eng. *forward-reserve problem* [7],[70]. Heurističke metode, s ciljem minimizacije troškova komisioniranja, analizirane su u *Hackman & Platzman* [71], dok *Van den Berg et al.* [70] daju model minimizacije ukupnog rada komisioniranja i popunjavanja.

[23] Moguće je da se zbog smanjenja potrebnog prostora zone komisioniranja neki materijali (koji se izdaju samo u velikim količinama, i/ili je frekvencija izdavanja mala) nalaze samo u zoni skladištenja, pa se u toj zoni i komisioniraju.

Metode koji nemaju direktne veze s komisioniranjem, ali su važne za efikasno funkcioniranje skladišta su metode dodjeljivanja radnih zadataka pojedinim transportnim sredstvima, metode paletiziranja (načini oblikovanja paletnih jedinica), metode (cross-)dockinga, metode dodjeljivanja sredstava vanjskog transporta ulazima/izlazima skladišta) i dr. [24]

[24] Za pregled literature o pojedinim postupcima čitatelja se upućuje na *Roodbergen* [7].

3. METODE ROUTINGA

Određivanje redoslijeda prikupljanja i smjera kretanja jedan je od osnovnih zadataka metoda pri komisioniranju, s ciljem generiranja što kraćeg (krajnji cilj minimalnog) puta prikupljanja materijala (to je put kojega prijeđe komisioner obavljajući jedan radni ciklus). Za klasična regalna skladišta s prolazima razvijeno je nekoliko heurističkih metoda routinga, kao i algoritam za određivanje optimalne rute.

U nastavku ovog poglavlja daje se prikaz metoda routinga, te proračun puta uporabom određene metode s pretpostavkom slučajnog rasporeda odlaganja materijala u skladištu. Proračun puta komisioniranja nije za svaku metodu napravljen na temelju generirane rute, već su, korištenjem značajki pojedine metode, određivane te zbrojene pojedine komponente ukupnog puta. Tako određen ukupni put u potpunosti je jednak stvarnom ukupnom putu komisioniranja. Detaljnije objašnjenje proračuna puta komisioniranja dano je uz svaku metodu routinga posebice.
Pripadajući simulacijski programi za proračun prosječnog puta komisioniranja priloženi su u dodatku ovog rada, a za glavne varijable i parametre, kako u programima tako i u analitičkim modelima, korištene su sljedeće oznake[41]:

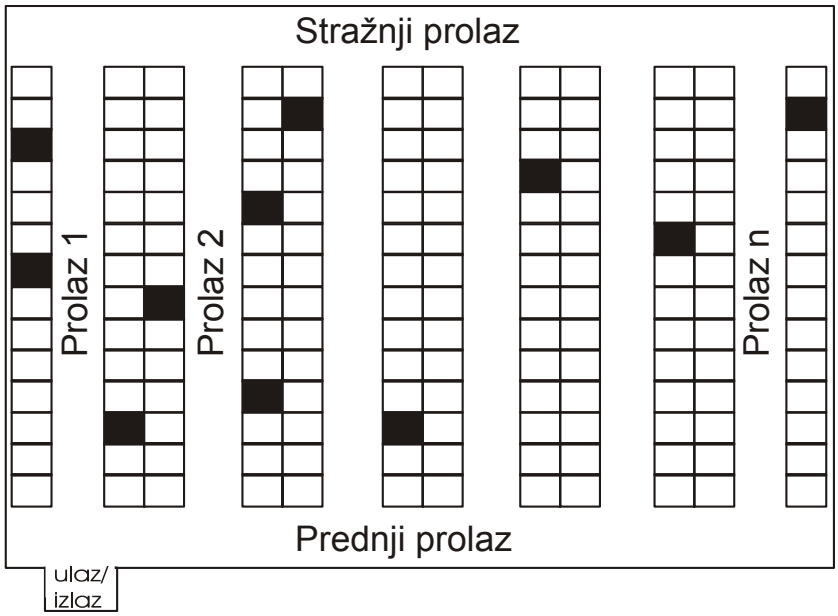
N – broj glavnih prolaza u skladištu
L – duljina glavnog prolaza, m
n – broj prolaza koji sadrži barem jednu traženu lokaciju
n_f – posljednji glavni prolaz koji sadrži barem jednu traženu lokaciju
l_f – udaljenost do najdalje lokacija u prolazu, m
w_t – širina prednjeg/stražnjeg prolaza, m
w_l – razmak između središta dva susjedna glavna prolaza, odnosno zbroj širine glavnog prolaza i dvostrukog regala, m
x – broj lokacija koje treba posjetiti prema narudžbi
L_t – "uzduž prolaza" komponenta puta komisioniranja, m
L_l – "preko prolaza" komponenta puta komisioniranja, m
L_{tot} – ukupni put komisioniranja jedne narudžbe, m

Analiza performansi metoda routinga napravljena je u ovisnosti o brojnim utjecajnim faktorima. Kako u realnosti postoje različiti prostorni rasporedi skladišta (zone komisioniranja), analiza performansi napravljena je za najčešći (osnovni) tip prostornog rasporeda skladišta (prikazan na slici 3-1.), što korespondira s drugim radovima i istraživanjima na ovom području [7], [10], [11], [72], [75].

To je skladište s paralelnim redovima regala s prolazima, s jednim centralnim ulazom/izlazom[42], te mogućnošću mijenjanja prolaza na početku ili kraju skladišta (prednji i stražnji prolaz). Prolazi između regala omogućuju kretanje u dva smjera unutar prolaza, ali komisioniranje može biti obavljeno s obje strane prolaza bez značajne promjene položaja (potrebe za dodatnim vremenom kretanja). Slika 3-1. ujedno predstavlja i jedan primjer narudžbe (svaki pravokutnik predstavlja skladišnu lokaciju, a crno su označene lokacije s kojih treba prikupiti materijal za tu narudžbu).

Na kraju ovog poglavlja prezentirani su analitički modeli određivanja prosječnog puta komisioniranja za tri metode routinga.

[41] U simulacijskim programima koristile su se i druge varijable, kako određene karakteristične za neku metodu te objašnjene u opisu proračuna metode, tako i mnoge pomoćne varijable.
[42] Ne smatra se obavezno i fizički ulaz/izlaz u objekt (zonu), već početna i krajnja točka rute prikupljanja. To je mjesto gdje komisioner uzima listu komisioniranja, i na kojem predaje prikupljeni materijal. U literaturi se ta mjesta označavaju kao eng. *input/output* (I/O), *pickup-delivery point* (PD) ili *depot*.

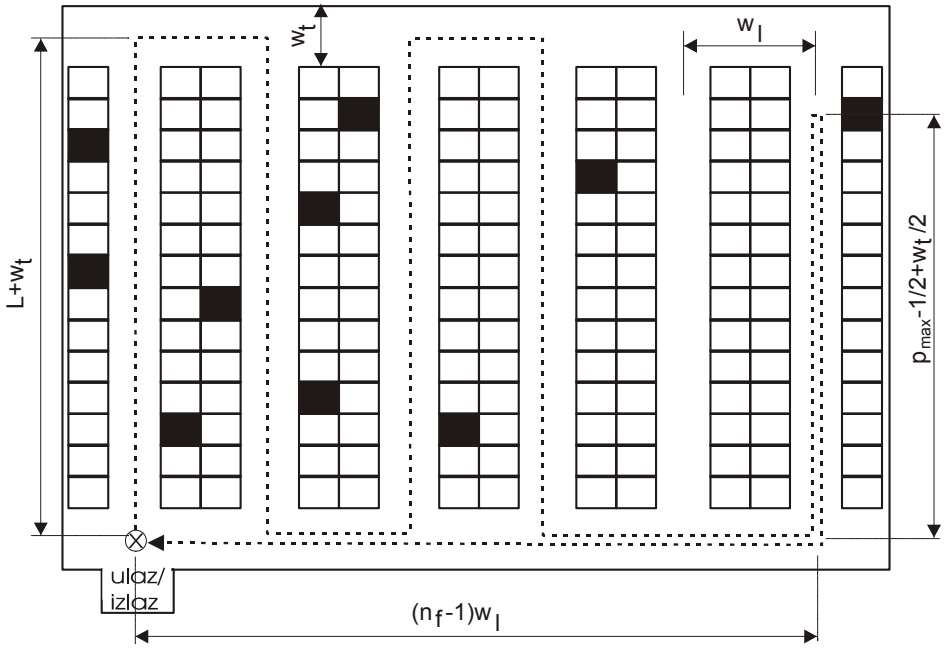


Slika 3-1. Shema osnovnog tipa prostornog rasporeda regalnog skladišta s prolazima

3.1. Definicije metoda routinga i algoritmi proračuna puta komisioniranja

Metoda S-oblika

Najjednostavniji način kretanja komisionera prilikom prikupljanja je korištenjem metode S-oblika (eng. *S-shape method*, u literaturi se ova metoda još naziva i eng. *transversal*). Svaki prolaz koji sadrži barem jednu lokaciju iz koje treba izuzeti materijal prolazi se cijelom duljinom. Ostali prolazi se izbjegavaju. Nakon što su svi materijali prikupljeni, komisioner se vraća prednjim glavnim prolazom do početne točke. Na slici 3-2. prikazan je primjer rute prikupljanja metodom S-oblika.

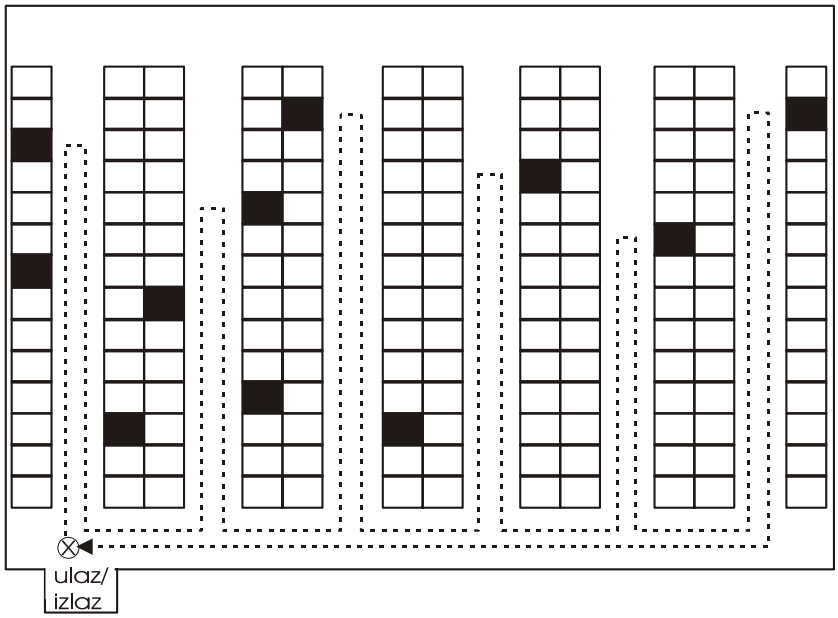


Slika 3-2. Shema skladišta i ruta kretanja (komponente puta) metodom S-oblika, primjer

Ova metoda je vjerojatno najčešće korištena metoda routinga u praksi [72]. Posebno je pogodna ukoliko se koristi transportno sredstvo koje ne može jednostavno mijenjati smjer kretanja unutar prolaza. Također je jedna od boljih metoda ukoliko transportno sredstvo zahtjeva relativno mnogo vremena za promjenu prolaza. Proračun duljine puta komisioniranja metodom S-oblika temelji se na određenju dvije komponente puta. U skladu s definicijom metode svaki prolaz koji sadrži traženu lokaciju prolazi se u cijelosti, te broj prolaza koji sadrže barem jednu traženu lokaciju (n) jednoznačno određuje tzv. "uzduž prolaza" (eng. *"within aisles"*) komponentu puta komisioniranja (L_t). Ta komponenta jednaka je umnošku broja prolaza kroz koje prolazi komisioner i duljine prolaza uključujući i širinu prednjeg odnosno stražnjeg prolaza (u stvarnosti pola širine prednjeg i pola širine stražnjeg prolaza, kao što je prikazano na slici 3-2[43]). Posljednji prolaz koji komisioner posjećuje (n_f) jednoznačno pak definira drugu, tzv. "preko prolaza" (eng. *"across aisles"*) komponentu puta komisioniranja (L_l). Ta komponenta jednaka je dvostrukoj udaljenosti (zbog povratka) centra tog prolaza od ulaza/izlaza, vidljivo također sa slike 3-3. Ovako definirani put komisioniranja potrebno je korigirati za slučaj da je broj prolaza koje komisioner posjećuje neparan. U tom slučaju se komisioner u posljednjem prolazu okreće, te ovisno o mjestu izuzimanja u prolazu radi veći ili manji put od duljine prolaza (na slici 3-2 prikazan je prvi slučaj), što je određeno pozicijom najdalje lokacije u tom prolazu (p_{max}).

Metoda povratka

Metoda povratka (eng. *Return method*) također je jedna od jednostavnijih metoda routinga. Ovom metodom komisioner ulazi u prolaze između regala isključivo iz prednjeg prolaza, te se nakon prikupljenog materijala okreće i izlazi na istoj strani. Primjer rute ovom metodom prikazan je na slici 3-3. Ova metoda jedina je moguća u skladištima sa samo jednim poprečnim prolazom. U situacijama s relativno širokim prolazima između regala, pa postoji potreba za dodatnim kretanjem komisionera od jedne do druge strane glavnog prolaza, ova metoda može dati bolje rezultate od ostalih metoda. U protivnom, uz slučajni raspored odlaganje materijala, ova metoda rezultira većim potrebnim vremenom kretanja od drugih metoda [10], [72].



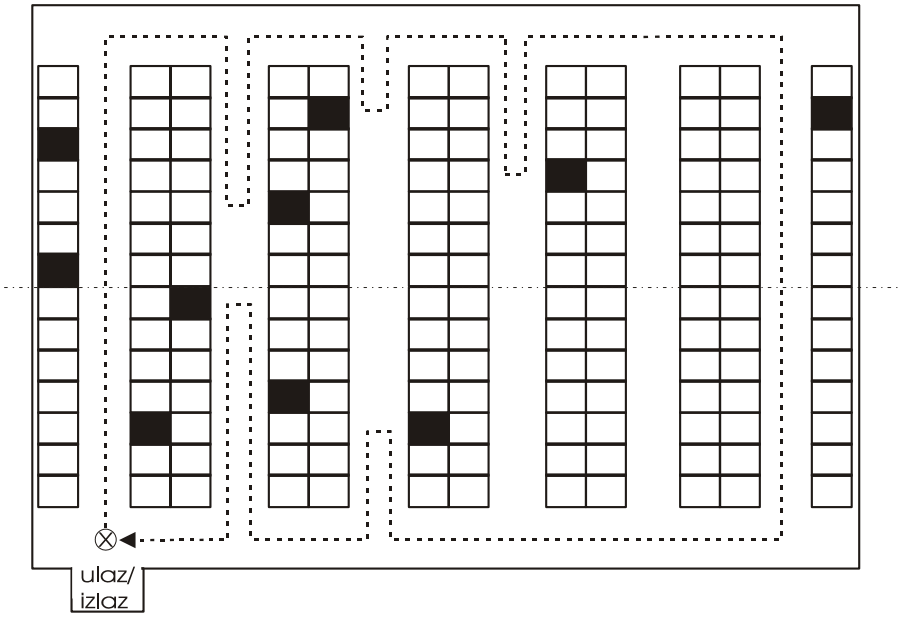
Slika 3-3. Shema rute kretanja metodom povratka, primjer

[43] Primjer narudžbe je za potrebe prikaza komponenti puta metodom S-oblika promijenjen.

Proračun puta komisioniranja pomoću metode povratka također se temelji na postojanju dvije komponente puta. Komponenta "preko prolaza" jednaka je kao i kod metode S-oblika. Komponentu "uzduž prolaza" čini zbroj puteva (uključujući i povratak) od prednjeg prolaza do zadnje tražene lokacije u svakom prolazu koji se posjećuje. Svaki taj put računa se kao put u posljednjem neparnom glavnom prolazu za metodu S-oblika.

Metoda srednje točke

Metodom srednje točke (eng. *Midpoint method*) skladište se "podijeli" u dvije polovice. Prikupljanje u prednjoj polovici obavlja se ulaskom komisionera iz prednjeg prolaza, dok se prikupljanje u stražnjoj polovici obavlja ulaskom komisionera iz stražnjeg prolaza. Samo se prvi i zadnji prolaz prođu cijelom duljinom. Primjer rute ovom metodom prikazan je na slici 3-4.



Slika 3-4. Shema rute kretanja metodom srednje točke, primjer

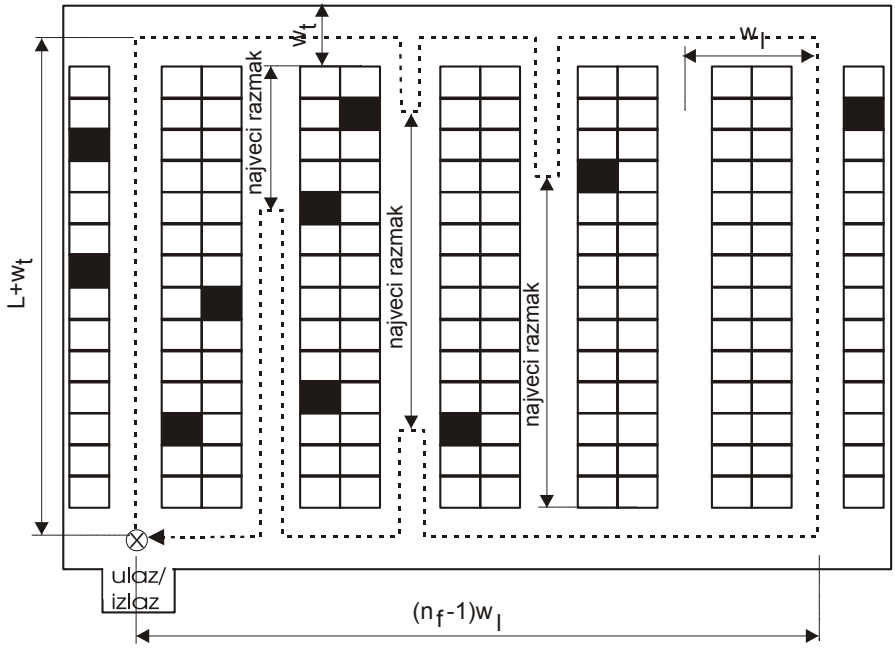
U proračunu puta komisioniranja metodom srednje točke komponenta "uzduž prolaza" određuje se za svaku polovicu skladišta jednako kao kod metode povratka, dok je komponenta "preko prolaza" identična kao u prva dva slučaja.

Metoda najvećeg razmaka

Metodom najvećeg razmaka (eng. *Largest Gap method*) komisioner, slično kao i kod metode srednje točke, prvi i zadnji prolaz prolazi u cjelosti. U ostale glavne prolaze ulazi i izlazi s iste strane, na način da se "najveći razmak" (eng. *largest gap*) ne prolazi. Primjer rute metodom najvećeg razmaka prikazan je na slici 3-5. Najveći razmak definira se kao najveća udaljenost između dvije susjedne tražene lokacije u prolazu, prve tražene lokacije u prolazu i prednjeg prolaza odnosno zadnje tražene lokacije u prolazu i stražnjeg prolaza. Ova metoda slična je metodi srednje točke, ali jednaka ili bolja od nje u svim situacijama, što je očigledno iz samih definicija.

Put komisioniranja metodom najvećeg razmaka se analogno kao i u prethodnim slučajevima sastoji od dvije komponente. I ovdje komponenta "preko prolaza" ovisi o udaljenosti posljednjeg prolaza koji se posjećuje i jednostavno se određuje kao i prethodnim

slučajevima. Proračun komponente "uzduž prolaza" nešto je kompliciraniji. U skladu s definicijom metode, prvi i posljednji glavni prolaz koji se posjećuju prolaze se u cjelosti. Za sve ostale prolaze koji se posjećuju potrebno je odrediti "najveći razmak", dio glavnog prolaza kroz koji komisioner ne prolazi. Pojednostavljeno, put kroz te prolaze jednak je dvostrukoj duljini prolaza umanjenoj za dvostruki "najveći razmak". Dodatnu komplikaciju čini potreba određenja da li je "najveći razmak" između prednjeg odnosno stražnjeg prolaza i neke tražene lokacije, ili između dvije susjedne tražene lokacije unutar prolaza (sve tri situacije prikazane su primjerom na slici 3-5.). Ovisno o tome, komisioner jednom ili dva puta ulazi i izlazi iz prolaza, što ima utjecaja na ukupni put (jednom ili dva puta prolazi širinu prednjeg/stražnjeg prolaza). Ta karakteristika ove metode postaje negativnost u sustavima kod kojih postoji potreba za dodatnim vremenom pri mijenjanju prolaza.

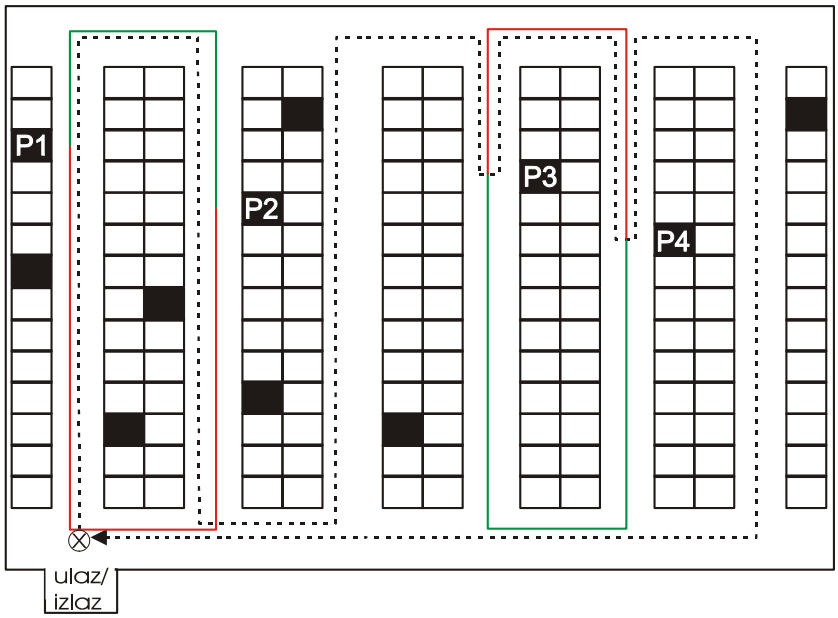


Slika 3-5. Shema skladišta i ruta kretanja (komponente puta) metodom najvećeg razmaka, primjer

Kompozitna metoda

Kompozitna metoda (eng. Composite method), relativno novija metoda predložena u *Petersen* [18], kombinira značajke dvije druge metode: metode S-oblika i metode povratka. Ona minimizira kretanje između dvije najdalje lokacije u dva susjedna prolaza, pa se isti, ovisno o poziciji lokacija s kojih treba prikupiti materijal, prolazi u cijelosti – transverzalno (kao metoda S-oblika) ili se radi okret i povratak (kao metoda povratka). Na slici 3-6. prikazana je ruta kretanja kompozitnom metodom. Udaljenost između najdaljih lokacija u prvom i drugom prolazu (P1 i P2) manja je u slučaju transverzalne rute (označeno zeleno) nego povratne rute (označeno crveno), pa se prvi prolaz prolazi u cjelosti. Obrnuto, udaljenost između najdaljih lokacija u četvrtom i petom prolazu (P3 i P4) manja je za slučaj povratne rute te se u četvrtom prolazu komisioner okreće i vraća u glavni prolaz s kojeg je krenuo.

Proračun puta komisioniranja ponovno se sastoji od određenja komponenti puta, s time da se za svaki prolaz određuje dio komponente "uzduž prolaza", ovisno o tome da li se on prolazi u cjelosti (duljina prolaza) ili se radi povratak (dvostruka udaljenost do najdalje lokacije). Komponenta "preko prolaza" identična je kao u prethodno opisanim slučajevima.



Slika 3-6. Shema rute kretanja kompozitnom metodom, primjer

Kombinirana metoda

Kombinirana metoda (eng. *Combined method)*, predložena u *De Koster* & *Roodbergen* [12], rezultira rutom vrlo sličnom ruti kompozitnoj metode. Za razliku od nje, kombinirana metoda ima kao dodatak komponentu dinamičkog programiranja, što omogućuje odluku na način da se gleda jedan prolaz unaprijed. Naime, iako je u jednom prolazu kraći put ako se prođe povratnom rutom, ova metoda može rezultirati prolazom kroz cijeli prolaz ukoliko se time dobije bolja početna pozicija za slijedeći prolaz. Time se ostvaruje i bolji ukupni rezultat.

Proračun puta komisioniranja kombiniranom metodom temelji se na određenju rute kretanja metodom dinamičkog programiranja. Određivanje rute počinje u prvom lijevom prolazu koji sadrži traženu lokaciju (p), te završava u zadnjem desnom prolazu s traženom lokacijom (r). Definira se L_j kao parcijalni put potreban da se posjete sve tražene lokacije u prolazima od p do j. Postoje dvije "klase ekvivalencije" tog parcijalnog puta:

L_j^a – parcijalni put koji završava na kraju prolaza j

L_j^b – parcijalni put koji završava na početku prolaza j

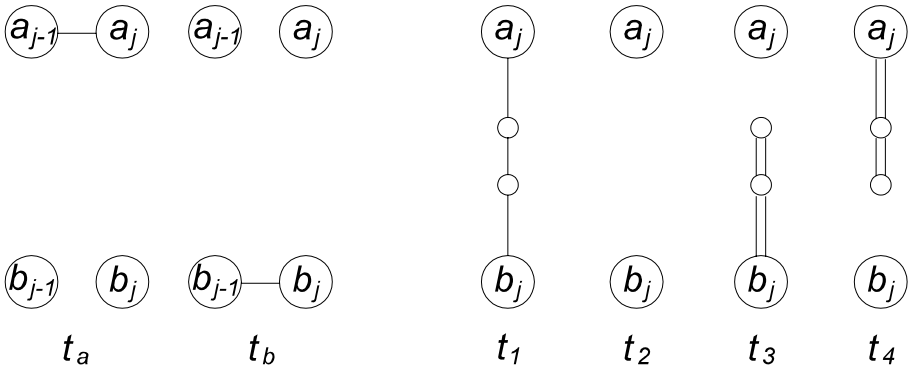
Također se definiraju dva načina prelaska (tranzicije) iz prolaza j-1 do prolaza j , prikazana na slici 3-7, kao:

t_a – put kroz stražnji glavni prolaz
t_b – put kroz prednji glavni prolaz

Nadalje, četiri načina (tranzicije) prikupljanja materijala unutar prolaza j , prikazana također na slici 3-7, su:

t_1 – put kroz cijeli prolaz
t_2 – nema ulaska u prolaz
t_3 – ulazak i izlazak iz prednjeg glavnog prolaza
t_4 – ulazak i izlazak iz stražnjeg glavnog prolaza

Tranzicija t_2 dozvoljena je samo ako u prolazu j nema traženih lokacija. Duljina puta tranzicija ovisi, kako o dimenzijalam skladišta, tako i o aktualnim položajima traženih lokacija unutar prolaza.



Slika 3-7. Tranzicije kombinirane metode routinga

Algoritam određenja rute kretanja je slijedeći:

Korak 1

L_p^a počinje u čvoru b_p , završava u čvoru a_p i sadrži tranziciju t_1

L_p^b počinje i završava u čvoru b_p i sadrži tranziciju t_3

Korak 2

Za svaki slijedeći prolaz ($p < j < r$) odrede se stanja L_j^a i L_j^b kako slijedi:
Ako prolaz j sadrži traženu lokaciju, onda su

$$L_j^a = \min\begin{Bmatrix} L_{j-1}^a + t_a + t_4 \\ L_{j-1}^b + t_b + t_1 \end{Bmatrix} , \; L_j^b = \min\begin{Bmatrix} L_{j-1}^b + t_b + t_3 \\ L_{j-1}^a + t_a + t_1 \end{Bmatrix}$$

Ako prolaz j ne sadrži niti jednu traženu lokaciju, onda su

$$L_j^a = L_{j-1}^a + t_a \;\; , \;\; L_j^b = L_{j-1}^b + t_b$$

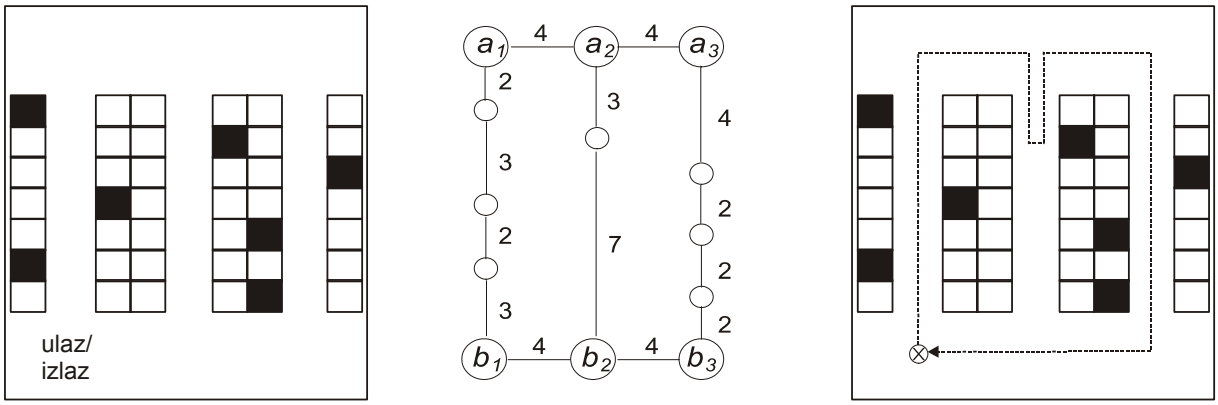
Korak 3

Za zadnji prolaz r određuje se stanje L_r^b kao

$$L_r^b = \min\begin{Bmatrix} L_{r-1}^b + t_b + t_3 \\ L_{r-1}^a + t_a + t_1 \end{Bmatrix}$$

Da se dobije cjelokupni put komisioniranja, rezultirajućem putu L_r^b potrebno je još dodati put od ulaza/izlaza do čvora L_p^b, te put od čvora L_r^b do ulaza/izlaza.

Opisani algoritam ilustriran je na primjeru[44] skladišta s regalima u tri prolaza i narudžbom od 7 dijelova, kao na slici 3-8 a).



Slika 3-8. Shema primjene dinamičkog modeliranja i rješenja kombiniranom metodom routinga; a) primjer skladišta s traženim lokacijama, b) reprezentacija skladišta pomoću grafa, c) optimalna ruta kretanja

Duljina prolaza je 7 metara (7 skladišnih lokacija po 1 m), a širina glavnih prolaza 3 m. Razmak između dva susjedna prolaza je 4 m. Slika 3-8 b) opisuje situaciju s čvorovima – traženim lokacijama te krajevima i završecima prolaza, te mogućim putevima.
U ovom je primjeru p =1 i r =3.

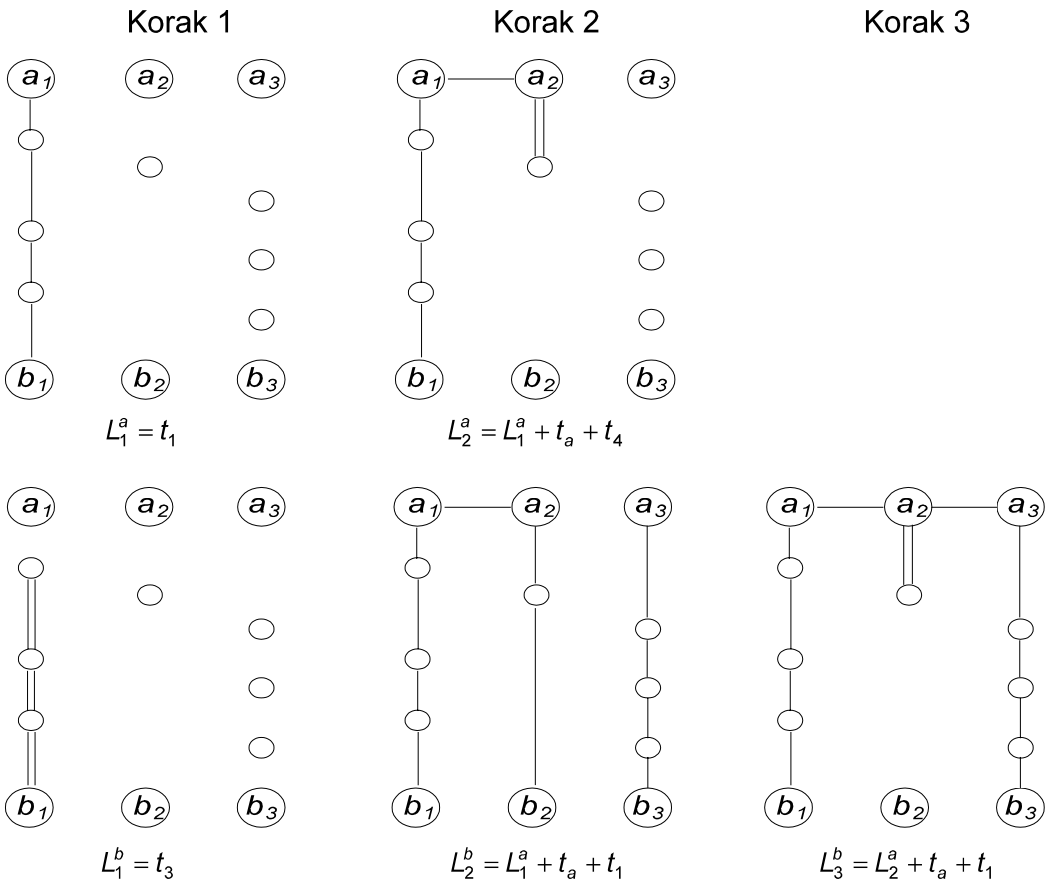
Korak 1: Postupak počinje s određenjem dva parcijalna puta, L_1^a i L_1^b.
L_1^a počinje u čvoru b_1 te završava u čvoru a_1 i sastoji se od tranzicije t_1, te iznosi L_1^a = 10. L_1^b počinje i završava u čvoru b_1 i sastoji se od tranzicije t_3, te iznosi L_1^b = 16.

Korak 2: Kako postoje dvije mogućnosti formiranja L_2^a kao $L_1^a + t_a + t_4$ =10+4+6=20 odnosno $L_1^b + t_b + t_1$ =16+4+10=30, odabire se manja od njih. Prema tome, $L_2^a = L_1^a + t_a + t_4$.
Također postoje dvije mogućnosti formiranja L_2^b kao $L_1^b + t_b + t_3$ =16+4+14=34 odnosno $L_1^a + t_a + t_1$ = 10+4+10=24, pa je $L_2^b = L_1^a + t_a + t_1$.

Korak 3: Također za formiranje parcijalnog puta L_3^b postoje dvije mogućnosti, gdje je $L_2^a + t_a + t_1$=20+4+10=34 manje od $L_2^b + t_b + t_3$ =24+4+12=40, pa je $L_3^b = L_2^a + t_a + t_1$.

Ovime je završeno određivanje parcijalnog puta dinamičkim programiranjem, čiji su koraci prikazani i grafički na slici 3-9. Dodavanjem puta od čvora b_3 do ulaza/izlaza dobije se ukupni put komisioniranja kombiniranom metodom koji iznosi L_{tot}= $L_3^b + 2 \cdot t_b$ = 42, a pripadajuća ruta prikazan je na slici 3-8 c).

[44] Ruta prikupljanja kombiniranom metodom u primjeru prikazanom na slici 3-1 identična je ruti dobijenoj pomoću kompozitne metode, prikazane na slici 3-6.



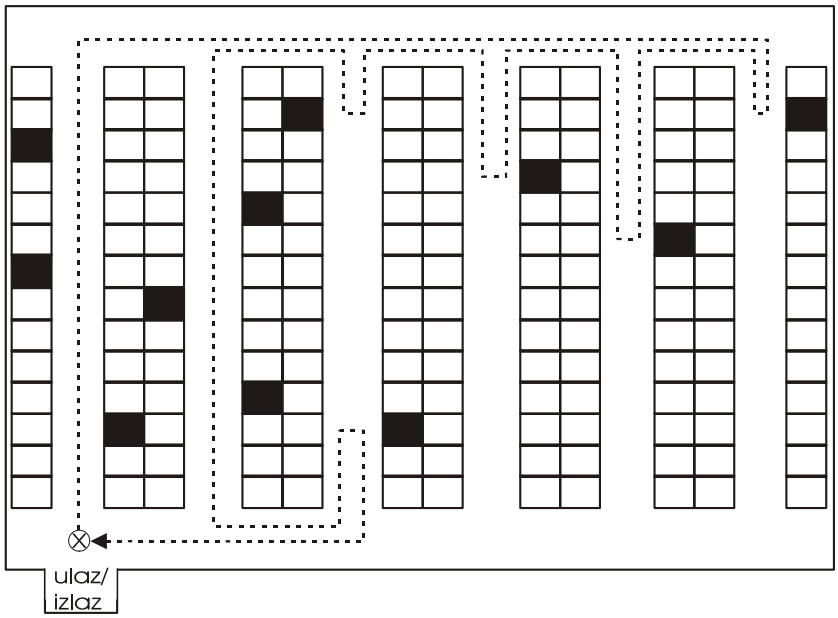
Slika 3-9. Vizualizacija koraka dinamičkog programiranja kombinirane metode

Optimalni algoritam

Sve do sada spomenute heurističke metode ograničavaju mogućnost određenja "najbolje" rute prikupljanja. Na primjer, prema metodi S-oblika komisioner treba proći cijeli prolaz, metoda najvećeg razmaka pak ne dozvoljava put kroz cijeli glavni prolaz. Iako nešto slobodnije, kompozitna i kombinirana metoda također su ograničene razmatranjem puta samo u promatranom, odnosno promatranom i slijedeće prolazu. Da se odredi najkraća moguća ruta komisioniranja potreban je algoritam sposoban razmotriti sve mogućnosti kretanja u i između glavnih prolaza. *Ratliff & Rosenthal* [11] razvili su algoritam za određivanje optimalne rute u pravokutnom, klasičnom regalnom skladištu s prolazima, koji za odabrani primjer rezultira rutom prikazanom na slici 3-10.

Skladište se reprezentira kao graf s čvorovima (traženim lokacijama te krajevima i završecima prolaza) te granama (svi mogući putevi kretanja komisionera)[45]. Problem određenja minimalne (optimalne) rute prikupljanja svodi se na određenje podgrafa skladišta takvog da je ukupna duljina grana minimalna. Podgraf skladišta konstruira se određenjem minimalnih parcijalnih podgrafa pomoću dinamičkog programiranja. Za detaljnije objašnjenje algoritma čitatelja se upućuje na *Ratliff & Rosenthal* [11]. Za određenje optimalne rute komisioniranja u skladištima s trećim glavnim prolazom koristi se modificirani prošireni algoritam, prezentiran u *Roodbergen* [7], dok su *De Koster & Van Der Poort* [8] razvili optimalni algoritam za slučaj decentraliziranog odlaganja.

[45] Kako se skladište modelira kao graf, u opisu se koristi terminologija iz teorije grafova (vidi npr. *Cvetković* [73].



Slika 3-10. Shema rute kretanja dobivene optimalnim algoritmom, primjer

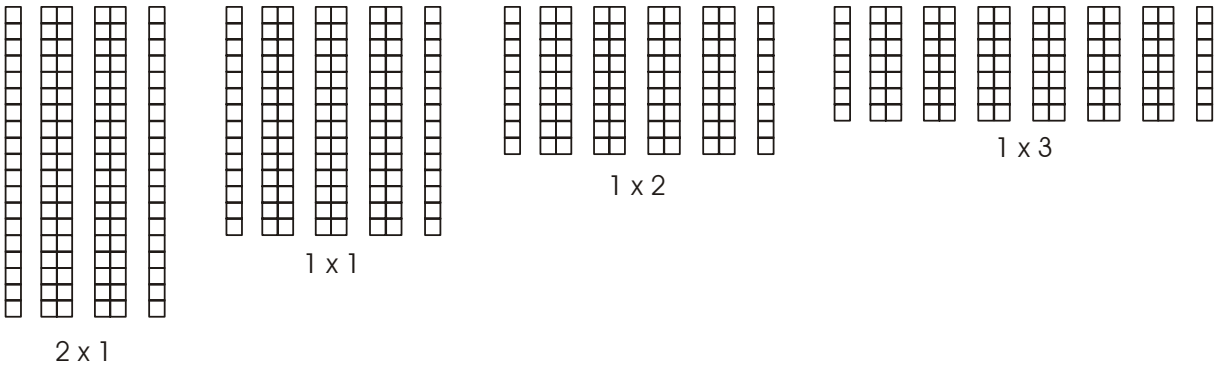
3.2. Analiza performansi metoda routinga

Da bi se odredile situacije u kojima je pojedina metoda prihvatljivija od druge, napravljena je analiza performansi za brojne različite situacije. No, ovdje se javlja pitanje zašto uopće upotrebljavati heurističke metode ako postoji optimalni algoritam koji rezultira najkraćim mogućim putem prikupljanja. Praćenje rute dobivene optimalnim algoritmom za čovjeka komisionera može biti vrlo otežano zbog "nelogičnog" rješenja (uočljivo sa slike 3.10). Rezultat određene heurističke metode, ovisno o situaciji, može biti vrlo blizu optimalnom rješenju, a pripadajuća ruta lakša za praćenje. Tako nije čudno da se isključivo heurističke metode danas koriste u praksi [9]. Zbog toga je analiza heurističkih metoda i usporedba s optimalnim algoritmom nužna.

Analiza performansi metoda routinga napravljena je za različite prostorne rasporede skladišta (varirajući broj i duljinu prolaza za zadani kapacitet), za različite veličine skladišta (kapacitet), te za različite veličine narudžbi (varirajući broj lokacija iz kojih treba izuzeti materijal). Također je napravljena analiza utjecaja položaja ulaza/izlaza na ukupni put komisioniranja, kao i širina prolaza (utjecaj tipa transportnog sredstva). Provedena analiza prikazana u ovom poglavlju napravljena je pod pretpostavkom slučajnog odlaganja materijala u skladištu (analiza performansi metoda routinga s dodijeljenim odlaganjem prikazana je u poglavlju 4.).

U određivanju prosječnog vremena vožnje pri komisioniranju korištena je simulacija. Veličina narudžbe varirana je s 5, 10, 15, 20, 30 i 40 lokacija po ruti. Analizirana su dva skladišta s obzirom na veličinu (kapaciteti skladišta od 144 i 576 lokacije po jednoj razini), sa po četiri različita prostorna rasporeda. Prostorni raspored skladišta odabran je tako da odnos duljine i širine skladišta iznosi otprilike 2:1, 1:1, 1:2 odnosno 1:3 (u literaturi tzv. 2x1, 1x1, 1x2 i 1x3 oblik regalnog skladišta [61], shematski prikazani na slici 3-11). Na ovakav način analizirano je 48 različitih situacija za svaku promatranu metodu routinga. Duljina prolaza zadana je u metrima, a zbog pojednostavljenja programiranja (a bez utjecaja na generalizaciju rješenja) pretpostavljena je duljina jedne lokacije 1 m. Širina prednjeg/stražnjeg prolaza odabrana je 3 m, a razmak između centara dva susjedna glavna prolaza 4 m. Kako naočigled metoda srednje točke u svakoj situaciji daje lošiji rezultat od metode najvećeg razmaka, ista se nije analizirala. Simulacijskim programom se za svaku situaciju generiralo 10000 slučajnih narudžbi, te je izračunat prosječni put komisioniranja. Programi su napravljeni u

programskom jeziku *Qbasic* i izvršavani na PC računalu[46]. Za određenje prosječnog puta komisioniranja mogu se koristiti i programi na internet stranicama *Erasmus Logistica Warehouse Website*[47]. Rezultati provedenih simulacija nalaze se u tablicama 3-1 i 3-2.



Slika 3-11. Shematski prikaz analiziranih oblika prostornog rasporeda skladišta

Prvi dio analize performansi posvećen je osnovnim heurističkim metodama (metoda S-oblika, metoda povratka i metoda najvećeg razmaka). Nakon toga daje se analiza performansi novih (naprednih) heurističkih metoda (kompozitna i kombinirana metoda) u odnosu na osnovne. Konačno se daje usporedba rezultata heurističkih metoda s rezultatima optimalnog algoritma.

3.2.1. Performanse osnovnih heurističkih metoda routinga

Metoda povratka pokazala se kao metoda koja rezultira najlošijim rezultatom u svim promatranim situacijama, što je vidljivo iz grafičkih prikaza na slikama 3-12. i 3-13. Iako su razlike male u situacijama s malim prosječnim brojem traženih lokacija po prolazima, u slučajevima s većim prosječnim brojem traženih lokacija po prolazu one dostižu i 60% povećanje puta u odnosu na metodu S-oblika.

Usporedba druge dvije osnovne heurističke metode routinga, metode S-oblika i metode najvećeg razmaka*,* potvrđuje već otprije poznatu činjenicu da jedna nadmašuje drugu ovisno o prosječnom broju traženih lokacija po prolazu [9]. Granična vrijednost ovisi o situaciji, a u provedenim situacijama bila je u rasponu od 2,85 do 3,5[48]. U slučaju malih narudžbi metoda najvećeg razmaka će rezultirati kraćim putevima od metode S-oblika (u nekim simuliranim situacijama i do 15%), dok će u slučaju velikih narudžbi, a uz uvjet manjeg broja prolaza, metoda S-oblika ostvariti kraći put komisioniranja (također do iznosa 15% u nekim promatranim situacijama). Međutim, kod skladišta s 3 prolaza vidljivo je znatno odstupanje od gore opisanih rezultata. Nakon provedene dodatne analize simulacijama (varirajući broj prolaza uz konstantnu veličinu narudžbe, kao što pokazuje slika 3-14), vidi se utjecaj neparnog broja prolaza na metodu S-oblika. Razlog za to leži u činjenici da će u većini slučajeva komisioner u zadnjem prolazu morati raditi povratnu vožnju na način kako je prikazano i objašnjeno uz sliku 3-2.

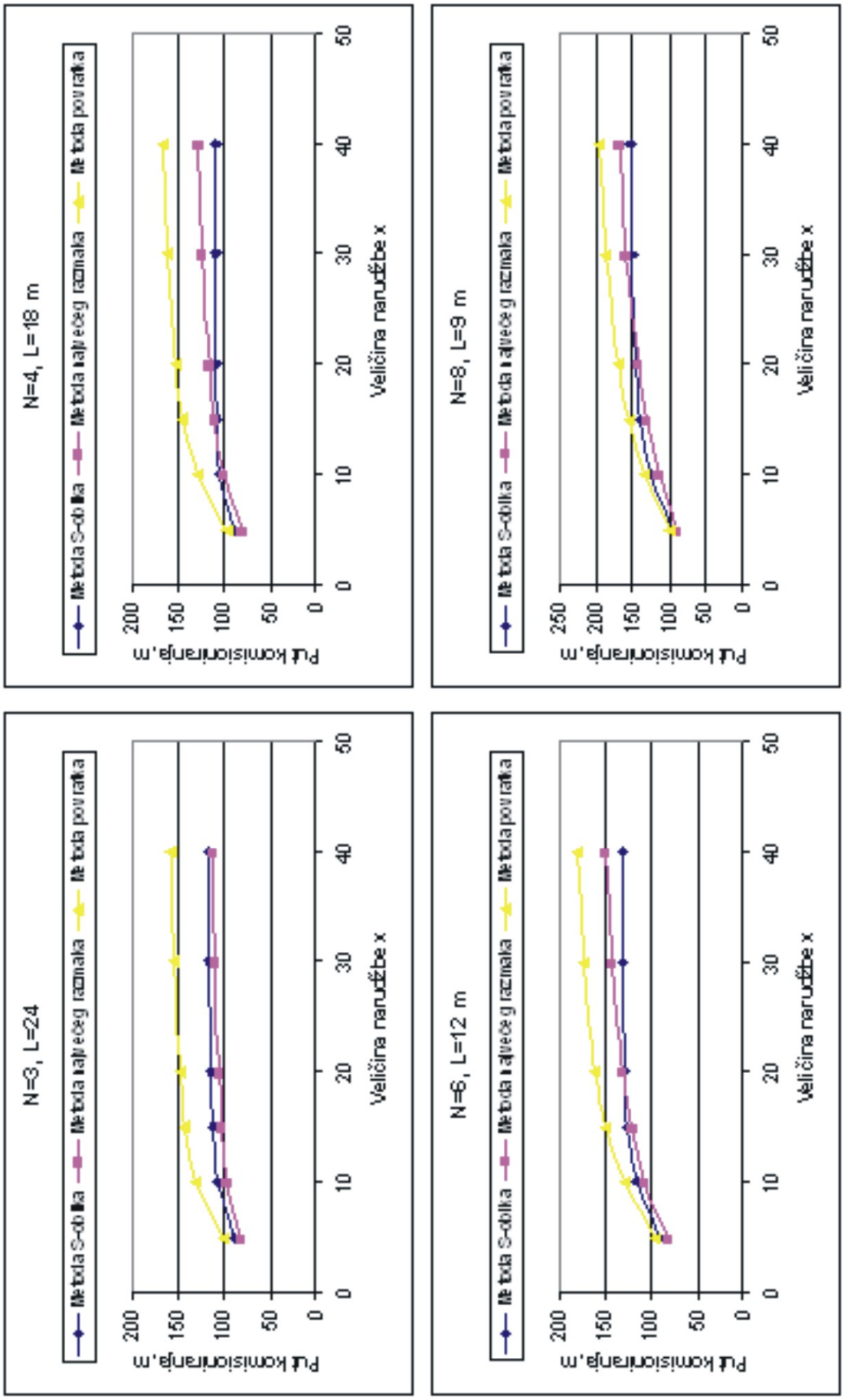
[46] Za 10000 ponavljanja u simulacijama, izračunati interval povjerenja za razinu povjerenja od 99% iznosio je $\pm$ 1,5% od dobivene prosječne vrijednosti.
[47] http://www.fbk.eur.nl/OZ/LOGISTICA/
[48] U poglavlju 3.3 pokazano je da je granična vrijednost fiksna u svim situacijama ako se izražava u prosječnom broju traženih lokacija po očekivanom broju posjećenih prolaza skladišta, *x/n* (vidi str. 43).

Tablica 3-1. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe i prostornom rasporedu skladišta (manje skladište)

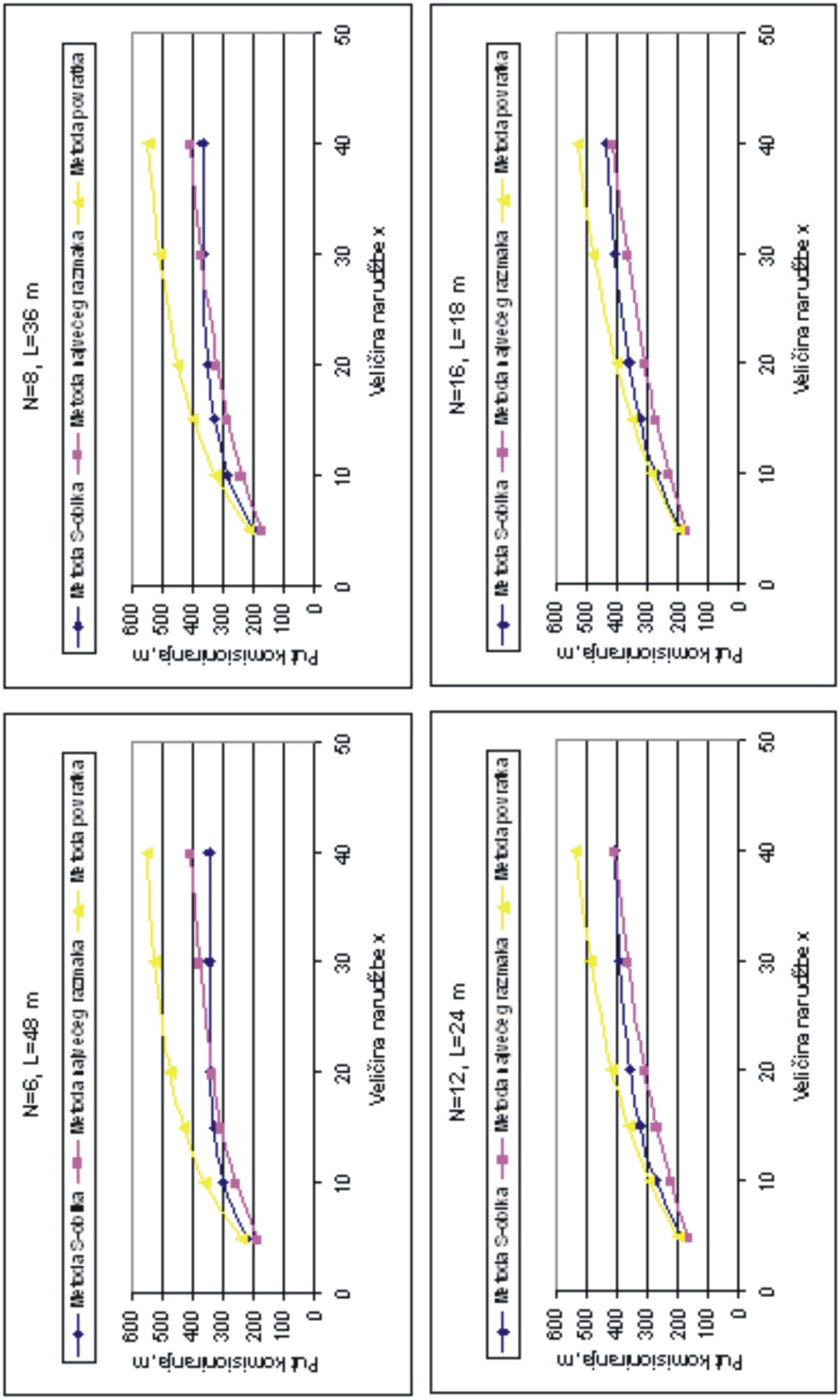
Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe, *x*	Metoda routinga	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24 m	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18 m	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12 m	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9 m
5	*Metoda S-oblika*	88,2	88,3	90,3	96,2
10		106,4	104,7	115,9	124,8
15		111,8	107,4	125,2	139,0
20		114,1	107,9	128,4	146,2
30		116,4	108,0	129,8	150,8
40		117,4	108,0	130,0	151,7
5	*Metoda povratka*	100,6	95,8	94,3	98,9
10		129,8	128,8	129,4	134,2
15		141,9	143,9	149,2	155,7
20		148,2	152,6	161,0	169,7
30		154,9	161,2	173,7	186,3
40		158,1	165,6	180,4	195,1
5	*Metoda najvećeg razmaka*	81,1	79,4	81,8	88,8
10		95,8	99,8	106,1	114,2
15		102,0	110,0	120,7	131,0
20		105,4	116,1	130,5	142,7
30		109,6	123,5	142,5	158,3
40		112,1	127,8	149,8	167,9
5	*Kompozitna metoda*	81,7	80,1	82,7	89,5
10		103,7	102,7	109,4	117,5
15		111,2	107,2	122,5	166,5
20		114,0	108,0	127,7	142,9
30		116,3	108,0	129,9	150,3
40		117,3	108,0	130,0	151,8
5	*Kombinirana metoda*	79,8	78,8	81,2	88,8
10		97,1	99,1	106,3	114,9
15		104,6	105,6	118,1	129,9
20		108,4	107,4	124,3	138,6
30		112,5	108,0	128,9	147,4
40		114,7	108,0	129,8	150,5
5	*Optimalni algoritam*	74,5	72,0	76,8	84,7
10		89,4	92,1	99,9	109,2
15		96,7	102,0	112,7	124,1
20		101,5	106,1	120,3	133,7
30		106,8	107,9	127,2	144,3
40		110	108,0	129,4	148,8

Tablica 3-2. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe i prostornom rasporedu skladišta (veće skladište)

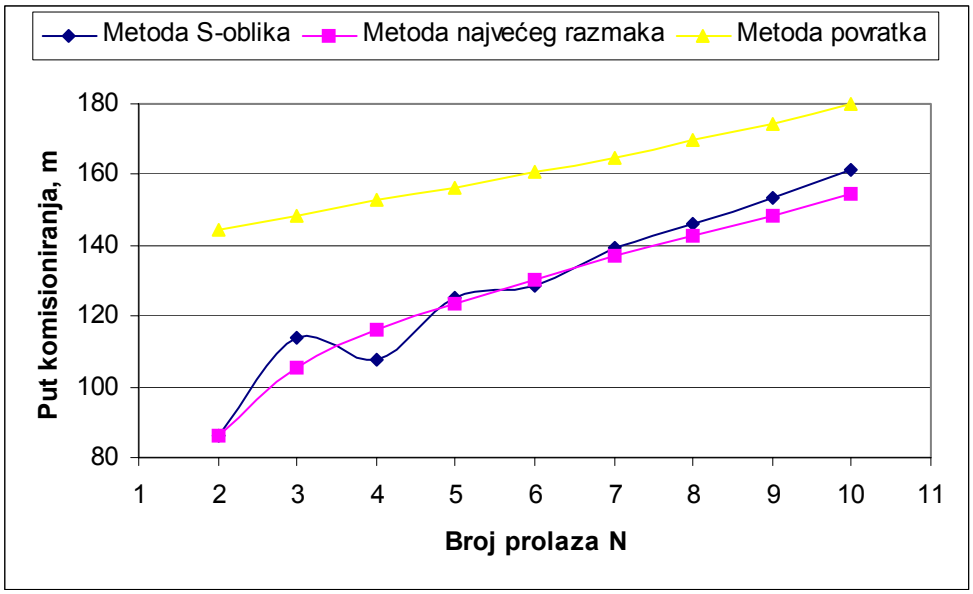
Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe*x*	Metoda routinga	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*Metoda S-oblika*	222,1	203,1	190,4	195,5
10		302,1	287,1	272,8	272,7
15		332,2	329,6	324,0	324,6
20		341,8	351,6	356,5	362,3
30		345,5	364,6	391,7	408,7
40		345,9	367,4	405,2	433,2
5	*Metoda povratka*	239,5	213,4	196,1	198,7
10		358,6	324,4	292,7	285,3
15		427,1	397,0	362,4	350,3
20		472,4	447,2	415,6	402,4
30		522,4	507,7	489,1	478,7
40		550,3	544,6	534,6	530,2
5	*Metoda najvećeg razmaka*	186,9	171,4	165,6	174,9
10		257,6	238,6	225,7	230,7
15		303,6	286,8	271,9	273,6
20		336,3	322,7	309,2	309,6
30		378,3	373,1	365,3	366,8
40		405,2	406,6	406,3	409,7
5	*Kompozitna metoda*	191,2	175,2	168,9	177,0
10		274,7	254,7	240,5	242,7
15		319,6	305,6	291,3	292,2
20		338,6	336,2	329,0	329,7
30		346,2	362,9	375,7	384,3
40		346,2	368,0	398,6	417,1
5	*Kombinirana metoda*	187,4	173,1	166,9	176,2
10		262,8	246,5	235,3	239,3
15		304,3	292,4	282,4	285,0
20		325,6	320,8	316,5	319,7
30		342,1	350,9	359,9	369,5
40		345,2	362,6	383,8	400,4
5	*Optimalni algoritam*	168,2	156,0	155,2	166,9
10		232,8	219,4	213,3	221,6
15		276,3	264,9	257,5	263,1
20		303,3	296,0	291,2	296,8
30		331,3	338,3	338,2	346,8
40		341,9	352,3	366,7	380,6



Slika 3-12. Grafovi performansi osnovnih heurističkih metoda routinga (manje skladište)



Slika 3-13. Grafovi performansi osnovnih heurističkih metoda routinga (veće skladište)



Slika 3-14. Utjecaj neparnog broja prolaza na routing metodu S-oblika, primjer (x=20, manje skladište)

Negativni utjecaj neparnog broja prolaza u skladištu na performanse metode S-oblika opada s povećanjem broja prolaza.

3.2.2. Performanse naprednih heurističkih metoda routinga

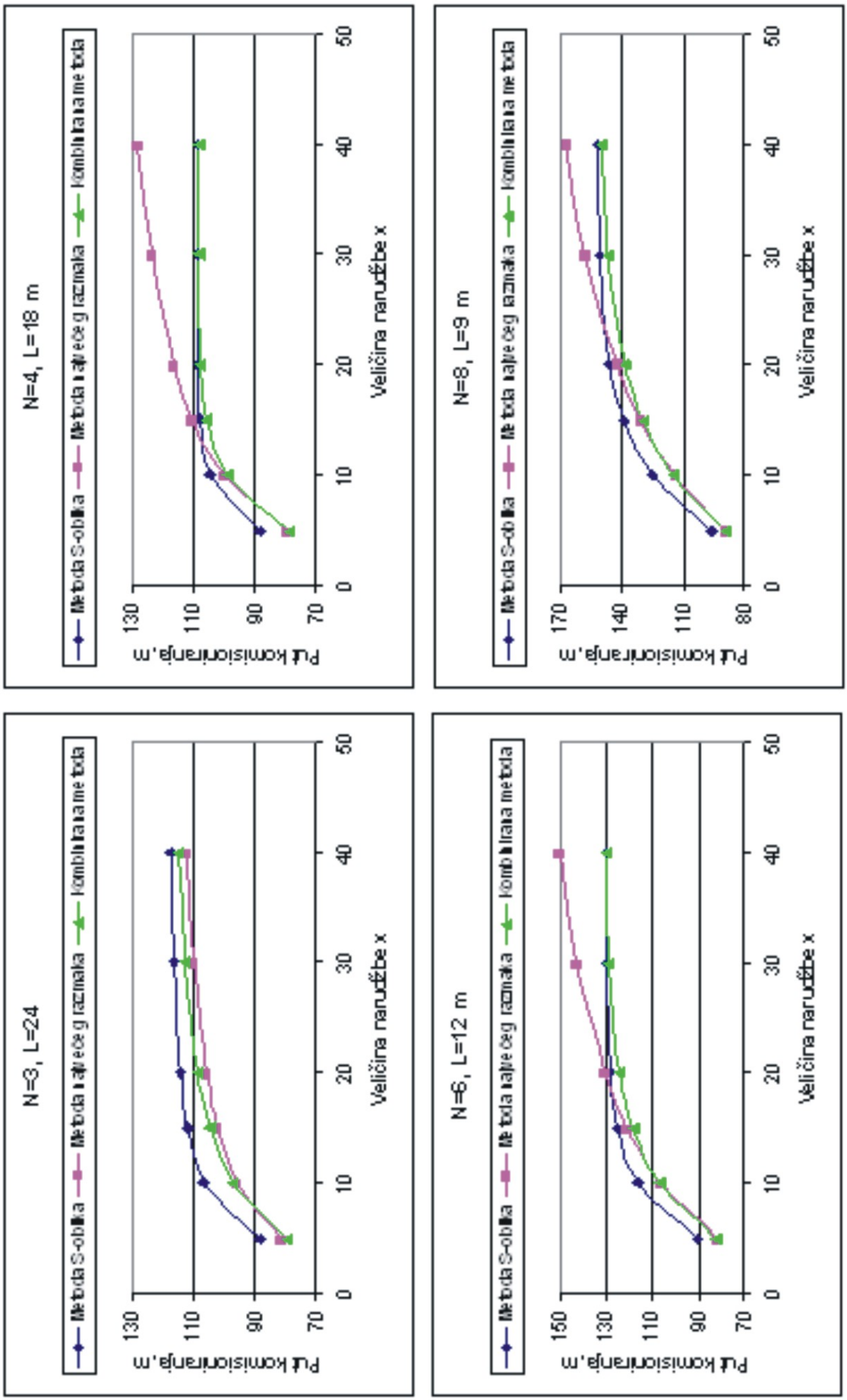
Uvidom u rezultate provedenih simulacija prikazanih u tablicama 3-1 i 3-2 vidljivo je da kombinirana metoda u svim situacijama rezultira kraćim putem komisioniranja od kompozitne metode. Ovakav rezultat ne iznenađuje jer, kao što je rečeno u opisu metoda, kombinirana metoda zbog svoje komponente dinamičkog programiranja minimizira put u promatrana dva susjedna prolaza, dok je kompozitna metoda ograničena na minimizaciju puta samo u promatranom prolazu[49]. Zbog toga se u nastavku analizira samo kombinirana metoda.

Kako je kombinirana heuristička metoda kombinacija metode S-oblika i metode povratka, bilo je za očekivati da će u svim situacijama rezultirati i boljim rezultatom od tih osnovnih metoda. Rezultirajuća ruta je i složenija za praćenje, pa prevaga za njenu primjenu u praksi može biti ostvareni iznos skraćenja puta. S druge pak strane, pitanje je da li kombinirana metoda u situacijama manjih veličina narudžbi anulira prednost metode najvećeg razmaka koju ona ima nad metodom S-oblika.

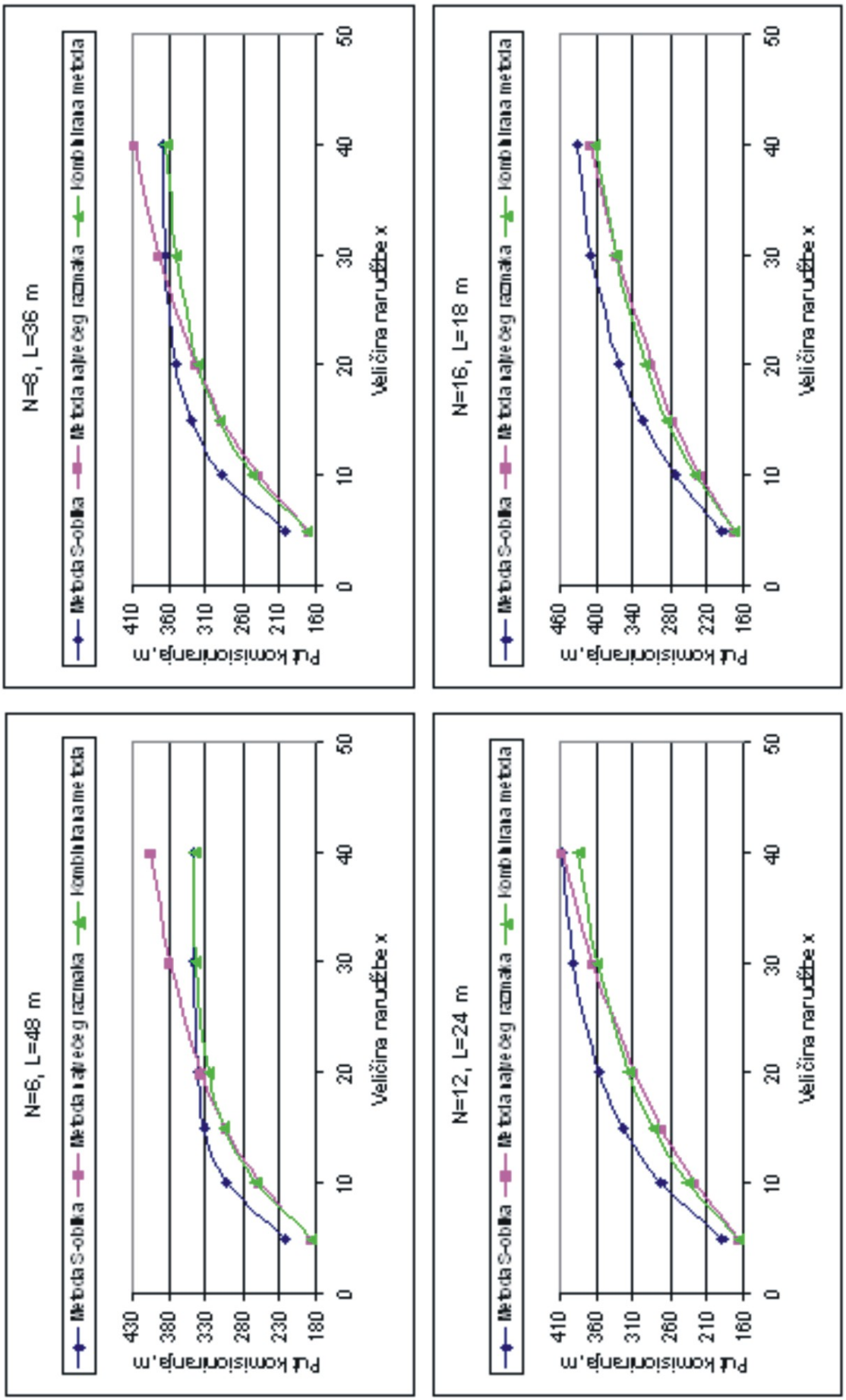
Slike 3-15 i 3-16 grafički prikazuju rezultate provedenih simulacija. Vidljivo je da u situacijama s relativno velikim narudžbama[50] ($x/N>5$) kombinirana metoda rezultira približno jednakim putem komisioniranja kao i metoda S-oblika. Za manje vrijednosti x/N moguće je smanjiti put komisioniranja do 15%. To je zapravo područje u kojem i metoda najvećeg razmaka rezultira manjim putem komisioniranja od metode S-oblika u istom iznosu, pa se može zaključiti, a što potvrđuju i grafikoni, da za manje vrijednosti x/N kombinirana metoda rezultira približno istim putem komisioniranja kao i metoda najvećeg razmaka.

Zbog osjetljivosti metode S-oblika na neparan broj prolaza, isto je provjereno i za kombiniranu metodu. Analiza, predočena grafikonom na slici 3-17, pokazuje određen utjecaj neparnog broja prolaza i na ovu metodu, ali znatno manji nego je to slučaj s metodom S-oblika. Također, taj utjecaj mnogo brže opada s povećanjem broja prolaza.

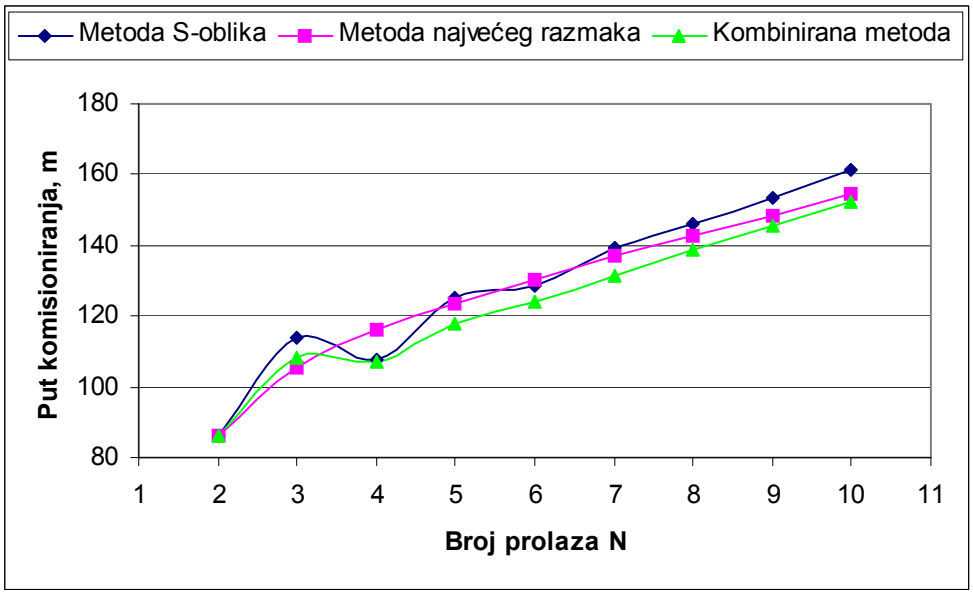
[49] Pri tome se misli na minimizaciju puta uz uvjet transverzalnog ili povratnog kretanja.
[50] Karakteristična vrijednost nije veličina narudžbe x, već prosječan broj traženih lokacija po prolazu x/N.



Slika 3-15. Grafovi performansi kombinirane metode routinga u usporedbi s osnovnim heurističkim metoda routinga (manje skladište)



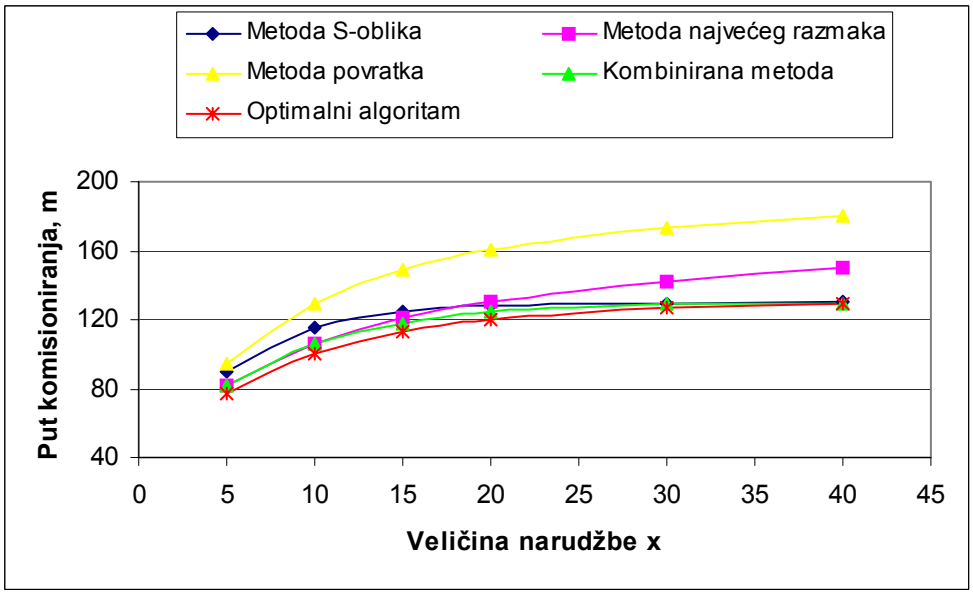
Slika 3-16. Grafovi performansi kombinirane metode routinga u usporedbi s osnovnim heurističkim metoda routinga (veće skladište)



Slika 3-17. Utjecaj neparnog broja prolaza na kombiniranu metodu routinga, primjer (x=20, manje skladište)

3.2.3. Usporedba performansi heurističkih metoda i optimalnog algoritma

Već je rečeno da se usprkos postojanju optimalnog algoritma danas u praksi koriste isključivo heurističke metode. Rezultat određene heurističke metode može biti vrlo blizu optimalnom rješenju, a pripadajuća ruta lakša za praćenje. Rezultati provedenih simulacija (na slici 3-18 grafički su ilustrirani rezultati jedne promatrane situacije) to i potvrđuju.



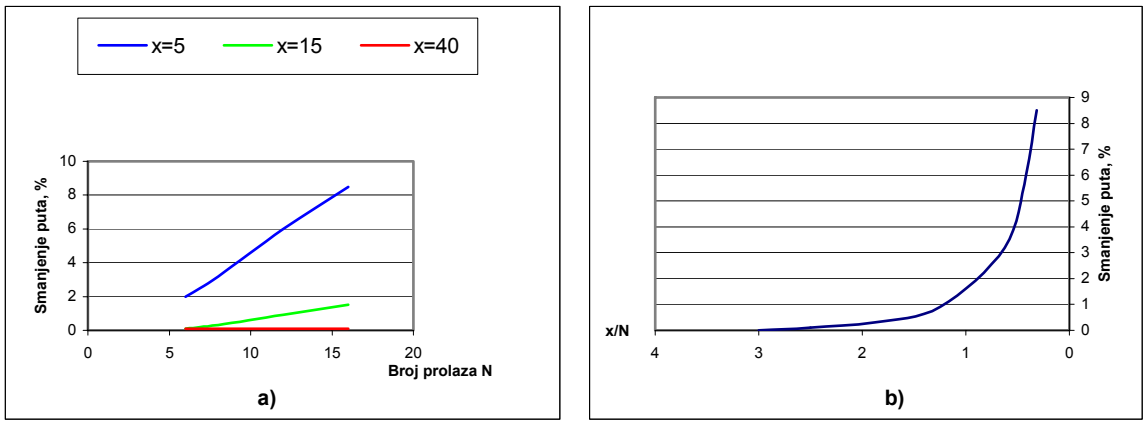
Slika 3-18. Prikaz usporedbe puta komisioniranja optimalnim algoritmom i heurističkim metodama (primjer: *N*=6, *L*=12)

Rezultati kombinirane metode u većini situacija približni su rezultatima optimalnog algoritma. Prije je pokazano da u situacijama s relativno velikim narudžbama metoda S-oblika rezultira jednakim putem komisioniranja kao i kombinirana metoda, dok u situacijama s manjim narudžbama takve rezultate postiže metoda najvećeg razmaka. Shodno tome, može se konstatirati da je uporaba i tih osnovnih heurističkih metoda prihvatljiva ukoliko im se primjena ograniči na područja njihovih preferencija. Povećanje puta primjenom dobro

odabrane heurističke metode u odnosu na optimalni algoritam u većini je situacija samo par postotaka. Iznimke, na koje treba obratiti pozornost, su situacije s vrlo malim brojem traženih lokacija po broju prolaza *x/N* te većom duljinom prolaza *L*, gdje povećanja mogu iznositi i 20%. S druge strane, pogrešno odabrana heuristička metoda može rezultirati znatnim povećanjem puta komisioniranja u odnosu na minimalni put (u nekim je situacijama npr. metoda povratka rezultirala i do 50% većim putem od optimalnog).

3.2.4. Utjecaj položaja ulaza/izlaza te širine prolaza na put komisioniranja

Položaj ulaza/izlaza ne mora biti u kutu skladišta, kao što je to pretpostavljeno u dosadašnjim analizama. Vrlo je čest slučaj položaja ulaza/izlaza na sredini širine skladišta. Logički se može zaključiti, na temelju definiranih načina proračuna puta komisioniranja metodama routinga (opisano u podpoglavlju 3.1), da položaj ulaza/izlaza ne utječe na "uzduž prolaza" komponentu puta, ali ima utjecaja na "preko prolaza" komponentu puta, pa se položajem ulaza/izalaz u sredini može dodatno smanjiti put komisioniranja u odnosu na položaj u kutu skladišta [10]. Nakon provedenih simulacija vidljivo je da apsolutni iznos tog smanjenja puta ovisi samo o veličini narudžbe i obliku skladišta, dok postotno smanjenje ukupnog puta komisioniranja ovisi i o duljini prolaza, kao i o odabranoj metodi routinga. Postotak smanjenja ukupnog puta raste povećanjem širine skladišta, a pada povećanjem veličine narudžbe (vidljivo sa slike 3-19 a), odnosno može se prikazati kao ovisnost o prosječnom broju traženih lokacija po prolazu *x/N* (slika 3-19 b). Za vrijednosti *x/N*>3 taj je postotak praktički nula, *x/N*>1 ne prelazi 2%, dok je značajan samo kod jako širokih skladišta (veliki broj redova) s malim narudžbama, gdje iznosi do 10%[51].



Slika 3-19. Postotak smanjenja puta komisioniranja promjenom položaja ulaza/izlaza (metoda routinga S-oblika, veće skladište)

Širina prolaza između regala, razumljivo je, također ima utjecaja na ukupni put komisioniranja. Međutim, apsolutna promjena ukupnog puta komisioniranja jednaka je za sve metode routinga. Prema definicijama metoda to nije slučaj i sa širinom glavnih prolaza. Naime, prema definiciji metode najvećeg razmaka, u slučajevima "najvećeg razmaka" između dvije lokacije unutar prolaza komisioner će za prikupljanje materijala u tom prolazu proći dvije širine glavnog puta, dok kod ostalih metoda uvijek samo jednom. Manje potrebne širine glavnog prolaza prema tome idu u korist toj metodi routinga. No za realna skladišta te razlike su praktički zanemarive, pa se može reći da su performanse metoda routinga neovisne o širinama prolaza u skladištu. Jednako vrijedi i za širine regala.

[51] Prema *Petersen* [10], prosječno smanjenje puta komisioniranja položajem ulaza/izlaza u sredini u odnosu na kut skladišta iznosi 1%, (prosječna vrijednost smanjenja za sve analizirane situacije u tom radu, op.a.).

3.3. Analitički pristup određenju prosječnog vremena vožnje komisionera sa slučajnim rasporedom odlaganja

Zbog stohastičke prirode procesa komisioniranja, u fazi oblikovanja novog i preoblikovanja postojećeg skladišta vjerojatna je uporaba simulacije. Kako je simulacija metoda koja iziskuje dosta vremena (kako u fazi izrade modela, tako i simuliranja procesa), od velike pomoći u smanjenju vremena (pre)oblikovanja mogu biti analitički modeli određivanja puta (vremena) komisioniranja. U literaturi postoji nekoliko radova posvećenih takvim modelima (opisanim u nastavku), isključivo za jednostavne heurističke metode, metodu S-oblika i metodu povratka [16], [74], [75], [76]. Na temelju prezentiranog analitičkog pristupa u radu je napravljen je i analitički model procjene puta komisioniranja metodom najvećeg razmaka, te objavljen kao znanstveni rad u [77]. Drugi dio ovog podpoglavlja posvećen je analizi modela na temelju usporedbe s rezultatima dobivenih simulacijama.

3.3.1. Analitički modeli puta komisioniranja sa slučajnim rasporedom odlaganja

U određenju očekivanog puta komisioniranja koristi se analogija s problemom zauzetosti (eng. *occupancy problem* [75]): Neka je *x* kuglica u *N* kutija, traži se očekivani broj kutija koji sadrži barem jednu kuglicu. Ako je broj kuglica jednak broju traženih lokacija (veličini narudžbe), a broj kutija jednak broju prolaza u skladištu, rezultat je ekvivalentan broju posjećenih prolaza. Pod pretpostavkom slučajnog rasporeda odlaganja (uniformna distribucija materijala po prolazima i uzduž prolaza), očekivani broj prolaza koji sadrže barem jednu traženu lokaciju je

$$n = N \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{N} \right)^{x} \right] \tag{1}$$

a kako put komisioniranja ovisi i o najdaljem posjećenom prolazu od ulaza/izlaza, njegova očekivana vrijednost može se odrediti pomoću

$$n_f = N - \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{i}{N} \right)^{x} \tag{2}$$

Detaljnija objašnjenja i izvodi izraza (1) i (2) mogu se naći u *Chew & Tang* [75].

Model puta metodom S-oblika

Shodno načinu proračuna puta komisioniranja pomoću komponenti puta opisanih u podpoglavlju 3.1, očekivani put komisioniranja pomoću modela također je suma spomenutih komponenti. Očekivani put "uzduž prolaza" (L_t) može se odrediti kao umnožak očekivanog broja posjećenih prolaza i duljine prolaza zajedno s širinom glavnog prolaza. Ovo u potpunosti vrijedi za slučaj parnog broja posjećenih prolaza. U slučaju neparnog broja prolaza potrebno je odrediti put povratne vožnje u zadnjem prolazu. *Chew & Tang* [75] su u svojem modelu pretpostavili nemogućnost okretanja komisionera unutar prolaza. Odredili su vjerojatnost da je broj posjećenih prolaza neparan te shodno tome dodali još jednu komponentu puta (komisioner prolazi dodatno jednu cijelu duljinu prolaza). *Caron et al.* [16] su pak modificirali metodu na način da se, u slučaju neparnog broja posjećenih prolaza, povratni put radi u prolazu s "najmanjim razmakom". Obje opisane situacije u neskladu su s pretpostavkama uzetim u ovom radu. Zbog pojednostavljenja modela može se pretpostaviti da je u slučaju neparnog broja posjećenih prolaza najdalja tražena lokacija u zadnjem prolazu na sredini, pa je prema tome put u tom prolazu također jednak duljini prolaza uvećan za širinu glavnog prolaza. Prema tome komponenta očekivanog puta "uzduž prolaza" može se odrediti pomoću izraza

$$L_t^S = n \cdot (L + w_t) \tag{3}$$

Komponenta očekivanog puta "preko prolaza" (L_l) iznosi dvije udaljenosti ulaza/izlaza do centra najdaljeg posjećenog prolaza, te se može izračunati kao

$$L_l^S = 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{4}$$

Prema tome, ukupni očekivani put komisioniranja metodom S-oblika iznosi

$$L^S = n \cdot (L + w_t) + 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{5}$$

Model puta metodom povratka

Ukupni očekivani put komisioniranja i ovoga puta je suma komponenti "uzduž prolaza" i preko prolaza". Komponenta puta "preko prolaza" za metodu povratka jednaka je toj komponenti metode S-oblika, dakle

$$L_l^R = 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{6}$$

Komponenta "uzduž prolaza" ovisi o očekivanoj vrijednosti najdalje tražene lokacije u posjećenom prolazu. Za x_n prosječni broj traženih lokacija po posjećenom prolazu (x_n=x/n) pozicija najdalje tražene lokacije je na $x_n/(x_n+1)$ duljine prolaza (vidi *Caron et al*. [16]), pa se komponenta očekivanog puta "uzduž prolaza" za ovu metodu može izračunati pomoću izraza

$$L_t^R = n \cdot \left(2 \cdot \frac{x_n}{x_n + 1} \cdot L + w_t \right) \tag{7}$$

Konačno, ukupni očekivani put komisioniranja metodom povratka iznosi

$$L^R = n \cdot \left(2 \cdot \frac{x_n}{x_n + 1} \cdot L + w_t \right) + 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{8}$$

Model puta metodom najvećeg razmaka

Iz definicije ove metode vidljivo je da je i u ovom slučaju komponenta puta "preko prolaza" kao i u prethodna dva slučaja, dakle

$$L_l^{LG} = 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{9}$$

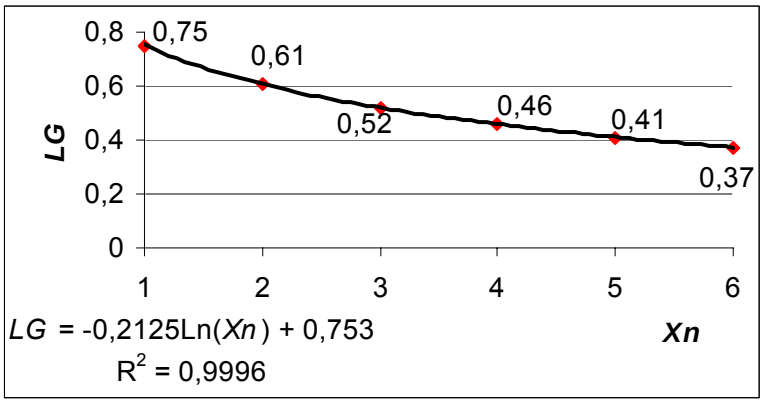
Očekivani put komponente "uzduž prolaza" ovisi o prosječnom najvećem razmaku u posjećenim prolazima, koji se označava pomoću faktora duljine prolaza *LG*. Prema tome je očekivani put u posjećenom prolazu (osim prvog i posljednjeg, shodno definiciji metode)

$$2 \cdot (1 - LG) \cdot L \tag{10}$$

Zbog vrlo složenog analitičkog određenja prosječnog najvećeg razmaka, faktor *LG* je za vrijednosti x_n=1...6 određen simulacijom. *LG* je funkcija samo od prosječnog broja traženih lokacija po posjećenom prolazu, dobro aproksimirana logoritamskom funkcijom

$$LG = -0.2125 \cdot \ln(x_n) + 0.753 \tag{11}$$

vidljivo sa slike 3-20.

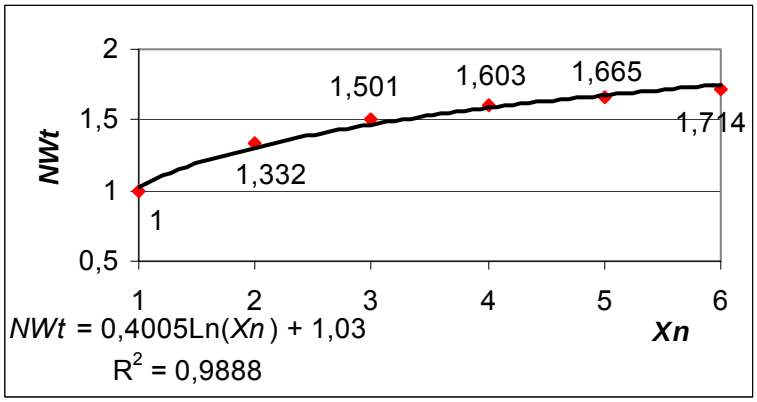


Slika 3-20. Aproksimacija vrijednosti *LG*

Ukoliko je najveći razmak između dvije susjedne tražene lokacije, komisioner radi povratno kretanje na oba kraja prolaza (vidi sliku 3-7, treći prolaz), pa shodno tome prolazi i dvostruku širinu glavnog prolaza w_t. U slučaju najvećeg razmaka između prednjeg prolaza i tražene lokacije (slika 3-7, četvrti prolaz), odnosno stražnjeg prolaza i tražene lokacije (slika 3-7, drugi prolaz), ta se širina prolazi samo jedanput. Prosječni broj povratnih vožnji po posjećenom prolazu, označen sa NW_t , također je određen simulacijom za vrijednosti x_n=1...6, te aproksimiran logoritamskom funkcijom

$$NW_t = 0.4005 \cdot \ln(x_n) + 1.03 \tag{12}$$

kao što prikazuje slika 3-21.



Slika 3-21. Aproksimacija vrijednosti NW_t

Prema navedenom, očekivani put komponente "uzduž prolaza" može se izraziti kao

$$L_t^{LG} = 2 \cdot (l + w_t) + (n-2) \cdot \left[2 \cdot l \cdot (1 - LG) + NW_t \cdot w_t\right] \tag{13}$$

Konačno, ukupni očekivani put komisioniranja metodom najvećeg razmaka je

$$L^{LG} = 2 \cdot (l + w_t) + (n-2) \cdot \left[2 \cdot l \cdot (1 - LG) + NW_t \cdot w_t\right] + 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{14}$$

gdje su *LG* i NW_t logoritamske funkcije od x_n definirane pomoću izraza (11) odnosno (12).

3.3.2. Analiza modela puta komisioniranja sa slučajnim rasporedom odlaganja i usporedba rezultata sa simulacijama

U svrhu verifikacije modela te ocjene njihovih točnosti izračunate su očekivane duljine puta komisioniranja za sve prethodno simulacijama analizirane situacije, a rezultati su prikazani u tablici 3-3[52].

Tablica 3-3. Očekivane duljine puta komisioniranja dobijene pomoću analitičkih modela te prosječne duljine puta komisioniranja dobijene simulacijom

Broj skladišnih lokacija po razini, Q=144									
Veličina narudžbe, x	Metoda routinga	N=3 L=24		N=4 L=18		N=6 L=12		N=8 L=9	
		Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.
5	*Metoda S-oblika*	85,2	88,2	85,9	88,3	89,3	90,3	95,7	96,2
10		95,5	106,4	102,8	104,7	114,0	115,9	124,1	124,8
15		96,8	111,8	106,8	107,4	123,6	125,2	137,9	139,0
20		97,0	114,1	107,7	107,9	127,4	128,4	144,8	146,2
30		97,0	116,4	108,0	108,0	129,6	129,8	150,1	150,8
40		97,0	117,4	108,0	108,0	129,8	130,0	151,5	151,7
5	*Metoda povrtatka*	104,9	100,6	99,2	95,8	96,4	94,3	100,0	98,9
10		134,0	129,8	133,5	128,8	134,0	129,4	137,0	134,2
15		144,7	141,9	148,2	143,9	154,3	149,2	160,8	155,7
20		150,2	148,2	155,6	152,6	165,9	161,0	175,4	169,7
30		155,9	154,9	163,0	161,2	177,5	173,7	191,5	186,3
40		158,9	158,1	166,9	165,6	183,1	180,4	199,4	195,1
5	*Metoda najvećeg razmaka*	82,5	81,1	81,0	79,4	83,1	81,8	89,6	88,8
10		97,2	95,8	102,1	99,8	109,0	106,1	117,1	114,2
15		103,1	102,0	112,2	110,0	124,4	120,7	135,0	131,0
20		106,5	105,4	118,2	116,1	134,3	130,5	147,5	142,7
30		111,2	109,6	125,6	123,5	146,2	142,5	163,4	158,3
40		114,5	112,1	130,7	127,8	153,8	149,8	173,3	167,9
Broj skladišnih lokacija po razini, Q=576									
Veličina narudžbe, x	Metoda routinga	N=6 L=48		N=8 L=36		N=12 L=24		N=16 L=18	
		Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.
5	*Metoda S-oblika*	218,5	222,1	200,9	203,1	190,0	190,4	195,1	195,5
10		295,1	302,1	283,3	287,1	271,0	272,8	271,7	272,7
15		325,6	332,2	324,7	329,6	321,3	324,0	323,8	324,6
20		337,8	341,8	345,8	351,6	353,5	356,5	360,7	362,3
30		344,7	345,5	362,2	364,6	387,6	391,7	406,2	408,7
40		345,8	345,9	366,5	367,4	401,8	405,2	429,9	433,2
5	*Metoda povrtatka*	246,8	239,5	218,3	213,4	198,5	196,1	200,1	198,7
10		375,0	358,6	338,1	324,4	300,8	292,7	290,3	285,3
15		448,3	427,1	416,5	397,0	376,6	362,4	360,2	350,3
20		491,5	472,4	468,4	447,2	433,8	415,6	416,2	402,4
30		536,2	522,4	527,6	507,7	510,1	489,1	498,2	478,7
40		558,5	550,3	557,9	544,6	555,1	534,6	552,4	530,2
5	*Metoda najvećeg razmaka*	191,4	186,9	174,3	171,4	167,3	165,6	176,0	174,9
10		266,8	257,6	246,6	238,6	231,5	225,7	234,7	230,7
15		314,9	303,6	298,3	286,8	281,5	271,9	281,3	273,6
20		346,9	336,3	335,9	322,7	321,7	309,2	320,4	309,6
30		387,0	378,3	385,5	373,1	380,8	365,3	384,0	366,8
40		412,9	405,2	417,2	406,6	421,3	406,3	427,2	409,7

Iz dobijenih rezultata vidljivo je da analitički model puta komisioniranja metodom S-oblika rezultira nešto manjim putem od stvarnog prosječnog puta, a razlog za to leži u pretpostavci

[52] Rezultati dobiveni simulacijama u tablicama 3-3 i 3-4 identični su rezultatima iz tablica 3-1 i 3-2, ponovljeni zbog jednostavnije usporedbe.

povratne vožnje do polovice prolaza u slučajevima s neparnim brojem posjećenih prolaza. Greška u takvom slučaju raste s porastom x_n, što je dobro vidljivo iz rezultata za promatranu situaciju s N=3, L=24. U situacijama (skladištima) s parnim brojem prolaza usprkos porastu x_n s povećanjem veličine narudžbe x, istovremeno se smanjuje vjerojatnost neparnog broja posjećenih prolaza pa je ukupna greška mala, te ni u jednoj situaciji ne prelazi 3%.

Analitički model puta komisioniranja metodom povratka rezultira pak nešto većim putem od stvarnog. Kod ovog modela grešku uzrokuje pretpostavka o jednakoj raspodjeli traženih lokacija po prolazima. Na primjer, pretpostavimo 4 lokacija u 2 prolaza. Očekivani put "unutar prolaza" iznosi $2 \cdot 2/3 \cdot L = 1{,}33 \cdot L$ (dvije lokacije po prolazu), dok u realno mogućoj situaciji s tri lokacije u jednom i jednom lokacijom u drugom prolazu put komisioniranja iznosi $1/2 \cdot L + 3/4 \cdot L = 1{,}25 \cdot L$. Veličina greške niti u jednoj promatranoj situaciji nije premašila 5%.

Spomenuta pretpostavka o jednakoj raspodjeli traženih lokacija po prolazima razlog je i za potcjenjenu očekivanu vrijednost faktora najvećeg jaza (LG) te precjenjenu očekivanu vrijednost broja povratnih vožnji po posjećenom prolazu (NW_t), pa ukupno analitički model puta komisioniranja metodom najvećeg razmaka rezultira nešto većim očekivanim putem komisioniranja od stvarnog. Veličina greške, ovisno o situaciji, je u rasponu od 2-4%.

Nakon usporedbe rezulatata dobivenih modelima i simulacijama može se zaključiti da su predloženi modeli zadovoljavajuće točni i mogu se koristiti u procjeni puta komisioniranja. Usporedba modela međusobno pak također potvrđuje zaključke navedene u poglavlju o analizi performansi osnovnih heurističkih metoda routinga. Iz usporedbe izraza (5) i (8) očigledno je da metoda S-oblika u prosjeku rezultira kraćim putem od metode povratka u svim situacijama (pod pretpostavkom slučajnog rasporeda odlaganja). Razlika u performansama ove dvije metode ovisi o prosječnom broju traženih lokacija po posjećenom prolazu. Usporedba izraza (5) i (14) navodi pak na zaključak da će metoda najvećeg razmaka rezultirati kraćim putem komisioniranja od metode S-oblika u situacijama kada je LG>1/2[53]. Iz izraza (11) dobije se pripadajuća granična vrijednost broja traženih lokacija po posjećenom prolazu, x_n = 3,3, dok je stvarna granična vrijednost broja traženih lokacija po prolazu skladišta nešto manja[54].

U analitičkim modelima pretpostavljena je fiksna veličina narudžbe x. Realno ta vrijednost nije fiksna, ali se može računati s prosječnom veličinom narudžbe. Alternativno, s većom točnošću određenja očekivanog puta komisioniranja može se koristiti izraz

$$\sum_{x=1}^{\infty} p_x \cdot E(L_{kom}) \tag{15}$$

gdje su

p_x	vjerojatnost da je veličina narudžbe x
$E(L_{kom})$	očikivani put komisioniranja, određen izrazom (5), (8) ili (14), ovisno o metodi routinga

[53] Ovo vrijedi uz pojednostavljenje problema s pretpostavkom da je $NW_t = 1$. Realno, širina glavnih prolaza je mala u usporedbi s duljinom prolaza između regala, pa je za praktične probleme prihvatljivo zanemarenje ovog puta.

[54] Iz rezultata dobivenih simulacijama granična vrijednost broja traženih lokacija po prolazu u skladištu kreće se od 2,5 do 3, ovisno o veličini i obliku skladišta.

4. METODE DODJELJIVANJA MJESTA ODLAGANJA

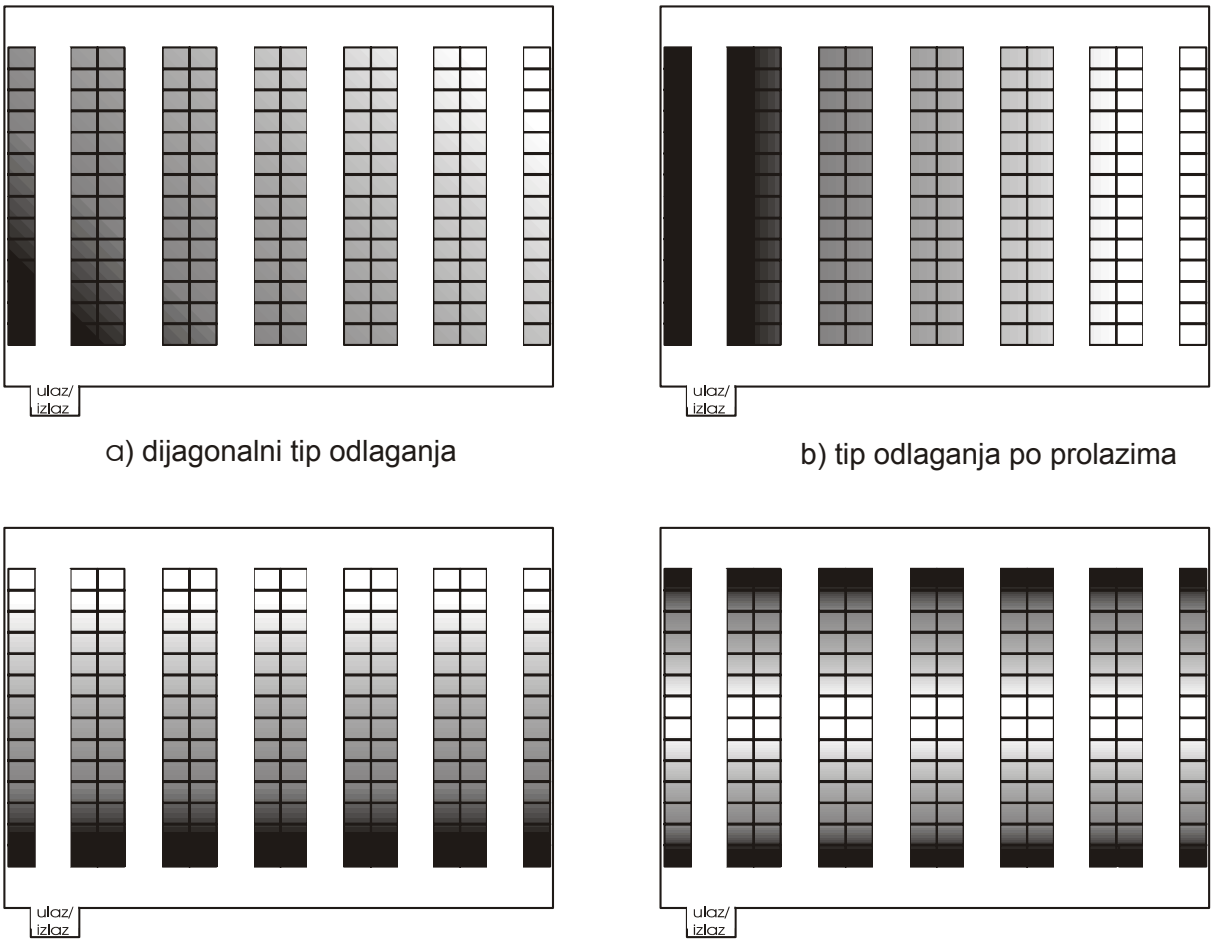
Raspon broja vrste materijala na skladištu u praksi varira od samo jednog, pa do nekoliko desetaka tisuća. S pozicije komisioniranja aktualna su za razmatranje skladišta s relativno većim brojem vrsta materijala, koji se međusobno razlikuju prema različitim kriterijima (npr. težina, dimenzije, zapaljivost,...). U skladištu ih se može odlagati bez nekog specifičnog rasporeda (na slučajno odabrano mjesto), ili na unaprijed određena mjesta, shodno prema jednom ili više odabrana kriterija. Tako je npr. vrlo logično da se vrlo teški materijali odlažu na niže lokacije, različita kemijska sredstva udaljena od prehrambenih proizvoda, itd. S ciljem minimizacije troškova rukovanja materijalom, poznat je princip odlaganja materijala s većim protokom bliže ulazu/izlazu [2], [30], [72]. Slijedeći ovu ideju, također je i na put (vrijeme) kretanja pri komisioniranju moguće utjecati odabirom načina rasporeda materijala u zoni komisioniranja, definiranog metodom dodjeljivanja mjesta odlaganja (u daljnjem tekstu nazivaju se skraćeno metode odlaganja). Za razliku od izuzimanja paletnih jedinica, kod komisioniranja kutija i pojedinačnih materijala (kakvo se razmatra u ovom radu), udaljenost mjesta odlaganja od ulaza/izlaza potrebno je promatrati u kontekstu cijele narudžbe (više lokacija) te načina kretanja pri komisioniranju (metodi routinga). Iz tog razloga je analiza metoda odlaganja napravljena u ovisnosti o metodi routinga. Analize su, kao i u prethodnom poglavlju, napravljene simulacijama, a za neke kombinacije razvijeni su i analitički modeli.

4.1. Definicije metoda odlaganja

Kao što je već spomenuto u poglavlju 2.2.1., metode odlaganja mogu se podijeliti u 3 grupe. Metodama slučajnog rasporeda odlaganja (eng. *random storage*) materijal se ne odlaže u skladištu na dodijeljene mu lokacije, već je raspored odlaganja materijala slučajan. Pri tome skladišna lokacija može biti stvarno slučajno odabrana (pomoću generatora slučajnih brojeva, a pripadajuća metoda naziva se metoda potpuno slučajnog rasporeda (eng. *purely randomized assignment – PRA*). Češći je ipak slučaj da se materijal odlaže na prvu (najbližu) slobodnu lokaciju (metoda eng. *closest open location – COL*), no pokazano je da u slučaju FIFO principa u skladištu, te visoke popunjenosti skladišta, ova metoda također rezultira slučajnim rasporedom materijala u skladištu.

Ukoliko su svakoj vrsti materijala rezervirane skladišne lokacije, govori se o unaprijed dodijeljenom rasporedu odlaganju (eng. *dedicated storage*). Za komisioniranje su relevantne metode koje dodjeljivanjem mjesta odlaganja smanjuju put kretanja pri komisioniranju (a time i ukupno vrijeme komisioniranja). Logično je da je kriterij prema kojem se dodjeljuju mjesta odlaganja povezan s protokom (potražnjom) određene vrste materijala. Tako je jedna od metoda odlaganje materijala isključivo prema protoku (metoda eng. *full-turnover storage*), s mogućim znatnim smanjenjm puta u odnosu na slučajni raspored odlaganja [20]. Osim te metode, u praksi se često kao kriterij dodjeljivanja mjesta odlaganja koristi omjer potrebnog broja lokacija i protoka (eng. *cube-per-order index, COI* metoda), što se pokazalo boljim od metode odlaganja prema protoku [2]. Načelno se može reći da se materijale s većim protokom (odnosno, u drugom slučaju manjim *COI* iznosom) odlaže na lokacije bliže ulazu/izlazu (početnoj i krajnjoj točki radnog ciklusa prikupljanja). Takva teza, kao što je spomenuto u uvodu ovog poglavlja, u potpunosti vrijedi za izuzimanje paletnih jedinica (jednostruki radni ciklus), dok u slučaju prikupljanja više materijala iz narudžbe (višestruki radni ciklus) ukupni put komisioniranja ne ovisi samo o udaljenosti svih traženih lokacija od ulaza/izlaza, već i o njihovoj međusobnoj udaljenosti te odabranom načinu kretanja komisionera pri prikupljanju (metodi routinga). Tako se može govoriti o nekoliko tipova odlaganja pojedine metode. Na slici 4-1 prikazani su najčešći tipovi odlaganja materijala metodama dodjeljenog rasporeda odlaganja u zoni komisioniranja. Tamnije lokacije predstavljaju mjesta odlaganja materijala s višim protokom (ili manjim *COI* iznosom). Dijagonalni tip odgovara pravilu odlaganja najbliže ulazu/izlazu. Ostali tipovi, a što je

pokazano u nastavku ovog poglavlja, primjenjiviji su u situacijama s nekom konkretno odabranom metodom routinga.



a) dijagonalni tip odlaganja

b) tip odlaganja po prolazima

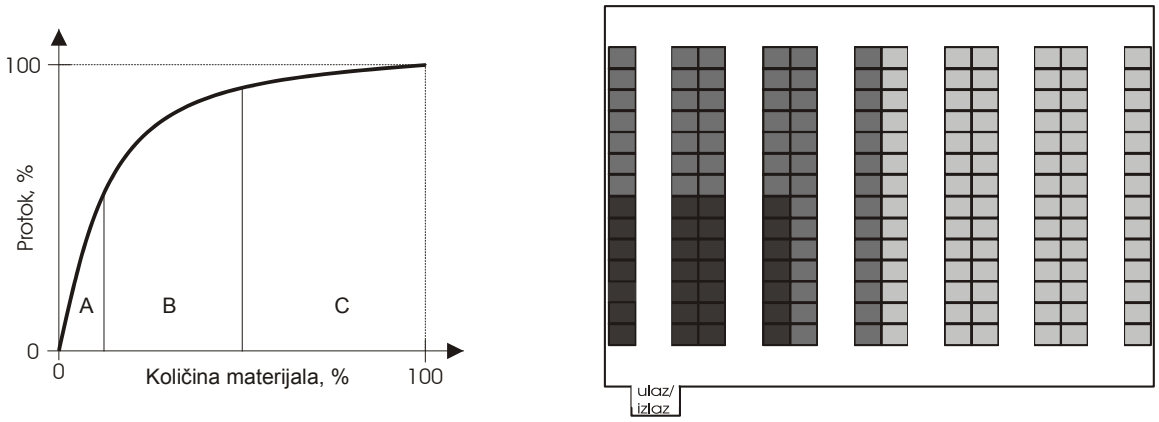
c) tip odlaganja uzduž prednjeg prolaza

d) tip odlaganja uzduž prednjeg i stražnjeg prolaza

Slika 4-1. Tipovi odlaganja metodama dodijeljenog rasporeda odlaganja

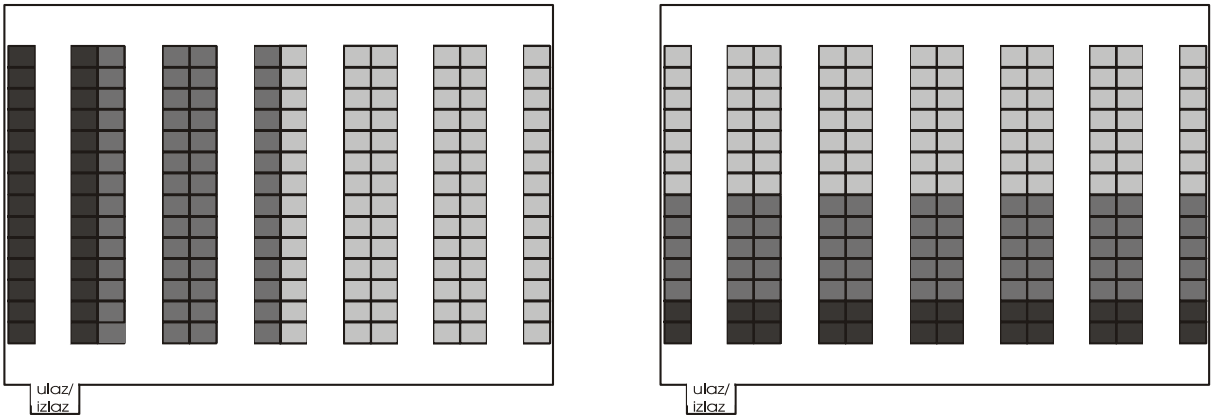
Pri skladištenju većih količina materijala, pri čemu potreba za skladišnim prostorom pojedine vrste materijala u vremenu nije konstanta, ovakav način dodjeljivanja mjesta odlaganja zahtijeva veći skladišni prostor (kapacitet skladišta) nego situacije sa slučajnim rasporedom odlaganja. Zbog toga se, između ostalog, u praksi često koriste metode odlaganja po zonama (eng. *class-based storage*). Materijali se na temelju određenog kriterija (u kontekstu smanjenja puta komisioniranja kriteriji podjele su ponovno protok ili *COI* iznos), ABC analizom podjele u nekoliko grupa (klasa). Materijalima svake grupe dodjele se određene skladišne lokacije, a odlaganje materijala unutar zona je po slučajnom rasporedu.

Na slici 4-2 prikazan je primjer ABC krivulje, te jedan od mogućih rasporeda zona odlaganja. Pri određivanju rasporeda i oblika zona (veličina zone određena je definiranjem grupa ABC analizom) također se, kao i kod unaprijed dodijeljenog odlaganja, uvažava pravilo da je zona grupe materijala s višim protokom bliže ulazu/izlazu, i obrnuto. Ponovno je to kod izuzimanja paletnih jedinica jednostrukim ciklusom jednostavno jednoznačno odrediti, dok kod komisioniranja višestrukim radnim ciklusom najbolji raspored i oblik zona ovisi o primjenjenoj metodi routinga. Pa tako također možemo govoriti o različitim tipovima rasporeda i oblika zona odlaganja.



Slika 4-2. ABC krivulja i pripadajuće zone u skladištu, primjer

Uz shematski na slici 4-2 prikazan jedan općeniti tip (za potrebe ovog rada može se analogijom nazvati dijagonalni tip odlaganja po zonama), na slici 4-3 prikazani su još dva karakteristična tipa odlaganja po zonama.



a) odlaganje u zone po prolazima

b) odlaganje u zone uzduž prednjeg prolaza

Slika 4-3. Mogući rasporedi zona odlaganja

4.2. Analiza performansi metoda dodijeljenog rasporeda odlaganja u kombinaciji s metodama routinga

S ciljem minimizacije puta kretanja metodama odlaganja potrebno je odrediti najbolji tip odlaganja materijala. Zbog ovisnosti puta komisioniranja o odabranom načinu kretanja komisionera, svaki tip odlaganja materijala nije jednako pogodan za određenu metodu routinga. Iz tog razloga određene (očigledno nepovoljne) kombinacije nisu niti analizirane. Prvi dio analize posvećen je određenju najpovoljnijeg tipa odlaganja uz odabranu metodu routinga te određenju smanjenja puta primjenom metoda odlaganja, dok se u drugom dijelu uspoređuju najpovoljnije kombinacije metoda odlaganja i metoda routinga.

U svrhu generalizacije problema i pojednostavljenja analize uvedene su određene pretpostavke.

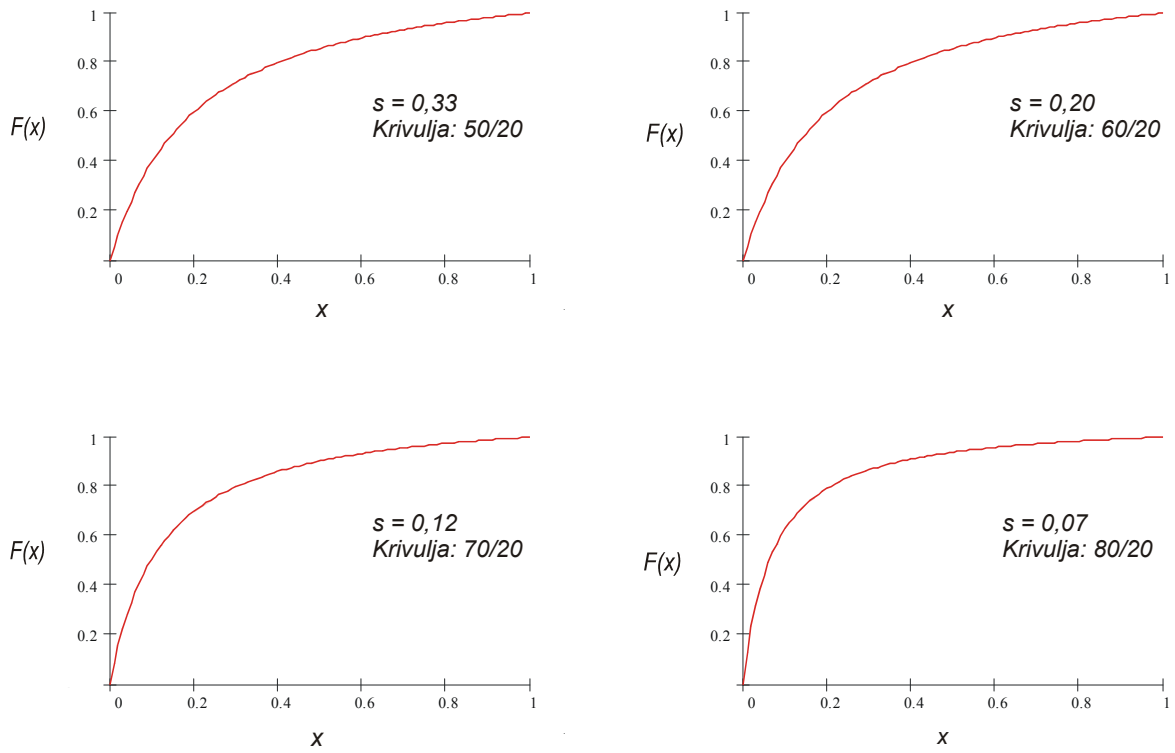
Broj vrsta materijala u zoni komisioniranja (broj artikala) jednak je broju lokacija, odnosno za svaki tip materijala potrebna je jedna lokacija odlaganja. Ovakva pretpostavka za analizu i rezultate ima dvojak značaj:

a) u slučaju unaprijed dodijeljenog rasporeda odlaganja nema povećanja zone komisioniranja u odnosu na slučajni raspored odlaganja. Kako se u zoni komisioniranja odlažu samo manje količine materijala, a glavnina se nalazi u skladišnoj zoni, ova pretpostavka u skladu je s realnim situacijama, a također prihvaćena u istraživanjima i drugih autora [7], [16], [18], [20], [72].
b) redoslijed materijala rangiranih po bilo kojem od dva spomenuta kriterija (protok i *COI* iznos) je identičan, pa provedena analiza pokriva oba slučaja u praksi. Iz usporedbe analize puta komisioniranja s odlaganjem prema protoku (*Petersen* [20]) odnosno prema *COI* iznosu (*Caron et al*. [16]) uočena je podudarnost načina generiranja lokacija materijala u provedenim simulacijama, a takav je korišten i u ovom radu.

Druga bitna pretpostavka korištena u analizi je da se ABC krivulja može dobro definirati jednostavnom funkcijom, te opisati odgovarajućom oznakom. Analitička funkcija je oblika

$$F(x)=\frac{(1+s)\cdot x}{s+x} \qquad F(x)\geq 0 \;\text{ i }\; x\leq 1\;,\;\; s\geq 0 \;\text{ i }\; s+x\neq 0 \tag{16}$$

gdje x predstavlja odnos potrebnog broja lokacija i ukupnog broja lokacija odlaganja za materijale čiji protok predstavlja udio $F(x)$ u ukupnom protoku, dok je s značajka oblika krivulje. Ovakva funkcija ovisi o samo jednom parametru, a prednost joj je u jednostavnijoj analizi [16]. U radu je provedena analiza za četiri različite ABC krivulje protoka, s oznakama 50/20, 60/20, 70/20 i 80/20. Druga vrijednost u oznaci predstavlja količinu materijala (postotak ukupne količine), a prva vrijednost pripadajući iznos protoka (postotak ukupnog protoka). Za tako definirane krivulje jednostavno je odrediti pripadajuću značajku oblika s. Na slici 4-4 prikazane su u radu analizirane ABC krivulje, s pripadajućim značajkama oblika i oznakama.



Slika 4-4. Analizirane ABC krivulje

Na vrlo sličan način napravljena je i analiza odlaganja po zonama, opisana u potpoglavlju 4.2.3.

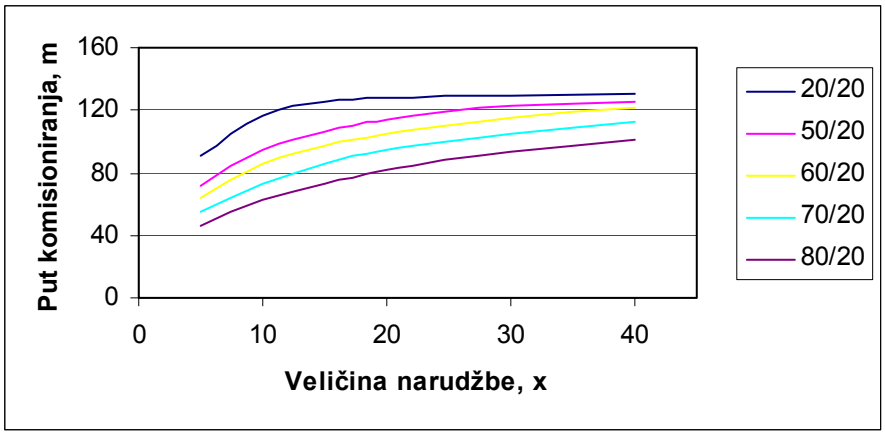
4.2.1. Određivanje najpovoljnijeg tipa odlaganja za odabranu metodu routinga

Dodijeljeni raspored odlaganja za routing prema metodi S-oblika

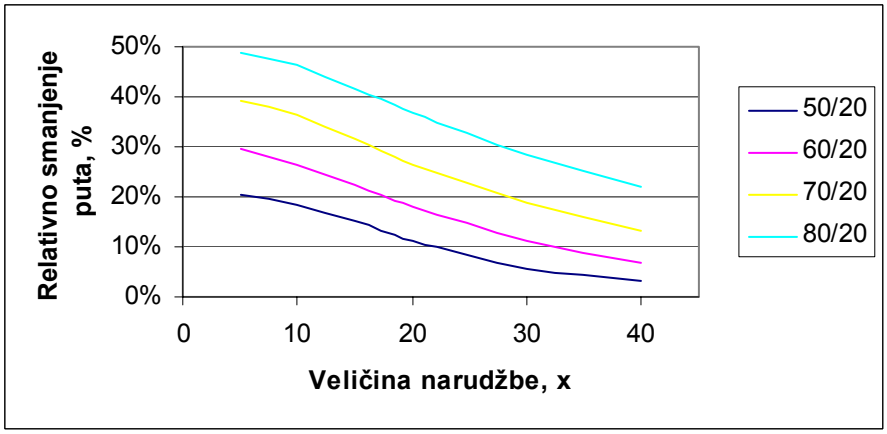
S obzirom na način kretanja komisionera definiranog metodom S-oblika (svaki prolaz s traženim lokacijama prolazi se u cjelosti), tip odlaganja uzduž prednjeg (i stražnjeg) prolaza praktički ne pridonosi nikakvom smanjenju puta komisioniranja. Ono se postiže smanjenjem (minimizicijom) broja prolaza u koje ulazi komisioner, te je odlaganje po prolazima (prikazano na slici 4-1 b)) za ovu metodu routinga najpovoljniji način odlaganja materijala. Rezultati analize simulacijama prikazani su u tablici 4-1.

Osim o veličini narudžbe i prostornom rasporedu skladišta, očito je da put komisioniranja ovisi i o primjeni dodijeljenog rasporeda odlaganja. Smanjenja puta vrlo su značajna (do 50%) u situacijama s manjim veličinama narudžbi i većom zakrivljenošću ABC krivulje, dok su neznatna (ali postoje) kod slabo zakrivljenih ABC krivulja i većih narudžbi (par postotaka).

Smanjenje puta komisioniranja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja ilustrirano je slikom 4-5 za jedan odabrani primjer, dok su slikom 4-6 prikazani pripadajući postotni iznosi smanjenja u odnosu na slučajni raspored odlaganja, u ovisnosti o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka.



Slika 4-5. Put komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u ovisnosti o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka, primjer (*N*=6, *L*=12, routing prema metodi S-oblika)

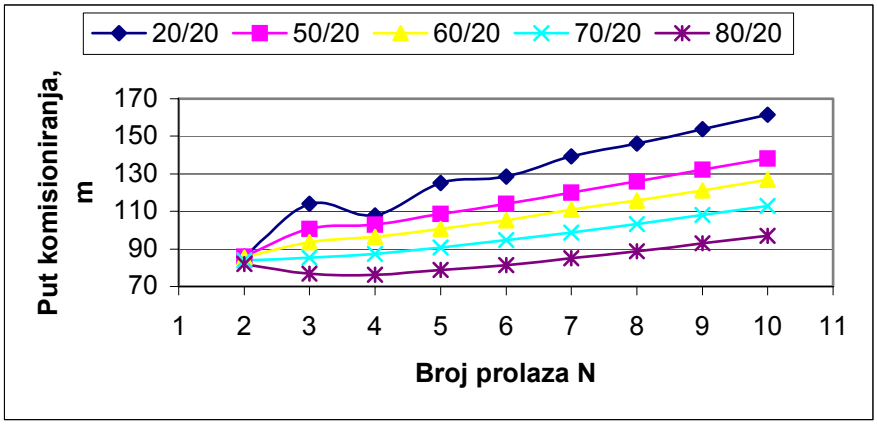


Slika 4-6. Relativno smanjenje puta komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja ovisno o ABC krivulji protoka i veličini narudžbe, primjer (*N*=6, *L*=12, routing prema metodi S-oblika)

Tablica 4-1. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi S-oblika i odlaganje po prolazima

Metoda S-oblika + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	88,2	88,3	90,3	96,2
10		106,4	104,7	115,9	124,8
15		111,8	107,4	125,2	139,0
20		114,1	107,9	128,4	146,2
30		116,4	108,0	129,8	150,8
40		117,4	108,0	130,0	151,7
5	*50/20*	71,2	69,6	71,8	76,4
10		86,5	88,4	94,4	102,3
15		95,0	97,3	106,4	116,3
20		100,7	102,9	114,0	125,9
30		107,0	105,9	122,4	137,1
40		110,5	107,2	126,0	143,2
5	*60/20*	65,2	62,6	63,6	67,6
10		79,1	79,9	85,3	92,3
15		87,7	89,9	97,4	106,1
20		93,6	96,4	105,2	115,7
30		101,4	102,6	115,5	128,0
40		106,2	105,3	121,1	135,6
5	*70/20*	59,3	55,4	55,0	58,2
10		71,3	70,4	73,5	79,8
15		79,7	80,2	85,8	94,7
20		85,2	87,4	94,7	103,3
30		94,0	96,1	105,3	116,4
40		99,0	101,1	112,8	125,2
5	*80/20*	54,0	48,5	46,2	48,1
10		64,0	60,8	62,1	66,7
15		70,9	69,3	73,1	79,4
20		76,7	76,3	81,3	88,8
30		84,2	86,0	93,1	101,8
40		90,3	92,6	101,3	111,2
Metoda S-oblika + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajnoi raspored odlaganja)*	222,1	203,1	190,4	195,5
10		302,1	287,1	272,8	272,7
15		332,2	329,6	324,0	324,6
20		341,8	351,6	356,5	362,3
30		345,5	364,6	391,7	408,7
40		345,9	367,4	405,2	433,2
5	*50/20*	182,9	168,6	158,9	160,3
10		245,9	243,3	227,3	230,8
15		281,0	272,7	269,2	274,4
20		302,3	298,5	298,8	305,8
30		325,4	328,5	336,3	348,6
40		336,3	344,5	360,0	376,4
5	*60/20*	164,8	151,9	143,9	145,7
10		220,9	211,3	205,2	208,8
15		254,9	246,4	243,5	248,8
20		277,9	272,0	271,0	278,0
30		306,5	304,9	309,1	318,4
40		322,1	325,2	334,2	346,9
5	*70/20*	143,7	133,2	126,4	127,7
10		192,4	189,1	178,7	182,3
15		225,7	216,3	212,7	220,0
20		247,3	240,2	238,8	245,5
30		278,6	273,9	275,3	284,5
40		299,3	296,4	301,1	312,6
5	*80/20*	125,5	113,7	106,4	107,0
10		163,4	153,5	149,9	154,0
15		192,3	183,3	179,7	184,8
20		213,4	206,1	203,2	209,7
30		245,5	237,7	236,9	244,9
40		267,1	260,9	262,9	271,6

Kako je analizom metode routinga S-oblika uz slučajni raspored odlaganja uočen negativni utjecaj neparnog broja prolaza na put komisioniranja (vidi poglavlje 3.2.1, slika 3-14), postavlja se pitanje da li je to slučaj i kod dodijeljenog rasporeda odlaganja. Na slici 4-7 prikazan je graf puta komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ABC krivulji protoka (za odabrani primjer kao i na slici 3-14), te je vidljivo smanjenje negativnog utjecaja neparnog broja prolaza na ovu metodu porastom zakrivljenosti ABC krivulje.



Slika 4-7. Utjecaj neparnog broja prolaza na metodu S-oblika u ovisnosti o zakrivljenosti ABC krivulje (primjer, x=20, manje skladište)

Prethodni grafikon zorno prikazuje i još jednu činjenicu, uočljivu i iz rezultata analize prikazanih u tablici 4-1. Optimalni prostorni raspored (optimalni broj prolaza) ovisi i o zakrivljenosti ABC krivulje, te je shodno tome dio analize optimalnog prostornog rasporeda zone komisioniranja, opisan u poglavlju 6, posvećen i ovoj činjenici.

Dodijeljeni raspored odlaganja za routing prema metodi povratka

S obzirom na karakter metode povratka, odlaganje materijala s većim protokom bliže glavnom prolazu -odlaganje uzduž prednjeg prolaza, prikazano na slici 4.1 c) - smanjuje vjerojatnost posjećivanja najdaljih lokacija unutar prolaza, čime se smanjuje "uzduž prolaza" komponenta puta komisioniranja u odnosu na slučajno odlaganje. Ovakav tip odlaganja preporučen je u radu *Caron et al*. [16]. S druge strane, odlaganje po prolazima – prikazano na slici 4.1 b) - smanjuje komponentu puta "preko prolaza". Smanjuje se i očekivani broj posjećenih prolaza, ali uz povećan broj traženih lokacija po posjećenom prolazu (time i prosječni prijeđeni put unutar tog prolaza), te je upitno ukupno smanjenje komponente puta "uzduž prolaza". Konačno, dijagonalno odlaganje – prikazano na slici 4.1 a) – po svojoj je definiciji kombinacija spomenuta dva tipa odlaganja, s realno očekivanim smanjenjem obje komponente puta komisioniranja. Za razliku od *Caron et al*. [16], *Petersen & Schmenner* [19] za metodu povratka predlažu upravo dijagonalno odlaganje kao najbolji tip odlaganja materijala.

Shodno opisanom, za određenje najboljeg tipa odlaganja materijala za metodu povratka, te njihovih međusobnih razlika u rezultatima, bilo je potrebno napraviti analizu sva tri spomenuta tipa odlaganja.

Rezultati analize prikazani su u tablicama 4-2 do 4-4. Polja označena plavkasto u tablicama prikazuju situacije u kojima je određena kombinacija najpovoljnija – rezultira najkraćim putem komisioniranja.

Tablica 4-3. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi povratka i odlaganje po prolazima

Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajnoi raspored odlaganja)*	100,6	95,8	94,3	98,9
10		129,8	128,8	129,4	134,2
15		141,9	143,9	149,2	155,7
20		148,2	152,6	161,0	169,7
30		154,9	161,2	173,7	186,3
40		158,1	165,6	180,4	195,1
5	*50/20*	84,2	79,6	77,5	79,8
10		111,5	108,3	108,1	112,8
15		125,9	124,7	127,2	132,4
20		135,1	135,3	139,4	145,9
30		145,5	148,3	155,5	164,5
40		150,9	155,5	165,4	176,1
5	*60/20*	77,0	71,9	69,2	72,4
10		102,2	98,2	98,0	101,7
15		116,6	114,6	115,5	120,6
20		126,2	125,4	128,0	133,8
30		138,4	139,2	144,5	152,7
40		145,4	147,6	155,0	164,3
5	*70/20*	69,1	63,6	61,2	62,9
10		90,8	87,0	85,9	89,3
15		104,8	101,3	102,0	106,3
20		114,8	111,9	113,6	118,9
30		127,4	127,3	130,6	136,8
40		136,4	136,9	141,3	149,3
5	*80/20*	60,7	54,8	51,7	52,3
10		79,3	74,2	72,9	75,1
15		91,7	87,3	87,2	90,5
20		101,3	97,5	97,5	101,9
30		114,9	111,8	113,9	118,8
40		123,8	121,9	125,2	131,0
Metoda povratka + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	239,5	213,4	196,1	198,7
10		358,6	324,4	292,7	285,3
15		427,1	397,0	362,4	350,3
20		472,4	447,2	415,6	402,4
30		522,4	507,7	489,1	478,7
40		550,3	544,6	534,6	530,2
5	*50/20*	204,8	184,6	166,2	164,7
10		301,6	275,9	251,5	246,3
15		360,1	335,5	309,9	303,5
20		404,6	379,4	354,4	346,6
30		460,0	440,5	419,1	411,8
40		495,1	479,4	462,0	458,6
5	*60/20*	189,5	169,6	153,2	151,0
10		273,9	249,8	229,9	226,6
15		327,6	305,2	283,3	279,2
20		367,8	345,2	323,4	318,3
30		423,6	403,1	381,7	377,2
40		461,2	443,2	425,0	420,7
5	*70/20*	158,9	151,2	137,1	134,4
10		240,3	219,9	206,7	201,8
15		290,1	267,9	250,3	248,3
20		326,7	304,1	286,4	283,9
30		379,3	358,9	339,8	336,0
40		417,4	396,4	378,4	376,0
5	*80/20*	147,6	131,1	118,3	116,1
10		206,5	188,1	175,1	172,4
15		246,7	228,8	213,7	211,6
20		280,1	260,0	243,2	242,5
30		328,1	308,0	290,5	289,8
40		364,3	343,1	326,9	325,4

Tablica 4-3. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi povratka i odlaganje uzduž prednjeg prolaza

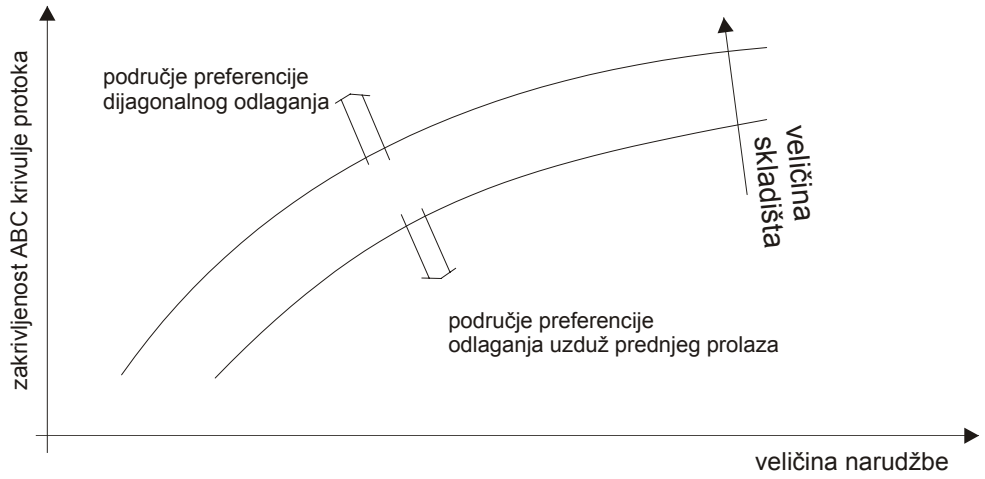
Metoda povratka + odlaganje uzduž prednjeg prolaza Veličina skladišta (broj lokacija po razini), Q=144					
Veličina narudžbe x	ABC krivulja	Broj prolaza, N=3 Duljina prolaza, L=24	Broj prolaza, N=4 Duljina prolaza, L=18	Broj prolaza, N=6 Duljina prolaza, L=12	Broj prolaza, N=8 Duljina prolaza, L=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	100,6	95,8	94,3	98,9
10		129,8	128,8	129,4	134,2
15		141,9	143,9	149,2	155,7
20		148,2	152,6	161,0	169,7
30		154,9	161,2	173,7	186,3
40		158,1	165,6	180,4	195,1
5	*50/20*	71,8	70,8	75,1	83,2
10		97,1	96,7	101,6	110,0
15		110,8	111,6	117,7	127,0
20		119,7	121,6	128,6	139,1
30		131,2	134,3	143,0	154,7
40		138,1	141,9	152,3	164,8
5	*60/20*	63,8	64,0	70,2	79,3
10		87,0	87,6	94,1	103,9
15		100,6	101,6	108,7	119,2
20		109,6	111,5	118,9	129,9
30		121,5	124,0	132,6	144,5
40		129,3	132,4	142,1	154,3
5	*70/20*	56,0	57,5	65,3	75,9
10		76,3	78,0	86,4	97,6
15		89,1	90,8	99,5	111,1
20		97,6	99,3	108,4	120,6
30		109,9	112,4	121,3	133,7
40		118,5	121,1	130,3	143,1
5	*80/20*	48,3	51,4	60,6	72,4
10		65,4	68,6	79,0	91,9
15		76,6	78,9	89,9	103,5
20		84,5	87,3	97,7	111,7
30		96,6	98,6	109,1	122,7
40		105,3	107,3	117,1	130,7
Metoda povratka + odlaganje uzduž prednjeg prolaza Veličina skladišta (broj lokacija po razini), Q=576					
Veličina narudžbe x	ABC krivulja	Broj prolaza, N=6 Duljina prolaza, L=48	Broj prolaza, N=8 Duljina prolaza, L=36	Broj prolaza, N=12 Duljina prolaza, L=24	Broj prolaza, N=16 Duljina prolaza, L=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	239,5	213,4	196,1	198,7
10		358,6	324,4	292,7	285,3
15		427,1	397,0	362,4	350,3
20		472,4	447,2	415,6	402,4
30		522,4	507,7	489,1	478,7
40		550,3	544,6	534,6	530,2
5	*50/20*	160,3	149,7	150,2	163,4
10		244,9	225,9	216,3	223,3
15		302,6	282,4	265,3	268,6
20		343,0	321,6	305,1	305,9
30		398,8	380,1	364,0	363,2
40		434,8	420,8	406,2	406,4
5	*60/20*	141,2	133,8	139,8	155,3
10		214,4	201,3	197,5	208,1
15		264,9	248,6	240,3	247,9
20		303,8	285,9	275,5	280,8
30		357,0	340,9	328,7	332,2
40		394,5	378,7	366,8	370,9
5	*70/20*	121,5	119,7	128,4	147,0
10		184,2	175,9	178,1	193,2
15		227,2	216,2	215,5	227,2
20		261,6	249,1	245,2	255,2
30		311,5	296,8	290,8	299,4
40		346,4	332,9	325,5	334,1
5	*80/20*	103,9	104,8	119,3	139,3
10		153,6	150,6	160,6	179,2
15		190,2	183,9	190,8	208,2
20		217,9	211,5	215,4	231,4
30		262,3	252,1	253,0	267,9
40		294,4	284,8	283,0	296,6

Tablica 4-4. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi povratka i dijagonalno odlaganje

Metoda povratka + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	100,6	95,8	94,3	98,9
10		129,8	128,8	129,4	134,2
15		141,9	143,9	149,2	155,7
20		148,2	152,6	161,0	169,7
30		154,9	161,2	173,7	186,3
40		158,1	165,6	180,4	195,1
5	*50/20*	70,9	69,3	71,8	76,9
10		97,0	96,8	100,9	108,3
15		111,3	112,3	119,0	127,4
20		120,8	123,0	131,3	141,0
30		132,2	136,4	147,7	159,5
40		139,4	144,9	158,3	171,8
5	*60/20*	62,0	60,9	63,5	67,8
10		86,4	85,5	90,2	96,7
15		100,4	100,8	106,8	114,9
20		110,1	112,0	118,7	128,4
30		122,7	126,0	135,7	146,5
40		130,4	134,9	147,1	159,2
5	*70/20*	53,1	51,6	53,9	58,6
10		74,6	73,8	77,6	83,7
15		88,2	87,7	93,2	100,3
20		97,6	98,4	104,0	112,7
30		110,7	112,7	121,1	131,1
40		119,6	122,6	132,2	143,6
5	*80/20*	43,4	42,4	44,2	48,2
10		62,2	61,5	63,8	69,4
15		74,3	73,7	78,2	84,3
20		83,3	83,2	88,4	95,7
30		96,5	97,0	104,0	112,3
40		105,6	106,8	115,1	124,9
Metoda povratka + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	239,5	213,4	196,1	198,7
10		358,6	324,4	292,7	285,3
15		427,1	397,0	362,4	350,3
20		472,4	447,2	415,6	402,4
30		522,4	507,7	489,1	478,7
40		550,3	544,6	534,6	530,2
5	*50/20*	162,4	153,8	151,0	156,0
10		247,4	233,1	227,6	233,0
15		304,5	288,8	283,2	287,0
20		346,1	330,7	324,8	330,2
30		402,6	388,7	385,9	392,2
40		439,5	429,0	430,4	438,3
5	*60/20*	141,4	134,4	135,1	141,2
10		215,5	205,0	204,0	210,5
15		267,3	254,4	253,1	259,9
20		305,3	292,3	290,5	298,0
30		360,9	346,6	347,1	354,7
40		397,4	386,8	388,2	397,3
5	*70/20*	119,2	115,5	116,7	122,5
10		183,6	176,0	177,7	183,7
15		227,8	217,5	218,8	227,6
20		261,8	251,3	252,3	261,5
30		311,6	301,1	302,3	313,3
40		349,0	337,9	340,7	351,2
5	*80/20*	98,8	95,8	97,6	102,5
10		149,7	145,0	147,1	155,0
15		187,3	181,1	183,0	190,6
20		216,8	210,1	210,1	220,1
30		262,6	251,4	255,3	265,9
40		295,7	285,2	286,7	299,9

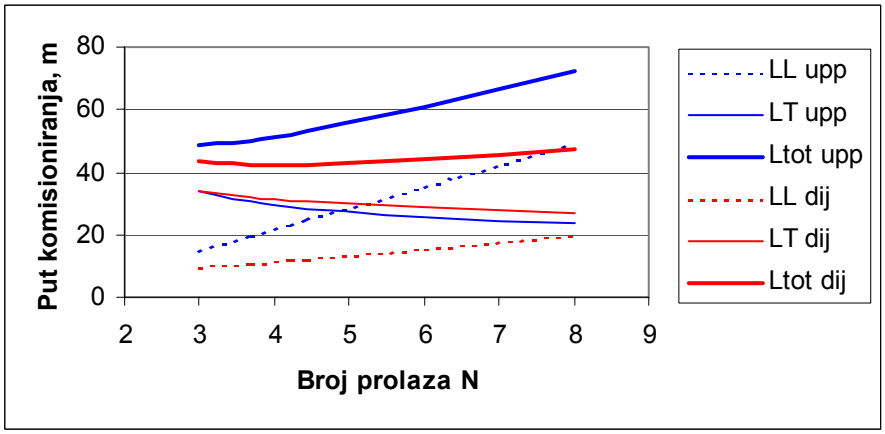
Iz rezultata je vidljivo da je odlaganje po prolazima najpovoljniji tip odlaganja za metodu routinga S-oblika, ali nije dobar tip odlaganja i s metodom povratka. S ovom metodom routinga za veće je narudžbe i manje zakrivljenosti ABC krivulje protoka najpogodnije odlaganje uzduž prednjeg prolaza, dok se u slučajevima s većom zakrivljenošću ABC krivulje i manjim narudžbama najkraći put komisioniranja postiže dijagonalnim odlaganjem. Također je uočljiva određena razlika u dominaciji ova dva tipa odlaganja ovisno o veličini skladišta. Za manje je skladište ono na strani dijagonalnog odlaganja, dok je za veće skladište na strani odlaganja uzduž prednjeg prolaza.

Kvalitativno se područja preferencija ova dva tipa odlaganja mogu predočiti grafom danim na slici 4-8.



Slika 4-8. Područja preferencija tipova odlaganja za routing prema metodi povratka

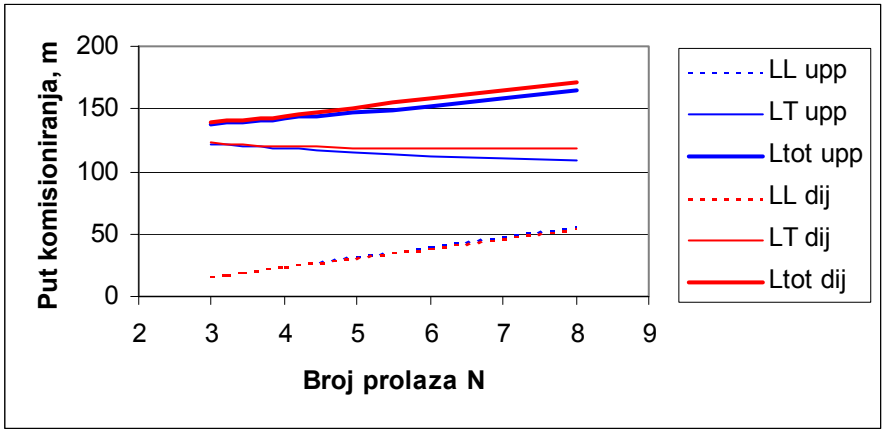
Prednost pojedinog tipa odlaganja ovisno o spomenutim veličinama leži u potencijalu smanjenja pojedine komponente puta. Sa slike 4-9 vidljivo je da u području malih narudžbi i velike zakrivljenosti ABC krivulje protoka potencijal smanjenja "preko prolaza" komponente puta dijagonalnim odlaganjem (LLdij) nadmašuje potencijal smanjenja komponente "uzduž prolaza", minimiziranu odlaganjem uzduž prednjeg prolaza (LTupp).



Slika 4.9 Komponente i ukupni put komisioniranja u području preferencije dijagonalnog odlaganja za routing prema metodi povratka

S druge strane, u području velikih narudžbi i male zakrivljenosti ABC krivulje protoka (slika 4-10), smanjenje "uzduž prolaza" komponente puta dijagonalnim odlaganjem praktički ne

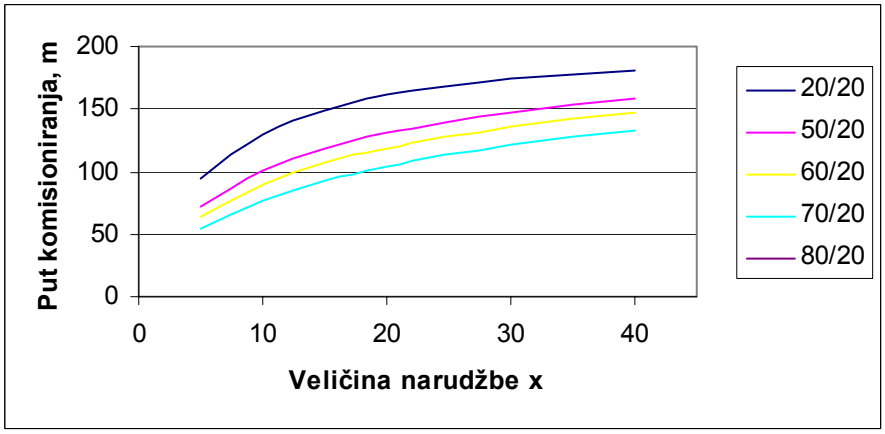
dolazi do izražaja, te minimizacija puta unutar prolaza donosi prednost odlaganju uzduž prednjeg prolaza.



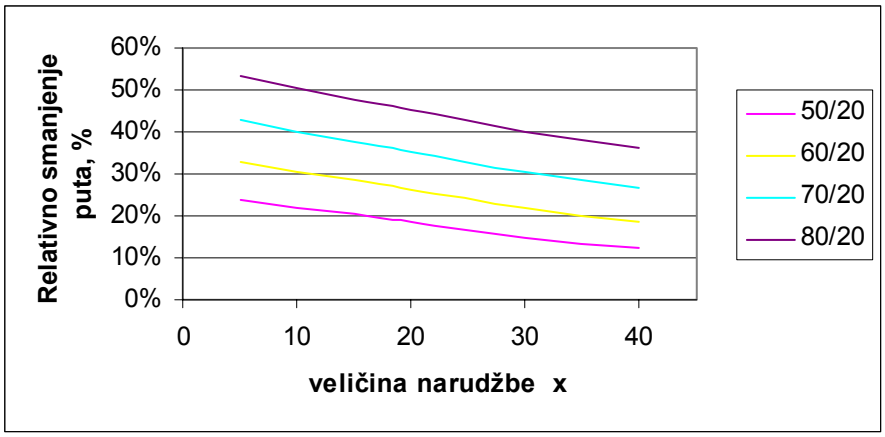
Slika 4.10 Komponente i ukupni put komisioniranja u području preferencije odlaganja uzduž prednjeg prolaza za routing prema metodi povratka

Povećanjem veličine skladišta, što podrazumijeva povećanje duljine prolaza, raste udio komponente "uzduž prolaza" u ukupnom putu komisioniranja u odnosu na komponentu "preko prolaza", te se time povećava i područje preferencije odlaganja uzduž prednjeg prolaza. No unatoč definiranoj preferenciji pojedinog tipa odlaganja u određenom području, u većini su slučajeva razlike u rezultatima vrlo male (nekoliko postotaka), te se za praktičnu uporabu mogu predložiti oba tipa odlaganja. Iznimka su samo vrlo široka skladišta u području preferencije dijagonalnog odlaganja, gdje razlike u rezultatima dosežu i 30%, na što treba obratiti pozornost.

Smanjenje puta komisioniranja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja za ovu je metodu routinga još veće nego je to bio slučaj sa metodom S-oblika. U situacijama s malim narudžbama i velikom zakrivljenošću ABC krivulje, smanjenje puta komisioniranja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja moguća su u iznosima i preko 50%. Za velike narudžbe i manje zakrivljenosti krivulje protoka smanjenja su manja, te ovisno o veličini i prostornom rasporedu zone komisioniranja, iznose od 10 do 25%. Slike 4-11 i 4-12 ilustriraju na jednom primjeru put komisioniranja te pripadajuće postotne iznose smanjenja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja, za različite ABC krivulje protoka i veličine narudžbe.



Slika 4-11. Put komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u ovisnosti o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka, primjer (*N*=6, *L*=12, routing prema metodi povratka, dijagonalno odlaganje)



Slika 4-12. Relativno smanjenje puta komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja ovisno o ABC krivulji protoka i veličini narudžbe, primjer (*N*=6, *L*=12, routing prema metodi povratka, dijagonalno odlaganje)

Dodijeljeni raspored odlaganja za routing prema metodi najvećeg razmaka

I za ovu metodu nije moguće jednostavno odrediti najbolji tip odlaganja materijala. Odlaganje po prolazima (slika 4-1b) minimizirati će "preko prolaza" komponentu puta komisioniranja, kao i broj posjećenih prolaza. Istovremeno, međutim, povećanje broja traženih lokacija unutar prolaza smanjuje prosječnu veličinu najvećeg jaza, odnosno povećava prijeđeni put unutar prolaza. Odlaganje uzduž prednjeg prolaza (slika 4-1c) pak ne utječe na "preko prolaza" komponentu puta, kao ni na broj posjećenih prolaza. Smanjuje se komponenta puta "unutar prolaza" povećanjem najvećeg jaza zbog grupiranja traženih lokacija bliže prednjem prolazu. S obzirom na definiciju metode najvećeg razmaka, komisioner obavezno prolazi i prednjim i stražnjim glavnim prolazom, te se kao logično rješenje dodijeljenog rasporeda odlaganja nameće tip odlaganja uzduž prednjeg i stražnjeg prolaza (slika 4-1d) kao potencijalno bolji od prethodno opisanog. Na taj će se način maksimizirati najveći razmak unutar posjećenih prolaza, a time i pripadajuća komponenta puta [78]. Konačno, dijagonalno odlaganje će donekle smanjiti, kako komponentu puta "preko prolaza", tako i prosječni broj posjećenih prolaza (jasno uz određeno povećanje puta unutar tih prolaza), te je kao i za metodu povratka potencijalno dobar tip odlaganja.

Analogno predhodnim slučajevima, spomenute kombinacije također su analizirane simulacijama. Rezultati analize prikazani su u tablicama 4-5 do 4-8 (polja označena plavkasto indikator su najboljeg tipa odlaganja za dotičnu situaciju).

Realno očekivanje da je odlaganje uzduž prednjeg i stražnjeg prolaza za ovu metodu routinga povoljnije od odlaganja uzduž samo prednjeg prolaza pokazalo se opravdanim, međutim lošije od preostala dva analizirana odlaganja. Dijagonalno odlaganja se i za ovu metodu routinga pokazuje kao vrlo dobar tip odlaganja, no najpovoljniji način odlaganja gotovo u cijelom analiziranom području jest odlaganje po prolazima.

Smanjenja puta komisioniranja primjenom dodijeljenog odlaganja u odnosu na slučajno odlaganje za male narudžbe i veliku zakrivljenost ABC krivulje protoka također su vrlo značajna, te iznose i do 50%, dok su kod velikih narudžbi i slabo zakrivljenih ABC krivulja protoka moguća smanjenja maksimalno do 10%, ovisno o veličini i obliku skladišta.

Grafikoni puta komisioniranja primjenom odlaganja po prolazima kao i pripadajuće postotno smanjenje puta u odnosu na slučajni raspored odlaganje prikazani su na slikama 4-13 i 4-14.

Tablica 4-5. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi najvećeg razmaka i odlaganje po prolazima

Metoda najvećeg razmaka + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	81,1	79,4	81,8	88,8
10		95,8	99,8	106,1	114,2
15		102,0	110,0	120,7	131,0
20		105,4	116,1	130,5	142,7
30		109,6	123,5	142,5	158,3
40		112,1	127,8	149,8	167,9
5	*50/20*	68,2	65,3	66,4	70,8
10		81,6	82,4	87,5	95,4
15		90,8	94,2	101,7	110,8
20		96,6	102,0	112,3	122,4
30		104,1	112,9	126,0	138,4
40		107,9	119,7	135,4	150,0
5	*60/20*	63,2	59,4	59,8	64,1
10		75,3	74,7	78,9	85,9
15		83,5	85,7	92,4	100,7
20		89,8	93,9	102,1	111,8
30		98,6	105,4	115,6	127,8
40		104,1	113,2	126,4	139,5
5	*70/20*	58,4	53,3	53,0	55,8
10		68,5	66,2	68,9	75,1
15		75,7	75,7	81,0	88,5
20		81,4	83,6	90,4	99,2
30		90,6	95,1	104,4	114,9
40		96,9	103,3	114,4	125,6
5	*80/20*	53,5	47,4	46,4	47,3
10		62,4	58,2	59,0	63,2
15		68,2	65,9	68,9	74,9
20		72,7	72,3	77,1	84,6
30		80,6	82,9	89,5	99,1
40		87,0	91,2	99,6	110,1
Metoda najvećeg razmaka + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	186,9	171,4	165,6	174,9
10		257,6	238,6	225,7	230,7
15		303,6	286,8	271,9	273,6
20		336,3	322,7	309,2	309,6
30		378,3	373,1	365,3	366,8
40		405,2	406,6	406,3	409,7
5	*50/20*	160,1	147,3	138,7	142,9
10		214,7	201,8	194,4	198,7
15		253,8	240,6	233,2	238,2
20		283,8	271,8	264,4	269,4
30		326,6	319,1	313,2	319,0
40		358,8	353,3	350,0	355,7
5	*60/20*	148,4	134,7	127,7	130,7
10		194,3	182,1	177,8	182,9
15		228,9	218,2	213,1	219,4
20		257,5	246,3	241,6	247,3
30		299,7	290,8	286,2	293,1
40		330,4	323,3	321,3	327,8
5	*70/20*	133,4	121,5	114,0	115,8
10		170,9	161,1	156,9	162,1
15		201,4	192,0	189,0	194,8
20		226,0	216,8	214,5	221,0
30		265,2	256,7	254,9	262,5
40		295,5	286,7	285,4	294,1
5	*80/20*	119,5	105,8	98,6	99,3
10		148,1	138,2	133,3	137,3
15		172,3	163,5	160,9	167,3
20		192,2	185,0	183,5	190,9
30		227,3	220,2	219,2	227,0
40		254,2	247,2	246,6	255,8

Tablica 4-6. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi najvećeg razmaka i odlaganje uzduž prednjeg prolaza

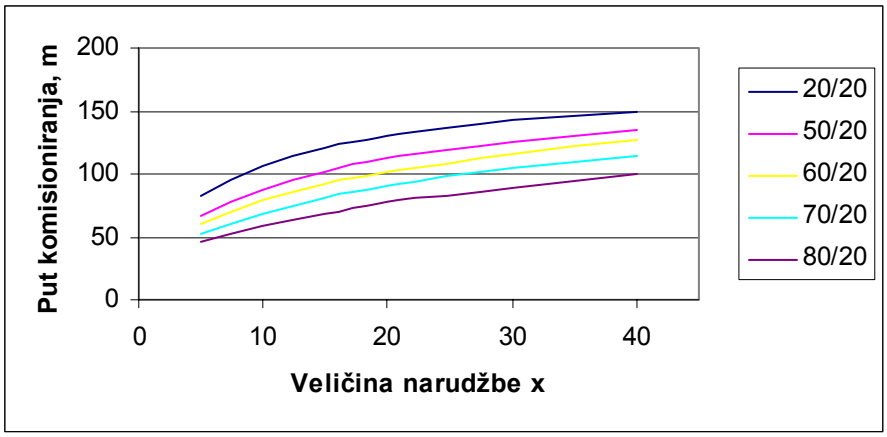
Metoda najvećeg razmaka + odlaganje uzduž prednjeg prolaza Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	81,1	79,4	81,8	88,8
10		95,8	99,8	106,1	114,2
15		102,0	110,0	120,7	131,0
20		105,4	116,1	130,5	142,7
30		109,6	123,5	142,5	158,3
40		112,1	127,8	149,8	167,9
5	*50/20*	78,6	76,7	79,4	86,6
10		91,5	94,0	100,2	109,3
15		96,9	102,6	112,8	123,4
20		99,7	107,9	120,5	133,1
30		103,9	114,7	131,3	146,2
40		106,6	119,0	137,7	154,4
5	*60/20*	78,0	75,4	78,2	85,6
10		89,0	91,1	97,5	106,7
15		94,0	99,2	108,4	119,5
20		97,1	104,0	116,0	128,5
30		101,1	110,3	125,5	140,2
40		103,8	114,6	131,8	147,8
5	*70/20*	76,6	74,1	77,0	84,3
10		86,5	87,8	94,0	103,9
15		91,0	94,8	103,8	115,5
20		93,8	99,1	110,4	123,3
30		97,8	105,1	119,0	133,5
40		100,4	109,2	124,8	140,3
5	*80/20*	75,3	72,9	75,6	83,4
10		83,9	84,3	90,7	100,9
15		87,6	90,2	99,2	111,0
20		90,3	94,0	104,8	117,7
30		93,7	99,7	111,9	126,4
40		96,4	103,2	117,2	132,4
Metoda najvećeg razmaka + odlaganje uzduž prednjeg prolaza Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	186,9	171,4	165,6	174,9
10		257,6	238,6	225,7	230,7
15		303,6	286,8	271,9	273,6
20		336,3	322,7	309,2	309,6
30		378,3	373,1	365,3	366,8
40		405,2	406,6	406,3	409,7
5	*50/20*	177,9	163,0	159,6	169,9
10		236,3	219,5	211,1	218,4
15		274,5	258,8	249,1	254,9
20		301,9	288,9	279,3	284,6
30		338,2	331,8	326,5	331,9
40		362,1	360,7	360,9	368,6
5	*60/20*	173,1	159,3	156,6	167,6
10		225,0	209,6	202,9	212,2
15		259,2	244,9	237,6	245,1
20		284,1	272,0	265,1	272,5
30		318,2	310,4	307,1	314,9
40		341,0	337,1	337,8	347,1
5	*70/20*	167,6	154,6	153,0	164,9
10		212,9	198,4	194,4	205,2
15		243,1	229,5	224,7	234,9
20		263,9	252,6	248,8	258,3
30		294,5	286,9	285,2	295,5
40		316,7	311,3	312,0	323,3
5	*80/20*	162,5	149,8	149,5	162,1
10		199,4	186,6	185,1	197,9
15		224,2	211,6	210,4	223,1
20		242,2	231,5	231,1	244,0
30		269,1	260,7	261,6	275,4
40		287,9	281,4	284,2	299,0

Tablica 4-7. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi najvećeg razmaka i odlaganje uzduž prednjeg i stražnjeg prolaza

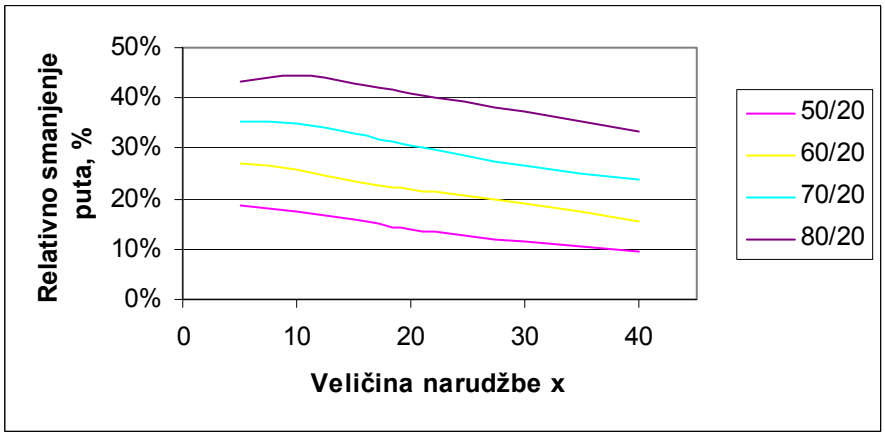
Metoda najvećeg razmaka + odlaganje uzduž prednjeg i stražnjeg prolaza Veličina skladišta (broj lokacija po razini), Q=144					
Veličina narudžbe x	ABC krivulja	Broj prolaza, N=3 Duljina prolaza, L=24	Broj prolaza, N=4 Duljina prolaza, L=18	Broj prolaza, N=6 Duljina prolaza, L=12	Broj prolaza, N=8 Duljina prolaza, L=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	81,1	79,4	81,8	88,8
10		95,8	99,8	106,1	114,2
15		102,0	110,0	120,7	131,0
20		105,4	116,1	130,5	142,7
30		109,6	123,5	142,5	158,3
40		112,1	127,8	149,8	167,9
5	*50/20*	77,4	74,8	77,4	84,1
10		89,3	91,2	97,4	106,8
15		95,0	100,4	110,4	121,3
20		98,7	106,0	119,3	131,9
30		103,2	113,7	130,8	146,7
40		106,1	118,6	138,3	156,3
5	*60/20*	76,4	73,7	76,4	84,1
10		87,3	88,9	95,2	104,7
15		92,5	96,9	106,9	118,2
20		95,8	102,3	115,1	128,3
30		100,2	109,3	125,8	141,9
40		103,1	114,1	132,7	150,9
5	*70/20*	75,3	72,5	75,5	83,4
10		85,0	85,9	92,7	102,9
15		89,6	93,4	103,5	115,5
20		92,6	98,2	110,3	124,6
30		96,6	104,6	120,4	137,0
40		99,4	108,8	126,6	145,2
5	*80/20*	74,4	71,4	74,5	82,7
10		82,6	83,4	90,5	100,9
15		86,6	89,6	100,0	112,9
20		89,2	93,8	106,5	121,2
30		92,9	99,2	114,8	132,3
40		95,4	103,0	120,0	139,3
Metoda najvećeg razmaka + odlaganje uzduž prednjeg i stražnjeg prolaza Veličina skladišta (broj lokacija po razini), Q=576					
Veličina narudžbe x	ABC krivulja	Broj prolaza, N=6 Duljina prolaza, L=48	Broj prolaza, N=8 Duljina prolaza, L=36	Broj prolaza, N=12 Duljina prolaza, L=24	Broj prolaza, N=16 Duljina prolaza, L=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	186,9	171,4	165,6	174,9
10		257,6	238,6	225,7	230,7
15		303,6	286,8	271,9	273,6
20		336,3	322,7	309,2	309,6
30		378,3	373,1	365,3	366,8
40		405,2	406,6	406,3	409,7
5	*50/20*	168,9	155,4	153,9	165,5
10		218,9	203,6	197,5	207,7
15		254,5	240,1	232,0	240,4
20		281,6	268,3	260,4	267,8
30		320,8	311,0	305,4	313,2
40		346,6	342,3	340,6	349,0
5	*60/20*	164,2	151,3	150,7	162,9
10		208,6	193,7	190,4	202,1
15		239,4	225,6	221,0	231,6
20		263,6	250,9	246,3	256,3
30		298,1	289,8	287,1	297,5
40		324,4	318,3	318,6	330,4
5	*70/20*	160,2	148,0	147,6	160,8
10		197,1	184,1	183,3	196,3
15		223,7	211,9	210,3	222,6
20		244,4	233,7	232,3	244,8
30		275,4	267,2	268,3	281,0
40		298,1	292,4	295,6	310,2
5	*80/20*	155,4	144,6	145,3	159,0
10		186,4	175,0	176,2	191,6
15		208,5	198,2	199,6	214,7
20		226,0	216,5	219,1	234,3
30		251,5	244,4	249,6	266,1
40		270,3	265,0	272,5	291,2

Tablica 4-8. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za routing prema metodi najvećeg razmaka i dijagonalno odlaganje

Metoda najvećeg razmaka + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	81,1	79,4	81,8	88,8
10		95,8	99,8	106,1	114,2
15		102,0	110,0	120,7	131,0
20		105,4	116,1	130,5	142,7
30		109,6	123,5	142,5	158,3
40		112,1	127,8	149,8	167,9
5	*50/20*	75,4	70,1	67,8	71,4
10		88,1	87,3	89,1	95,7
15		95,5	97,6	103,0	111,0
20		99,3	104,8	112,7	122,4
30		103,9	113,6	126,5	138,5
40		106,7	118,9	135,3	149,7
5	*60/20*	71,3	65,2	61,9	64,5
10		84,4	81,2	80,9	86,5
15		91,5	91,1	93,9	101,1
20		95,6	98,4	103,5	112,0
30		100,8	107,8	117,3	127,6
40		103,7	113,6	126,4	139,2
5	*70/20*	66,6	59,5	55,4	56,7
10		79,2	74,1	71,5	75,9
15		85,9	83,0	83,3	89,4
20		91,0	90,0	92,3	99,5
30		96,7	100,0	105,4	114,8
40		100,2	106,4	114,9	125,8
5	*80/20*	58,9	52,3	47,0	48,5
10		73,1	66,2	61,9	64,5
15		79,9	74,3	71,9	75,8
20		84,6	80,5	79,5	85,4
30		91,0	89,9	91,9	99,4
40		95,1	96,7	100,9	110,1
Metoda najvećeg razmaka + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	186,9	171,4	165,6	174,9
10		257,6	238,6	225,7	230,7
15		303,6	286,8	271,9	273,6
20		336,3	322,7	309,2	309,6
30		378,3	373,1	365,3	366,8
40		405,2	406,6	406,3	409,7
5	*50/20*	172,5	153,8	141,2	143,8
10		229,9	211,0	196,9	199,7
15		269,0	249,6	236,7	239,1
20		296,6	280,4	267,5	270,6
30		335,3	324,2	315,3	319,7
40		361,5	355,9	351,0	256,5
5	*60/20*	164,5	145,2	130,8	132,0
10		216,3	196,3	181,7	184,8
15		250,4	231,4	217,7	221,5
20		275,2	257,9	246,2	249,9
30		312,3	298,4	289,8	293,4
40		338,2	328,7	322,3	329,1
5	*70/20*	156,0	135,5	119,8	117,7
10		198,5	178,9	164,3	165,2
15		228,4	208,5	195,0	198,1
20		251,2	232,3	220,1	224,0
30		285,9	268,6	258,2	264,1
40		310,3	296,2	288,4	294,7
5	*80/20*	144,1	124,3	105,9	103,4
10		179,6	158,8	143,7	142,8
15		204,9	184,1	169,6	171,2
20		224,1	205,0	190,8	194,1
30		254,8	236,3	224,7	229,0
40		277,6	260,4	249,9	256,5



Slika 4-13. Put komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u ovisnosti o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka, primjer (*N*=6, *L*=12, routing prema metodi najvećeg razmaka, odlaganje po prolazima)



Slika 4-14. Relativno smanjenje puta komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni rasporedodlaganja ovisno o ABC krivulji protoka i veličini narudžbe, primjer (*N*=6, *L*=12, routing prema metodi najvećeg razmaka, odlaganje po prolazima)

Dodijeljeni raspored odlaganja za routing prema kombiniranoj metodi

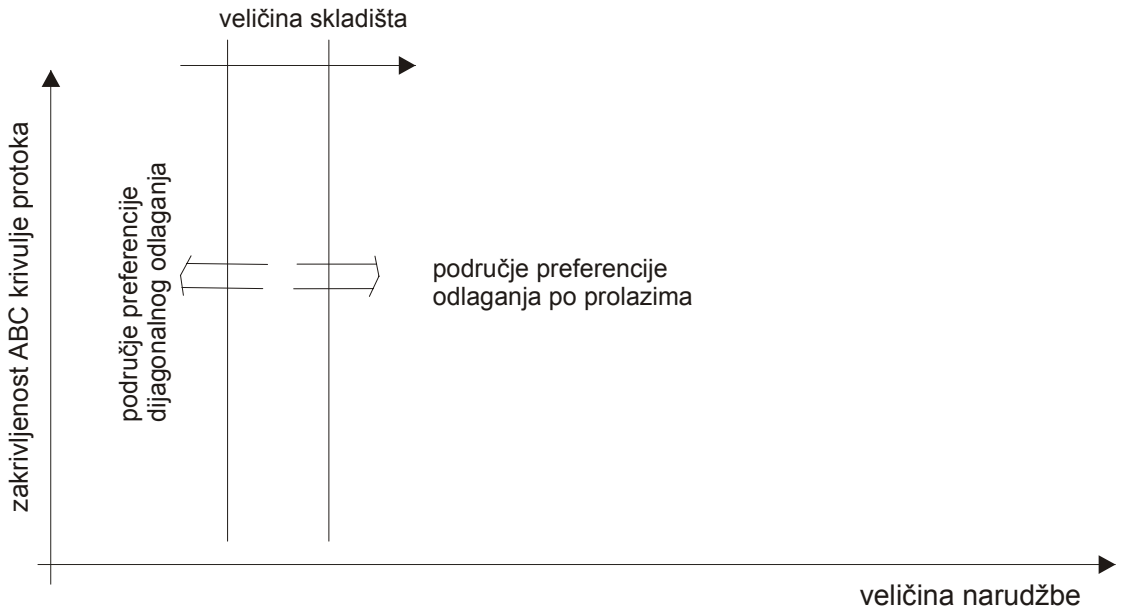
Imajući u vidu da kombinirana metoda rezultira rutom kretanja koja je zapravo modifikacija metode S-oblika, realno je za očekivati da su načini odlaganja koji smanjuju broj posjećenih prolaza najpogodniji za ovu metodu. U prvom redu to je odlaganje po prolazima koje, osim što minimizira broj posjećenih prolaza, minimizira i komponentu puta "preko prolaza". Kao alternativa tom odlaganju analizirano je i dijagonalno odlaganje. Rezultati simulacija prikazani su u tablicama 4-9 i 4-10.
Primjena analiziranih tipova odlaganja uz kombiniranu metodu routinga rezultira približno istim rezultatima u većini promatranih situacija. Za veće narudžbe uočava se manja prednost odlaganje po prolazima nad dijagonalnim odlaganjem i obrnuto, kod izrazito malih narudžbi povoljnije je dijagonalno odlaganje. Također se može uočiti i određena ovisnost rezultata o veličini skladišta, pa se kvalitativno mogu područja preferencija ova dva odlaganja prikazati grafom na slici 4-15. Za velike je narudžbe i veliki očekivani prosječni broj lokacija po prolazu, odnosno vjerojatnost prolaska komisionera kroz cijeli prolaz, a u tom je slučaju najpovoljnije minimizirati broj posjećenih prolaza. Obrnuto, kod izrazito malih narudžbi vjerojatnija je pojava povratnog kretanja unutar prolaza, te je u takvim slučajevima potencijal smanjenja te komponente puta znatnije na strani dijagonalnog odlaganja.

Tablica 4-9. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za kombiniranu metodu routinga i odlaganje po prolazima

Kombinirana metoda + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	79,8	78,8	81,2	88,8
10		97,1	99,1	106,3	114,9
15		104,6	105,6	118,1	129,9
20		108,4	107,4	124,3	138,6
30		112,5	108,0	128,9	147,4
40		114,7	108,0	129,8	150,5
5	*50/20*	65,5	64,5	66,1	70,4
10		82,3	83,6	88,2	95,7
15		91,5	93,5	101,0	110,2
20		97,3	99,2	109,2	119,7
30		104,5	104,8	118,4	131,7
40		108,4	106,7	123,6	138,6
5	*60/20*	59,7	58,0	59,5	63,7
10		74,6	75,7	79,7	86,5
15		84,5	85,8	92,1	100,3
20		90,3	92,7	100,1	110,0
30		98,3	100,6	110,8	122,6
40		103,6	104,2	117,3	130,5
5	*70/20*	53,0	51,0	51,4	55,0
10		67,1	66,5	69,9	76,1
15		75,9	77,0	81,4	88,9
20		81,9	83,8	90,1	98,4
30		91,2	92,9	101,1	110,8
40		96,8	98,8	108,2	119,9
5	*80/20*	45,5	43,8	43,2	45,9
10		58,1	56,7	58,7	63,7
15		65,8	65,8	69,8	75,8
20		72,3	72,7	77,4	84,6
30		80,7	82,6	89,0	97,3
40		87,5	89,3	96,9	106,0
Kombinirana metoda + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	187,4	173,1	166,9	176,2
10		262,8	246,5	235,3	239,3
15		304,3	292,4	282,4	285,0
20		325,6	320,8	316,5	319,7
30		342,1	350,9	359,9	369,5
40		345,2	362,6	383,8	400,4
5	*50/20*	159,5	146,6	139,8	144,8
10		221,9	208,0	200,7	204,8
15		257,1	245,8	240,2	245,9
20		280,0	272,1	269,4	275,4
30		309,9	306,5	308,6	318,1
40		325,6	326,9	334,4	347,7
5	*60/20*	145,9	134,9	127,6	131,2
10		200,0	188,8	182,5	188,4
15		233,4	223,7	218,9	225,1
20		257,2	247,4	245,3	253,2
30		287,8	282,5	282,3	292,1
40		306,9	304,3	308,1	319,7
5	*70/20*	130,5	119,1	113,7	116,6
10		176,1	166,7	162,0	166,2
15		206,6	197,7	193,3	200,3
20		229,5	219,6	217,9	225,2
30		260,1	252,5	252,7	261,6
40		281,4	276,1	277,7	288,4
5	*80/20*	112,1	102,8	96,6	99,0
10		148,7	140,7	137,7	141,8
15		177,2	168,6	165,0	171,7
20		197,2	188,6	186,0	193,7
30		227,7	219,5	218,4	227,0
40		249,1	241,2	241,2	251,0

Tablica 4-10. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za kombiniranu metodu routinga i dijagonalno odlaganje

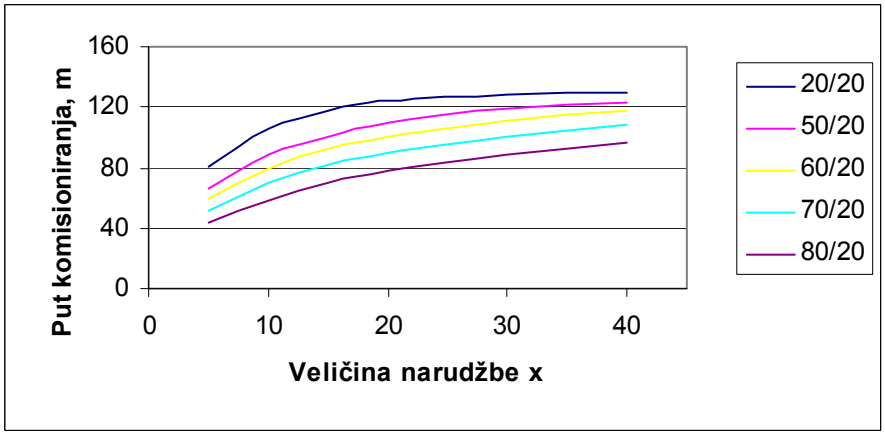
Kombinirana metoda + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	79,8	78,8	81,2	88,8
10		97,1	99,1	106,3	114,9
15		104,6	105,6	118,1	129,9
20		108,4	107,4	124,3	138,6
30		112,5	108,0	128,9	147,4
40		114,7	108,0	129,8	150,5
5	*50/20*	65,3	63,8	65,5	70,3
10		83,9	84,5	88,3	95,7
15		92,7	94,6	101,0	110,1
20		97,8	100,0	109,3	119,7
30		103,3	105,2	118,6	131,8
40		106,5	106,9	123,6	138,7
5	*60/20*	58,6	57,0	58,2	63,0
10		77,8	77,2	80,1	86,5
15		87,2	88,1	92,3	100,3
20		92,4	94,6	100,8	110,4
30		98,8	101,6	111,1	122,6
40		102,5	104,8	117,6	130,8
5	*70/20*	50,6	50,4	51,0	54,5
10		69,2	68,7	70,4	76,1
15		79,3	79,3	82,2	89,6
20		85,7	86,6	90,5	98,5
30		93,1	95,2	101,7	110,8
40		97,3	100,3	109,1	119,9
5	*80/20*	42,4	41,6	42,5	45,4
10		59,0	58,3	59,6	63,8
15		69,3	68,8	71,2	76,3
20		76,6	76,5	78,4	84,9
30		85,0	86,0	90,1	97,6
40		90,6	92,0	97,1	106,0
Kombinirana metoda + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	187,4	173,1	166,9	176,2
10		262,8	246,5	235,3	239,3
15		304,3	292,4	282,4	285,0
20		325,6	320,8	316,5	319,7
30		342,1	350,9	359,9	369,5
40		345,2	362,6	383,8	400,4
5	*50/20*	149,2	139,8	136,9	143,0
10		219,5	206,6	199,7	204,7
15		260,2	247,6	240,4	245,7
20		287,9	276,7	270,4	275,7
30		316,9	312,6	310,7	318,5
40		331,4	332,8	336,5	347,7
5	*60/20*	132,9	126,9	125,1	130,0
10		198,0	187,4	181,7	187,8
15		237,8	225,9	219,5	225,5
20		265,2	254,1	246,8	253,2
30		298,4	289,8	284,8	293,1
40		317,0	312,2	311,7	320,7
5	*70/20*	116,0	111,7	110,1	113,7
10		173,9	164,8	161,0	166,5
15		210,2	199,9	195,0	200,6
20		236,9	225,9	219,4	225,6
30		271,5	262,1	255,2	262,5
40		294,3	284,9	280,1	289,0
5	*80/20*	96,4	93,4	93,7	97,1
10		145,4	140,4	137,5	152,3
15		177,9	170,7	166,8	171,8
20		203,0	194,2	188,6	194,5
30		238,1	228,5	221,2	227,4
40		262,2	252,0	244,7	252,3



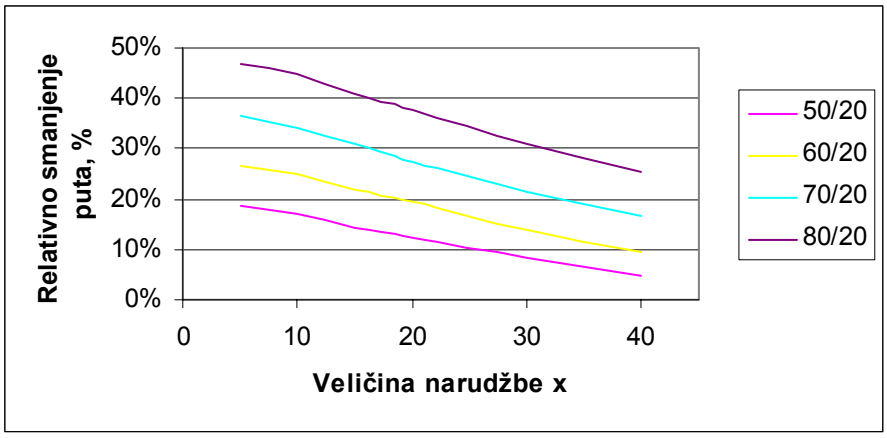
Slika 4-15. Područja preferencija tipova odlaganja za kombiniranu metodu routinga

Kako u području malih narudžbi dijagonalno odlaganje nadmašuje odlaganje po prolazima za max. 5%, za praktičnu se primjenu može ustvrditi da je i za ovu metodu routinga najpovoljniji tip odlaganja po prolazima.

Kao i za prethodne metode routinga, i za ovu postoji značajna mogućnost smanjenja puta komisioniranja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja. Mogućnosti uštede u vremena kretanja za male narudžbe i veliku zakrivljenost ABC krivulje protoka iznose i do 50%. Za velike narudžbe i slabo zakrivljene ABC krivulje protoka ostvarljive uštede znatno su manje, te iznose 5 do 15%, ovisno o veličini i obliku samog skladišta.
Analogno prethodnim slučajevima, put komisioniranja i smanjenja istog primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja primjerom su ilustrirani na slikama 4-16 i 4-17.



Slika 4-16. Put komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u ovisnosti o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka, primjer (*N*=6, *L*=12, kombinirana metoda routinga, odlaganje po prolazima)

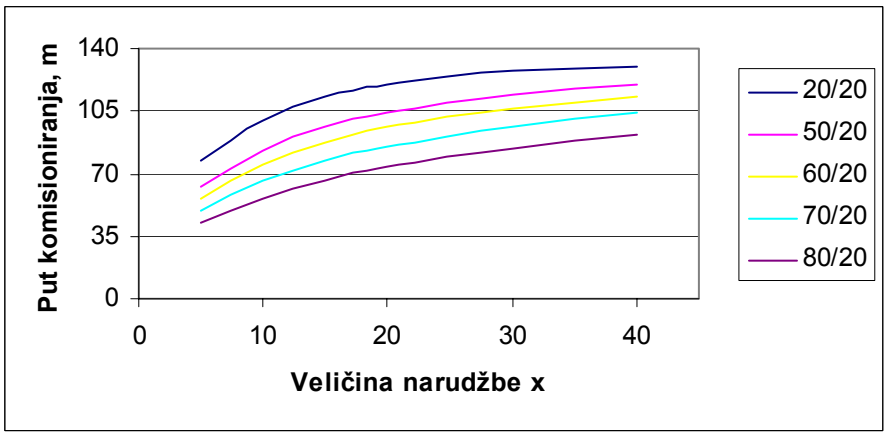


Slika 4-17. Relativno smanjenje puta komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja ovisno o ABC krivulji protoka i veličini narudžbe, primjer (*N*=6, *L*=12, kombinirana metoda routinga, odlaganje po prolazima)

Dodijeljeni raspored odlaganja za optimalni algoritam routinga

Izgled ruta kretanja dobijenih optimalnim algoritmom sugerira da su iste donekle kombinacija ruta definiranih metodama S-oblika i najvećeg razmaka. Stoga je realno za očekivati da je i kod ove metode routinga odlaganje po prolazima najpovoljniji način odlaganja, a zbog usporedbe napravljena je analiza i dijagonalnog odlaganja. Rezultati simulacija, prikazani u tablicama 4-11 i 4-12, to i potvrđuju. Samo u situacijama s izrazito malim narudžbama te uskim skladištima dijagonalno odlaganje ostvaruje bolji rezultat, međutim razlike su toliko male da je za praktičnu primjenu nepotrebno govoriti o nekom području preferencije dijagonalnog tipa odlaganja, kao i kod kombinirane metode routinga.

Smanjenje duljine optimalnog puta komisioniranja primjenom odlaganja po prolazima u odnosu na slučajni raspored odlaganja također, kao i kod većine heurističkih metoda, iznose do 50% za slučajeve malih narudžbi i jako zakrivljenih ABC krivulja protoka. U slučaju slabo zakrivljene krivulje protoka te velikog broja posjećenih lokacija po ruti potencijal smanjenja optimalnog puta primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja iznosi samo 5-10%. Ovi zaključci također su potkrijepljeni primjerom, prikazanim na slikama 4-18 i 4-19.



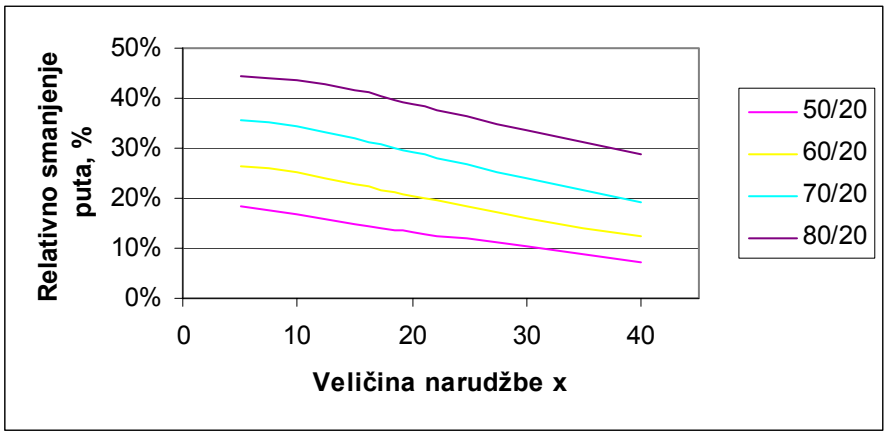
Slika 4-18. Put komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u ovisnosti o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka, primjer (*N*=6, *L*=12, optimalna ruta, odlaganje po prolazima)

Tablica 4-11. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za rute definirane optimalnim algoritmom i odlaganje po prolazima

Optimalni algoritam + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	74,5	72,0	76,8	84,7
10		89,4	92,1	99,9	109,2
15		96,7	102,0	112,7	124,1
20		101,5	106,1	120,3	133,7
30		106,8	107,9	127,2	144,3
40		110,0	108,0	129,4	148,8
5	*50/20*	64,5	61,0	62,7	67,8
10		77,0	77,1	83,1	91,0
15		83,9	87,1	95,8	105,2
20		89,4	94,6	104,2	115,2
30		96,4	102,3	114,2	127,3
40		101,2	105,7	120,3	135,3
5	*60/20*	59,0	55,8	56,5	60,8
10		71,6	70,5	74,7	82,1
15		78,3	79,7	87,0	96,0
20		83,3	86,8	95,8	106,1
30		90,6	95,9	106,7	118,6
40		95,7	101,6	113,3	126,8
5	*70/20*	54,4	50,1	49,5	83,0
10		66,1	63,3	65,7	72,4
15		72,4	71,1	76,8	84,9
20		77,0	77,9	85,3	94,1
30		83,6	87,5	96,8	107,5
40		88,5	94,1	104,4	115,9
5	*80/20*	50,0	44,7	42,6	44,4
10		60,4	56,2	56,4	61,3
15		66,1	62,8	65,6	72,3
20		70,1	68,7	73,4	80,6
30		76,0	76,9	84,3	94,1
40		80,5	83,5	92,3	102,7
Optimalni algoritam + odlaganje po prolazima Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	168,2	156,0	155,2	166,9
10		232,8	219,4	213,3	221,6
15		276,3	264,9	257,5	263,1
20		303,3	296,0	291,2	296,8
30		331,3	338,3	338,2	346,8
40		341,9	352,3	366,7	380,6
5	*50/20*	145,8	133,9	129,1	135,7
10		196,0	186,3	183,2	190,6
15		231,5	223,4	220,6	228,1
20		257,6	250,4	249,1	257,4
30		289,4	286,6	289,4	299,6
40		308,5	309,1	316,5	329,0
5	*60/20*	134,1	123,6	118,9	123,7
10		178,1	169,8	168,1	175,5
15		209,1	202,7	202,0	210,8
20		233,7	228,4	227,9	237,2
30		265,9	262,2	264,9	275,6
40		287,9	285,2	291,1	303,3
5	*70/20*	123,5	111,6	105,6	109,2
10		158,5	149,9	149,2	156,0
15		184,4	178,1	178,8	187,7
20		205,4	200,0	202,0	211,7
30		238,9	234,6	236,4	247,1
40		260,5	257,0	260,8	272,8
5	*80/20*	110,8	98,1	91,7	93,4
10		139,6	129,9	126,8	132,3
15		158,8	151,4	152,6	160,4
20		177,1	170,8	172,6	181,6
30		204,2	201,1	204,2	214,3
40		227,2	224,0	226,0	238,3

Tablica 4-12. Prosječni put komisioniranja ovisno o veličini narudžbe, prostornom rasporedu skladišta i ABC krivulji, za rute definirane optimalnim algoritmom i dijagonalno odlaganje

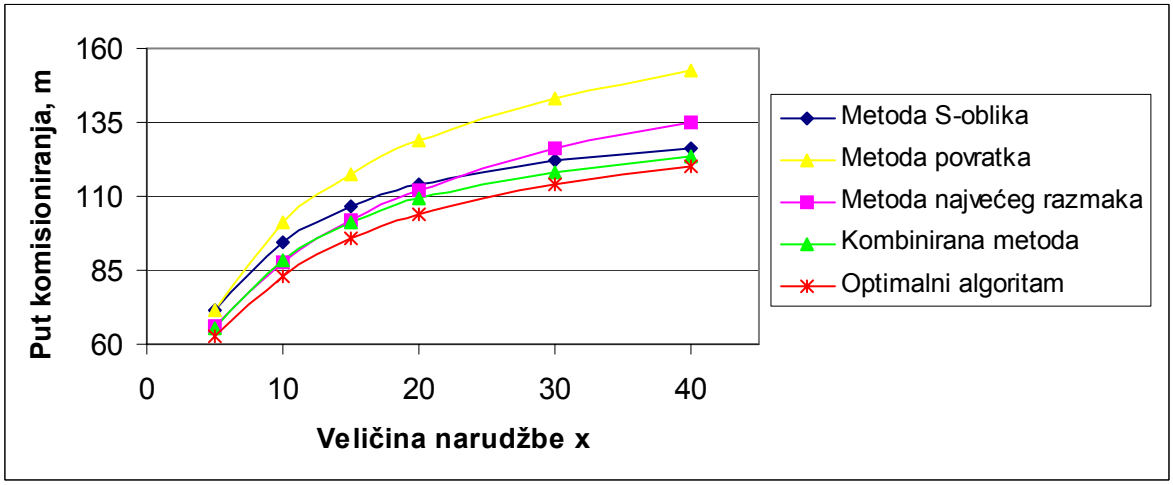
Optimalni algoritam + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=144					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=3 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=4 Duljina prolaza, *L*=18	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=12	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=9
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	74,5	72,0	76,8	84,7
10		89,4	92,1	99,9	109,2
15		96,7	102,0	112,7	124,1
20		101,5	106,1	120,3	133,7
30		106,8	107,9	127,2	144,3
40		110,0	108,0	129,4	148,8
5	*50/20*	63,0	61,7	63,0	67,9
10		80,2	80,1	83,6	91,5
15		87,8	90,0	96,4	105,7
20		92,4	96,2	105,2	115,5
30		98,3	103,4	114,6	127,6
40		102,0	106,2	120,7	135,4
5	*60/20*	57,9	56,0	56,6	61,0
10		74,8	74,0	75,6	82,6
15		82,9	83,6	88,1	96,3
20		88,0	90,3	96,8	106,0
30		93,9	98,5	107,6	118,6
40		97,8	103,1	114,1	127,0
5	*70/20*	50,4	49,3	49,9	53,1
10		67,5	65,9	67,5	72,7
15		76,6	76,0	78,4	85,1
20		82,1	82,4	86,4	95,0
30		88,8	91,5	97,9	107,4
40		93,0	97,1	105,3	116,0
5	*80/20*	42,0	41,3	42,1	44,5
10		58,2	56,9	58,6	61,3
15		67,9	66,4	67,8	72,9
20		74,2	73,2	74,0	81,6
30		81,9	82,1	85,9	93,9
40		86,5	88,1	94,0	103,3
Combined + dijagonalno odlaganje Veličina skladišta (broj lokacija po razini), *Q*=576					
Veličina narudžbe *x*	ABC krivulja	Broj prolaza, *N*=6 Duljina prolaza, *L*=48	Broj prolaza, *N*=8 Duljina prolaza, *L*=36	Broj prolaza, *N*=12 Duljina prolaza, *L*=24	Broj prolaza, *N*=16 Duljina prolaza, *L*=18
5	*20/20 (slučajni raspored odlaganja)*	168,2	156,0	155,2	166,9
10		232,8	219,4	213,3	221,6
15		276,3	264,9	257,5	263,1
20		303,3	296,0	291,2	296,8
30		331,3	338,3	338,2	346,8
40		341,9	352,3	366,7	380,6
5	*50/20*	143,4	133,6	130,1	136,1
10		202,7	190,7	184,1	190,6
15		240,3	229,6	223,0	229,1
20		267,5	257,1	252,1	258,2
30		300,5	293,7	292,3	300,9
40		318,6	316,7	319,3	330,6
5	*60/20*	130,2	122,8	118,9	124,0
10		186,3	175,1	170,0	176,3
15		221,1	210,2	205,6	211,4
20		247,4	236,2	231,0	238,5
30		281,3	272,7	268,7	276,8
40		302,1	295,3	294,3	305,5
5	*70/20*	114,1	109,0	106,2	110,4
10		165,2	156,7	151,3	157,3
15		197,9	187,5	183,0	189,3
20		221,6	211,2	206,7	213,3
30		254,7	245,9	241,0	248,8
40		278,2	269,2	265,0	274,8
5	*80/20*	95,7	92,0	90,7	93,9
10		140,2	134,4	131,1	135,0
15		169,8	162,6	157,4	162,8
20		192,4	182,8	178,3	184,3
30		224,4	214,7	209,3	216,5
40		247,2	237,3	232,3	240,3



Slika 4-19. Relativno smanjenje puta komisioniranja primjenom metode dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja ovisno o ABC krivulji protoka i veličini narudžbe, primjer (*N*=6, *L*=12, optimalna ruta, odlaganje po prolazima)

4.2.2. Usporedba metoda routinga s dodijeljenim rasporedom odlaganjem

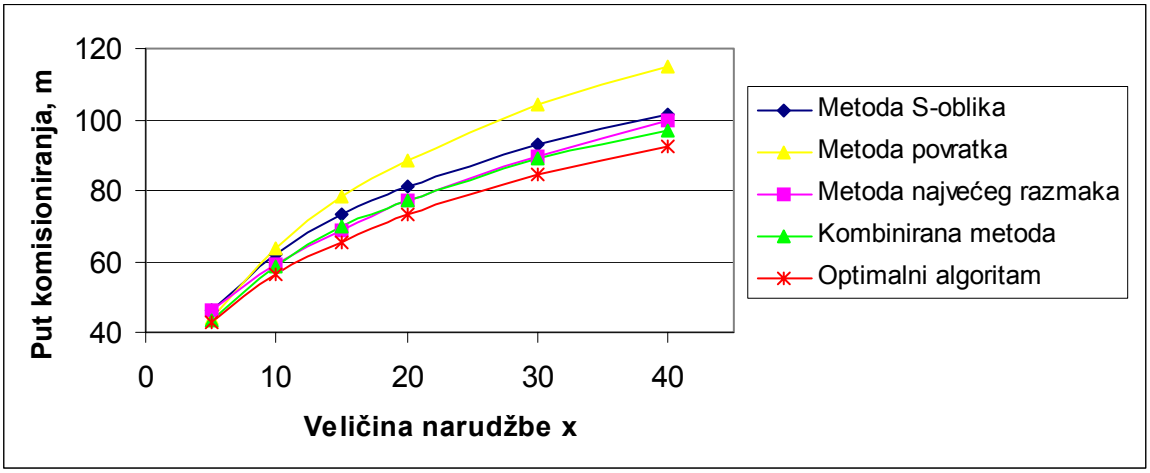
Provedene analize određivanja najboljeg tipa dodijeljenog rasporeda odlaganja za pojedinu metodu routinga pokazale su mogućnost znatnog skraćenja puta komisioniranja, a time i ukupnog vremena (troškova) komisioniranja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja. S obzirom na uočene promjene performansi pojedinih metoda routinga ovisno o zakrivljenosti ABC krivulje, u nastavku je dana usporedba metoda routinga s dodijeljenim rasporedeom odlaganja.
Grafički prikazi rezultata simulacija na odabranim primjerima ilustrirali su promjene puta komisioniranja metoda routinga s obzirom na zakrivljenost ABC krivulje protoka i veličinu narudžbe, dok slike 4-20 i 4-21 prikazuju međusobni odnos performansi metoda routinga.



Slika 4-20. Usporedba metoda routinga s dodijeljenim rasporedom odlaganja, zakrivljenost ABC krivulje proroka 50/20, primjer (*N*=6, *L*=12)

Vidljivo je da metoda povratka uz dodijeljeni raspored odlaganja nije više inferiorna ostalim metodama routinga u svim mogućim situacijama. Štoviše, za vrlo male narudžbe i jaku zakrivljenost krivulje rezultira manjim putem komisioniranja od ostalih jednostavnih metoda routinga. No u slučaju velikih narudžbi ova je metoda najlošija, neovisno o načinu odlaganja. Metoda najvećeg razmaka i uz dodijeljeni raspored odlaganja za male veličine narudžbi pokazuje vrlo dobre performanse, a nedostatak da u situacijama s većim prosječnim brojem

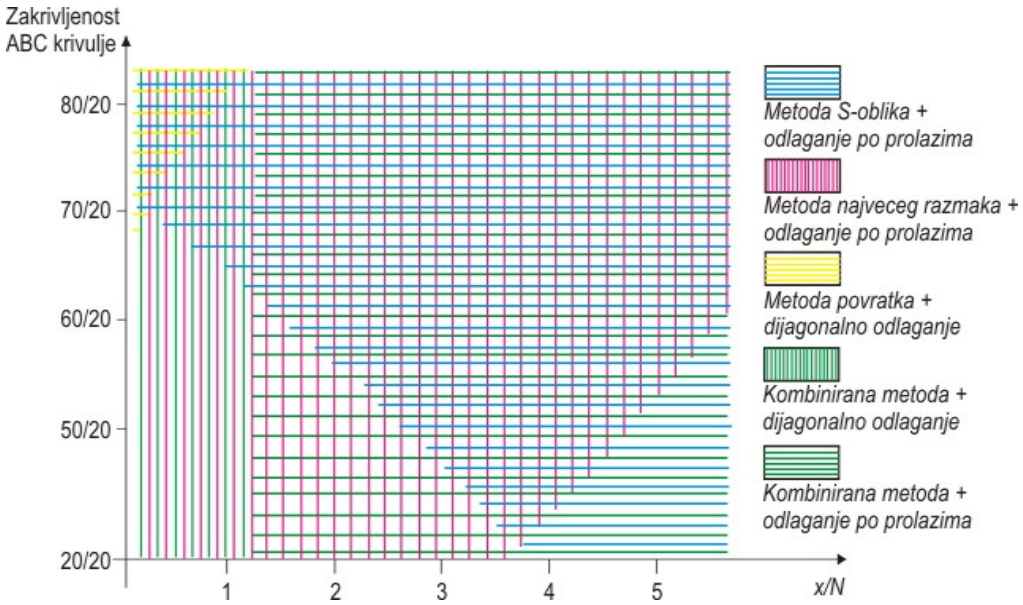
lokacija po prolazu rezultira dobrim rješenjem smanjuje se zakrivljenošću ABC krivulje protoka. Pa je tako vidljivo da kod jako zakrivljenih krivulja ova metoda rezultira kraćim putem komisioniranja od metode S-oblika u svim analiziranim situacijama, neovisno o veličini narudžbe. Nedostatak metode S-oblika da, uz slučajni raspored odlaganja, rezultira dobrom rutom kod malih narudžbi smanjuje se također povećanjem ABC krivulje protoka.



Slika 4-21. Usporedba metoda routinga s dodijeljenim rasporedom odlaganja, zakrivljenost ABC krivulje proroka 80/20, primjer (*N*=6, *L*=12)

Performanse kombinirane metode vrlo su dobre u svim situacijama, neovisno o zakrivljenosti ABC krivulje protoka, te je ona i uz dodijeljeni raspored odlaganja generalno najbolja heuristička metoda.

Najkraći put komisioniranja dobije se, logično, korištenjem optimalnog algoritma. No u svakoj je situaciji moguće odabrati neku heurističku metodu koja će, uz odgovarajući način odlaganja, rezultirati približno optimalnim rješenjem [79]. Jednostavne heurističke metode u takvim situacijama rezultiraju rutama koje su 4-8% iznad optimalne rute, dok kombinirana metoda daje samo 1-5% veći put od optimalnog, ovisno o veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka. Područja s takvim rezultatima određenih kombinacija metoda grafički su predočena na slici 4-22.



Slika 4-22. Područja približno optimalnih ruta heurističkih metoda routinga uz dodijeljeni raspored odlaganja

4.2.3. Odlaganje po zonama

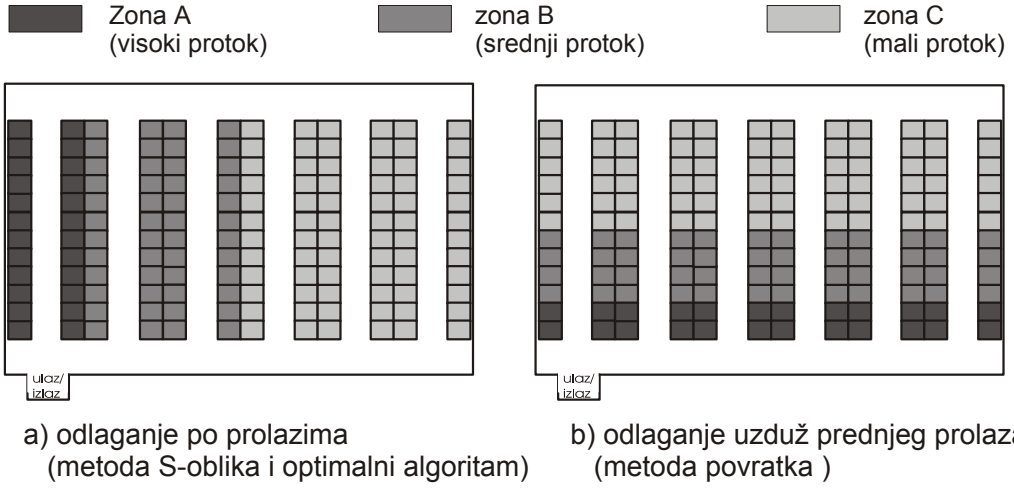
Osim već spomenute moguće potrebe za većim skladišnim prostorom, efikasna primjena dodijeljenog rasporeda odlaganja u praksi suočena je i s još jednim realnim problemom. Zbog dinamike promjena na tržištu (potražnja, novi proizvodi), stalne analize i relokacije proizvoda neophodne su za potpuno ostvarenje potencijala dodijeljenog rasporeda odlaganja. Stoga i ne čudi podatak da većina skladišta u svijetu koristi kombinacije slučajnog rasporeda odlaganja i dodijeljenog rasporeda odlaganja samo za manju grupu proizvoda s visokim protokom [79].
Jedno od mogućih rješenja za spomenute probleme je primjena odlaganja po zonama. Provedena istraživanja, iako za automatizirana skladišta [60], [61], [62], pokazala su da se sa samo nekoliko zona gotovo u potpunosti ostvaruje prednost unaprijed dodijeljenog rasporeda odlaganja u vidu minimizacije puta, a zadržava prednost slučajnog rasporeda odlaganja u vidu minimalne potrebne površine. Za očekivati je da je takav slučaj i kod klasičnih regalnih skladišta s prolazima.

Provedena analiza ograničena je na jedan prostorni raspored (N=6, L=12), s veličinom narudžbe x=20 i dvije ABC krivulje protoka, 50/20 i 80/20, te tri metode routinga. Za metodu routinga S-oblika primjenjeno je odlaganje u zone po prolazima, dok za metodu povratka odlaganje uzduž prednjeg prolaza. Također je analizom odlaganja u zone po prolazima uz optimalni algoritam routinga određeno odstupanje od optimalnog rezultata. Uporaba odlaganja po zonama implicira dva faktora: broj zona i veličinu zona. Broj zona najčešće je 2, 3 ili 4 [79]. Veličina zona definira se podjelom proizvoda u zone. U tablici 4-13 prikazane su analizirane kombinacije broja i veličine zona, te pripadajući broj prolaza odnosno lokacija unutar prolaza u određenoj zoni.

Tablica 4-13. Broj i veličina zona (oznaka, pripadajući prolazi odnosno lokacije unutar prolaza) u provedenoj analizi

Broj zona	Veličina zona					
	Oznaka	Prolazi	Lokacije	Oznaka	Prolazi	Lokacije
2	**33-66**	2-4	4-8	**17-83**	1-5	2-10
3	**17-17-66**	1-1-4	2-2-8	**17-33-50**	1-2-3	2-4-6
4	**17-17-17-50**	1-1-1-3	2-2-2-4	**17-17-33-33**	1-1-2-2	2-2-4-4

Oznaka npr. 17-33-50 implicira da je 17% proizvoda s najvećim protokom u prvoj zoni, 33% sa srednjim protokom u drugoj zoni, te preostalih 50% s najmanjim protokom u trećoj zoni, te za ovaj primjer rasporedi zona odlaganja izgledaju kao na slici 4-23.



a) odlaganje po prolazima (metoda S-oblika i optimalni algoritam)

b) odlaganje uzduž prednjeg prolaza (metoda povratka)

Slika 4-23. Rasporedi zona odlaganja, primjer

U tablicama 4-14 do 4-16 prikazani su rezultati analize, usporedba puteva komisioniranja uz slučajno, dodijeljeno i odlaganje po zonama, kao i podaci o postotnom relativnom povećanju efikasnosti komisioniranja (*PRP*) primjenom odlaganja po zonama. Spomenute vrijednosti predstavljaju odnos smanjenja puta komisioniranja primjenom odlaganja po zonama i smanjenja puta komisioniranja primjenom dodijeljenog rasporeda odlaganja, oba u u odnosu na slučajni raspored odlaganja. Prema tome je

$$PRP = \frac{L_S - L_Z}{L_S - L_D} \cdot 100\% \tag{17}$$

gdje su

L_S - put komisioniranja sa slučajnim rasporedom odlaganja, m

L_Z - put komisioniranja s odlaganjem po zonama, m

L_D - put komisioniranja s dodijeljenim rasporedom odlaganja, m

Tablica 4-14. Rezultati analize odlaganja po zonama za routing metodom S-oblika

Metoda odlaganja	ABC krivulja protoka	Oznaka (broj i veličina zona)	Put , m	PRP
Slučajni raspored odlaganja			128,4	
Dodijeljeni raspored odlaganja po prolazima	50/20		114,0	
	80/20		81,3	
Odlaganje u zone po prolazima	50/20	33-66	119,4	62,5 %
		17-83	123,1	36,8 %
		17-17-66	118,4	69,4 %
		17-33-50	116,6	81,9 %
		17-17-17-50	116,4	83,3 %
		17-17-33-33	115,4	90,3 %
	80/20	33-66	88,7	84,3 %
		17-83	98,7	63,1 %
		17-17-66	86,8	88,3 %
		17-33-50	85,5	91,1 %
		17-17-17-50	83,3	95,8 %
		17-17-33-33	83,0	96,4 %

Tablica 4-15. Rezultati analize odlaganja po zonama za routing metodom povratka

Metoda odlaganja	ABC krivulja protoka	Oznaka (broj i veličina zona)	Put , m	PRP
Slučajni raspored odlaganja			161,0	
Dodijeljeni raspored odlaganja uzduž prednjeg prolaza	50/20		128,6	
	80/20		97,7	
Odlaganje u zone uzduž prednjeg prolaza	50/20	33-66	138,0	71,0 %
		17-83	145,2	48,8 %
		17-17-66	137,0	74,1 %
		17-33-50	133,1	86,1 %
		17-17-17-50	131,8	90,1 %
		17-17-33-33	130,8	93,2 %
	80/20	33-66	111,7	77,9 %
		17-83	115,0	72,7 %
		17-17-66	104,5	89,3 %
		17-33-50	102,6	92,3 %
		17-17-17-50	101,0	94,8 %
		17-17-33-33	100,7	95,3 %

Tablica 4-16. Rezultati analize odlaganja po zonama za routing optimalnim algoritmom

Metoda odlaganja	ABC krivulja protoka	Oznaka (broj i veličina zona)	Put , m	PRP
Slučajni raspored odlaganja			120,3	
Dodijeljeni raspored odlaganja po prolazima	50/20		104,2	
	80/20		73,4	
Odlaganje u zone po prolazima	50/20	33-66	109,0	70,2 %
		17-83	111,3	55,9 %
		17-17-66	107,6	78,9 %
		17-33-50	106,1	88,2 %
		17-17-17-50	106,0	88,8 %
		17-17-33-33	105,0	95,0 %
	80/20	33-66	81,7	82,3 %
		17-83	86,1	72,9 %
		17-17-66	77,6	91,0 %
		17-33-50	75,8	94,9 %
		17-17-17-50	74,8	97,0 %
		17-17-33-33	74,0	98,7 %

Vidljivo je da se već sa tri zone može ostvariti 90% maksimalnog smanjenja puta komisioniranja ostvarivog dodijeljenim rasporedom odlaganja. To naročito vrijedi za veće zakrivljenosti ABC krivulje protoka. Osim o broju zona, iz rezultata je uočljivo da i odabir veličina zona može imati znatan utjecaj na put komisioniranja, poglavito u slučaju manjeg broja zona. Iako je analiza provedena samo za jedan prostorni raspored i tri metode routinga, za očekivati je ovakve rezultate i u ostalim situacijama. Stoga se može dati generalna ocjena da se primjenom odlaganja po zonama, uz pravilan odabir broja i veličina zona, ostvaruje gotovo u cjelosti prednost dodijeljenog rasporeda odlaganja u odnosu na slučajni raspored odlaganja.

4.3. Analitički pristup određenju prosječnog vremena vožnje komisionera s dodijeljenim rasporedom odlaganja

Kao i za slučajni raspored odlaganja, put komisioniranja jednostavnim heurističkim metodama S-oblika i povratka može se procijeniti razvijenim analitičkim modelima. Za složenije metode routinga vrlo je složeno (ako ne i nemoguće) izvesti izraze za statističko očekivanje pojedinih parametara funkcije puta komisioniranja. Također, modeli podrazumjevaju primjenu određenog načina odlaganja, po prolazima odnosno uzduž prednjeg prolaza.

4.3.1. Analitički modeli puta komisioniranja s dodijeljenim rasporedom odlaganja

Kao i u modelima opisanom u poglavlju 3.3.1 za slučajni raspored odlaganja, i kod dodijeljenog rasporeda odlaganja ukupni put komisioniranja može se izraziti kao suma očekivanog puta "uzduž prolaza" i "preko prolaza". Iznosi tih očekivanih puteva ovise o funkciji distribucije traženih lokacija po prolazima odnosno unutar prolaza, definiranoj funkcijom koja opisuje ABC krivulju protoka.

Model puta komisioniranja metodom S-oblika s odlaganjem po prolazima

Očekivani broj posjećenih prolaza za slučaj dodijeljenog rasporeda odlaganja po prolazima može se izračunati pomoću izraza

$$n^D = N - \sum_{i=1}^{N} (1 - p_i)^x \qquad (18)$$

gdje je *p(i)* vjerojatnost da se tražena lokacija nalazi u *i*-tom prolazu [75]. Ta se vjerojatnost može izraziti kao vjerojatnost da se tražena lokacija nalazi u prvih *i* prolaza umanjenu za vjerojatnost da se tražena lokacija nalazi u prvih *i*-1 prolaza

$$p(i) = F\left(\frac{i}{N}\right) - F\left(\frac{i-1}{N}\right) \tag{19}$$

gdje *F( )* predstavlja funkciju ABC krivulje protoka.

Shodno tome, očekivani put "uzduž prolaza" s dodijeljenim rasporedom odlaganja po prolazima iznosi

$$L_t^S = n^D \cdot (L + w_t) \tag{20}$$

Očekivani najdalji posjećeni prolaz, koji definira komponentu puta "preko prolaza", također ovisi o ABC krivulji, te se prema [75] može izraziti kao

$$n_f^D = N - \sum_{i=1}^{N-1}\left(\sum_{j=1}^{i}\left[F\left(\frac{j}{N}\right) - F\left(\frac{j-1}{N}\right)\right]\right)^x \tag{21}$$

te je očekivani put "preko prolaza"

$$L_l^S = 2 \cdot (n_f^D - 1) \cdot w_l \tag{22}$$

Ukupni očekivani put komisioniranja metodom S-oblika, uz odlaganje po prolazima, konačno je zbroj pripadajućih komponenti

$$L^S = L_t^S + L_l^S = n^D \cdot (L + w_t) + 2 \cdot (n_f^D - 1) \cdot w_l \tag{23}$$

Model puta komisioniranja metodom povratka s odlaganjem uzduž prednjeg prolaza

Analitički model određivanja očekivanog puta komisioniranja metodom povratka uz dodijeljeni raspored odlaganja napravljen je za slučaj odlaganja uzduž prednjeg prolaza. Takvo odlaganje nastoji minimizirati kretanje unutar posjećenog prolaza.

Očekivani broj posjećenih prolaza za takav je slučaj jednak očekivanom broju prolaza uz slučajni raspored odlaganja *n*, dan izrazom (1). Očekivani put unutar posjećenog prolaza ovisi o najudaljenijoj traženoj lokaciji unutar prolaza, te se analogijom[69] s određenjem očekivanog najdaljeg posjećenog prolaza može odrediti kao

$$l_f = L - \sum_{i=1}^{L-1}\left(\sum_{j=1}^{i}\left[F\left(\frac{j}{L}\right) - F\left(\frac{j-1}{L}\right)\right]\right)^{x/n} \tag{24}$$

gdje *x/n* predstavlja prosječni broj traženih lokacija po posjećenom prolazu.

[69] Ovakvo određenje najdalje lokacije unutar prolaza moguće je samo uz cjelobrojnu duljinu prolaza *L*, odnosno pretpostavku o jediničnoj duljini jedne lokacije. Takva pretpostavka sadržana je u provedenim simulacijama. U suprotnom, moguće je koristiti izraz za određenje očekivanog puta "unutar prolaza" predložen i objašnjen u *Caron et al.* [16].

Prema tome je komponenta puta "unutar prolaza" jednaka

$$L_t^R = n \cdot \left[(2 \cdot l_f - 1) + w_t \right] \tag{25}$$

Očekivani put "preko prolaza" definiran je očekivanim najdaljim prolazom n_f za slučajni raspored odlaganja, izraz (2), te konačno očekivani put komisioniranja metodom povratka uz odlaganje uzduž prednjeg prolaza iznosi

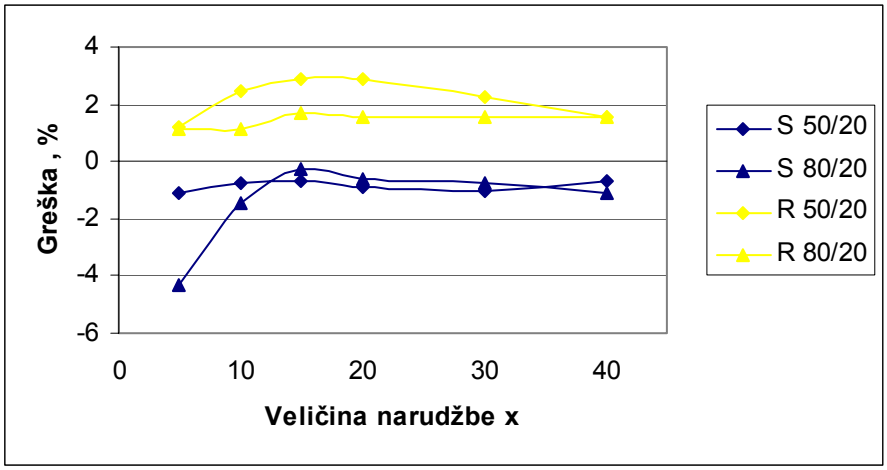
$$L^R = L_t^R + L_l^R = n \cdot \left[(2 \cdot l_f - 1) + w_t \right] + 2 \cdot (n_f - 1) \cdot w_l \tag{26}$$

4.3.2. Analiza modela puta komisioniranja s dodijeljenim rasporedom odlaganja i usporedba rezultata sa simulacijama

Verifikacija analitičkih modela provedena je usporedbom sa simulacijama dobivenim rezultatima, prikazanom u tablicama 4-17 i 4-18.

Kao i kod slučajnog rasporeda odlaganja, analitički model procjene puta komisioniranja metodom S-oblika uz odlaganje po prolazima rezultira nešto manjim putem od stvarnog prosječnog puta. Razlog za to leži također u pretpostavci o povratnom putu do polovice posljednjeg, neparnog posjećenog prolaza. To je poglavito vidljivo kod skladišta s tri prolaza, kod kojeg je velika vjerojatnost pojave povratnog kretanja u posljednjem prolazu. U takvim slučajevima porastom veličine narudžbe raste i veličina greške (zbog porasta prosječnog broja traženih lokacija u posljednjem prolazu). Međutim, porastom zakrivljenosti ABC krivulje protoka smanjuje se prosječni broj traženih lokacija u posljednjem prolazu, a time i greška analitičkog modela. Kod skladišta s parnim brojem prolaza, porast veličine narudžbe zapravo smanjuje vjerojatnost neparnog broja posjećenih prolaza, te je i greška smanjena.
Suprotno tome, analitički model procjene puta komisioniranja metodom povratka uz odlaganje uzduž prednjeg prolaza rezultira nešto većim putem komisioniranja od stvarnog. Greška je uzrokovana pretpostavkom o jednolikoj raspodjeli lokacija po prolazima, *x/n*, kao i kod analitičkog modela za slučajni raspored odlaganja.

Uz opasku o nešto znatnijoj grešci modela za metodu S-oblika u skladištima s neparnim brojem prolaza (u analiziranom primjeru max. 13%), može se ustvrditi da prezentirani modeli dobro procjenjuju put komisioniranja. Kao ilustracija te tvrdnje dat je grafikon relativne greške (□ analitičkih modela u odnosu na rezultate dobivene simulacijom, prikazan na slici 4-24.



Slika 4-24. Razlika između puta komisioniranja procjenjenog analitičkim modelima i određenog simulacijama (primjer *N*=6, *L*=12)

Tablica 4-17. Put komisioniranja dobiven pomoću analitičkog modela i simulacijom (routing prema metodi S-oblika, odlaganje po prolazima)

Metoda S-oblika + odlaganje po prolazima Broj skladišnih lokacija po razini, *Q*=144									
Veličina narudžbe, *x*	ABC krivulja	*N*=3 *L*=24		*N*=4 *L*=18		*N*=6 *L*=12		*N*=8 *L*=9	
		Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.
5	50/20	68,6	71,2	68,4	69,6	71,0	71,8	75,9	76,4
10		83,6	86,5	86,7	88,4	93,7	94,4	101,9	102,3
15		90,3	95,0	95,5	97,3	105,7	106,4	116,2	116,3
20		93,4	100,7	100,3	102,9	113,0	114,0	125,4	125,9
30		95,9	107,0	104,9	105,9	121,1	122,4	136,3	137,1
40		96,7	110,5	106,7	107,2	125,1	126,0	142,2	143,2
5	60/20	61,2	65,2	60,6	62,6	62,9	63,6	67,5	67,6
10		76,8	79,1	78,6	79,9	84,2	85,3	91,6	92,3
15		84,8	87,7	88,3	89,9	96,5	97,4	105,7	106,1
20		89,3	93,6	94,3	96,4	104,5	105,2	115,2	115,7
30		93,7	101,4	100,9	102,6	114,3	115,5	127,5	128,0
40		95,6	106,2	104,2	105,3	119,9	121,1	134,9	135,6
5	70/20	53,2	59,3	52,1	55,4	53,8	55,0	57,8	58,2
10		68,0	71,3	68,9	70,4	73,2	73,5	79,6	79,8
15		77,0	79,7	79,1	80,2	85,3	85,8	93,2	94,7
20		82,7	85,2	85,9	87,4	93,7	94,7	102,8	103,3
30		89,2	94,0	94,3	96,1	104,8	105,3	115,9	116,4
40		92,5	99,0	99,1	101,1	111,7	112,8	124,4	125,2
5	80/20	45,5	54,0	43,5	48,5	44,2	46,2	47,2	48,1
10		58,1	64,0	58,0	60,8	61,2	62,1	66,4	66,7
15		66,9	70,9	67,9	69,3	72,9	73,1	79,0	79,4
20		73,3	76,7	75,0	76,3	80,8	81,3	88,3	88,8
30		81,5	84,2	84,6	86,0	92,4	93,1	101,5	101,8
40		86,5	90,3	90,8	92,6	100,2	101,3	110,7	111,2
Metoda S-oblika + odlaganje po prolazima Broj skladišnih lokacija po razini, *Q*=576									
Veličina narudžbe, *x*	ABC krivulja	*N*=6 *L*=48		*N*=8 *L*=36		*N*=12 *L*=24		*N*=16 *L*=18	
		Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.
5	50/20	180,3	182,9	167,2	168,6	157,8	158,9	160,0	160,3
10		242,8	245,9	233,1	243,3	226,3	227,3	229,5	230,8
15		276,7	281,0	270,8	272,7	268,3	269,2	273,8	274,4
20		297,6	302,3	295,5	298,5	297,3	298,8	305,2	305,8
30		320,8	325,4	325,2	328,5	335,0	336,3	347,8	348,6
40		332,2	336,3	341,5	344,5	358,1	360,0	375,3	376,4
5	60/20	161,6	164,8	150,6	151,9	143,2	143,9	145,3	145,7
10		218,0	220,9	209,0	211,3	204,1	205,2	208,3	208,8
15		251,6	254,9	244,7	246,4	242,4	243,5	248,5	248,8
20		274,0	277,9	269,5	272,0	269,8	271,0	277,7	278,0
30		301,8	306,5	301,9	304,9	307,5	309,1	318,7	318,4
40		317,7	322,1	321,9	325,2	332,4	334,2	346,6	346,9
5	70/20	140,1	143,7	131,0	133,2	125,3	126,4	127,4	127,7
10		189,9	192,4	181,6	189,1	177,9	178,7	182,6	182,3
15		222,0	225,7	214,7	216,3	212,4	212,7	218,7	220,0
20		244,8	247,3	238,7	240,2	237,9	238,8	245,5	245,5
30		275,3	278,6	272,0	273,9	274,5	275,3	284,3	284,5
40		294,8	299,3	294,4	296,4	300,1	301,1	311,9	312,6
5	80/20	117,6	125,5	109,6	113,7	104,9	106,4	106,7	107,0
10		159,7	163,4	152,2	153,5	149,1	149,9	153,5	154,0
15		188,9	192,3	181,7	183,3	179,5	179,7	185,2	184,8
20		210,7	213,4	203,9	206,1	202,6	203,2	209,4	209,7
30		241,8	245,5	236,3	237,7	236,8	236,9	245,3	244,9
40		263,2	267,1	259,4	260,9	261,7	262,9	271,6	271,6

Tablica 4-18. Put komisioniranja dobijen pomoću analitičkog modela i simulacijom (routing prema metodi povratka, odlaganje po prolazima)

Metoda povratka + odlaganje uzduž prednjeg prolaza Broj skladišnih lokacija po razini, *Q*=144									
Veličina narudžbe, *x*	ABC krivulja	*N*=3 *L*=24		*N*=4 *L*=18		*N*=6 *L*=12		*N*=8 *L*=9	
		Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.
5	50/20	74,1	71,8	72,5	70,8	76,0	75,1	83,8	83,2
10		100,2	97,1	100,1	96,7	104,1	101,6	111,9	110,0
15		113,5	110,8	115,0	111,6	121,1	117,7	129,9	127,0
20		121,9	119,7	124,1	121,6	132,3	128,6	142,4	139,1
30		132,5	131,2	136,1	134,3	146,2	143,0	158,3	154,7
40		139,0	138,1	143,4	141,9	154,7	152,3	168,0	164,8
5	60/20	65,8	63,8	65,5	64,0	70,9	70,2	79,8	79,3
10		89,7	87,0	90,3	87,6	96,0	94,1	105,2	103,9
15		102,7	100,6	104,3	101,6	111,5	108,7	121,4	119,2
20		111,4	109,6	113,6	111,5	121,9	118,9	132,8	129,9
30		122,9	121,5	125,8	124,0	135,5	132,6	147,8	144,5
40		130,3	129,3	133,9	132,4	144,3	142,1	157,4	154,3
5	70/20	57,3	56,0	58,6	57,5	65,9	65,3	76,0	75,9
10		78,5	76,3	80,1	78,0	87,8	86,4	98,5	97,6
15		90,7	89,1	92,9	90,8	101,4	99,5	112,7	111,1
20		99,3	97,6	101,7	99,3	110,8	108,4	122,7	120,6
30		111,2	109,9	113,8	112,4	123,5	121,3	136,3	133,7
40		119,3	118,5	122,2	121,1	132,2	130,3	145,4	143,1
5	80/20	49,2	48,3	52,0	51,4	61,3	60,6	72,5	72,4
10		67,0	65,4	70,0	68,6	79,9	79,0	92,3	91,9
15		77,9	76,6	81,0	78,9	91,4	89,9	104,3	103,5
20		85,9	84,5	88,7	87,3	99,4	97,7	112,8	111,7
30		97,6	96,6	100,3	98,6	110,8	109,1	124,5	122,7
40		105,9	105,3	108,6	107,3	118,9	117,1	132,6	130,7
Metoda povratka + odlaganje uzduž prednjeg prolaza Broj skladišnih lokacija po razini, *Q*=576									
Veličina narudžbe, *x*	ABC krivulja	*N*=6 *L*=48		*N*=8 *L*=36		*N*=12 *L*=24		*N*=16 *L*=18	
		Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.	Analit.	Simul.
5	50/20	165,0	160,3	152,8	149,7	152,0	150,2	164,2	163,4
10		255,6	244,9	234,4	225,9	221,0	216,3	226,2	223,3
15		315,8	302,6	293,1	282,4	274,0	265,3	274,2	268,6
20		357,6	343,0	336,6	321,6	316,3	305,1	314,0	305,9
30		411,5	398,8	395,5	380,1	378,9	364,0	376,0	363,2
40		445,5	434,8	433,3	420,8	422,0	406,2	421,5	406,4
5	60/20	144,4	141,2	136,6	133,8	140,7	139,8	155,6	155,3
10		223,1	214,4	207,2	201,3	200,8	197,5	210,2	208,1
15		277,1	264,9	258,8	248,6	246,9	240,3	252,2	247,9
20		316,0	303,8	298,1	285,9	284,2	275,5	287,1	280,8
30		368,6	357,0	353,2	340,9	340,5	328,7	342,1	332,2
40		403,7	394,5	390,4	378,7	380,6	366,8	383,2	370,9
5	70/20	124,1	121,5	120,7	119,7	129,7	128,4	147,2	147,0
10		190,1	184,2	179,9	175,9	180,9	178,1	194,6	193,2
15		236,7	227,2	223,8	216,2	219,9	215,5	230,5	227,2
20		271,5	261,6	257,8	249,1	251,6	245,2	260,2	255,2
30		320,7	311,5	307,4	296,8	300,4	290,8	307,3	299,4
40		355,3	346,4	342,6	332,9	336,2	325,5	343,2	334,1
5	80/20	105,0	103,9	105,9	104,8	119,5	119,3	139,5	139,3
10		158,2	153,6	153,9	150,6	162,1	160,6	180,1	179,2
15		196,5	190,2	189,5	183,9	194,0	190,8	210,0	208,2
20		226,0	217,9	217,7	211,5	220,0	215,4	234,5	231,4
30		269,6	262,3	260,1	252,1	260,4	253,0	273,4	267,9
40		301,7	294,4	291,5	284,8	290,9	283,0	303,3	296,6

5. METODE SPAJANJA NARUDŽBI

Metode spajanja narudžbi (eng. *orderbatching methods*) čine treću grupu metoda za smanjenje vremena kretanja pri komisioniranju obrađenu u ovom radu. Primjena ovih metoda rezultat je odluke o organizaciji komisioniranja. Kao što je već spomenuto u poglavlju 2., postoji nekoliko metoda organizacije komisioniranja. Osnovna metoda, komisioniranje prema narudžbi, podrazumjeva prikupljanje materijala sa samo jedne narudžbe, odnosno narudžba komisioniranja jednaka je narudžbi korisnika. Analize metoda routinga i metoda odlaganja prikazane u prethodna dva poglavlja napravljene su uz pretpostavku o ovakvom načinu komisioniranja.
Kod manjih narudžbi (manjeg broja izuzimanja po narudžbi korisnika), veliki udio vremena komisioniranja otpada na vrijeme kretanja. U tom slučaju moguće je primjeniti drugačiji način organizacije komisioniranja – komisioniranje grupe narudžbi (eng. *batch picking*). Više narudžbi korisnika spaja se u jednu narudžbu komisioniranja, pa komisioner u jednoj ruti prikuplja materijal iz cijele grupe. Na taj se način može smanjiti prosječno vrijeme kretanja pri komisioniranju, te proces komisioniranja učiniti efikasnijim [21].
U literaturi se mogu naći opisane brojne heurističke metode za spajanje narudžbi, ali većina od njih nije primjenjiva za klasična skladišta s prolazima, već za slučajeve s jednim prolazom [21]. Određene usporedbe heurističkih metoda spajanja narudžbi za skladišta s prolazima i osnovnim prostornim rasporedom, prikazanim na slici 3-1, mogu se naći u radovima *Gibson & Sharp* [24], *Rosenwein* [29] i *De Koster et al*. [21]. Problem određenja metode spajanja narudžbi koja rezultira minimalnim putem kretanja pri komisioniranju sadržan je u sva tri rada, no uz pretpostavku o slučajnom rasporedu odlaganja te kretanju komisionera po najjednostavnijoj heurističkoj metodi routinga –metodi S-oblika[71]. Ukupni put komisioniranja ovisi o odabranoj metodi routinga, ali i većina algoritama rezultira drugačijim grupama narudžbi ovisno o pretpostavljenoj metodi routinga. Stoga je, u cilju minimizacije puta komisioniranja, potrebno utvrditi najbolje kombinacije ovih metoda u određenim situacijama. Također, i potencijal smanjenja ukupnog puta komisioniranja uz primjenu dodijeljenog rasporeda odlaganja i spajanja narudžbi ostaje otvoreni problem.
U slijedećem podpoglavlju dat je pregled postojećih metoda spajanja narudžbi pri komisioniranju, dok je podpoglavlje 5.2. posvećeno njihovoj analizi. Sublimacija istraživanja performansi kombinacija metoda komisioniranja, njihova utjecaja i značaja ovisno o primjenjenoj kombinaciji data je u poglavlju 7.

5.1. Definicije i algoritmi metoda spajanja narudžbi

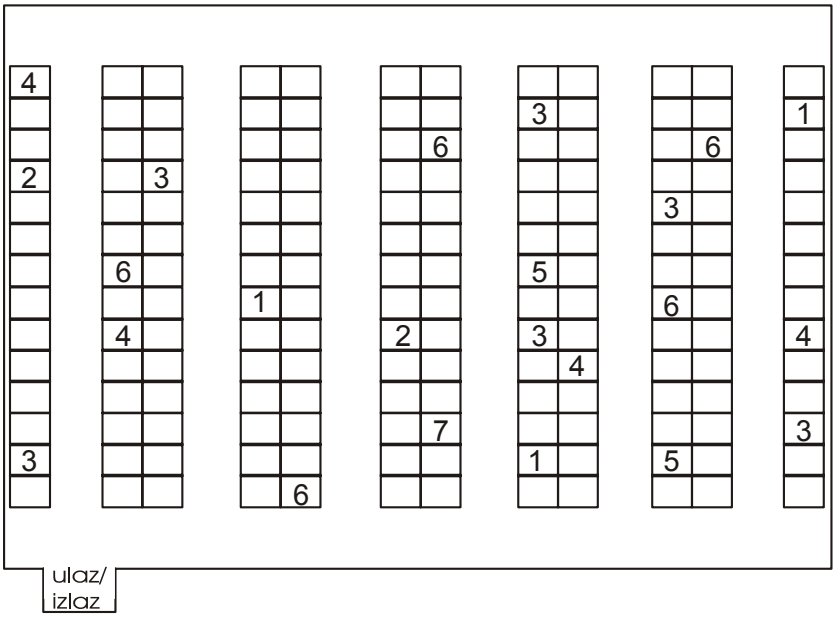
Iako se najbolje rješenje problema grupiranja narudžbi može naći određenjem svih mogućih kombinacija, te odabirom one s najkraćim putem, u praksi se češće koriste heurističke metode. Razlog za to leži u potrebnom prevelikom kompjuterskom vremenu računanja najboljeg rješenja [81]. Unatoč zajedničkom cilju razvijenih brojnih i različitih heurističkih metoda spajanja narudžbi, definiranje grupe narudžbi na način da se minimizira put komisioniranja, nisu sve jednako dobre za sve situacije. Pri tome je važno naglasiti da je svima zajedničko i jedno važno ograničenje – ne prekoračiti maksimalni kapacitet sredstva za komisioniranje. U prikazu postojećih metoda i pripadajućih algoritama koristi se jedan manji, ilustrativni primjer. U skladištu s prostornim rasporedom prikazanim na slici 5-1 potrebno je prikupiti materijal iz 7 narudžbi. Brojka u određenoj skladišnoj lokaciji na slici predstavlja materijal određene narudžbe. Veličine narudžbi su, prema tome, slijedeće

Narudžba 1: 3 jedinice
Narudžba 2: 2 jedinice
Narudžba 3: 6 jedinica
Narudžba 4: 4 jedinice

[71] *De Koster et al*. [21] su uz metodu S-oblika analizirali i put komisioniranja grupe narudžbi metodom najvećeg razmaka.

Narudžba 5: 2 jedinice
Narudžba 6: 5 jedinica
Narudžba 7: 1 jedinica

Kapacitet sredstva za komisioniranje ograničen je na 8 jedinica.



Slika 5-1. Primjer skladišta s označenim lokacijama proizvoda i pripadajućim brojem narudžbe

Prema *De Koster et al.* [21], heurističke metode spajanja narudžbi[72] mogu se podijeliti u tri grupe: jednostavne metode, algoritmi temeljne narudžbe (eng. *seed algorithms*) i algoritmi uštede (eng. *saving algorithms*).

Jednostavne metode

Iz ove grupe najčešće korištena heuristika u praksi je tzv. eng. *First-Come First-Served* algoritam - FCFS. Ovaj algoritam dodaje narudžbe grupi onim redoslijedom kojim su zaprimljene u skladište. Nakon što se dostigne maksimalni kapacitet sredstva za komisioniranje, formira se sljedeća grupa.
Primjena ovog algoritma na primjeru sa slike 5-1 rezultirala bi s 4 generirane grupe:

grupa 1 - narudžbe 1 i 2,
grupa 2 - narudžba 3,
grupa 3 - narudžbe 4 i 5,
grupa 4 - narudžbe 6 i 7.

Vidljivo je da usprkos kapacitetu sredstva za komisioniranje od 8 jedinica, niti jedna grupa ne sadrži više od 6 jedinica.

Ovakav algoritam vrlo je jednostavan za primjeniti, ali neće rezultirati "najboljim" rezultatima grupiranja narudžbi.

[72] Osim eng. *orderbatching methods,* ovi autori metode spajanja narudžbi nazivaju i eng. *order clustering methods.*

Algoritmi temeljne narudžbe

Algoritmi temeljne narudžbe (eng. *seed algorithms*) počinju izborom temeljne narudžbe (eng. *seed order*) između svih mogućih narudžbi. Odluka o izboru temeljne narudžbe bazira se na određenom pravilu izbora temeljne narudžbe, eng. *seed selection rule*. Nakon određenja temeljne narudžbe slijedi dodavanje druge narudžbi prema pravilu dodavanja, eng. *order addition rule*. Nakon dodane narudžbe algoritam može krenuti u dva smjera. U prvom načinu (pravilo jednostavne temeljne narudžbe, eng. *single seed* rule) temeljna narudžba ostaje temeljna za cijelu grupu, te se ostale dodaju do dostizanja kapaciteta sredstva za komisioniranje. U drugom načinu (pravilo kumulativne temeljne narudžbe, eng. *cumulative seed rule*) dodana narudžba i početna temeljna narudžba zajedno formiraju novu temeljnu narudžbu, te se slijedeća narudžba dodaje u odnosu na tu novoformiranu temeljnu narudžbu. Drugim riječima, nakon svake dodane narudžbe obnavlja se temeljna narudžba.
U svrhu ostvarenja dobre grupe narudžbi vrlo je važno odabrati dobru temeljnu narudžbu [80]. Postoji nekoliko kriterija za odabir (pravila izbora temeljne narudžbe) navedenih u literaturi, kao što su:

A. slučajno odabrana narudžba
B. narudžba s najdaljom lokacijom u odnosu na ulaz/izlaz
C. narudžba s najvećim brojem prolaza koje treba posjetiti
D. narudžba s najdužim putem komisioniranja
E. narudžba s najvećim razmakom prvog i zadnjeg prolaza koje treba posjetiti
F. narudžba s najvećim brojem lokacija za posjetiti
G. narudžba s najbližom lokacijom u odnosu na ulaz/izlaz
H. narudžba s najmanjim brojem prolaza koje treba posjetiti
I. narudžba s najkraćim putem komisioniranja
J. narudžba s najmanjim razmakom prvog i zadnjeg prolaza koje treba posjetiti
K. narudžba s najmanjim brojem lokacija za posjetiti

Za dodavanje narudžbi u obzir mogu doći sljedeća pravila:

1. Odaberi narudžbu sa svojstvom da je suma udaljenosti između svake lokacije temeljne narudžbe i najbliže lokacije dodane narudžbe najmanja [24]
2. Odaberi narudžbu sa svojstvom da je suma udaljenosti između svake lokacije dodane narudžbe i najbliže lokacije temeljne narudžbe minimalna [27]
3. Odaberi narudžbu za koju je razlika između između njenog "centra težine" (eng. centre of gravity) i "centra težine" temeljne narudžbe najmanja. "Centar težine" definiran je kao prosječni prolaz narudžbe (prosjek između prolaza koje treba posjetiti, uključujući i višestruko brojanje prolaza koji sadrže više traženih lokacija) [29]
4. Odaberi narudžbu koja minimizira broj dodanih prolaza koje treba posjetiti, u odnosu na temeljnu narudžbu [29]
5. Odaberi narudžbu koja zajedno sa temeljnom narudžbom ostvaruje najveću uštedu vremena (puta) komisioniranja u komparaciji s ukupnim vremenom (putem) prikupljanja svake narudžbe ponaosob [82]

U svim slučajevima moguće je da dvije ili više narudžbi (kandidata) daju jednak rezultat. U tom se slučaju odabire narudžba s najvećim brojem lokacija, iz jednostavnog razloga što je kasnije lakše dodati manje narudžbe i dopuniti kapacitet sredstva za komisioniranje [21].

U primjeni prva dva pravila nužno je odrediti udaljenost između lokacija, koja se može predstaviti različitim mjerama. Za ovaj rad relevantne su dvije mjere:

a) mjera udaljenosti prolaza (eng. *aisle distance measure*). Udaljenost između dvije lokacije je apsolutna razlika prolaza u kojima se te lokacije nalaze [24]
b) mjera vremena/puta komisioniranja (eng. *travel time/distance measure*). Udaljenost između dvije lokacije je najkraće moguće vrijeme (put) kretanja komisionera između te dvije lokacije [82]

U literaturi se navode i druge mjere, npr. euklidijska i čebiševa. Međutim, takve mjere koriste se u situacijama sa samo jednim prolazom (komisioniranje unutar visokih regala), a nisu primjerene određivanju udaljenosti između lokacija u dva različita prolaza [21].

Za ilustraciju grupiranja narudžbi algoritmom temeljne narudžbe odabran je algoritam prema pravilu jednostavne temeljne narudžbe, s odabranom temeljnom narudžbom s najvećim brojem lokacija, te pravilom dodavanja narudžbe koja minimizira broj dodanih prolaza. Rezultirajuće grupe su:

grupa 1 - narudžbe 3 i 5,
grupa 2 - narudžbe 6, 2 i 7,
grupa 3 - narudžbe 4 i 1.

U ovom primjeru prve dvije formirane grupe maksimalno popunjavaju kapacitet sredstva za komisioniranje (8 jedinica), dok su u trećoj grupi preostale narudžbe. Primjena nekog drugog algoritma temeljne narudžbe rezultirala bi (vrlo vjerojatno) drugačijim grupama.

Algoritmi uštede

Algoritam uštede (eng. *saving algorithm*) bazira se na uštedi vremena (puta) s_{ij} , ostvarenoj spajanjem dvije narudžbe *i* i *j* u jednu, u odnosu na pojedinačno prikupljanje tih narudžbi. Postoji nekoliko algoritama predstavljenih u literaturi.

Clarke and Wright algoritam

Ovaj algoritam grupiranja narudžbi temelji se na algoritmu transportnog problema VRP[73], prezentiranom u *Clarke & Wright* [82]. Izračunaju se uštede s_{ij} za sve moguće parove narudžbi *i,j* (definira se matrica uštede). Uštede se sortiraju padajućim redoslijedom, te se par s najvećom uštedom odabire kao početna grupa (u slučaju dva ili više jednaka para izabere se slučajan par ili par s najvećim brojem lokacija[74]). Ukoliko niti jedna od narudžbi iz sljedećeg para nije uključena u postojeću grupu, a preostali kapacitet je dovoljan za obje narudžbe, i taj par se uključuje u postojeću grupu. Ukoliko je jedna narudžba već uključena u postojeću grupu, druga se, ukoliko je to moguće, također dodaje toj grupi. Procedura se ponavlja do posljednjeg para s liste. Ako su nakon provedene procedure neke narudžbe ostale nedodjeljene u grupe, formira se nova grupa i procedura se ponavlja.

Osim ovog osnovnog *Clarke & Wright* algoritma, moguća su i određene varijacije. Pa tako *De Koster et al.* [21] predlažu modificirani *C&W* algoritam[75], takav da nakon svakog dodavanja narudžbe novonastala grupa postaje nova narudžba te se ponovno računa ušteda svih parova. Drugim riječima, radi se rekalkulacija matrice uštede nakon svake dodane narudžbe. Pretpostavka da će ovako poboljšan algoritam nadmašiti osnovnu varijantu pokazala se točnom za dvije osnovne metode

[73] VRP – eng. *Vehicle Routing Problem*, problem određenja rute kretanja vozila-usmjeravanja (u praksi ovaj se problem često odnosi na vozila vanjskog transporta)
[74] Kod odabira para s najvećim brojem lokacija grupirati će se veće narudžbe, te je kasnije lakše dodavati manje narudžbe, čime je realno očekivati i bolje rezultirajuće grupiranje
[75] *Rosenwein* [29] u svom radu također koristi modificiranu verziju *C&W* algoritma s rekalkulacijom matrice, no matricu ne rangira prema uštedama puta već prema minimizaciji dodanih prolaza.

routinga, S-oblika i najvećeg razmaka [21]. Kod velikog broja narudžbi može se pojaviti problem velikog vremena računanja zbog mnogo rekalkulacija matrica uštede.

EQUAL algoritam

Ovaj algoritam, prezentiran u *Elsayed & Unal* [22], iako izvorno namjenjen grupiranju narudžbi za komisioniranje u *person-on-board S/RS* sustavima, može biti korišten i kod klasičnih regalnih sustava. Koncepcijski je to algoritam temeljne narudžbe, u kojem se za temeljnu narudžbu odabire par sa najvećom uštedom puta (vremena) komisioniranja. Tom paru dodaju se narudžbe prema pravilu najveće uštede, do popune kapaciteta. Nakon svake dodane narudžbe rekalkulira se temeljna narudžba, odnosno koristi se pravilo kumulativne temeljne narudžbe. Nakon dostizanja kapaciteta sredstva za komisioniranje procedura se ponavlja za preostale narudžbe – formira se slijedeća grupa.

S-L algoritam

S-L algoritmom (od eng. *small-large,* opisan također u *Elsayed & Unal* [22]) razlikuju se velike (veće od preddefinirane veličine) od malih narudžbi. Prvo se sve velike narudžbe grupiraju pomoću *EQUAL* algoritma. Zatim se male narudžbe poredaju po veličini, te se prva, najveća mala narudžba dodaje u grupu s kojom daje najveću uštedu (normalno ukoliko to dozvoljava kapacitet sredstva za komisioniranje).
Moguća, poboljšana varijanta ovog algoritma je grupiranje velikih narudžbi pomoću *Clarke & Wright* algoritma, predložena u *De Koster et al.* [21].

Ilustracija primjene algoritma uštede napravljena je pomoću osnovnog *Clarke & Wright* algoritma. Dok se kod većine algoritama temeljne narudžbe uočava neovisnost definiranja grupa o metodi routinga, već one utječu samo na ukupni put prikupljanja, kod algoritama uštede se jasno uviđa utjecaj odabrane metode routinga na određivanje uštede puta komisioniranja, a time i definiranje grupa narudžbi.
Nakon određenja matrice uštede (u primjeru je pretpostavljena metoda routinga S-oblika), prikazane na slici 5-2, algoritam bi generirao slijedeće grupe:

grupa 1 - narudžbe 1 i 6,
grupa 2 - narudžbe 3 i 5,
grupa 3 - narudžbe 2, 4 i 7.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-						
2	16	-					
3	X	24	-				
4	54	30	X	-			
5	60	16	66	46	-		
6	94	50	X	X	66	-	
7	32	16	32	12	32	32	-

Slika 5-2. Matrica uštede *Clarke & Wright* algoritma, primjer

Uz odabranu neku drugu metodu routinga promjenila bi se matrica uštede, a time i (ali ne i nužno) rezultirajuće grupe narudžbi.

Iz predočenih primjera jasno je vidljiva ovisnost rezultata grupiranja narudžbi o odabranom algoritmu. Time se jasno utječe na ukupni put komisioniranja. Dodatno, određeni algoritmi rezultirati će i različitim grupama za odabrane različite metode routinga. Stoga je, u cilju

minimizacije puta komisioniranja, nužno odrediti one kombinacije metoda spajanja narudžbi i metoda routinga koje u određenim situacijama rezultiraju najboljim rješenjima.

5.2. Analiza metoda spajanja narudžbi

Analiza metoda spajanja narudžbi također je provedena simulacijom. Zbog velikog broja mogućih algoritama spajanja narudžbi, analizirani su samo potencijalni kandidati za najbolja rješenja, odabrani na temelju dosadašnjih istraživanja prikazanih u literaturi. Naime, ovisno o pravilu jednostavne ili kumulativne temeljne narudžbe, pravilu izbora temeljne narudžbe (A – K), pravilu dodavanja narudžbe (1. – 5.) te izboru mjere za udaljenost, mogu se definirati čak 154 različita algoritma temeljne narudžbe. Uz 4 algoritama uštede (uključujući i modificirani C&W algoritam), te *FCFS* jednostavni algoritam, dolazi se do 159 algoritama spajanja narudžbi, koje uz metode routinga daju preko 1000 različitih kombinacija ovih metoda. Svaku od njih trebalo bi analizirati za različite vrijednosti kapaciteta sredstva za komisioniranje, veličine narudžbi te oblik i veličinu skladišta.

Analiza pravila jednostavne odnosno kumulativne temeljne narudžbe, prikazana u [21], pokazala je da pravilo kumulativne temeljne narudžbe u realnim skladištima (realni oblik i veličina skladišta, broj narudžbi i kapacitet sredstva za komisioniranje) nadmašuje pravilo jednostavne narudžbe, ali su razlike praktički zanemarive (ispod 0,5 %). Nadalje, na temelju iskustva [81], pokazalo se da "najveće, najdulje ili najdalje" pravilo izbora temeljne narudžbe kod algoritama temeljne narudžbe nadmašuje "najmanje, najkraće ili najbliže" pravilo. Analiza tih pravila, provedena u [21] potvrdila je superiornost pravila C, D i E, neovisno o metodi routinga S-oblika ili najvećeg razmaka. Za ta tri izabrana pravila izbora temeljne narudžbe pokazalo se da je dodavanje narudžbi najbolje provoditi prema pravilu 1, 4 i 5. Pri tome je za određivanje udaljenosti između lokacija (kod pravila 1) mjera vremena (puta) komisioniranja pokazala primjerenija od mjere udaljenosti prolaza (iako su razlike male, poglavito ako se upotrijebi metoda routinga S-oblika).
Iako su spomenute analize napravljene samo uz jednostavne heurističke metode routinga, složene heurističke metode i optimalni algoritam routinga zapravo su hibrid (kombinacija) tih jednostavnih metoda, te je realna pretpostavka da i za njih algoritmi temeljne narudžbe sa takvim pravilima rezultiraju najboljim rješenjima.
S druge strane, usporedba algoritama uštede pokazala je, kao što je već spomeuto, da modificirani *Clarke & Wright* algoritam nadmašuje osnovnu verziju neovisno o primjenjenoj metodi routinga. Također, grupiranje velikih narudžbi u S-L algoritmu koristeći *Clarke & Wright* algoritam rezultira boljim rješenjima od grupiranja velikih narudžbi *EQUAL* algoritmom [21]. Sam *EQUAL* algoritam pokazao se pak kao najlošiji algoritam uštede.

Zbog svega spomenutog, analiza algoritama spajanja narudžbi provedena je za sljedeće algoritme:

S(J,C,1b)
S(J,D,1b)
S(J,E,1b)
S(J,C,4)
S(J,D,4)
S(J,E,4)
S(J,C,5)
S(J,D,5)
S(J,E,5)
C&W
C&W mod
S-L (C&W)
FCFS

Prvih devet algoritama su algoritmi temeljne narudžbe, pri čemu oznake unutar zagrade predstavlja pravilo temeljne narudžbe, pravilo izbora temeljne narudžbe i pravilo dodavanja narudžbe uz eventualno odabranu mjeru određivanja udaljenosti lokacija. Iako je kumulativno pravilo temeljne narudžbe bolje od jednostavnog, zbog zanemarivih razlika u putu komisioniranja, a jednostavnijeg programiranja, u radu je provedena analiza algoritama temeljne narudžbe s pravilom jednostavne temeljne narudžbe. Pretposljednja tri navedena algoritma su *saving* algoritmi, osnovni i modificirani *Clarke & Wright* algoritam te *S-L* algoritam s osnovnim *Clarke & Wright* algoritmom za grupiranje velikih narudžbi. Zadnji navedeni, jednostavni *FCFS* algoritam, iako zasigurno najlošiji od svih, iskorišten je kao referentni algoritam za usporedbu.

U svrhu određenja najboljih algoritama spajanja narudžbi, spomenuti algoritmi analizirani su za različite kombinacije oblika i veličine skladišta, veličine narudžbi i kapaciteta komisionera. Za četiri različita skladišta (dvije veličine po dva oblika), uz varirani kapacitet komisionera i veličinu narudžbe, analizirano je 16 kombinacija.
Nadalje, analiza algoritama spajanja narudžbi provedena je za četiri metode routinga – jednostavne heurističke metode S-oblika i najvećeg razmaka, naprednu kombiniranu heurističku metodu i optimalni algoritam. U analizi je pretpostavljen slučajni raspored odlaganja materijala, dok se naknadno analizirao utjecaj i drugih metoda odlaganja (podpoglavlje 5.2.4.).

Veličina narudžbe slučajno je generirana po uniformnom rasporedu, prosječne vrijednosti 4 odnosno 10, tako da u ovisnosti s variranim kapacitetom (12/24 odnosno 30/60) rezultira teorijskom veličinom grupe od 3 i 6 narudžbi. Ukupni broj narudžbi za grupiranje bio je konstanta i iznosio je 20. Naknadno je također i ova pretpostavka dokinuta, te je analiziran potencijal smanjenja puta komisioniranja primjenom algoritama spajanja u ovisnosti o ukupnom broju narudžbi. Zbog povećanog vremena računanja u simulacijskom eksperimentu broj ponavljanja iznosio je 1000, a uz razinu povjerenja od 95% interval pouzdanosti iznosio je $\pm 0{,}5\%$ od prosječne vrijednosti.

Cjelokupni rezultati analize prikazani su u tablici 5-1 (pri čemu su oznake za metode routinga slijedeće: S – metoda S-oblika, LG – metoda najvećeg razmaka, C – kombinirana metoda i O – optimalni algoritam). Rezultirajuće vrijednosti predstavljaju ukupni put komisioniranja svih narudžbi spojenih u grupe. Ovisno o odabranoj metodi routinga, određeni su najbolji algoritmi temeljne narudžbe i algoritmi uštede (podpoglavlje 5.2.1. i 5.2.2.), te naknadne definirani potencijali smanjenja puta komisioniranja primjenom tih najboljih algoritama (podpoglavlje 5.2.3.). Također je istražen eventualni utjecaj dodijeljenog rasporeda odlaganja na performanse algoritama spajanja narudžbi (podpoglavlje 5.2.4.).

Tablica 5-1. Rezultati analize algoritama spajanja narudžbi

Prostorni raspored skladišta		N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18			
Veličina narudžbe		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)	
Kapacitet		12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60
FCFS	S	848	426	890	435	1012	573	1220	607	2309	1372	2933	1468	2200	1430	3144	1759
	LG	809	460	981	521	926	563	1232	694	1930	1271	2832	1700	1869	1238	2755	1751
	C	803	426	884	435	934	544	1168	601	1990	1250	2738	1449	1939	1264	2815	1673
	U	751	419	879	433	888	527	1137	600	1781	1163	2568	1426	1802	1176	2619	1597
S(JC1b)	S	725	396	810	425	857	522	1083	586	1978	1249	2627	1411	1906	1297	2811	1672
	LG	692	421	886	500	794	523	1106	663	1690	1170	2547	1638	1696	1163	2505	1672
	C	682	389	801	422	795	495	1045	585	1723	1149	2463	1392	1744	1150	2574	1588
	U	633	380	787	418	755	481	1015	574	1526	1049	2288	1355	1574	1085	2365	1515
S(JD1b)	S	717	398	802	424	854	522	1090	585	1965	1258	2616	1418	1915	1292	2805	1674
	LG	685	421	880	502	798	516	1103	662	1680	1164	2536	1620	1639	1122	2505	1676
	C	678	388	791	422	794	491	1049	579	1705	1132	2450	1388	1694	1154	2556	1588
	U	629	381	785	418	760	479	1011	575	1527	1051	2290	1360	1568	1074	2358	1508
S(JE1b)	S	732	396	807	423	870	526	1090	588	1992	1247	2644	1418	1927	1302	2819	1682
	LG	698	421	885	500	806	516	1106	664	1691	1165	2564	1622	1665	1139	2510	1679
	C	688	389	798	420	800	490	1051	582	1822	1172	2493	1405	1793	1187	2582	1588
	U	639	383	796	418	768	476	1021	575	1536	1057	2304	1362	1590	1088	2370	1519
S(JC4)	S	746	407	818	428	880	528	1111	592	1984	1238	2638	1429	1985	1329	2860	1686
	LG	718	435	919	511	829	525	1127	669	1718	1178	2615	1638	1710	1166	2569	1692
	C	701	402	816	426	835	499	1065	583	1736	1145	2490	1407	1764	1197	2589	1594
	U	669	398	811	425	792	484	1037	579	1583	1063	2352	1373	1648	1115	2432	1526
S(JD4)	S	751	407	820	427	881	528	1106	593	2001	1253	2640	1433	1990	1328	2839	1684
	LG	719	431	908	509	829	525	1129	669	1725	1181	2612	1638	1727	1174	2570	1689
	C	706	402	816	426	826	503	1061	587	1753	1144	2480	1404	1772	1189	2585	1597
	U	664	395	814	424	786	489	1037	579	1578	1060	2339	1361	1637	1115	2416	1525
S(JE4)	S	770	413	826	428	917	548	1118	599	2064	1303	2708	1442	2045	1361	2900	1708
	LG	731	440	918	512	861	539	1135	672	1778	1207	2642	1657	1783	1191	2596	1713
	C	752	409	822	428	886	526	1086	592	1934	1221	2562	1417	1905	1238	2657	1625
	U	677	399	812	426	813	499	1049	583	1632	1091	2366	1385	1706	1136	2460	1546

Tablica 5-1. Rezultati analize algoritama spajanja narudžbi (nastavak)

Prostorni raspored skladišta		N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18			
Veličina narudžbe		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)	
Kapacitet		12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60
S(JC5)	S	707	394	800	422	840	513	1080	582	1922	1236	2570	1406	1889	1263	2754	1659
	LG	683	419	887	500	791	508	1105	663	1689	1166	2604	1630	1637	1122	2507	1672
	C	687	386	797	420	790	488	1049	579	1743	1156	2473	1388	1687	1146	2535	1577
	U	642	384	788	417	753	474	1021	572	1577	1070	2343	1357	1573	1070	2384	1511
S(JD5)	S	703	395	797	421	834	510	1070	580	1909	1225	2573	1406	1881	1262	2761	1661
	LG	675	412	885	500	778	499	1102	662	1685	1164	2574	1624	1619	1113	2504	1669
	C	675	385	796	419	782	485	1038	578	1728	1143	2455	1387	1664	1136	2515	1571
	U	642	384	785	418	748	465	1016	571	1569	1075	2332	1352	1563	1054	2371	1505
S(JE5)	S	728	397	815	422	865	518	1087	587	1957	1239	2610	1411	1916	1276	2790	1668
	LG	700	419	888	500	809	510	1111	666	1726	1182	2613	1636	1684	1142	2583	1683
	C	698	389	799	421	803	492	1048	579	1764	1151	2478	1395	1721	1154	2555	1579
	U	658	388	793	419	779	484	1031	575	1594	1089	2357	1360	1608	1094	2396	1517
C&W	S	719	395	799	423	861	512	1090	585	1978	1245	2629	1410	1903	1271	2843	1672
	LG	690	416	880	500	787	496	1105	659	1685	1148	2560	1617	1613	1097	2490	1656
	C	688	396	794	420	794	485	1055	578	1718	1143	2488	1384	1676	1129	2551	1575
	U	642	380	789	418	752	466	1024	571	1543	1051	2328	1357	1546	1048	2374	1507
S-L(C&W)	S	726	399	803	425	865	527	1090	588	1968	1258	2632	1422	1911	1293	2844	1684
	LG	692	423	882	504	789	511	1110	659	1665	1162	2581	1637	1621	1127	2507	1684
	C	689	394	794	423	801	498	1058	583	1720	1142	2487	1400	1681	1158	2555	1589
	U	645	385	791	423	756	478	1030	577	1534	1055	2334	1366	1565	1069	2382	1521
C&W mod	S	688	388	803	423	807	490	1067	583	1821	1155	2543	1405	1821	1200	2701	1636
	LG	655	388	852	489	765	477	1072	649	1591	1057	2445	1560	1592	1049	2426	1614
	C	644	375	793	420	767	468	1019	577	1601	1056	2365	1377	1603	1074	2455	1542
	U	603	362	780	417	727	453	991	569	1457	984	2213	1340	1507	1009	2302	1477

5.2.1. Algoritmi temeljne narudžbe

Uvidom u rezultate analiziranih algoritama temeljne narudžbe za pojedine metode routinga, može se uočiti određena preferabilnost pojedinih algoritama za određenu metodu routinga.

U tablici 5-2 prikazani su rezultati analize uz primjenjenu metodu routinga S-oblika, uz prosječan put komisioniranja po svim ponavljanjima. Dodatno, u tablici 5-3 su i prosječni putevi komisioniranja po odabranom pravilu izbora temeljne narudžbe (C,D i E), odnosno pravilu dodavanja narudžbe (1b,4 i 5). Najbolji rezultati označeni su plavo, dok je prvi slijedeći prosječni rezultat označen žuto.

Tablica 5-2. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima temeljne narudžbe uz routing metodom S-oblika

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	848	426	890	435	1012	573	1220	607	2309	1372	2933	1468	2200	1430	3144	1759	1414,1
S(JC1b)	725	396	810	425	857	522	1083	586	1978	1249	2627	1411	1906	1297	2811	1672	1272,2
S(JD1b)	717	398	802	424	854	522	1090	585	1965	1258	2616	1418	1915	1292	2805	1674	1270,9
S(JE1b)	732	396	807	423	870	526	1090	588	1992	1247	2644	1418	1927	1302	2819	1682	1278,9
S(JC4)	746	407	818	428	880	528	1111	592	1984	1238	2638	1429	1985	1329	2860	1686	1291,2
S(JD4)	751	407	820	427	881	528	1106	593	2001	1253	2640	1433	1990	1328	2839	1684	1292,6
S(JE4)	770	413	826	428	917	548	1118	599	2064	1303	2708	1442	2045	1361	2900	1708	1321,9
S(JC5)	707	394	800	422	840	513	1080	582	1922	1236	2570	1406	1889	1263	2754	1659	1252,3
S(JD5)	703	395	796	421	834	510	1070	580	1909	1225	2573	1406	1881	1262	2761	1661	1249,2
S(JE5)	728	397	815	422	865	518	1087	587	1957	1239	2610	1411	1916	1276	2790	1668	1267,9

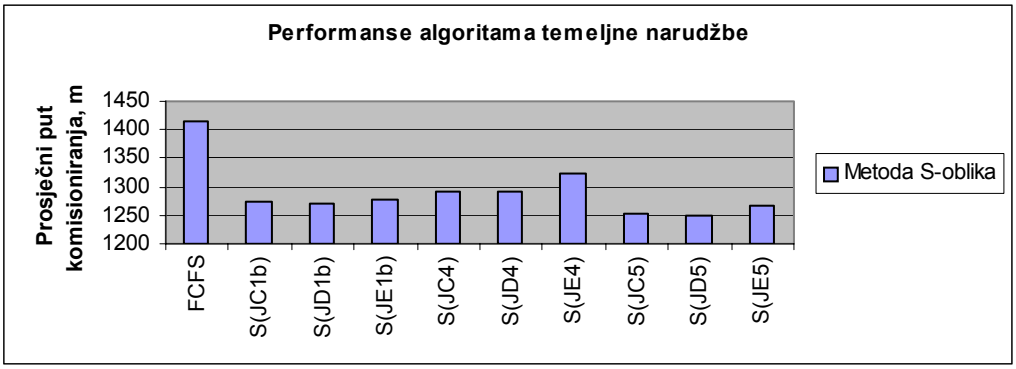
Tablica 5-3. Analiza elemenata algoritama temeljne narudžbe uz routing metodom S-oblika

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
Prosječan put komisioniranja prema pravilu izbora temeljne narudžbe																	
C	726,0	399,0	809,3	425,0	859,0	521,0	1091,3	586,7	1961,3	1241,0	2611,7	1415,3	1926,7	1296,3	2808,3	1672,3	**1271,9**
D	723,7	400,0	806,0	424,0	856,3	520,0	1088,7	586,0	1958,3	1245,3	2609,7	1419,0	1928,7	1294,0	2801,7	1673,0	**1270,9**
E	743,3	402,0	816,0	424,3	884,0	530,7	1098,3	591,3	2004,3	1263,0	2654,0	1423,7	1962,7	1313,0	2836,3	1686,0	**1289,6**
Prosječan put komisioniranja prema pravilu dodavanja narudžbe																	
1b	724,7	396,7	806,3	424,0	860,3	523,3	1087,7	586,3	1978,3	1251,3	2629,0	1415,7	1916,0	1297,0	2811,7	1676,0	**1274,0**
4	755,7	409,0	821,3	427,7	892,7	534,7	1111,7	594,7	2016,3	1264,7	2662,0	1434,7	2006,7	1339,3	2866,3	1692,7	**1301,9**
5	712,7	395,3	803,7	421,7	846,3	513,7	1079,0	583,0	1929,3	1233,3	2584,3	1407,7	1895,3	1267,0	2768,3	1662,7	**1256,5**

Očigledno je da je pravilo dodavanja narudžbe koja s temeljnom rezultira najvećom uštedom (5) najbolje pravilo dodavanja narudžbe, dok se za temeljnu narudžbu uviđa bliskost pravila izbora narudžbe s najvećim putem komisioniranja (D) i narudžbe s najvećim brojem prolaza (C). To niti ne iznenađuje s obzirom na karakter metode S-oblika. Konačno, algoritam S(JD5) rezultira najkraćim ukupnim putem komisioniranja, uz dobre performanse i S(JC5) algoritma, vidljivo i sa slike 5-3.

Za razliku od predhodnog slučaja, uz primjenjenu metodu najvećeg razmaka (rezultati analize prikazani su u tablicama 5-4 i 5-5) pravilo izbora temeljne narudžbe s najvećim putem putem komisioniranja (D) superiorno je ostalim pravilima u svim analiziranim

slučajevima. S druge strane, pravilo dodavanja narudžbe s kojom se minimizira suma udaljenosti lokacija spojenih narudžbi (1b) u ovom slučaju rezultira gotovo jednako kao i pravilo maksimizacije uštede (5). Stoga su za ovu metodu routinga, prikazano na slici 5-4, najpogodniji algoritmi (JD5) i (JD1b). Kod ove se metode može uvidjeti da algoritam (JD1b) bolje minimizira put komisioniranja u skladištima s dugim prolazima, dok kod kraćih prolaza treba preferirati algoritam (JD5).



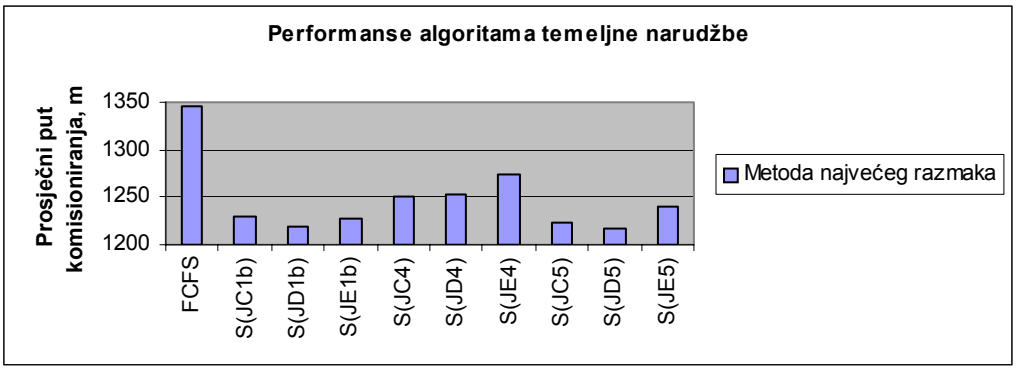
Slika 5-3. Performanse algoritama temeljne narudžbe uz routing metodom S-oblika

Tablica 5-4. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima temeljne narudžbe uz routing metodom najvećeg razmaka

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	692	421	886	500	794	523	1106	663	1690	1170	2547	1638	1696	1163	2505	1672	1345,8
S(JC1b)	685	421	880	502	798	516	1103	662	1680	1164	2536	1620	1639	1122	2505	1676	1229,1
S(JD1b)	698	421	885	500	806	516	1106	664	1691	1165	2564	1622	1665	1139	2510	1679	1219,3
S(JE1b)	718	435	919	511	829	525	1127	669	1718	1178	2615	1638	1710	1166	2569	1692	1226,9
S(JC4)	719	431	908	509	829	525	1129	669	1725	1181	2612	1638	1727	1174	2570	1689	1251,2
S(JD4)	731	440	918	512	861	539	1135	672	1778	1207	2642	1657	1783	1191	2596	1713	1252,2
S(JE4)	683	419	887	500	791	508	1105	663	1689	1166	2604	1630	1637	1122	2507	1672	1273,4
S(JC5)	675	412	885	500	778	499	1102	662	1685	1164	2574	1619	1620	1113	2504	1669	1223,9
S(JD5)	700	419	888	500	809	510	1111	666	1726	1182	2613	1636	1684	1142	2583	1683	1216,3
S(JE5)	692	421	886	500	794	523	1106	663	1690	1170	2547	1638	1696	1163	2505	1672	1240,8

Tablica 5-5. Analiza elemenata algoritama temeljne narudžbe uz routing metodom najvećeg razmaka

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
Prosječan put komisioniranja prema pravilu izbora temeljne narudžbe																	
C	697,7	425,0	897,3	503,7	804,7	518,7	1112,7	665,0	1699,0	1171,3	2588,7	1635,3	1681,0	1150,3	2527,0	1678,7	**1234,8**
D	693,0	421,3	891,0	503,7	801,7	513,3	1111,3	664,3	1696,7	1169,7	2574,0	1625,7	1662,0	1136,3	2526,3	1678,0	**1229,3**
E	709,7	426,7	897,0	504,0	825,3	521,7	1117,3	667,3	1731,7	1184,7	2606,3	1638,3	1710,7	1157,3	2563,0	1691,7	**1247,0**
Prosječan put komisioniranja prema pravilu dodavanja narudžbe																	
1b	691,7	421,0	883,7	500,7	799,3	518,3	1105,0	663,0	1687,0	1166,3	2549,0	1626,7	1666,7	1141,3	2506,7	1675,7	**1225,1**
4	722,7	435,3	915,0	510,7	839,7	529,7	1130,3	670,0	1740,3	1188,7	2623,0	1644,3	1740,0	1177,0	2578,3	1698,0	**1258,9**
5	686,0	416,7	886,7	500,0	792,7	505,7	1106,0	663,7	1700,0	1170,7	2597,0	1628,3	1647,0	1125,7	2531,3	1674,7	**1227,0**



Slika 5-4. Performanse algoritama temeljne narudžbe uz routing metodom najvećeg razmaka

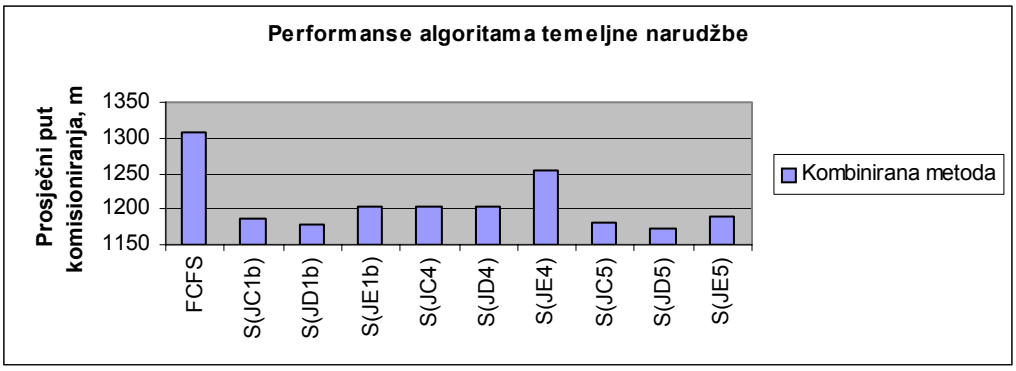
I uz kombiniranu metodu routinga pravilo izbora temeljne narudžbe (D) superiorno je ostalim pravilima. Najpovoljnija pravila dodavanja narudžbe su, kao i u prethodnom slučaju, pravila (5) i (1b), pa su i za ovu metodu routinga najbolji algoritmi (JD5) i (JD1b), vidljivo iz tablica 5-6 i 5-7 i slike 5-5. Analogijom se i razlike u performansama između ta dva algoritma mogu u određenoj mjeri pripisati obliku skladišta, odnosno duljini regala.

Tablica 5-6. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima temeljne narudžbe uz routing kombiniranom metodom

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	803	426	884	435	934	544	1168	601	1990	1250	2738	1449	1939	1264	2815	1673	1307,1
S(JC1b)	682	389	801	422	795	495	1045	585	1723	1149	2463	1392	1744	1150	2574	1588	1187,3
S(JD1b)	678	388	791	422	794	491	1049	579	1705	1132	2450	1388	1694	1154	2556	1588	1178,7
S(JE1b)	688	389	798	420	800	490	1051	582	1822	1172	2493	1405	1793	1187	2582	1588	1203,8
S(JC4)	701	402	816	426	835	499	1065	583	1736	1145	2490	1407	1764	1197	2589	1594	1203,1
S(JD4)	706	402	816	426	826	503	1061	587	1753	1144	2480	1404	1772	1189	2585	1597	1203,2
S(JE4)	752	409	822	428	886	526	1086	592	1934	1221	2562	1417	1905	1238	2657	1625	1253,8
S(JC5)	687	386	797	420	790	488	1049	579	1743	1156	2473	1388	1687	1146	2535	1577	1181,3
S(JD5)	675	385	794	419	782	485	1038	578	1728	1143	2455	1387	1664	1136	2515	1571	1172,2
S(JE5)	698	389	799	421	803	492	1048	579	1764	1151	2478	1395	1721	1154	2555	1579	1189,1

Tablica 5-7. Analiza elemenata algoritama temeljne narudžbe uz kombiniranu metodu routinga

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
Prosječan put komisioniranja prema pravilu izbora temeljne narudžbe																	
C	690,0	392,3	804,7	422,7	806,7	494,0	1053,0	582,3	1734,0	1150,0	2475,3	1395,7	1731,7	1164,3	2566,0	1586,3	**1190,6**
D	686,3	391,7	800,3	422,3	800,7	493,0	1049,3	581,3	1728,7	1139,7	2461,7	1393,0	1710,0	1159,7	2552,0	1585,3	**1184,7**
E	712,7	395,7	806,3	423,0	829,7	502,7	1061,7	584,3	1840,0	1181,3	2511,0	1405,7	1806,3	1193,0	2598,0	1597,3	**1215,5**
Prosječan put komisioniranja prema pravilu dodavanja narudžbe																	
1b	682,7	388,7	796,7	421,3	796,3	492,0	1048,3	582,0	1750,0	1151,0	2468,7	1395,0	1743,7	1163,7	2570,7	1588,0	**1189,9**
4	719,7	404,3	818,0	426,7	849,0	509,3	1070,7	587,3	1807,7	1170,0	2510,7	1409,3	1813,7	1208,0	2610,3	1605,3	**1220,0**
5	686,7	386,7	796,7	420,0	791,7	488,3	1045,0	578,7	1745,0	1150,0	2468,7	1390,0	1690,7	1145,3	2535,0	1575,7	**1180,9**



Slika 5-5. Performanse algoritama temeljne narudžbe uz kombiniranu metodu routinga

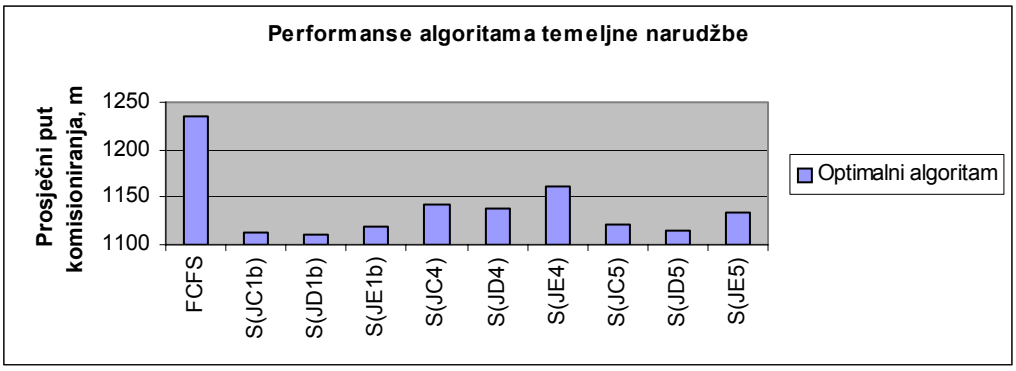
Ukoliko se za određivanje rute komisioniranja koristi optimalni algoritam, uviđa se dominacija pravila izbora temeljne narudžbe (D), uz dobre performanse i pravila (C), koja uz pravilo dodavanja narudžbe s minimizacijom sume udaljenosti lokacija spojenih narudžbi (1b) rezultira najboljim rješenjima. Tako se može konstatirati da su za optimalni algoritam routinga općenito najpovoljniji algoritmi temeljne narudžbe (JD1b) i (JC1b), vidljivo iz tablica 5-8 i 5-9, odnosno slike 5-6.

Tablica 5-8. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima temeljne narudžbe uz routing optimalnim algoritmom

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	751	419	879	433	888	527	1137	600	1781	1163	2568	1426	1802	1176	2619	1597	1235,4
S(JC1b)	633	380	787	418	755	481	1015	574	1526	1049	2288	1355	1574	1085	2365	1515	1112,5
S(JD1b)	629	381	785	418	760	479	1011	575	1527	1051	2290	1360	1568	1074	2358	1508	1110,9
S(JE1b)	639	383	796	418	768	476	1021	575	1536	1057	2304	1362	1590	1088	2370	1519	1118,9
S(JC4)	669	398	811	425	792	484	1037	579	1583	1063	2352	1373	1648	1115	2432	1526	1142,9
S(JD4)	664	395	814	424	786	489	1037	579	1578	1060	2339	1361	1637	1115	2416	1525	1138,7
S(JE4)	677	399	812	426	813	499	1049	583	1632	1091	2366	1385	1706	1136	2460	1546	1161,3
S(JC5)	642	384	788	417	753	474	1021	572	1577	1070	2343	1357	1573	1070	2384	1511	1121,0
S(JD5)	642	384	785	418	748	465	1016	571	1569	1075	2332	1352	1563	1054	2371	1505	1115,6
S(JE5)	658	388	793	419	779	484	1031	575	1594	1089	2357	1360	1608	1094	2398	1517	1134,0

Tablica 5-9. Analiza elemenata algoritama temeljne narudžbe uz optimalni routing

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
Prosječan put komisioniranja prema pravilu izbora temeljne narudžbe																	
C	648,0	387,3	795,3	420,0	766,7	479,7	1024,3	575,0	1562,0	1060,7	2327,7	1361,7	1598,3	1090,0	2393,7	1517,3	**1125,5**
D	645,0	386,7	794,7	420,0	764,7	477,7	1021,3	575,0	1558,0	1062,0	2320,3	1357,7	1589,3	1081,0	2381,7	1512,7	**1121,7**
E	658,0	390,0	800,3	421,0	786,7	486,3	1033,7	577,7	1587,3	1079,0	2342,3	1369,0	1634,7	1106,0	2409,3	1527,3	**1138,0**
Prosječan put komisioniranja prema pravilu dodavanja narudžbe																	
1b	633,7	381,3	789,3	418,0	761,0	478,7	1015,7	574,7	1529,7	1052,3	2294,0	1359,0	1577,3	1082,3	2364,3	1514,0	**1114,1**
4	670,0	397,3	812,3	425,0	797,0	490,7	1041,0	580,3	1597,7	1071,3	2352,3	1373,0	1663,7	1122,0	2436,0	1532,3	**1147,6**
5	647,3	385,3	788,7	418,0	760,0	474,3	1022,7	572,7	1580,0	1078,0	2344,0	1356,3	1581,3	1072,7	2384,3	1511,0	**1123,5**



Slika 5-6. Performanse algoritama temeljne narudžbe uz optimalni algoritam routinga

Razlike između najboljeg algoritma temeljne narudžbe i *FCFS* algoritma iznose od 4 do 17%, praktički neovisno o izabranoj metodi routinga. Razlike su veće što je kapacitet manji – manji broj narudžbi u grupi, a širina skladišta veća (manji prosječni broj lokacija po prolazu), čime dolazi do izražaja "logika" spajanja narudžbi. Kod užih skladišta i poglavito velikog kapaciteta razlike su s praktičnog stajališta zanemarive.

5.2.2. Algoritmi uštede

Kao što je već rečeno, a i vidljivo iz tablice 5-1, analizirana su tri algoritma uštede, osnovni *Clarke & White* algoritam (C&W), modificirani *Clarke & White* algoritam (C&W mod) i *S-L* algoritam s grupiranjem velikih narudžbi pomoću osnovnog *Clarke & White* algoritma (S-L (C&W).)

Ovisno o metodi routinga, tablice 5-10 do 5-13 prikazuju usporedbu rezultata algoritama uštede međusobno, kao i sa najboljim algoritmom temeljne narudžbe, uz pripadajuće postotno smanjenje ukupnog puta komisioniranja u odnosu na referentni *FCFS* algoritam.

Tablica 5-10. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima uštede uz routing metodom S-oblika

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	848	426	890	435	1012	573	1220	607	2309	1372	2933	1468	2200	1430	3144	1759	**1414,1**
SEED	703	395	796	421	834	510	1070	580	1909	1225	2573	1406	1881	1262	2761	1661	**1249,2**
%	17	7	11	3	18	11	12	4	17	11	12	4	15	12	12	6	**11**
C&W	719	395	799	423	861	512	1090	585	1978	1245	2629	1410	1903	1271	2843	1672	**1270,9**
%	15	7	10	3	15	11	11	4	14	9	10	4	14	11	10	5	**9,5**
C&W m	688	388	803	423	807	490	1067	583	1821	1155	2543	1405	1821	1200	2701	1636	**1220,7**
%	19	9	10	3	20	14	13	4	21	16	13	4	17	16	14	7	**12,5**
S-L	726	399	803	425	865	527	1090	588	1968	1258	2632	1422	1911	1293	2844	1684	**1277,2**
%	14	6	10	2	15	8	11	3	15	8	10	3	13	10	10	4	**8,9**

Vidljivo je da modificirani *Clarke & White* algoritam rezultira najkraćim ukupnim putem komisioniranja u svim situacijama, neovisno o metodi routinga. Smanjenje ukupnog puta u odnosu na *FCFS* algoritam u rasponu je od 4 do 21%, ovisno o broju narudžbi u grupi (kapacitetu) i obliku skladišta. S malim brojem narudžbi u grupi, što je slučaj u većini praktičnih situacija [21], moguće su značajne uštede u putu komisioniranja primjenom naprednih algoritama spajanja narudžbi u odnosu na *FCFS* algoritam, čime je opravdana potreba za upotrebom takvih algoritama pri povećanju efkasnosti komisioniranja.

Preostala dva algoritma uštede približnih su performansi kao i najbolji algoritam temeljne narudžbe, pri čemu se osnovni *C&W* algoritam pokazao nešto boljim od *S-L* algoritma.

Tablica 5-11. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima uštede uz routing metodom najvećeg razmaka

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	809	460	981	521	926	563	1232	694	1930	1271	2832	1700	1869	1238	2755	1751	**1345,8**
SEED	675	412	885	500	778	499	1102	662	1685	1164	2574	1619	1620	1113	2504	1669	**1216,3**
%	17	10	10	4	16	11	11	5	13	8	9	5	13	10	9	5	**10**
C&W	690	416	880	500	787	496	1105	659	1685	1148	2560	1617	1613	1097	2490	1656	**1212,4**
%	15	10	10	4	15	12	10	5	13	10	10	5	14	11	10	5	**9,9**
C&W m	655	388	852	489	765	477	1072	649	1591	1057	2445	1560	1592	1049	2426	1614	**1167,6**
%	19	16	13	6	17	15	13	6	18	17	14	8	15	15	12	8	**13,3**
S-L	692	423	882	504	789	511	1110	659	1665	1162	2581	1637	1621	1127	2507	1684	**1222,1**
%	14	8	10	3	15	9	10	5	14	9	9	4	13	9	9	4	**9,0**

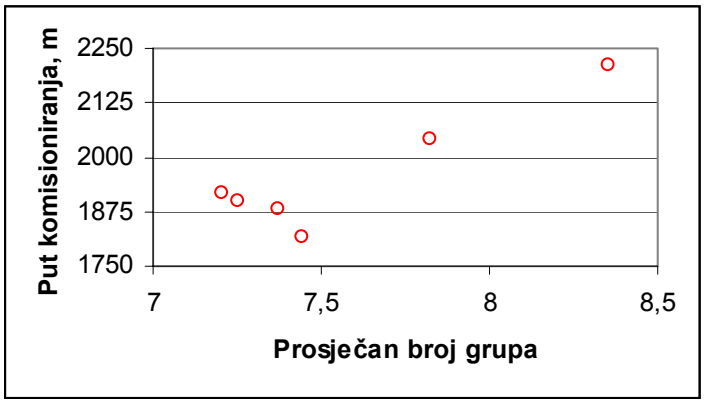
Tablica 5-12. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima uštede uz routing kombiniranom metodom

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	803	426	884	435	934	544	1168	601	1990	1250	2738	1449	1939	1264	2815	1673	**1307,1**
SEED	675	385	794	419	782	485	1038	578	1728	1143	2455	1387	1664	1136	2515	1571	**1172,2**
%	16	10	10	4	16	11	11	4	13	9	10	4	14	10	11	6	**10**
C&W	688	396	794	420	794	485	1055	578	1718	1143	2488	1384	1676	1129	2551	1575	**1179,6**
%	14	7	10	3	15	11	10	4	14	9	9	4	14	11	9	6	**9,4**
C&W m	644	375	793	419	767	468	1019	577	1601	1056	2365	1377	1603	1074	2455	1542	**1133,4**
%	20	12	10	4	18	14	13	4	20	16	14	5	17	15	13	8	**12,6**
S-L	689	394	794	423	801	498	1058	583	1720	1143	2487	1400	1681	1158	2555	1589	**1185,8**
%	14	8	10	3	14	8	9	3	14	9	9	3	13	8	9	5	**8,8**

Tablica 5-13. Putevi komisioniranja grupa narudžbi spojenih algoritmima uštede uz routing optimalnim algoritmom

Oblik skladišta	N=4, L=18				N=8, L=9				N=8, L=36				N=16, L=18				Prosječan put po svim analiziranim kombinacijama
Veličina narudžbe	U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		U(1,7)		U(5,15)		
Kapacitet	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	12	24	30	60	
FCFS	751	419	879	433	888	527	1137	600	1781	1163	2568	1426	1802	1176	2619	1597	**1235,4**
SEED	629	381	785	418	760	479	1011	575	1527	1051	2290	1360	1568	1074	2358	1508	**1110,9**
%	16	9	11	3	14	9	11	4	14	10	11	5	13	9	10	6	**10**
C&W	642	380	789	418	752	466	1024	571	1543	1051	2328	1357	1546	1048	2374	1507	**1112,3**
%	15	9	10	3	15	12	10	5	13	10	9	5	14	11	9	6	**9,8**
C&W m	603	362	780	417	727	453	991	569	1457	984	2213	1340	1507	1009	2302	1477	**1074,4**
%	20	14	11	4	18	14	13	5	18	15	14	6	16	14	12	8	**12,6**
S-L	645	385	791	423	756	478	1030	577	1534	1055	2334	1366	1565	1069	2382	1521	**1119,4**
%	14	8	10	2	15	9	9	4	14	9	9	4	13	9	9	5	**9,0**

Vrlo je interesantno da je kod *S-L* algoritma, usprkos grupiranju velikih narudžbi osnovnim *Clarke & White* algoritmom i naknadnim dopunjavanjem grupa malim narudžbama, rezultat lošiji od grupiranja svih narudžbi osnovnim *Clarke & White* algoritmom. Naime, ovakav način grupiranja rezultira najboljom popunom kapaciteta – najmanjim ukupnim brojem grupa, ali se oduzimanjem malih narudžbi smanjuje potencijal ušteda. Pa se tako, ilustrirano slikom 5-7, može zaključiti da će se ušteda u putu komisioniranja primjenom dobrog algoritma ostvariti takvim grupiranjem koje će rezultirati relativno malim brojem grupa u odnosu na *FCFS* algoritam ili neki drugi lošiji algoritam temeljne narudžbe, no najmanji broj grupa ne povlači za sobom i najkraći put komisioniranja. Do takvog zaključka došli su i *De Koster et al.* u [21].



Algoritam	Ukupni put	Broj grupa
FCFS	2213	8,35
S(JE4)	2045	7,82
S(JD5)	1881	7,37
C&W	1903	7,25
S-L	1921	7,20
C&W mod	1821	7,44

Slika 5-7. Put komisioniranja i prosječni broj grupa ovisno o algoritmu grupiranja, primjer (*N*=16, *L*=18, kapacitet=12, metoda S-oblika)

No, ukoliko je u određenoj situaciji potrebno minimizirati broj grupa (broj ruta), najpogodniji algoritam za to je *S-L* algoritam.

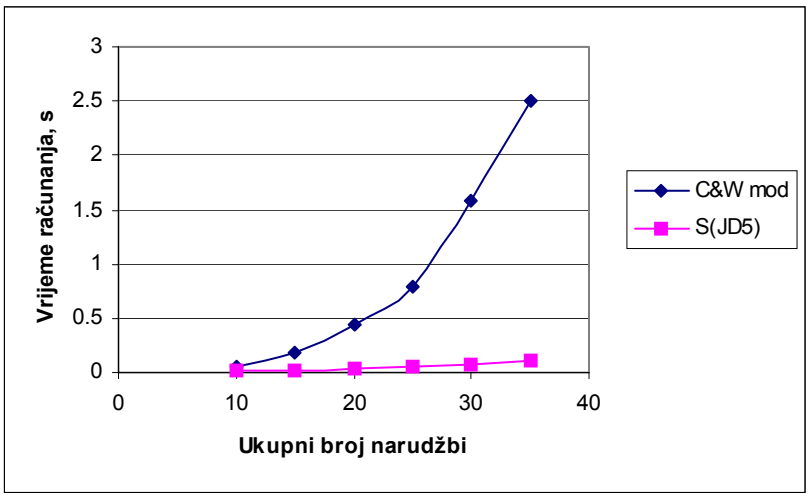
Kako je u provedenom istraživanju ukupni broj narudžbi koje se grupiraju bio konstanta i iznosio je 20, postavlja se pitanje kakve su performanse algoritama spajanja narudžbi uz promjenjeni broj narudžbi. Za pretpostaviti je da će se smanjiti put komisioniranja zbog većeg broja narudžbi potencijalnih za spajanje (bilo na temelju najveće uštede kod algoritama uštede, bilo po nekom pravilu dodavanja kod algoritama temeljne narudžbe). Nadalje, jedna od karakteristika modificiranog *Clarke & White* algoritma je računanje matrice ušteda svih narudžbi, što povlači za sobom porast broja parova s kvadratom porasta ukupnog broja narudžbi, te bi za veliki broj narudžbi ovaj algoritam mogao zahtijevati preveliko vrijeme računanja. Rezultati dodatne analize, provedene samo za dva algoritma, prikazani su u tablici 5-14.

Tablica 5-14. Performanse algoritama spajanja narudžbi u ovisnosti o ukupnom broju narudžbi za spajanje, primjer (*N*=8, *L*=36, kapacitet = 24, metoda S-oblika)

Algoritam	**Clarke & White mod**			**S (JD5)**			**Razlika, %**
Broj narudžbi	Ukupni put komisioniranja, m	Put po jednoj narudžbi, m	Vrijeme računanja, s	Ukupni put komisioniranja, m	Put po jednoj narudžbi, m	Vrijeme računanja, s	
10	661	66,1	0,06	674	67,4	0,013	2,0
15	904	60,3	0,19	952	63,5	0,024	5,3
20	1155	57,8	0,44	1225	61,3	0,04	6,1
25	1392	55,7	0,8	1478	59,1	0,06	6,2
30	1616	53,9	1,58	1747	58,2	0,08	8,1
35	1831	52,3	2,5	2001	57,2	0,11	9,3

Vidljivo je da se porastom broja narudžbi za grupiranje zaista povećava mogućnost smanjenja puta komisioniranja (smanjuje se put komisioniranja po jednoj narudžbi). Pri tome je veći potencijal kod algoritama uštede, što je vidljivo iz porasta razlike rezultata u odnosu

na najbolji algoritam temeljne narudžbe. Što se pak vremena računanja[76] tiče, vidljivo je da porastom ukupnog broja narudžbi ono raste (linearno kod algoritma temeljne narudžbe, te vrlo progresivno kod algoritma uštede,vidljivo i sa slike 5-8.), ali sa suvremenim računalima ono nije nikakva prepreka korištenju algoritama spajanja.

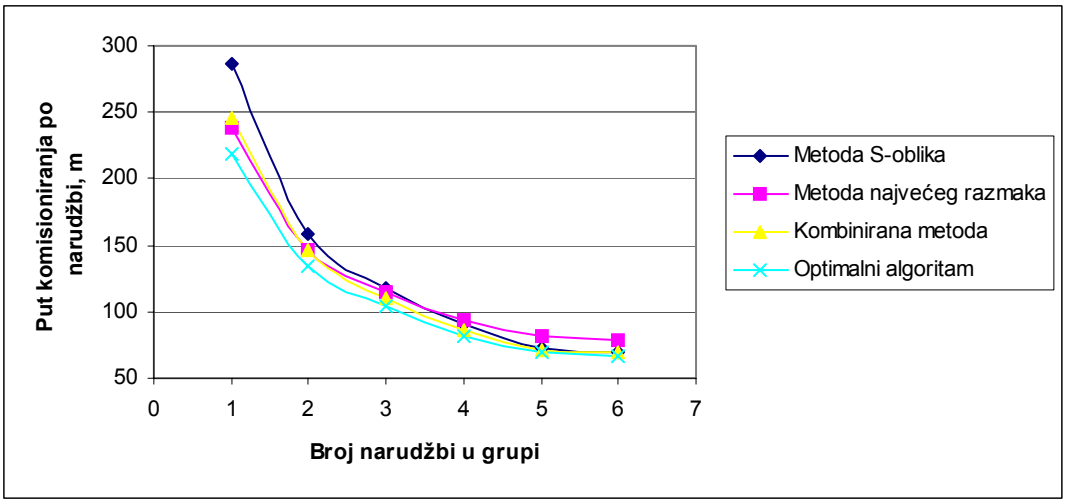


Slika 5-8. Usporedba vremena računanja algoritama spajanja narudžbi

Ukoliko bi ukupni broj narudžbi bio toliko velik da vrijeme računanja kod algoritma uštede postane neprihvatljivo, moguće je ili primjeniti algoritam temeljne narudžbe, ili u razmatranju ograničiti broj narudžbi za grupiranje.

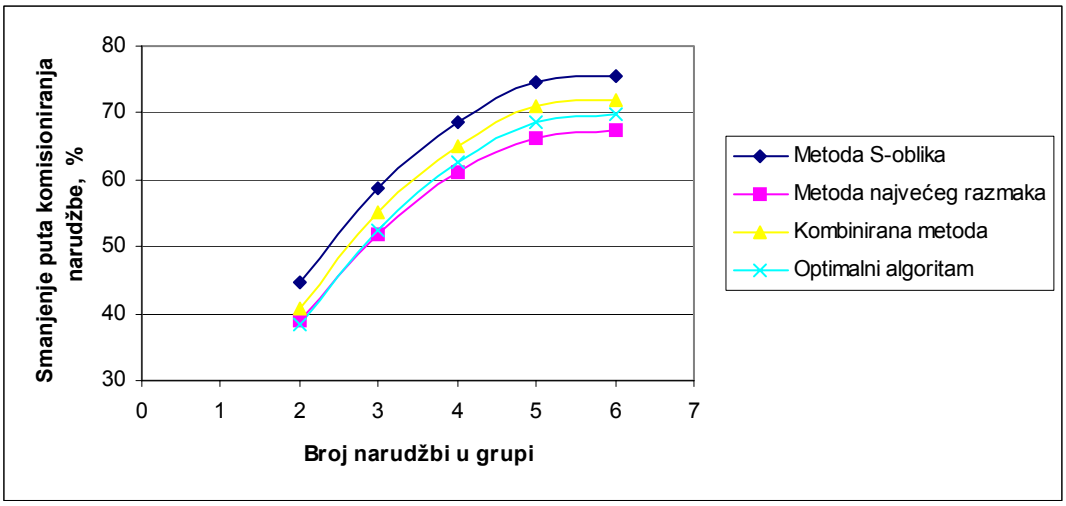
5.2.3. Smanjenje puta komisioniranja primjenom metoda spajanja narudžbi

Nakon određenja najboljih algoritama spajanja narudžbi s ciljem smanjenja puta komisioniranja, postavlja se pitanje kolike su postignute uštede. Iako točan iznos ovisi i o karakteristikama skladišta, najveći utjecaj na uštede ipak imaju veličina narudžbi i kapacitet komisionera, odnosno prosječni broj narudžbi po grupi. S ciljem ilustracije mogućnosti uštede, na slikama 5-9 i 5-10 prikazan je primjer smanjenja puta komisioniranja po narudžbi i pripadajuće postotne uštede u odnosu na organizaciju komisioniranja prema narudžbi.



Slika 5-9. Put komisioniranja po narudžbi u ovisnosti o veličini grupe, primjer (*N*=8, *L*=36, veličina narudžbe *x*=10, *C&W mod* algoritam spajanja)

[76] Vrijeme računanja u tablici predstavlja ukupno vrijeme potrebno za grupiranje i određenje puta komisioniranja navedenim algoritmima, provedeno na računalu Pentium III 633 Mhz.



Slika 5-10. Smanjenje puta komisioniranja po narudžbi u odnosu na komisioniranje prema narudžbi, primjer (N=8, L=36, veličina narudžbe x=10, *C&W mod* algoritam spajanja)

Očigledan je visoki potencijal smanjenja puta komisioniranja primjenom metoda spajanja, koje se kreće u rasponu od 40 do u prosjeku 70%[77], ovisno o broju narudžbi u grupi i primjenjenoj metodi routinga. Može se zaključiti da će, za određeni kapacitet, spajanje relativno malih narudžbi rezultirati vrlo visokim postotkom smanjenja puta komisioniranja po narudžbi. U slučaju velikih narudžbi taj se postotak smanjuje. Pri tome je važno naglasiti da je opisani primjer napravljen za konstantnu i fiksnu veličinu narudžbe, uz mijenjanje kapaciteta. Variranje veličine narudžbe uz konstantan kapacitet rezultirao bi nešto manjim uštedama kod manjih vrijednosti broja narudžbi u grupi, iz razloga većeg broja lokacija po narudžbi što povlači za sobom smanjen potencijal ostvarivanja ušteda. S druge strane, generiranje veličine narudžbi po nekoj distribuciji rezultiralo bi nešto većim uštedama. U takvom slučaju, za narudžbe kod kojih srednja vrijednost veličine teži kapacitetu, smanjenje puta komisioniranja se približava nuli. Pa tako *Petersen & Aese* [83] navode da su za velike narudžbe (velike u opisanom smislu, sa brojem narudžbi u grupi <2) male uštede. Također su u takvim situacijama napredni algoritmi spajanja samo neznatno bolji od *FCFS* algoritma, čime spomenuti autori opravdavaju činjenicu zašto neka skladišta preferiraju najjednostavniji algoritam spajanja.

Iz grafa sa slike 5-9 također je vidljivo da se smanjuju razlike između pojedinih metoda routinga porastom broja narudžbi po grupi, pa se može konstatirati da primjena organizacije komisioniranja spajanjem narudžbi praktički anulira prednosti naprednih metoda routinga u odnosu na jednostavne.

U cjelokupnoj analizi vrijedila je pretpostavka o položaju ulaza/izlaza u kutu skladišta. Iako je položaj ulaza/izlaza u sredini najpovoljniji, u poglavlju 3.2.4. pokazano je da su razlike minimalne, poglavito kod velikog broja lokacija po ruti. Kako je to slučaj kod komisioniranja sa spajanjem narudžbi, može se zaključiti da položaj ulaza/izlaza ne igra bitnu ulogu na smanjenje puta komisioniranja sa spajanjem narudžbi, kao niti na međusoban odnos performansi algoritama spajanja. Do takvog su zaključka došli i *De Koster et al.* [21], uvidjevši da su razlike do maksimalno 1,5 %.

[77] Ovako visoki postoci odnose se na smanjenje puta komisioniranja. Ukupne uštede ukupnog vremena komisioniranja znatno su manje zbog fiksnih vremena izuzimanja i administativnih poslova. Pa tako npr. za realne vrijednosti brzine kretanja komisionera v=0,75 m/s i vremena izuzimanja s uračunatim administrativnim vremenom od 20 s po lokaciji (vrijednosti preuzete iz *Petersen & Aese* [83]), pripadajuće uštede ukupnog vremena komisioniranja iznose od 20 do 40%. Ovakav odnos ušteda ukupnog vremena komisioniranja i vremena kretanja pri komisioniranju korespondira s njihovim odnosom prikazanim na slici 1-2.

5.2.4. Utjecaj metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja na performanse algoritama spajanja narudžbi

Dosadašnje analize napravljene su uz pretpostavku slučajnog rasporeda odlaganja materijala. Ukoliko to nije slučaj, već se upotrijebi dodijeljeno raspored odlaganja materijala, postavlja se pitanje da li algoritmi spajanja narudžbi imaju jednaki potencijal smanjenja puta komisioniranja.

Tablica 5-15. prikazuje puteve komisioniranja i postotne uštede primjenom spajanja narudžbi u odnosu na komisioniranje prema narudžbi, ovisno o ABC krivulji odlaganja. Kako se odlaganje po prolazima pokazalo kao najpovoljniji tip odlaganja (poglavito kod većeg broja lokacija po prolazima, što je svakako slučaj kod organizacije komisioniranja sa spajanjem narudžbi), analiza je ograničena samo na taj tip odlaganja, s ABC krivuljama protoka 50/20 i 80/20.

Tablica 5-15. Smanjenja puta komisioniranja primjenom spajanja narudžbi u ovisnosti o metodi odlaganja, primjer

N=8, *L*=36, $\bar{x}$ = 10 Broj narudžbi = 20		**Routing metodom S-oblika**				**Optimalni algoritam routinga**			
		Ukupni put				Ukupni put			
Komisioniranje prema narudžbi	20/20	5576				4323			
	50/20	4583				3663			
	80/20	3033				2564			
		Kap.=30		Kap.=60		Kap.=60		Kap.=60	
		Uk. put	Ušteda	Uk. put	Ušteda	Uk. put	Ušteda	Uk. put	Ušteda
Komisioniranje sa spajanjem narudžbi (C&W mod)	20/20	2543	54 %	1405	75 %	2213	49 %	1340	69 %
	50/20	2093	54 %	1224	73 %	1869	49 %	1151	69 %
	80/20	1435	53 %	876	71 %	1261	51 %	787	69 %

Iako je vidljivo neznatno smanjenje ušteda uz primjenjenu metodu S-oblika, može se konstatirati da dodijeljeni raspored odlaganja nema bitnijeg utjecaja na performanse algoritama spajanja narudžbi.

Primjenjeni algoritam spajanja narudžbi u analizi je bio modificirani *C&W* algoritam. Korištenje ostalih algoritama spajanja narudžbi dalo je, očekivano, jednake rezultate uštede. Njihova pak međusobna usporedba pokazala je blago poboljšanje algoritama uštede u odnosu na algoritme temeljne narudžbe ukoliko se koristi dodijeljeni raspored odlaganja, no nema bitnijih promjena u rangiranju algoritama, te su konstatirani najbolji algoritmi spajanja uz dodijeljeni raspored odlaganja isti kao i za slučajni raspored odlaganja. Takva konstatacija dana je i u *De Koster et al.* [21].

6. OPTIMALNI PROSTORNI RASPORED ZONE KOMISIONIRANJA

U dosadašnjem istraživanju metoda komisioniranja naglasak je stavljen na odabir metode ili kombinacija metoda s ciljem minimizacije puta komisioniranja. Pri tome su se analize temeljile na varijacijama veličine i oblika skladišta, veličini narudžbe, kapacitetu komisionera (uz primjenjeno spajanje narudžbi) i obliku ABC krivulje protoka (uz primjenjen dodijeljeni raspored odlaganja), s ciljem određenja najboljih metoda za određenu situaciju. Ovako postavljen problem i rješenja daju logističarima spoznaje o mogućnosti smanjenja puta komisioniranja u postojećim regalnim skladištima s prolazima.
Uvidom u rezultate analiza (poglavlje 3.2. Analiza performansi metoda routinga, tablice 3-1 i 3-2, poglavlje 4.2. Analiza performansi metoda dodijeljenog rasporeda odlaganja u kombinaciji s metodama routinga, tablice 4-1 do 4-20 te poglavlje 5.2. Analiza metoda spajanja narudžbi, tablica 5-1) može se uvidjeti znatan utjecaj prostornog rasporeda (layout-a) na put komisioniranja. Stoga je, s pozicije projektanta novih skladišta – zona komisioniranja, od značaja određenje optimalnog prostornog rasporeda prema kriteriju minimalnog puta.

U literaturi se ovaj problem uglavnom svodio na određenje optimalnog prostornog rasporeda skladišne zone – jednostruki ili dvostruki radni ciklus transportnog sredstva (vidi npr. Oluić [30] – model optimalnih izmjera skladišta), dok je efekt oblikovanja prostornog rasporeda na produktivnost sustava za komisioniranje samo marginalno adresiran u radovima fokusiranim na optimizaciju metoda routinga. Nešto značajniji iskorak u tome dali su *Hall* [9] (optimalni prostorni raspored ovisno o veličini narudžbe) i *Kunder & Gudehus* [84] (optimalni prostorni raspored ovisno o veličini narudžbe i ukupnoj duljini prolaza), no samo za slučajni raspored odlaganja. U novije vrijeme na ovaj problem fokusirali su se *Caron et al*. [16] i [85], uvrstivši u analize i dodijeljeni raspored odlaganja. No u njihovom radu pretpostavljen je drugačiji prostorni raspored zone komisioniranja (raspored u dva bloka odjeljena centralnim glavnim prolazom), a rezultati su pokazali mogućnost drastičnog utjecaja prostornog rasporeda na put komisioniranja.

Analiza ovisnosti puta komisioniranja o prostornom rasporedu (određenje optimalnog prostornog rasporeda), prikazana u ovom poglavlju, proširenje je spomenutih istraživanja, napravljeno za pretpostavljeni prostorni raspored definiran slikom 3-1. Osim utjecaja veličine narudžbi, veličine skladišta (ukupne duljine prolaza), metode odlaganja i metode routinga istražen je i eventualni utjecaj primjene metoda spajanja narudžbi na određenje optimalnog prostornog rasporeda.

6.1. Određenje optimalnog broja prolaza zone komisioniranja

Određenje optimalnog prostornog rasporeda zone komisioniranja predstavlja određenje broja i duljine prolaza između regala[85]. Za zadani kapacitet zone komisioniranja (potreban broj lokacija, čime je uz definirane dimenzije lokacije zadana i ukupna duljina prolaza između regala) problem se može svesti na određenje optimalnog broja prolaza između regala.

Ukupna duljina prolaza tako je umnožak broja prolaza i duljine prolaza između regala

$$L^* = N \cdot L \tag{25}$$

[85] U proširenom smislu, određenje optimalnog prostornog rasporeda uključuje i određenje položaja ulaza/izlaza, kao i na eventualni broj i položaj dodatnih glavnih (poprečnih) prolaza. U ovom radu analiza je ograničena na osnovni prostorni raspored prikazan na slici 3-1. Optimalni položaj ulaza/izlaza je u sredini zone komisioniranja (dokazano u *Roodbergen* [7]), no razlike u putu komisioniranja u odnosu na položaj u kutu su zanemarive, vidljivo iz podpoglavlja 3.2.4.). Analiza utjecaja dodatnih poprečnih prolaza obrađuje se u *Roodbergen & De Koster* [12], [13], te u *Vaughan & Petersen* [14].

Matematički se ovaj problem može definirati kao model nelinearnog programiranja, koji će minimizirati očekivani put komisioniranja.

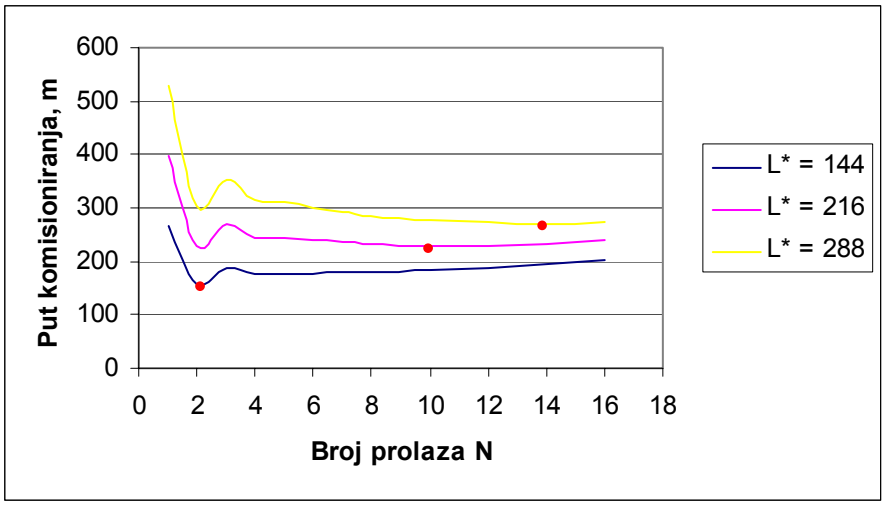
$$\begin{aligned} &\min E(L_{kom}) \\ &N \cdot L = L^* \\ &N \geq 1 \text{ (cjelobrojan)} \\ &L \geq 0 \end{aligned} \qquad (26)$$

pri čemu je

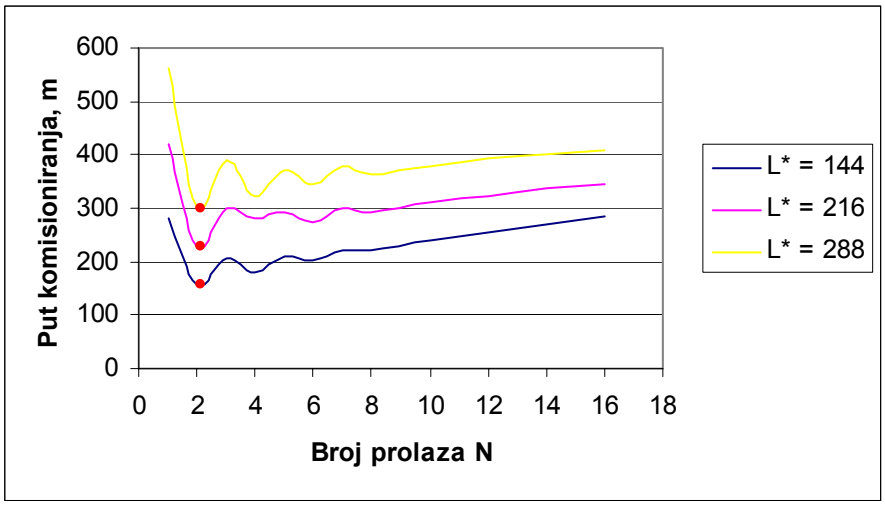
$E(L_{kom}) = f(N, L, x)$ - očekivani put komisioniranja, m
N – broj prolaza između regala
L – duljina prolaza između regala, m
L^* - ukupna duljina prolaza zone komisioniranja, m
x - veličina narudžbe (broj traženih lokacija)

Pri tome je problem određenja matematičkog izraza za očekivani put komisioniranja, koji osim o spomenutim veličinama ovisi i o odabranim metodama komisioniranja, kao i rješenja samog modela. Očekivani put komisioniranja matematički je određen samo za neke kombinacije metoda routinga i metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja (poglavlja 3.3 i 4.3), no iz dobijenih izraza očigledna je nemogućnost analitičkog određenja optimalnog broja prolaza. Iz tog razloga određenje optimalnog broja prolaza zone komisioniranja napravljeno je simulacijama, varirajući sve utjecajne parametre na put komisioniranja (ukupna duljina prolaza L^*, broj prolaza N, veličina narudžbe x, za određene kombinacije metoda routinga, metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja i metoda organizacije komisioniranja). U nastavku su prikazani rezultati simulacije samo za 2 metode routinga (metoda S-oblika i optimalni algoritam), 2 načina odlaganja (slučajni i dodijeljeni raspored s ABC krivuljom protoka 80/20), dvije veličine narudžbi (x=10 i x=30) te tri veličine skladišta definirane ukupnom duljinom prolaza (L^*=144, 216 i 288), bez gubitka generalizacije. Naknadno je prikazan i utjecaj primjene metode organizacije komisioniranja sa spajanjem narudžbi na optimalni raspored zone komisioniranja.

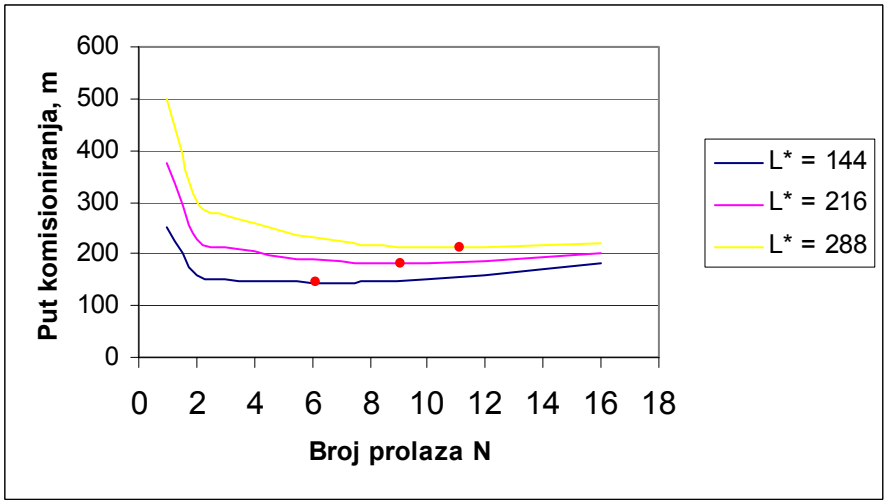
Na slikama 6-1 i 6-2 odnosno 6-3 i 6-4 prikazana je ovisnost puta komisioniranja o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza za odabranu metodu routinga i veličinu narudžbe, uz slučajni raspored odlaganja. Crvenom točkom označene su vrijednosti optimalnog broja prolaza.



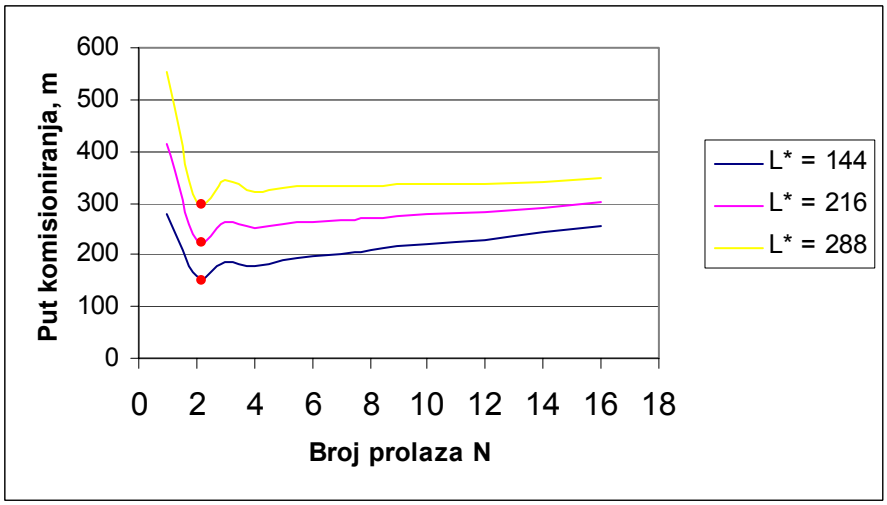
Slika 6-1. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (routing metodom S-oblika, slučajni raspored odlaganja, veličina narudžbe x = 10)



Slika 6-2. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (routing metodom S-oblika, slučajni raspored odlaganja, veličina narudžbe *x* = 30)



Slika 6-3. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (optimalni routing, slučajni raspored odlaganja, veličina narudžbe *x* = 10)



Slika 6-4. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (optimalni routing, slučajni raspored odlaganja, veličina narudžbe *x* = 30)

Uočava se ovisnost optimalnog broja prolaza o veličini narudžbe i veličini zone komisioniranja. Neovisno o metodi routinga, za relativno velike narudžbe i male zone komisioniranja, minimizacija puta komisioniranja ostvaruje se prostornim rasporedom sa samo dva prolaza. S druge strane, za male narudžbe i zone komisioniranja većih dimenzija optimalan je prostorni raspored s više prolaza.

Odnosom dvije spomenute utjecajne varijable (ukupna duljina prolaza L^* i veličine narudžbe x) može se definirati prosječna udaljenost lokacija d kao

$$d = \frac{L^*}{x} \tag{27}$$

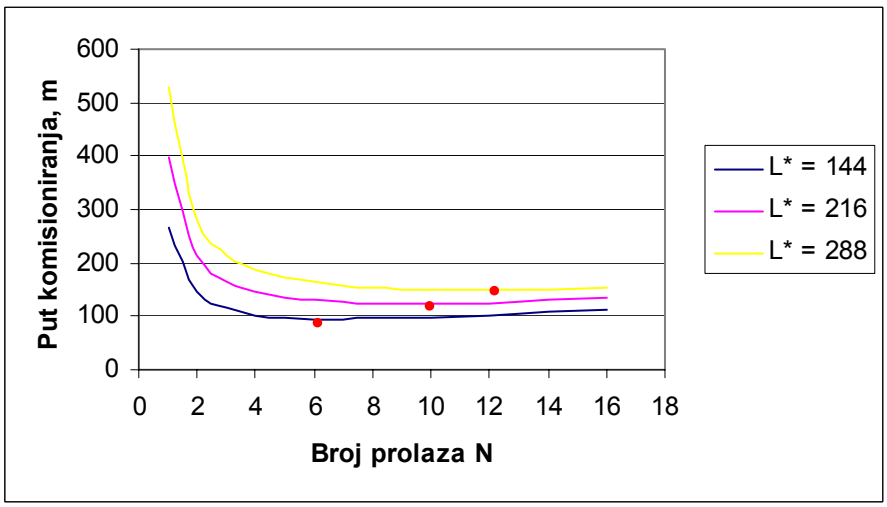
te postoji takva prosječna udaljenost d^* za koju vrijedi

$$\text{optimalni broj prolaza} = \begin{cases} 2 & za \quad d < d^* \\ \min E(L_{kom}) = f(L^*, x) & za \quad d \geq d^* \end{cases} \tag{28}$$

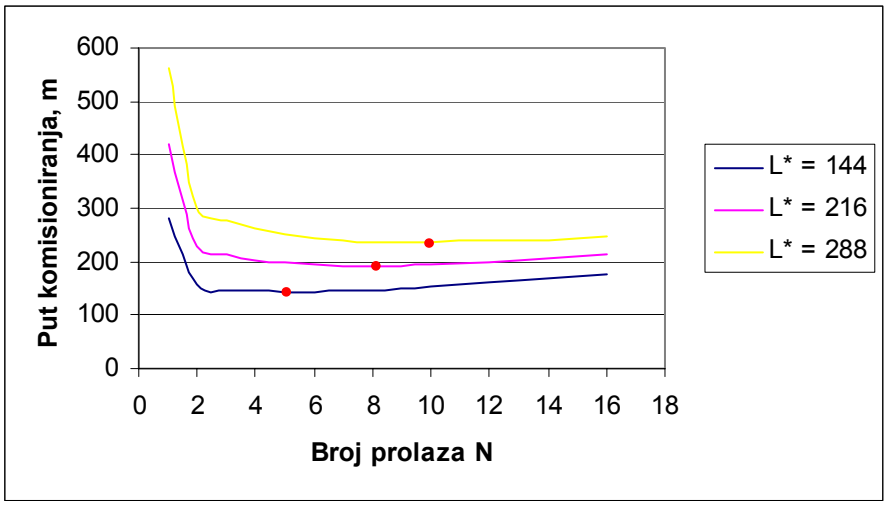
Drugim riječima, u situacijama s malom prosječnom udaljenošću lokacija d optimalan je prostorni raspored sa samo dva prolaza, dok je kod većih prosječnih udaljenosti lokacija optimalni broj prolaza jednak minimumu funkcije očekivanog puta komisioniranja.

Porastom vrijednosti d raste i optimalni broj prolaza. Dodatno, za konstantni d porastom L^* (uz konzekventni porast i veličine narudžbe x) također raste optimalni broj prolaza. Vrijednost prosječne granične udaljenosti lokacija d^* ovisi pak o primjenjenoj metodi routinga, te je za metodu S-oblika ona viša zbog same definicije te metode (prolaska kroz cijeli prolaz). Također se za ovu metodu uviđa već spomenuta ovisnost o neparnom broju prolaza u slučaju velikih narudžbi (veći prosječni broj lokacija po prolazu povlači za sobom veću vjerojatnost posjećivanja svih prolaza).

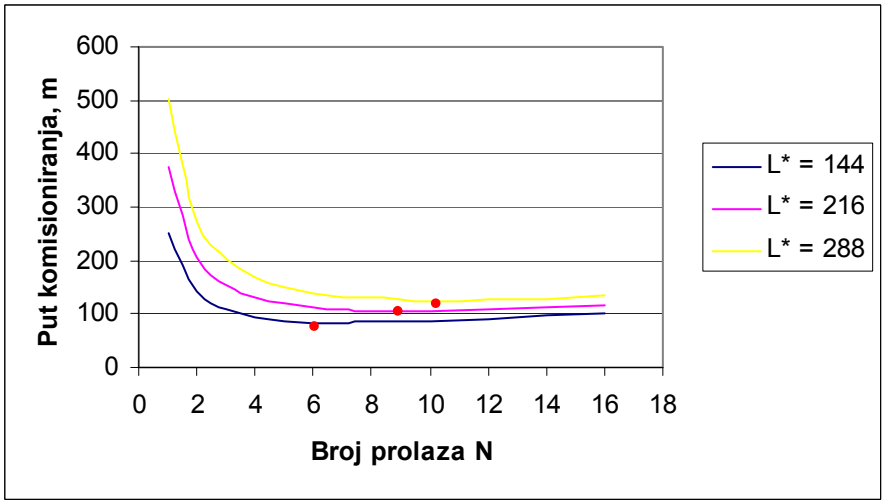
Za razliku od slučajnog rasporeda odlaganja, ukoliko se primjeni metoda dodijeljenog rasporeda odlaganja prema protoku optimalni je broj redova drugačiji. Na slikama 6-5 do 6-8 prikazana je ovisnost puta komisioniranja o broju i ukupnoj duljini prolaza, za iste metode routinga i veličine narudžbi, ali uz odlaganje po prolazima. Iz skupa analiziranih ABC krivulja odabrana je za prikaz najzakrivljenija 80/20 zbog najbolje ilustracije utjecaja analizirane metode.



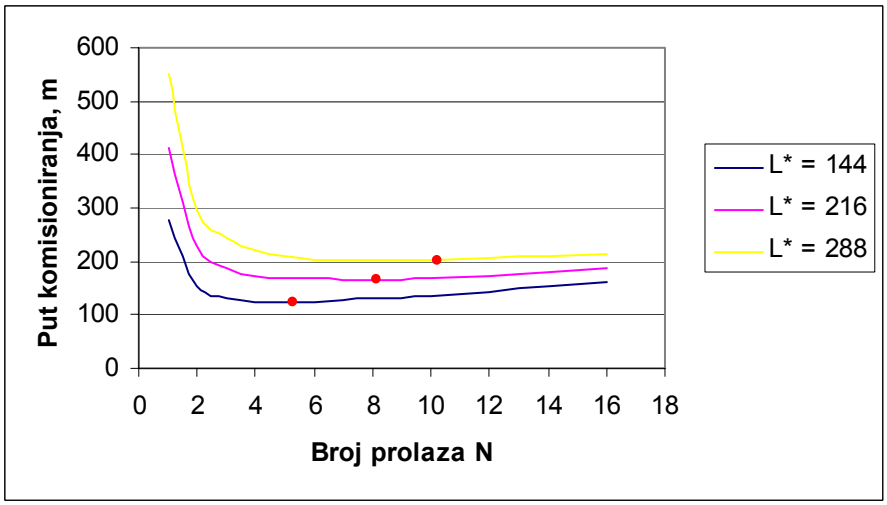
Slika 6-5. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (routing metodom S-oblika, dodijeljeni raspored odlaganja, veličina narudžbe x = 10)



Slika 6-6. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (routing metodom S-oblika, dodijeljeni raspored odlaganja, veličina narudžbe *x* = 30)



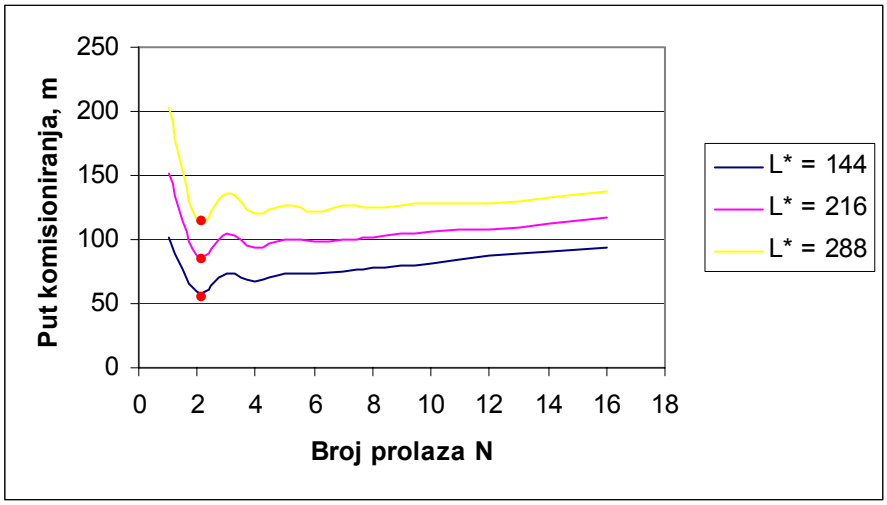
Slika 6-7. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (optimalni routing, dodijeljeni raspored odlaganja, veličina narudžbe *x* = 10)



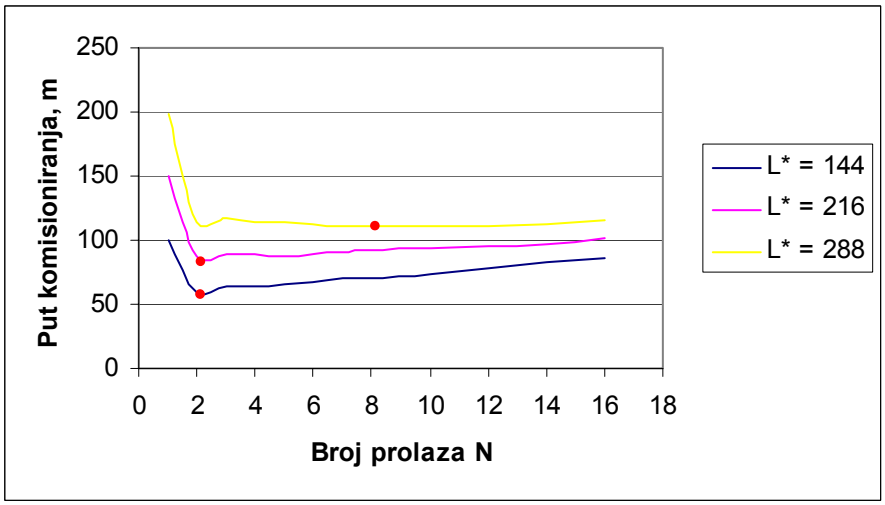
Slika 6-8. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (optimalni routing, dodijeljeni raspored odlaganja, veličina narudžbe *x* = 30)

Bez obzira na veliki broj lokacija u ruti (velike narudžbe), optimalni prostorni raspored više nije sa dva prolaza. Naime, primjena dodijeljenog rasporeda odlaganja ekvivalentna je koncentraciji većine traženih lokacija u nekoliko prolaza blizu ulaza/izlaza. Rezultat je povećanje prosječne udaljenosti između lokacija u preostalom dijelu zone komisioniranja u usporedbi sa slučajnim rasporedom odlaganjem. Porast zakrivljenosti ABC krivulje (faktora *s*) rezultira optimalnim prostornim rasporedom s većim brojem prolaza jednako kao i porast prosječne udaljenosti lokacija *d*.

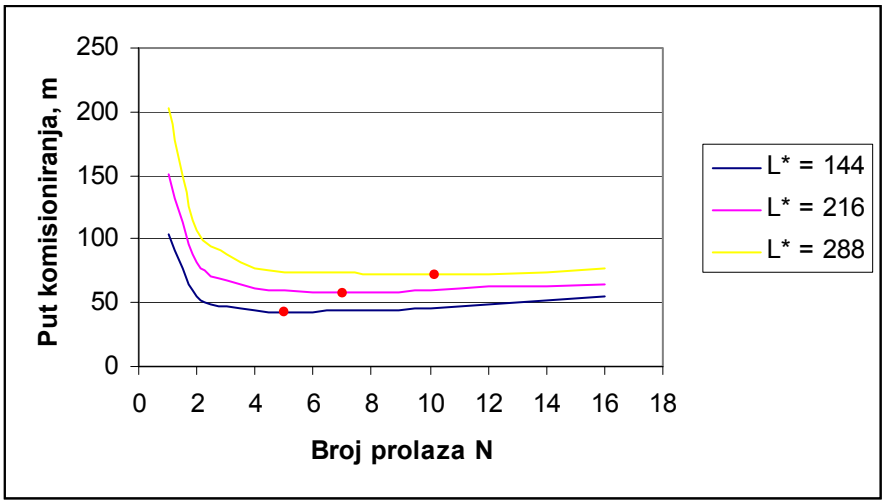
Ukoliko se primjeni organizacija komisioniranja sa spajanjem narudžbi (uz slučajni ili dodijeljeni raspored odlaganja), približan način određenja optimalnog prostornog rasporeda moguć je smatranjem kapaciteta veličinom narudžbe, kao u prethodnim slučajevima. Ovakva analogija u potpunosti bi vrijedila uz pretpostavke o *FCFS* algoritmu spajanja narudžbi i potpunoj popuni kapaciteta. Kako realno *FCFS* algoritam ne rezultira niti približno potpunom popunom kapaciteta komisionera, a s pozicije smanjenja puta daleko prihvatljiviji su napredniji algoritmi spajanja narudžbi, provedena je analiza puta komisioniranja u ovisnosti o broju i ukupnoj duljini prolaza za spajanje narudžbi pomoću modificiranog *C&W* algoritma. Zbog usporedbe rezultata kapacitet komisionera iznosi 30, a rezultirajući grafovi prikazani su na slikama 6-9 do 6-12.



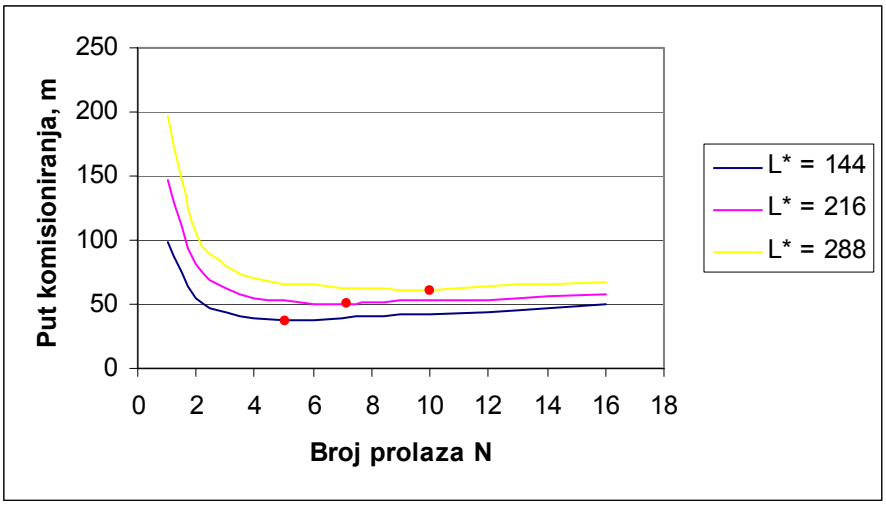
Slika 6-9. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (routing metodom S-oblika, slučajni raspored odlaganja, spajanje narudžbi)



Slika 6-10. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (optimalni routing, slučajni raspored odlaganja, spajanje narudžbi)



Slika 6-11. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (routing metodom S-oblika, dodijeljeni raspored odlaganja, spajanje narudžbi)



Slika 6-12. Put komisioniranja u ovisnosti o broju prolaza i ukupnoj duljini prolaza (optimalni routing, dodijeljeni raspored odlaganja, spajanje narudžbi)

Rezultirajući grafovi potvrđuju očekivanja o sličnosti optimalnog prostornog rasporeda sa prethodnim slučajevima, dok se uočene razlike mogu, osim nepotpunom popunjavanju kapaciteta, pripisati i načinu minimizacije puta komisioniranja od strane samog algoritma. Naime, rezultat spajanja uglavnom će, a poglavito to vrijedi za routing metodom S-oblika, biti povećana gustoća lokacija u nekoliko prolaza, te mala gustoća lokacija u preostalim prolazima. Zbog toga se, kao i kod dodijeljenog odlaganja, smanjuje prosječna granična vrijednost gustoće lokacija d^*.

6.2. Utjecaj optimalnog broja prolaza na odluke projektanta

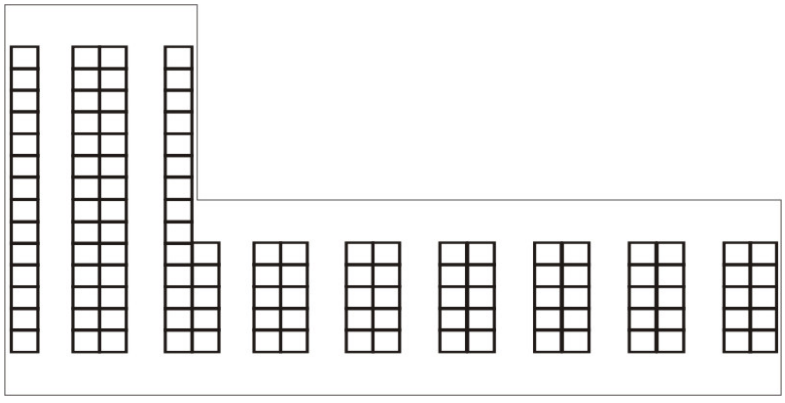
Rezultati provedenog istraživanja ukazuju na značajan utjecaj odabranog prostornog rasporeda na očekivani put komisioniranja. Kako razlike mogu iznositi i preko 50%, realna je težnja oblikovanje zone komisioniranja s optimalnim prostornim rasporedom.

Odabir optimalnog prostornog rasporeda ovisi o odabranoj veličini zone komisioniranja (ukupna duljina prolaza) i prosječnoj veličini narudžbe, te o odabranim metodama komisioniranja (metoda routinga, metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja i metoda organizacije komisioniranja). Na temelju rezultata mogu se definirati određene vodilje

oblikovanja. Prostorni raspored sa samo dva prolaza optimalan je u situacijama s malom prosječnom udaljenošću između lokacija (odnos između ukupne duljine prolaza i veličine narudžbe) i sa slučajnim rasporedom odlaganjem. Praktički je to slučaj kod komisioniranja velikih narudžbi ili komisioniranja sa spajanjem narudžbi. Ukoliko je prosječna udaljenost između lokacija velika i/ili je primjenjen dodijeljeni raspored odlaganja sa vrlo zakrivljenom ABC krivuljom protoka, optimalni je prostorni raspored sa više prolaza. Optimalni broj prolaza u takvim situacijama ponajprije ovisi o ukupnoj duljini prolaza.

Jasno da se pri oblikovanju prostornog rasporeda zone komisioniranja, osim minimizacije puta komisioniranja, moraju uvažavati i drugi faktori i ograničenja. Prostorni raspored sa samo dva prolaza ne mora biti prihvatljiv s pozicije cjelokupnog prostornog rasporeda skladišta i utjecaja na troškove gradnje objekta. Također, u slučaju visokog protoka (većeg broja komisionera u zoni komisioniranja), realno je razmotriti i problem zagušenja. Pitanje je također i fleksibilnost takvog prostornog rasporeda (s obzirom na npr. promjene u veličini narudžbe, promjene metoda komisioniranja, protoka, kapaciteta i dr.). Iako se u ovom radu organizacija komisioniranja po zonama nije razmatrala, podjela zone komisioniranja u zone sa po dva prolaza nameće se kao optimalno rješenje. S druge strane, u situacijama s većim optimalnim brojem prolaza iz dijagrama je vidljivo da su krivulje protoka oko optimalne vrijednosti vrlo ravne. Drugim riječima, postoje brojni prostorni rasporedi s putem komisioniranja približni optimumu, što projektantu daje određenu slobodu i mogućnost zadovoljenja ostalih zahtjeva. Pri tome se može ustvrditi da prostorni rasporedi s parnim brojem prolaza rezultiraju manjim putem komisioniranja od prostornih rasporeda s neparnim brojem prolaza, poglavito uz routing metodom S-oblika i velike narudžbe.

Kako je provedeno istraživanje bilo ograničeno samo na osnovni prostorni raspored, potreban je jedan kritički osvrt na ostale prostorne rasporede. Primjena jednog ili više poprečnih prolaza može, osim smanjenja puta komisioniranja, rezultirati i drugačijim optimalnim brojem prolaza. Također, prostorni raspored ne mora nužno biti pravokutnog oblika. Štoviše, rezultati provedenog istraživanja (mala prosječna udaljenost lokacija → 2 prolaza, velika prosječna udaljenost lokacija → više prolaza) sugeriraju da bi uz primjenu dodijeljenog rasporeda odlaganja optimalni prostorni raspored shematski mogao izgledati kao na slici 6-13. Jasno da primjena ovakvog prostornog rasporeda ovisi o mogućnosti ukomponiranja istog u cjelokupni prostorni raspored skladišta, ili izgradnje objekta skladišta nepravokutnog oblika.



Slika 6-13. Shematski prikaz optimalnog prostornog rasporeda zone komisioniranja s dodijeljenim rasporedom odlaganja

Prema tome, odabir prostornog rasporeda odluka je samog projektanta, ovisi o mnogim faktorima, pri čemu u cilju minimizacije puta komisioniranja treba uvažavati dobivene spoznaje o utjecaju metoda komisioniranja na optimalni prostorni raspored.

7. SINTEZA I GENERALIZACIJA

Cjelovita analiza i sistematizacija metoda komisioniranja napravljena u radu sagledava primjenu i performanse pojedine metode u interakciji s ostalim metodama, što je korak naprijed u odnosu na pojedina istraživanja prezentirana do sada u literaturi.

Istraživanje značajki pojedinih metoda routinga (raznih heurističkih metoda koje se koriste u praksi, te teorijskog optimalnog algoritma) s teorijskog je stajališta rangiralo pojedine heurističke metode ovisno o situaciji (veličini i obliku skladišta, veličini narudžbe), te definiralo razlike u odnosu na optimalni algoritam. Za praktičnu primjenu, od bitnog je značaja poznavanje performansi pojedinih metoda routinga, te u kojoj situaciji primjeniti neku od postojećih metoda. Iako s najmanjim putem komisioniranja, optimalni algoritam routinga rezultira "nelogičnim" rutama za komisionera. Nasreću, u većini realnih skladišta moguće je odabrati jednostavniju heurističku metodu koja će u dotičnoj situaciji rezultirati približno optimalnim rješenjem.
Ugradnja metoda routinga (čak i optimalnog algoritma) u današnje WMS-ove ne predstavlja bitniju zapreku njihovoj primjeni.

Primjena dodijeljenog rasporeda odlaganja dokazana je u praksi za smanjenje kretanja prilikom komisioniranja. Međutim, odabir najpovoljnijeg tipa odlaganja ovisi o metodi routinga. Osim metode routinga, teorijski najbolji tip odlaganja ovisi i o veličini skladišta, veličini narudžbe i zakrivljenosti ABC krivulje protoka (poglavlje 4.2.1.). Za praktičnu primjenu, odlaganje po prolazima pokazalo se kao najrobusniji tip odlaganja, s optimalnim ili približno optimalnim rezultatima u svim situacijama, nadmašivši najčešće korišteni tip odlaganja u praksi [17] – odlaganje uzduž prednjeg prolaza.
Kako primjena dodijeljenog rasporeda odlaganja može povlačiti za sobom i potrebiti povećani kapacitet i/ili stalne analize i relokacije, jedno od rješenja je primjena odlaganja po zonama. I s teorijskog i s praktičnog stajališta važno je saznanje da se i kod klasičnih regalnih skladišta, kao i kod automatiziranih (što je otprije poznato), već sa nekoliko zona eliminiraju spomenuti problemi, a gotovo u potpunosti ostvaruju smanjenja puta komisioniranja. Pri tome je od nezanemarivog utjecaja osim broja zona i pravilan odabir veličina pojedinih zona.

Najznačajniji utjecaj na smanjenje puta komisioniranja ima pak promjena organizacije komisioniranja. Spajanjem narudžbi umjesto komisioniranja prema narudžbi moguće su najveće uštede u putu komisioniranja. Pri tome se, od brojnih algoritama spajanja, modificirani *Clarke & White* algoritam uštede pokazao kao najbolji algoritam (poglavlje 5.2.2.), neovisno o primjenjenoj metodi routinga i/ili načinu odlaganja. Iako se u praksi vrlo često koristi jednostavni *FCFS* algoritam spajanja, prema rezultatima analize za to ne postoji opravdanje. Kao i kod metoda routinga, i algoritme spajanja vrlo je jednostavno ugraditi u WMS-ove. Na današnjim računalima niti vrijeme računanja ne predstavlja problem, a kao alternativa postoje i nešto jednostavniji, a opet po rezultatu bliski algoritmi temeljne narudžbe.

Na temelju rezultata dosadašnjeg dijela rada (u poglavlju 4.2. određene su najbolje kombinacije metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja i metoda routinga, u poglavlju 5.2. definirane su najbolje kombinacije metoda spajanja narudžbi i metoda routinga, a u podpoglavlju 5.2.4. istražene su performanse kombinacija metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja i metoda spajanja narudžbi uz odabranu metodu routinga), moguće je zaključiti da je kombinacija metode organizacije komisioniranja sa modificiranim *C&W* algoritmom spajanja, metode odlaganja po prolazima i optimalne metode routinga najbolja kombinacija po kriteriju minimalnog puta, a time i vremena kretanja komisionera.

S druge strane, svaka od spomenutih metoda povlači za sobom određene konzekvence koje mogu imati negativni učinak na rezultate komisioniranja. Pa tako optimalni algoritam routinga

generira putanje koje su "nelogične" za praćenje, te mogu zbuniti komisionera i tako povećati vrijeme komisioniranja i greške. Jednostavnije heurističke metode, iako rezultiraju dužim putevima, mogu biti prihvatljivije zbog konzistentnijih i jednostavnijih ruta. Metoda dodijeljenog rasporeda odlaganja, osim što može zahtijevati povećani skladišni prostor, povlači za sobom i eventualnu potrebu relokacija materijala ukoliko tijekom vremena dolazi do promjena u razdiobi potražnje [83]. Slučajnim rasporedom odlaganja ostvaruje se bolja iskoristivost zone komisioniranja, a smanjuju se i moguće pojave zagušenja – više komisionera u prolazu. Primjena organizacije komisioniranja sa spajanjem narudžbi nedvojbeno u većini situacija značajno nadmašuje komisioniranje prema narudžbi po pitanju puta komisioniranja, no takva metoda pak zahtijeva sortiranje. Iako ono može biti obavljeno i tijekom komisioniranja, pa ne iziskuje dodatne investicijske troškove za sustav za sortiranje, moguća je pojava dodatnog vremena, a povećava se i mogućnost greške.
Zbog svega navedenog je za projektante i menađere – logističare skladišnih sustava bitno poznavanje relativne važnosti promjene pojedinih metoda ili njihovih kombinacija u komisioniranju. Iako se iz brojnih tablica i dijagrama uštede na temelju provedenih analiza mogu razaznati efekti primjene pojedinih metoda, u ovom poglavlju sublimirana su provedena istraživanja s ciljem da se odredi značaj odluka o primjeni pojedinih metoda ili njihovih kombinacija.

Kao referentno, odabrano je komisioniranje prema narudžbi sa slučajnim rasporedom odlaganja materijala i kretanjem komisionera po najjednostavnijoj metodi S-oblika. Variranjem jedne, dvije ili sve tri metode određene su potencijalne uštede takvih promjena. U nastavku su prikazane promjene metoda korištenjem u prethodnom radu definiranih najboljih pojedinih metoda odnosno njihovih kombinacija. Pa je tako za određenje efekata promjena za metodu routinga upotrebljen optimalni algoritam, za metodu odlaganja odlaganje po prolazima te za metodu organizacije komisioniranja metoda spajanja narudžbi pomoću modificiranog *C&W* algoritma. Variranjem spomenutih metoda moguće su kombinacije, označene kraticama:

SSR
BSR (1)
SOR (1)
BOR (2)
SSV (1)
BSV (2)
SOV (2)
BOV (3)

Slova u kraticama, objašnjena u tablici 7-1, označavaju redom metodu organizacije komisioniranja, metodu routinga i metodu rasporeda odlaganja, dok broj u zagradi predstavlja broj promjenjenih metoda u odnosu na spomenutu referentnu kombinaciju (SSR).

Tablica 7-1. Notacija kombinacija metoda komisioniranja

Organizacija komisioniranja	S – komisioniranje prema narudžbi (***S**ingle order-picking*) B – komisioniranje grupe narudžbi (***B**atch picking*)
Metoda routinga	S – kretanje po metodi **S**-oblika O – kretanje po ruti **O**ptimalnog algoritma
Metoda odlaganja	R – slučajni raspored odlaganja (***R**andom storage*) V – dodijeljeni raspored odlaganja po prolazima (***V**olume-based within-aisle storage*)

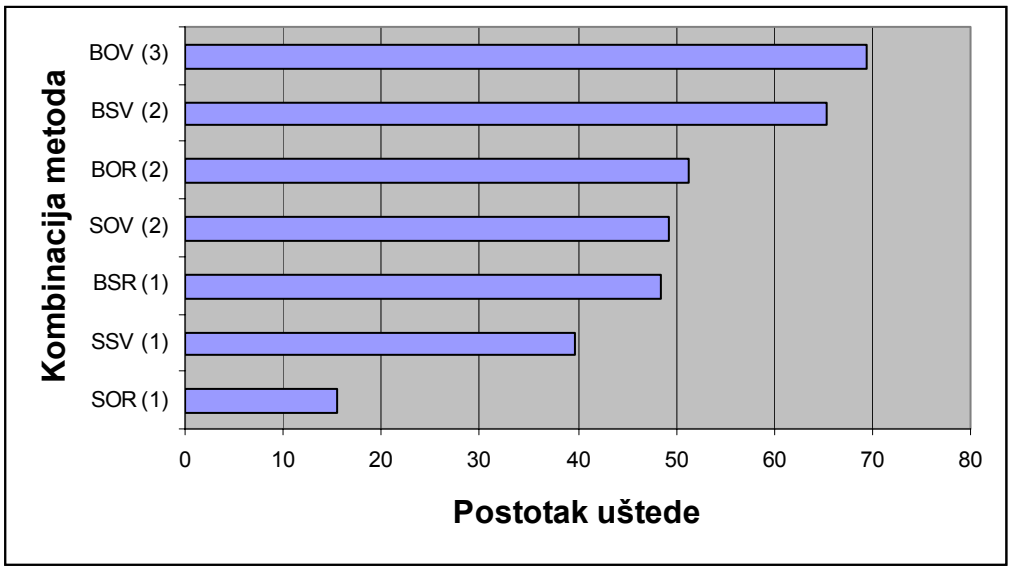
Bez gubitka generalizacije, analiza je provedena za jedan odabrani prostorni raspored i veličinu zone komisioniranja (N=8, L=36), u ovisnosti o veličini narudžbe. Promjena prostornog rasporeda i veličine skladišta, iako ima utjecaja na apsolutni iznos veličine uštede, ne utječe bitno na relativni odnos efekata promjena pojedine ili kombinacija metoda.

Veličina narudžbe u simulaciji je s prosječnim vrijednostima $\bar{x}$ = 5, 10, 15, 20, 25 i 30 lokacija, generirana pomoću uniformne razdiobe[87], dok je kapacitet komisionera kod komisioniranja sa spajanjem bio 50. Analiza sa fiksnim veličinama narudžbi, ili po nekoj drugoj distribuciji rezultira s nešto povećanim putevima komisioniranja, no također bez bitnijeg utjecaja na relativne efekte metoda komisioniranja. Za dodijeljeni raspored odlaganja po prolazima tražene lokacije su se generirale po ABC krivulji 80/20.
Rezultati analize prikazani su u tablici 7-2, pri čemu vrijednosti predstavljaju ukupni put komisioniranja 20 narudžbi.

Tablica 7-2. Usporedba kombinacija metoda komisioniranja - ukupni put komisioniranja

Veličina narudžbe	5	10	15	20	25	30	35	Prosjek
SSR	3814	5576	6268	6841	7006	7205	7291	6286
BSR (1)	831	1613	2396	3292	4285	5382	6401	3457
SOR (1)	2919	4321	5090	5787	6154	6522	6785	5368
BOR (2)	785	1510	2291	3069	4041	5096	6102	3271
SSV (1)	2160	3031	3544	4042	4370	4673	4958	3825
BSV (2)	509	991	1525	2206	2914	3762	4494	2343
SOV (2)	1792	2556	2980	3365	3671	3960	4215	3220
BOV (3)	464	887	1377	1912	2585	3244	3914	2055

Ilustrirano slikom 7-1 koja prikazuje prosječnu postotnu uštedu u putu komisioniranja svake kombinacije u odnosu na referentnu kombinaciju, potvrđuje se konstatatirana najbolja kombinacija metoda odlaganja – BOV (3). Također je vidljivo da najveći relativni efekt na skraćenje puta komisioniranja ima promjena organizacije komisioniranja, odnosno primjena metode spajanja narudžbi, zatim promjena metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja, dok najmanji relativni efekt ima promjena routinga. Vrlo je indikativno da promjena samo jedne metode – metode organizacije, u određenim situacijama može ostvariti veći efekt od primjene i dodijeljenog rasporeda odlaganja i optimalnog routinga.

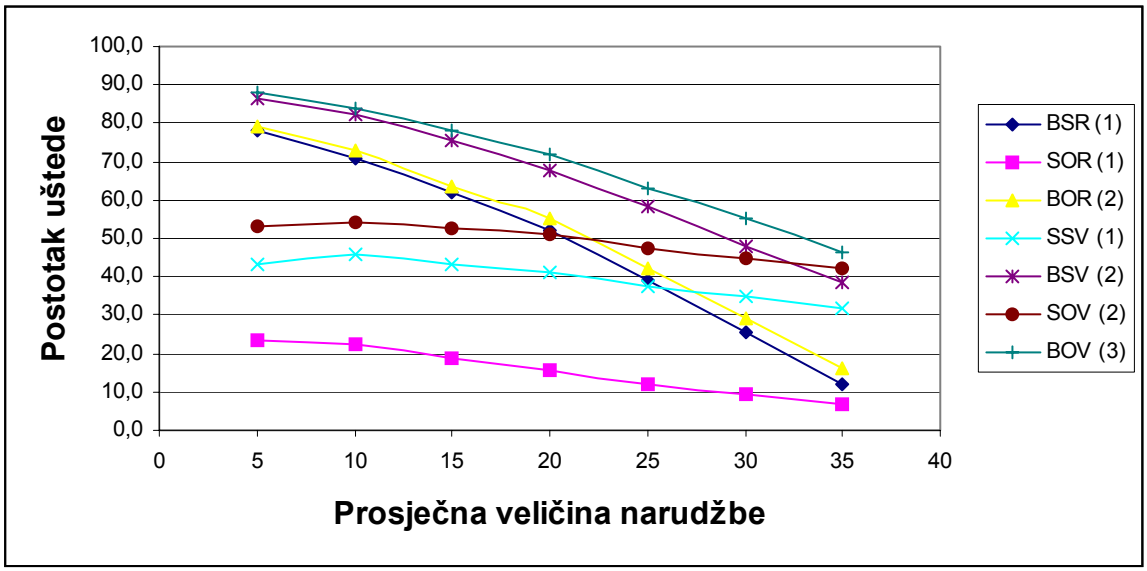


Slika 7-1. Veličina uštede primjenom kombinacija metoda komisioniranja u odnosu na referentnu kombinaciju SSR

Daljnja analiza pokazuje određene interakcije pojedinih metoda i veličine narudžbe. Tako je sa slike 7-2 vidljivo da se efekti primjene spajanja narudžbi znatno smanjuju povećanjem veličine narudžbe. Pa je tako efekt promjene samo metode organizacije – BSR(1) manji od

[87] Uniformne razdiobe bile su redom U(1,9), U(5,15), U(5,25), U(10,30), U(10,40) i U(15,45)

efekta promjene metode odlaganja – SSV (1) za prosječne veličine narudžbe veće od 25. Pri tome ove veličine narudžbi ne treba smatrati apsolutnim granicama, već relativno prema kapacitetu, te se uviđa da je efekt primjene metoda spajanja znatno smanjen kod prosječne broja narudžbi po grupi < 2. No u slučaju manjih narudžbi (većeg broja narudžbi po grupi) te uštede su najznačajnije. Kod velikih narudžbi očito je da najveći efekat na smanjenje puta komisioniranja ima metoda dodjeljivanja mjesta odlaganja. Kod jako velikih narudžbi vidljivo je da uz slučajni raspored odlaganja bilo kakve druge promjene rezultiraju slabim performansama, odnosno minimalnim uštedama.



Slika 7-2. Veličina uštede primjenom kombinacija metoda komisioniranja u odnosu na referentnu kombinaciju u ovisnosti o veličini narudžbe

Što se tiče metode routinga, vidljivo je da promjena te metode donosi najmanje uštede u usporedbi s promjenom neke druge metode. Poglavito su male uštede kod većih narudžbi, kod kojih optimalni algoritam ima tenedenciju formiranja ruta kao metoda S-oblika. Dodatno, promjenom i drugih metoda komisioniranja, primjena optimalnog algoritma samo neznatno dodatno smanjuje put komisioniranja u odnosu na jednostavnu metodu S-oblika. Kod vrlo malih narudžbi, primjenjeno spajanje narudžbi gotovo eliminira potrebu uporabe optimalnog algoritma.

Relativni efekti primjene kombinacija metoda komisioniranja sugeriraju da je u mnogim situacijama za ostvarenje znatnog smanjenja puta komisioniranja dovoljno primjeniti samo jednu ili dvije metode komisioniranja. Koju(e) metode ovisi pak o karakteristikama narudžbi i kapacitetu komisionera. Ukoliko su relativno male narudžbe i veliki kapacitet, treba težiti primjeni spajanja narudžbi. U suprotnom, uz uvjet da se ABC analizom protoka materijala na skladištu utvrdi znatnija zakrivljenost pripadajuće krivulje, treba primjeniti dodijeljeni raspored odlaganja ili odlaganje po zonama. Opravdanost primjene optimalnog algoritma routinga znatno je umanjena kod organizacije komisioniranja sa spajanjem narudžbi. Kod komisioniranja prema narudžbi iznos mogućeg smanjenja puta u odnosu na jednostavne heurističke metode komisioniranja može biti prevaga u odluci.

U postupku projektiranja novog rješenja, izgradnja varijanti sustava za komisioniranje temeljena na odabranim metodama komisioniranja mora biti, s ciljem optimizacije rješenja, popraćena s pripadajućim najboljim prostornim rasporedom. Pa je tako za manje zone komisioniranja i veće narudžbe (komisioniranje grupa narudžbi), uz slučajni raspored odlaganja, optimalni prostorni raspored sa samo dva prolaza. Kod većih skladišta, manjih narudžbi i/ili dodijeljenog rasporeda odlaganja materijala s jače zakrivljenom krivuljom protoka potrebno je odrediti optimalni broj prolaza. Kako se u projektu mora odgovoriti i na

mnoge druge zahtjeve i ograničenja, dobro je znati da u takvim slučajevima postoje brojni prostorni rasporedi s putem komisioniranja blizu optimuma. Navedene spoznaje imaju utjecaja i na samu metodologiju projektiranja skladišta – povećan je značaj analize puteva komisioniranja u fazi oblikovanja varijanti, a što povlači za sobom da su u ranijim fazama projektiranja potrebni kvalitetniji podaci o procesima skladištenja.

Rezultati provedenog istraživanja potvrdili su ispravnost postavljene teze da se u klasičnim regalnim skladištima s prolazima primjenom metoda komisioniranja mogu znatno smanjiti putevi i vremena kretanja pri komisioniranju. Uz pretpostavke o osnovnom prostornom rasporedu i nedjeljivosti zone komisioniranja na podzone, definirana je optimalna kombinacija metoda komisioniranja koja neovisno o veličini i obliku te zone, veličini narudžbe, kapacitetu komisionera i karakteristikama materijala i narudžbi, minimizira put, a time i vrijeme komisioniranja. Za svaku kombinaciju metoda moguće je odrediti optimalni prostorni raspored zone komisioniranja, ovisno o navedenim parametrima. Time je potvrđeno i očekivanje o implikacijama rješenja ovog istraživanja i na fazu oblikovanja novih skladišnih sustava, odnosno zona komisioniranja.

S teorijskog stajališta, ponovljivost istraživanja priloženim simulacijskim programima i usporedba s rezultatima rješenja prezentiranih u literaturi (navedenoj u popisu), omogućavaju egzaktnu verifikaciju rezultata ovoga rada. Osim toga, ovaj rad u cjelosti je utemeljen i kompatibilan s relevantnim i recentnim radovima u svijetu. Potvrda i efekti rezultata ostvariti će se konkretnim projektima (pre)oblikovanja komisioniranja skladišnih sustava.

8. ZAKLJUČAK

Priprema materijala u skladištu radi otpreme korisnicima – komisioniranje, jedan od osnovnih potprocesa skladištenja, najznačajniji je s motrišta osnovnih zadataka skladišta. S druge strane, komisioniranje ima najveći utjecaj na operativne troškove u skladištu, te je kao takvo u posljednje vrijeme predmet istraživanja.

Skladišta se projektiraju i izvode s različitim rješenjima komisioniranja. Među brojnim faktorima koji imaju utjecaja na rješenja su: veličina poduzeća, vrsta proizvodnih procesa, složenost, vrste, značajke i količina materijala, tip, broj i vrsta skladišta, statičke i dinamičke značajke skladištenja, značajke skladišne i transportne opreme, kao i brojne skladišne metode. Radi toga danas su rješenja komisioniranja utemeljena na primjeni brojnih principa, strategija, pravila i metoda.
Dva su osnovna principa komisioniranja "čovjek robi" ili "roba čovjeku", ovisno o kretanju čovjeka-komisionera ili robe. Neovisno o sustavu, veliki udio vremena komisionera otpada upravo na spomenuto kretanje. Raznim se metodama komisioniranja: metodama routinga, metodama dodijeljivanja mjesta odlaganja i metodama organizacije komisioniranja, može utjecati na smanjenje puta komisioniranja.
U klasičnim (neautomatiziranim) sustavima, u kojima se komisioner kreće prolazima između regala u horizontalnoj ravnini, samo za kretanje potroši se više od 50% od ukupnog vremena komisioniranja. Iako je evidentno da se skraćivanjem puta komisioniranja može postići znatna ušteda na vremenu, a time i na troškovima komisioniranja, istraživanje komisioniranja u takvim skladištima neopravdano je nedovoljno zastupljeno u literaturi.
U ovom radu sustavno je provedena cjelovita analiza-sinteza najpoznatijih metoda komisioniranja. Osim jedne temeljite sistematizacije rezultati su u funkciji vrednovanja, po istom kriteriju, pojedinačnih i kombinacija raznih metoda. Pri tome su polazište i cilj bili potencijal smanjenja puta komisioniranja njihovom primjenom.
U poglavlju *Metode routinga* istražene su karakteristike razvijenih heurističkih metoda određivanja redoslijeda i rute prikupljanja materijala u klasičnim regalnim skladištima s prolazima, kao i optimalni algoritam routinga. Rezultati pokazuju razlike u primjeni pojedine metode routinga ovisno o situaciji i do 40% puta komisioniranja, te je naglašena nužnost primjene adekvatne metode routinga.
Za određivanje očekivanog prosječnog puta komisioniranja za neke su jednostavnije heurističke metode routinga razvijeni i prezentirani analitički modeli.
U poglavlju *Metode dodijeljivanja mjesta odlaganja* u fokus istraživanja uvodi se način odlaganja materijala u skladištu. Odlaganje prema protoku, koje je uz određene pretpostavke ekvivalentno dokazano najpovoljnijem načinu odlaganja prema COI indeksu, ovisno o zakrivljenosti ABC krivulje omogućuje smanjenje puta komisioniranja i do 50% u odnosu na slučajni raspored odlaganja materijala. S obzirom na moguće različite tipove odlaganja, ovisno o metodi routinga definirane su najbolje kombinacije metoda routinga i tipova odlaganja. Kako je primjena dodijeljenog rasporeda odlaganja povezana s određenim nedostacima, za alternativno rješenje pokazana je zadovoljavajuća mogućnost primjene odlaganja po zonama.
Za određivanje očekivanog prosječnog puta komisioniranja za neke kombinacije metoda routinga i tipova odlaganja također su prezentirani analitički modeli.
Osim komisioniranja prema narudžbi, za organizaciju komisioniranja može se primjeniti komisioniranje grupa narudžbi ili komisioniranje po zonama. Komisioniranje grupe narudžbi, odnosno njihovo grupiranje određenim algoritmom, treći je dio istraživanja posvećen smanjenju ukupnog puta komisioniranja. U poglavlju *Metode spajanja narudžbi* analizirani su brojni algoritmi spajanja, te definirani najbolji ovisno o metodi routinga. Primjena ovakve organizacije komisioniranja može, ovisno o broju narudžbi po grupi, rezultirati uštedama u putu od cca. 40 do 70%. Dodatno, dodijeljenim se rasporedom odlaganja te uštede i povećavaju, bez utjecaja na relativne performanse metode odnosno samih algoritama spajanja.

U konačnici, primjena najboljih metoda routinga, odlaganja i spajanja narudžbi u odnosu na odabranu referentnu (u praksi najčešću) kombinaciju, može u nekim ekstremnim slučajevima rezultirati i do čak 90%-tnog smanjenja puta komisioniranja (sadržano u poglavlju 7). Iako su u većini drugih slučajeva ti potencijali manji, dovoljan su i očigledan razlog nužnosti primjene adekvatnih metoda u unapređenju procesa komisioniranja. S praktičnog stajališta, ponekad je dovoljno primjeniti samo neke od metoda a da se ostvare značajna poboljšanja. Poglavito to dobiva na značenju kada se zna da su to metode koje ne zahtijevaju investiranje u novu opremu[89], promjene prostornog rasporeda skladišta ili uvođenje automatizacije. Njihovo uvođenje zahtijeva samo promjenu načina rada u skladištu.
Dakako da je i u fazi projektiranja novih skladišnih sustava (ujedno i sustava za komisioniranje) od velikog značaja poznavanje i primjena metoda komisioniranja, čime se oblikuju efikasnija rješenja. Osim metoda, utjecaj na efikasnost komisioniranja ima i odabrani prostorni raspored zone komisioniranja. Pa je tako u poglavlju *Optimalni prostorni raspored zone komisioniranja* prezentiran matematički model određenja optimalnog broja prolaza po kriteriju minimalnog puta komisioniranja, uz raspravu i smjernice oblikovanja.

Istraživački duh ne razlikuje se mnogo od sportskog. "Brže, više, jače" moto je koji se može oslikati i u znanstvenom radu. Usprkos postojanju brojnih metoda, principa i izvedbi komisioniranja, uvijek će biti napora za traženjem još boljih, bržih, robusnijih, jeftinijih, pouzdanijih,... Tako se i u svezi metoda komisioniranja opisanih i istraženih u ovom radu mogu očekivati i daljnja istraživanja. Neka od njih, prema osobnom izboru autora ovog rada, navedena su u nastavku.

Analogno optimalnom algoritmu routinga, za očekivati je napore u traženju optimalnog algoritma spajanja narudžbi. Jedan takav korak napravljen je u *Gademan et al.* [23], u kojem je za paralelno komisioniranje po zonama prezentiran optimalni algoritam spajanja narudžbi pomoću *branch & bound* metode. Algoritam minimizira maksimalno vrijeme komisioniranja po zonama, koje se nije razmatralo u ovom radu.
Jedna od ideja smanjenja vremena komisioniranje je i primjena tzv. korelacijskog rasporeda odlaganja (eng. *correlated assignment*). Postojanje različitih materijala koji se u većini slučajeva zahtijevaju zajedno u narudžbi navelo je na razmišljanje o uskladištenju takvih materijala u bliske lokacije. Takvo se odlaganje razmatra u *Frazelle & Sharp* [86]. Kao i korelacije materijala, moguće je odrediti i sličnosti korisnika, definiranu u kolikoj mjeri neki korisnici naručuju iste materijale. Neke tehnike određivanja tih sličnosti i grupiranja proizvoda (time i određivanja mjesta odlaganja) razmatraju se u *Liu* [87]. No potrebno je istražiti da li i za koje značajke sličnosti ovakvo odlaganje može nadmašiti unaprijed dodijeljeno odlaganje prema protoku. Ovo je jedan od izazova autoru u budućem istraživačkom radu.
Određena sličnost korelacijskom odlaganju postoji i u sustavima za komisioniranje komponenata za montažu (dijelovi i/ili sklopovi koji se izdaju zajedno proizlaze iz strukture proizvoda [88]). U montažnim sustavima koji se opskrbljuju sa skupovima komponenti potrebnim za montažu (eng. *kit,* pa se takvi sustavi nazivaju eng. *kitting systems*), moguće je te komponente skladištiti zajedno na istoj lokaciji. Takvi sustavi predmet su rada u *Brynzer & Johansson* [89] i *Bryzner et al.* [38], uz naglasak na potrebu određenja rasporeda odlaganja.
Kao što je već spomenuto, istraživanje metoda komisioniranja u ovom je radu bilo ograničeno na osnovni prostorni raspored zone komisioniranja, pravokutni oblik s dva glavna prolaza – prednjim i stražnjim. U praksi su moguća i drugačija riješenja (npr. već spomenuti prostorni raspored s međuprolazima), te je potrebno odrediti performanse metoda komisioniranja i u takvim slučajevima, kao i optimalne prostorne rasporede.
Također, organizacija komisioniranja po zonama, samo spomenuta u ovom radu, jedno je od nerijetkih riješenja u praksi. Iako rezultati ovog rada mogu umnogome poslužiti u oblikovanju

[89] Pri tome se podrazujeva postojanje sustava za upravljanje skladištenjem – WMS-a, bez kojeg je nemoguće u prihvatljivom vremenu generiranje ruta, praćenje lokacija i određivanje mjesta odlaganja, niti spajanje narudžbi prema odabranom algoritmu.

i takvih riješenja, dodatni je faktor kod paralelnog komisioniranja po zonama i ostvarivanje balansa radnog opterećenja komisonera [25]. Naime, u takvim sustavima više komisionera započinje s radom u svojoj zoni, pa postoji mogućnost pojave slobodnog vremena koje neki komisioner čeka na završetak prikupljanja u ostalim zonama. Kako je minimizacija ukupnog vremena komisioniranja narudžbe (maksimalno vrijeme komisioniranja u zonama) funkcija cilja, ovaj problem mogao bi se riješiti iznalaženjem algoritama odlaganja kojima će se ujednačiti broj traženih materijala iz narudžbi po zonama.
Prethodno spomenuto paralelno komisioniranje po zonama implicira nužnost naknadnog akumuliranja i sortiranja prikupljenog materijala zbog gubitka integriteta narudžbi. U *sort-while-pick* ili *pick-and-pass* sustavima sortiranje se odvija paralelno s izuzimanjem materijala, vrijeme sortiranja ne utječe na međusobni odnos performansi razmatranih metoda komisioniranja (a praktički se može i zanemariti), te se minimizacija vremena komisioniranja može temeljiti ne minimizaciji puta komisioniranja. U sustavima s naknadnim sortiranjem ocjena o najboljim metodama komisioniranja treba se temeljiti na ukupnom vremenu komisioniranja i sortiranja. Postojanje veze između ova dva procesa implicira potrebu razmatranja eventualnih interakcija metoda komisioniranja i metoda sortiranja (spomenutih u podpoglavlju 2.4.4.).

Na kraju, u pogledu dostupnih i korištenih literaturnih i drugih izvora, evidentno je da dominiraju oni s engleskog jezičnog područja. Moguće je da ovo ograničenje ima određenih implikacija na sveobuhvatnost prikaza stanja, no pretpostavka je da su posljedice minimalne. Većina autora s drugih jezičnih područja ionako objavljuje radove na engleskom jeziku. Određene poteškoće u istraživanju i pisanju disertacije pojavile su se i s nazivljem. Kao što je već spomenuto, iz ovoga područja ima vrlo malo radova na hrvatskom jeziku. Autor ovoga rada predložio je hrvatske inačice nekih stranih naziva, ali nema pretenzija da su time definitivno riješeni svi problemi stručnog nazivlja. To je neka buduća zadaća grupe autora, kako iz struke tako i jezikoslovaca.

LITERATURA

[1] Logistics Tutorial - Orderpicking, Gatech, Atlanta, www.isye.gatech.edu/logisticstutorial/order/opindex.htm

[2] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A., Trevino, J., Facilities Planning, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1996

[3] Lambert, D.M., Stock, J.R., Ellram, L.M., Fundamentals of Logistics Management, McGraw-Hill, Boston, 1998

[4] Srića, V., Muller, J., Put k elektroničkom poslovanju, Sinergija, Zagreb, 2001

[5] Kotler, P., Armstrong, G., Principles of Marketing, 5th ed., Prentice Hall, 1993

[6] Council of Logistics Management - Internet stranice, www.clm1.org

[7] Roodbergen, K.J., Layout and routing methods for warehouses, ERIM Ph.D. series Research in Management 4, ISBN 90-5892-005-4, Nizozemska, 2001

[8] De Koster, R., Van Der Poort, E., Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions, IIE Transactions 30, 469-480, 1998

[9] Hall, R.W., Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse, IIE Transactions, 25(4), 76-87, 1993

[10] Petersen, C.G., An evaluation of order picking routeing policies, International Journal of Operations & Production Management 17(11), 1098-1111, 1997

[11] Ratliff, H.D., Rosenthal, A.S., Order-picking in a rectangular warehouse: A solvable case of the travelling salesman problem, Operations Research 31(3), 507-521, 1983

[12] Roodbergen, K.J., De Koster R., Routing orderpickers in a warehouse with multiple cross aisles. In: Progress in material handling research (R.J. Graves et al., eds.), Material Handling Institute, Charlotte, North Carolina, 451-467, 1998

[13] Roodbergen, K.J., De Koster, R., Routing orderpickers in a warehouse with a middle aisle, European Journal of Operational Research 133, 32-43, 2001

[14] Vaughan, T.S., Petersen, C.G., The effect of warehouse cross aisle on order picking efficiency, International Journal of Production Research 37 (4), 881-897, 1999

[15] De Koster, R., Roodbergen, K.J., Van Voorden, R., Reduction of walking time in distribution center of De Bijenkorf, in: New trends in distribution logistics, Speranca & Stähly (eds.), Springer, Berlin, 215-234, 1999

[16] Caron, F., Marchet, G., Perego, A., Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems, International Journal of Production Research 36(3), 713-732, 1998

[17] Petersen, C.G., Considerations in order picking zone configuration, International Journal of Operations & Production Management 22 (7), 793-805, 2002

[18] Petersen, C.G., Routeing and storage policy interaction in order picking operations, Decision Sciences Institute Proceedings 3, 1614-1616, 1995

[19] Petersen, C.G., Schmenner, R.W., An evaluation of routing and volume-based storage policies in an order-picking operation, Decision Sciences Journal 30(2), 481-501, 1999

[20] Petersen, C., The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency, International Journal of Operations & Production Management19(10), 1053-1064, 1999

[21] De Koster, M.B.M., Van Der Poort, E.S., Wolters, M., Efficient orderbatching methods in warehouses, International Journal of Production Research 37(7), 1479-1504, 1999

[22] Elsayed, E.A., Unal, I.O., Order batching algorithms and travel time-estimation for automated storage/retrieval systems, International Journal of Production Research 27, 1097-1114, 1989

[23] Gademan, A.J.R.M., Van den Berg, J.P., Van der Hoff, H.H., An order batching algorithm for wave picking in a parallel-aisle warehouse, IIE Transactions 33, 385-398, 2001

[24] Gibson, D.R., Sharp, G.P., Order batching procedures, European Journal of Operational Research 58, 57-67, 1992

[25] Jane, C.C., An Item Assignment Heuristic within a Warehouse, Proceedings of The 5th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Application and Practice, Hsinchu, Taiwan, 2000

[26] Lin, C.H., Lu, I.Y., The procedure of determining the order picking strategies in distribution center, International Journal of Production Economics 60/61, 301-307, 1999

[27] Pan, C.H., Liu, S.Y., A comparative study of order batching algorithms, Omega International Journal of Management Science 23, 691-700, 1995

[28] Piasecki, D., Order Picking: Methods and Equipment for Piece Pick, Case Pick, and Pallet Pick Operations, 2001, www.inventoryops.com

[29] Rosenwein, M.B., A comparison of heuristics for the problem of batching orders for warehouse selection, International Journal of Production Research 34(3), 657-664, 1996

[30] Oluić, Č., Skladištenje u industriji, FSB Zagreb, 1997

[31] Vila A., Leicher, Z., Planiranje proizvodnje i kontrola rokova, Informator, Zagreb, 1976

[32] Choe, K.I., Sharp, G.P., Small parts order picking: design and operation, Technical report, Georgia Tech Research Corporation, Atlanta, 1992 www.isye.gatech.edu/logisticstutorial/order/article.htm

[33] Ashayeri, J., Gelders, L.F., Warehouse design optimization, European Journal of Operational Research 21, 285-294, 1985

[34] Napolitano, M., Using modeling to solve warehousing problems, Warehousing Education and Research Council, 1998

[35] Yoon, C.S., Sharp, G.P., Example application of the cognitive design procedure for an order pick system: case study, European Journal of Operational Research 87, 223-246, 1995

[36] Ashayeri, J., Warehouse design and location decision: an integrated approach, doktorska disertacija, Katholieke Universiteit Leuven, Belgija, 1985

[37] Yoon, C.S., Sharp, G.P., A structured procedure for analysis and design of order pick systems, IIE Transactions 28, 379-389, 1996

[38] Brynzer, H., Johansson, M.I., Medbo, L., A Methodology for Evaluation of Order Picking Systems as a Base for System Design and Managerial Decisions, International Journal of Operations & Production management 14 (3), 126-139, 1994

[39] Rouwenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., Van Houtum, G.J., Mantel, R.J., Zijm, W.H.M., Warehouse design and control: Framework and literature review, European Journal of Operational Research 122, 515-533, 2000

[40] Gray, A.E., Karmarkar, U.S., Seidmann, A., design and operation of an order-consolidation warehouse: Models and application, European Journal of Operational Research 58, 14-36, 1992

[41] Van den Berg, J.P., Zijm, W.H.M., Models for warehouse management: Classifiction and examples, International Journal of Production Economics 59, 519-528,1999

[42] De Koster, R., Performance approximation of pick-to-belt orderpicking systems, European Journal of Operational Research 72, 558-573, 1994

[43] Equipment Report, Vertical lift storage modules: Advances drive growth, Modern Material Handling, October 1, 1998

[44] Forger, G., Vertical lift storage modules: Making great use of the cube, Modern Material Handling, August 1, 1996

[45] Graves, S.C., Hausman, W.H., Schwarz, L.B., Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems, Management Sciences 23(9), 935-945, 1977

[46] Van den Berg, J.P., Gademann, A.J.R.M., Simulation study of an automated storage/retrieval system, International Journal of Production Research 38(6), 1339-1356, 2000

[47] Bozer, Y.A., White, J.A., Travel-time models for automated storage/retrieval systems, IIE Transactions 16(4), 329-338, 1984

[48] Sarker, B.R., Babu, P.S., Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review, International Journal of production Economics 40(2-3), 173-184, 1995

[49] Han, M.H., McGinnis, L.F., Shieh, J.S., White, J.A., On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system, IIE Transactions 19(1), 56-66, 1987

[50] Lee, H.F., Schaefer, S.K., Retrieval sequencing for unit-load automated storage and retrieval systems with multiple openings, International Journal of Production Research 34(10), 2943-2962, 1996

[51] Peters, B.A., Smith, J.S., Hale, T.S., Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems, International Journal of Production Research 34(6), 1757-1771, 1996

[52] Meller, R.D., Mungwattana, A., Multti-shuttle automated storage/retrieval systems, IIE Transactions 29, 925-938, 1997

[53] Keserla, A., Peters, B.A., Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems, Journal of Manufacturing Systems 13(6), 424-434, 1994

[54] Malmborg, C., Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems, International Journal of Production Research 38 (18), 4599-4610, 2000

[55] Guenov, M., Raeside, R., Zone shapes in class based storage and multicommand order picking when storage/retrieval machines are used, European Journal of Operational Research 58, 37-47, 1992

[56] Bartholdi, J.J., Platzman, L.K., Retrieval strategies for a carousel conveyor, IIE Transactions 19, 166-173, 1986

[57] Ferišak, V., Nabava: politika, strategija, organizacija, management, VF, Zagreb, 2002

[58] Hausman, W.H., Schwarz, L.B., Graves, S.C., Optimal storage assignment in automatic warehouse systems, Management Science 22(6), 629-638, 1976

[59] Rusell, M.L., Cost and Throughput Modeling of Manual and Automated Order Fulfillment Systems, magistarski rad, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2001

[60] Choe, K, Sharp, G.P., Class-Based Storage in a Unit-Load AS/RS, Report Tr-88-08, Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1988

[61] Choe, K, Sharp, G.P., Class-Based Storage with Multi-Command Operation, Report Tr-88-08, Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1988

[62] Rosenblatt, M.J., Roll, Y., Warehouse design with storage policy considerations, International Journal of Production Research 22, 809-821, 1984

[63] Rosenblatt, M.J., Eynan, A., Deriving the optimal boundaries for class-based automatic storage/retrieval systems, Management Science 35(12), 1519-1524, 1989

[64] Lim, W.K., Bartholdi, J.J., Platzman, L.K., Storage Schemes for Carousel Conveyors Under Real Time Control, Report TR-85-10, Material Handling Research Center, Georgia Institute of technology, Atlanta, Georgia, 1985

[65] Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., Bucket brigades: A self-balancing order-picking system for a warehouse, 1996, www.isye.gatech.edu/people/faculty/John_Bartholdi/bucket_brigades/papers/bbwh.pdf

[66] Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., The bucket brigade web page, www.isye.gatech.edu/people/faculty/John_Bartholdi/bucket_brigades.html

[67] Johnson, E., The impact of sorting strategies on automated sortation system performance, IIE Transactions 30, 67-77, 1998

[68] Bozer, Y.A., Quiroz, M.A., Sharp, G.P., An evaluation of alternative control strategies and design issues for automated order accumulation and sortation systems, Material Flow 4, 265-282, 1988

[69] Meller, R.D., Optimal order-to-line assignment in an order accumulation/sortation system, IIE Transactions 29, 293-301, 1997

[70] Van den Berg, J.P., Sharp, G.P., Gademann, A.J.R.M., Pochet, Y., Forward-reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments, European Journal of Operational research 111, 98-113, 1998

[71] Hackman, S.T., Platzman, L.K., Near-optimal solution of generalized resource allocation problems with large capacities, Operations Research 38(5), 902-910, 1994

[72] Roodbergen, K.J., Petersen, C.G., How to improve order picking efficiency with routing and storage policies, in: Progress in Material Handling Practice (Forger G.R. et al., eds.), Material Handling Institute, Charlotte, North Carolina, pp. 107-124, 1999

[73] Cvetković, D., Teorija grafova i njene primjene, Naučna knjiga, Beograd, 1981

[74] Caron, F., Marchet, G., Perego, A., Optimal layout in low-level picker-to-part systems, International Journal of Production Research 38 (1), 101-117, 2000

[75] Chew, E.P., Tang, L.C., Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse, European Journal of Operational Research 112, 582-597, 1999

[76] Tang, L.C., Chew, E.P., Batching and Storage Assignment Strategies, Computers & Industrial Engineering 33 (3-4), 817-820, 1997

[77] Đukić, G., Oluić, Č., Travel time models for order picking, Proceedings of the CARS & FOF 2001 Conference, Durban, South Africa, 10-12. July 2001, pp. 1087-1094

[78] Đukić, G., Oluić, Č., Čala, I., Order-picking: Largest Gap Routing Policy with COI-based Storage Policy, 18th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Porto, Portugal, 3-5. July 2002, pp. 49-55

[79] Đukić, G., Oluić, Č., Routing and storage policies in order-picking: The best combinations, Proceedings of International Conference on Industrial Logistics ICIL 2003, 140-149, Vaasa, Finska 2003

[80] Petersen, G.C., Implementation issues of class-based storage strategies, Proceedings of the 32nd Annual Meeting of Decision Sciences Institute, San Francisco, SAD, 2001

[81] Erasmus Logistika Warehouse Website – batching strategies, www.fbk.eur.nl/OZ/LOGISTICA/batch.html

[82] Clarke, G., Wright, W., Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, Operations Research 12, 568-581, 1964

[83] Petersen, C.G., Aese, G., A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking, International Journal of Production Economics (u pripremi za tisak)

[84] Kunder, K., Gudehus, T., Mittlere Wegzeiten beim eindimensionalen Kommissionaren, Zeitschrift für Operazions Research 19, B53-B72, 1975

[85] Caron, F., Marchet, G., Perego, A., Layout design in manual picking systems: a simulation approach, Integrated Manufacturing Systems 11/2, 94-104, 2000

[86] Frazelle, E.A., Sharp, G.P., Correlated assignment strategy can improve any order-picking operation, Industrial Engineering 21 (4), 33-37, 1989

[87] Liu, C.M., Clustering techniques for stock location and order-picking in a distribution center, Computers & Operations research 26, 989-1002, 1999

[88] Brynzer, H., Johansson, M.I., Storage location assignment: Using the product structure to reduce order picking times, International Journal of Production Economics 46-47, 595-603, 1996

[89] Brynzer, H., Johansson, M.I., Design and performance of kitting and order picking systems, International Journal of production Economics 41, 115-125, 1995

KRATKI ŽIVOTOPIS

Rođen sam 27. ožujka 1970. godine u Varaždinu. Nakon završetka osnovne, te srednje škole za matematičko-informatičke tehničare u Varaždinu, godine 1989. upisao sam Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, smjer Strojarske konstrukcije, te diplomirao 1994. godine. Na istome Fakultetu završio sam poslijediplomski studij na smjeru Organizacija proizvodnje, obranivši 06.04.2000. godine magistarski rad: "Analiza i oblikovanje skladišnog sustava".

Nakon odsluženje vojnog roka 1995. godine, gdje sam šest mjeseci kao pripadnik 113. brigade Šibenik sudjelovao u Domovinskom ratu, zaposlio sam se u poduzeću "ITAS" Ivanec u konstrukcijskom odjelu. Od 1996. godine radim kao znanstveni novak na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, na Zavodu za industrijsko inženjerstvo. 2001. godine izabran sam u zvanje asistent za znanstveno polje strojarstvo, grana Proizvodno strojarstvo - disciplina "Rukovanje materijalom".

Sudjelovao sam u istraživanju na projektima "Istraživanje i razvoj logistički integrirane proizvodnje", glavni istraživač prof.dr.sc. Dragutin Taboršak, "Upravljanje proizvodnjom uporabom umjetne inteligencije", glavni istraživač prof.dr.sc. Nikola Šakić, "Dinamičko modeliranje logističkih sustava", glavni istraživač prof.dr.sc.Čedomir Oluić. Svi navedeni projekti financirani su od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske. Koautor sam u dva rada objavljena u u domaćim časopisima referiranim u svjetskim bazama podataka, u sedam radova na međunarodnim znanstvenim skupovima i pet radova na domaćim znanstvenim skupovima, kao i tri stručna rada.

Sudjelujem u izvođenju dodiplomske i poslijediplomske nastave na Fakultetu strojarstva i brodogradnje iz kolegija: Rukovanje materijalom, Logistika i informacijski sustavi, Osnove industrijske logistike, Tehnička logistika i operacijska istraživanja, Upravljanje logistikom. Na Strojarskom odjelu Tehničkog veleučilištu u Zagrebu sudjelujem u nastavi iz predmeta Logistika proizvodnje. Fakultetsko vijeće Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu nominiralo me za Godišnju nagradu znanstvenim novacima u 2003. godini, za postignute rezultate na znanstvenom području tehničkih znanosti, polje strojarstvo, grana proizvodno strojarstvo – disciplina industrijsko inžinjerstvo.

Tijekom ljeta 1998. godine radi usavršavanja u struci proveo sam dva mjeseca na University of Nebraska, Omaha u SAD-u.
Govorim i pišem engleski jezik. Oženjen sam, otac jednog djeteta.

SHORT BIOGRAPHY

I was born at Varaždin, Croatia, 27th of March 1970. After elementary school and mathematics-informatics secondary school, I started studying at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, and received BSc in mechanical engineering in 1994. At the same faculty I received MSc in industrial engineering in 2000 with the thesis "Analysis and design of warehouse systems".

After six months in the military service during the Independence war in 1995, I worked as a mechanical engineer in machine tools company "ITAS". Since 1996 I am a junior researcher-assistant at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Industrial Engineering Department.

I contributed in the projects sponsored by Croatian Ministry of Science and Technology: "Research and development of logistic integrated production", "Production management using artificial intelligence" and "Dynamic modelling of logistic systems". I am a co-author of two papers in journals referred in world scientific databases, seven papers in international conferences, five papers in domestic conferences with international review and three projects.

I contribute in undergraduate and graduate study at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture with courses "Material handling", "Logistics and information systems", "The basics of industrial logistics", "Engineering logistics and operations research", "Logistics management", "Production logistics".

During summer 1998 I spent two months at the University of Nebraska, Omaha, USA. I speak and write English.
I am married, father of one child.