Simulacijski model automatiziranog skladišnog sustava s regalnim vozilima

Dujman, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:235:777472

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

DIPLOMSKI RAD

Josip Dujman

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Josip Dujman

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Goranu Đukiću na dobroj volji i pruženoj pomoći pri izradi ovoga rada. Naročito se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom zadnjih pet godina ovoga studija.

Josip Dujman

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP DUJMAN** Mat. br.: 0035197112

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacijski model automatiziranog skladišnog sustava s regalnim vozilima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulattion model of shuttle-based storage and retrieval system**

Opis zadatka:

U novije vrijeme vidljiv je trend izvedbi automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima, pod nazivom eng. Shuttle-Based Storage and Retrieval System, SBS/RS. U takvim sustavima vozila u kombinaciji s liftovima zamjenjuju automatske dizalice koje su bile neizostavni dio dosadašnjih izvedbi automatiziranih skladišnih sustava. Projektiranje takvih sustava potpomognuto je analitičkim modelima radnih ciklusa, ali i simulacijama zbog nedostataka primjene isključivo matematičkih modela.

U radu je potrebno:
- Dati pregled povijesnog razvoja i stanja automatiziranih skladišnih sustava (AS/RS).
- Objasniti princip rada i osnovne komponente tipičnih izvedbi AS/RS-a.
- Temeljem pregleda literature i glavnih proizvođača napraviti prikaz novih, inovativnih izvedbi automatiziranih skladišnih sustava.
- Detaljno pojasniti izvedbe automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima.
- Dati pregled analitičkih modela oblikovanja takvih sustava.
- Napraviti simulacijski model jedne odabrane izvedbe SBS/RS sustava te usporediti rješenja simulacije i analitičkih modela.
- Primjenom simulacija provesti analizu primjene raznih odabranih metoda skladištenja.

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
27. rujna 2018.	29. studenog 2018.	05. prosinca 2018. 06. prosinca 2018. 07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Goran Đukić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI 3
2.1. Automatizirani sustavi s fiksnim prolazima 4
2.1.1. Unit-load AS/RS 8
2.1.2. Mini-load AS/RS 8
2.1.3. Varijacije osnovne izvedbe 9
2.1.4. Komisioniranje pomoću AS/RS-a 10
2.2. Karuseli i VLM 11
2.2.1. Horizontalni karuseli 11
2.2.2. Vertikalni karuseli 13
2.2.3. Vertikalni podizni modul 15
3. SBS/RS 17
3.1. Klasifikacija SBS/RS-a 17
3.1.1. AVS/RS 19
3.2. Struktura i komponente SBS/RS-a 20
3.2.1. Regalna vozila 21
3.2.2. Dizalo 25
3.3. Metode upravljanja 25
3.3.1. Metode odlaganja 25

3.3.2. Sekvenciranje 27
3.3.3. Dodijeljivanje naloga 31
3.3.4. Metode usmjeravanja vozila 31
3.3.5. Parkirna lokacija 31
4. OBLIKOVANJE I PERFORMANSE SKLADIŠTA 32
4.1. Analitički modeli za procjenu performansi 32
4.1.1. Modeli vremena vožnje 33
4.1.2. Modeli teorije redova 33
4.2. Primjena modela u literaturi 35
5. ENTERPRISE DYNAMICS 38
6. KOMPOZICIJA MODELA 39
6.1. Izgradnja modela 40
6.1.1. Atomi Product i Source 40
6.1.2. Atom Accumulating Conveyor 42
6.1.3. Atom Elevator 43
6.1.4. Atom Warehouse 44
6.1.5. Atom TransferCar Controller 46
6.2. Povezivanje kanala i detaljna razrada 49
7. REZULTATI SIMULACIJE 59
8. ZAKLJUČAK 66
LITERATURA 68
PRILOG 72

POPIS SLIKA

Slika 1. AS/RS s dizalicom [3] 5
Slika 2. *Aisle-captive* AS/RS [8] 6
Slika 3. *Aisle-to-aisle* dizalica [9] 6
Slika 4. Jedinični teret 8
Slika 5. *Mini-load* AS/RS [8] 9
Slika 6. *Dual-shuttle* dizalica [10] 10
Slika 7. Horizontalni karusel [11] 12
Slika 8. Radna stanica karusela [13] 13
Slika 9. Vertikalni karusel [14] 14
Slika 10. Shema vertikalnog podiznog modula [5] 15
Slika 11. *Dual-tray* VLM [5] 16
Slika 12. *Tier-captive* SBS/RS [21] 18
Slika 13. *Multi-level* SBS/RS [20] 19
Slika 14. Razlika između SBS/RS i AVS/RS [20] 19
Slika 15. Single-level vozilo [25] 22
Slika 16. Multi-level vozilo [26] 22
Slika 17. Platformsko regalno vozilo [27] 23
Slika 18. Transferno vozilo [27] 24
Slika 19. Kompaktni skladišni sustav [27] 24
Slika 20. Višestruki radni ciklusi dizalice [6] 29
Slika 21. Radni ciklusi dizala [29] 30
Slika 22. Radni ciklusi regalnog vozila [29] 30
Slika 23. Struktura modela čekanja [31] 34
Slika 24. Primjer otvorene mreže redova [20] 34
Slika 25. Primjer modela 38
Slika 26. 3D model 39
Slika 27. 2D model 40
Slika 28. Ilustracija labela 41
Slika 29. Atom Source 42
Slika 30. Cjelokupni skladišni sustav [37] 43
Slika 31. Atom akumulirajući konvejer 43
Slika 32. Promjena lokacije atoma 44

Slika 33. Atom skladište 45
Slika 34. Atom skladište - parametri 45
Slika 35. 2D prikaz atoma TransferCar 47
Slika 36. TransferCar - parametri 48
Slika 37. Routing tablica 49
Slika 38. Parametri transfer stanice 50
Slika 39. Atom Editor 51
Slika 40. Definiranje atributa 51
Slika 41. Atom UserEvents 52
Slika 42. Događaj u UserEventsu 52
Slika 43. Hijerarhija atoma 54
Slika 44. Spojeni kanali 56
Slika 45. Atom Queue 57
Slika 46. Konačni kod 57
Slika 47. 2D prikaz modela 58
Slika 48. 3D prikaz modela I 58
Slika 49. 3D prikaz modela II 58
Slika 50. Horizontalne zone 62
Slika 51. Vertikalne zone 63
Slika 52. Protok sustava za vertikalne zone 64
Slika 53. Stupanj iskoristivosti dizala za vertikalne zone 65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Profili brzina i akceleracija 60
Tablica 2. Idealna vremena radnih ciklusa 60
Tablica 3. Protoci sustava 61
Tablica 4. Vrijeme radnih ciklusa pri vertikalnim zonama 63
Tablica 5. Protoci sustava pri vertikalnim zonama 64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
AGV		Automatski vođena vozila
AS/RS		Automatizirani skladišni sustav za skladištenje i izuzimanje
AVS/RS		Automatizirani skladišni sustav s autonomnim vozilima
a_x^+	m/s^2	Ubrzanje regalnog vozila
a_x^-	m/s^2	Usporenje regalnog vozila
a_y^+	m/s^2	Ubrzanje dizala
a_y^-	m/s^2	Usporenje dizala
CBS/RS		Automatizirani skladišni sustav s dizalicama
CQN		Zatvorena mreža redova
DCC		Dvostruki radni ciklus
E(%)		Devijacija/greška
F/A S/RS		Automatizirani skladišni sustav s fiksnim prolazima
FCFS		Prvi u redu, prvi poslužen
FIFO		Prvi ušao, prvi izašao
I/O		Ulaz/izlaz
m		Broj razina
OQN		Otvorena mreža redova
POSC		Parkirna lokacija na mjestu izvršenja zadnjeg naloga
SBS/RS		Automatizirani skladišni sustav s regalnim vozilima
SCC		Jednostruki radni ciklus
SOQN		Poluotvorena mreža redova
SRM		Stroj za skladištenje i izuzimanje
$T(DC)_{RV}$	s	Prosječno vrijeme dvostrukog radnog ciklusa regalnog vozila
$T(DC)'_{RV}$	s	Prosječno vrijeme dvostrukog ciklusa regalnog vozila pri vertikalnim zonama
$T(SC)_D$	s	Prosječno vrijeme jednostrukog radnog ciklusa dizala
$T(SC)'_D$	s	Prosječno vrijeme jednostrukog ciklusa dizala pri vertikalnim zonama
t_c	s	Vrijeme radnog ciklusa
t_d	s	Dodatno vrijeme po ciklusu
t_i	s	Vrijeme istovara
t_{pv}	s	Vrijeme povratne vožnje
t_u	s	Vrijeme utovara
t_v	s	Vrijeme vožnje
VLM		Vertikalni podizni modul
v_x	m/s	Brzina regalnog vozila
v_y	m/s	Brzina dizala

WMS		Sustav upravljanja skladištem
λ_{RV}	JT/h	Protok regalnih vozila
λ_{D}	JT/h	Protok dizala
λ_{max}	JT/h	Maksimalni ostvareni protok sustava
λ'_{RV}	JT/h	Protok regalnih vozila pri vertikalnim zonama
$\lambda_{D}{}'$	JT/h	Protok dizala pri vertikalnim zonama

SAŽETAK

Automatizirani skladišni sustavi s regalnim vozilima su relativno novija tehnologija za skladištenje manjih tereta i sve učestalija alternativa automatiziranim skladišnim sustavima s dizalicama. Oni nalaze svoju primjenu ponajviše u uvjetima velikog protoka za komisioniranje artikala i imaju određenu fleksibilnost u odnosu na tradicionalne sustave s dizalicama. Projektiranje takvih sustava i pronalaženje optimalne varijante je potpomognuto brojnim analitičkim modelima iz grupe modela vremena vožnje i modela redova čekanja. Oni modeliraju realni sustav s manjom razinom detalja od simulacijskog modela stoga se koriste u ranoj fazi projektiranja za pronalaženje najboljih kandidata. U radu je predstavljen simulacijski model koji objedinjava neke mogućnosti modela vremena vožnje i modela reda čekanja kako bi se izračunala ne samo vremena radnih ciklusa i protok nego otkrio koliki je utjecaj blokiranja na performanse sustava, čime se otkriva i greška analitičkih modela. Nadalje, provedena je optimizacija modela pomoću promjene metode skladištenja čime je moguće ostvariti poboljšanje protoka. Dodatno, u radu su opisane razne izvedbe automatiziranih skladišnih sustava, njihova podjela, način rada i metode upravljanja.

Ključne riječi: automatizirani skladišni sustavi s regalnim vozilima, analitički modeli, simulacijski model, metode upravljanja

SUMMARY

Shuttle-based storage and retrieval systems (SBS/RS) are relatively newer technology for storing miniloads and are more frequent alternative to crane-based storage and retrieval systems. SBS/RS is mainly applied for order picking with high throughput requirements and have a certain degree of flexibility compared to crane-based systems. Designing such systems and finding the optimal variant is conducted by numerous analytical models, namely travel time models and queuing network models. They model the real system with lower level of details than simulation models so they are used in early design phase to find the best candidates. This paper presents simulation model which combines some properties of travel time model and queuing network model for calculating not just cycle times and system throughput but to discover the impacts of blocking on system performance and compare the results with analytical model. Furthermore, optimization of the model is performed in order to increase throughput by changing storage assignment methods. Also, this paper presents various types of automated storage systems, their classification, mode of operation and control policies.

Key words: shuttle-based storage and retrieval system, analytical models, simulation model, control policies

1. UVOD

Nova i globalna tržišta zahtijevaju od poduzeća sve veći broj različitih proizvoda sa smanjenim životnim ciklusom, malim količinama i smanjenim vremenima isporuke. Na današnjem globalnom tržištu poduzeća moraju moraju biti sposobna dostaviti proizvod na vrijeme, uvoditi nove proizvode i pružati usluge brže od konkurenata. Posebice u rastućoj e-trgovini koja stavlja fokus na skladišta, gdje se dnevno moraju komisionirati tisuće artikala. [1]

U zemljama s visokim troškovima rada, zemljišta i energije, visoki investicijski troškovi za tehnologije automatizacije skladišta se isplate jer će se povrat investicije ubrzat kroz smanjenje troškova rada i utroška energije [2], a povećati se će kapacitet skladišta i poboljšati usluga i produktivnost [3].

Zbog toga se u drugom poglavlju definiraju automatizirani skladišni sustavi, opisuje se podjela takvih tehnologija, daje se sistematizirani pregled izvedbi i objašnjuju principi rada takvih sustava. U trećem poglavlju se opisuje SBS/RS kao glavna tema ovoga rada. Prikazuje se česta klasifikacija u literaturi i detaljno se razrađuju sve moguće varijante takvih sustava i njihov princip rada. Nadalje, objašnjavu se relevantne metode upravljanja takvim sustavom koje se mogu shvatiti kao softver koji upravlja hardverom skladišnog sustava. Kroz cijeli rad se spominju i riječi iz engleskog jezika, kako bi se čitatelj, koji bi htio naučiti o ovim sustavima, lakše snašao u literaturi koja je dominantno na engleskom jeziku. Drugi razlog je nedostatak adekvatnih hrvatskih prijevoda.

U četvrtom poglavlju se opisuju utjecajni faktori pri projektiranju takvih sustava i ukratko opisuju učestale mjere performansi sustava. Performanse sustava su bitne kako bi se mogle procijeniti sve projektne varijante i pronaći neki optimum. Metode kojima se to postiže su korištenje analitičkih i simulacijskih modela. Kako bi se ovaj rad stavio u kontekst spominje se primjena tih metoda u istraživačkoj literaturi.

S petim poglavljem počinje uvod u razvijeni simulacijski model kratkim spomenom na korišteni softver u petom poglavlju. U šestom počinje detaljan opis razvoja simulacije gdje opis može pomoći čitatelju koji započinje rad u takvom softveru.

Konačno, u sedmom poglavlju se analiziraju rezultati dobiveni simulacijskim eksperimentima. Mjereni parametri su oni najučestaliji poput prosječnog vremena radnih ciklusa i stupnja iskorištenosti. Variranjem nekih parametara i metoda odlaganja materijala je napravljena usporedba između analitičkog i simulacijskog modela.

2. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI

Automatizirani skladišni sustavi su različite izvedbe sustava za automatizirano odlaganje (uskladištenje) i izuzimanje (iskladištenje). Jedna od često citiranih definicija ovih sustava glasi: „Automatski sustav za skladištenje i izuzimanje je kombinacija opreme i upravljanja koja rukuje, skladišti i izuzima materijale kada je potrebno, s preciznošću, točnošću i brzinom, s određenim stupnjem automatizacije. Sustavi se razlikuju od relativno jednostavnih, ručno kontroliranih komisijskih strojeva koji operiraju u malim skladišnim strukturama do jako velikih, računalom upravljanih sustava za skladištenje i izuzimanje potpuno integriranih u proizvodne i distribucijske procese.“ [4] Ova definicija objedinjuje sve moguće izvedbe ovih sustava stoga je za razjašnjenje potrebno opisati njihovu podjelu. Automatizacija se može ogledati u korištenju automatskih dizalica između prolaza regala za uskladištenje i izuzimanje, drugih vrsta regalnih vozila, dizala te (polu)automatiziranih pokretnih regala. Nadalje, potrebno je navesti i opisati terminologiju koja je vrlo česta u literaturi. Uvriježena kratica koja označava automatizirane skladišne sustave je AS/RS prema engleskom nazivu *Automated Storage and Retrieval Systems*[1]. Iako dolazi od engleskih riječi vrlo je česta u literaturi i na drugim jezicima pa i na hrvatskom.

Pojava ovih sustava u primjeni datira još od 1960-ih godina kada su se pojavile prve izvedbe visokoregalnih automatiziranih sustava. Razlozi su zapravo bili jednostavni, pojava sve većih količina zaliha u procesima proizvodnje i distribucije roba te pronalaženje načina za učinkovito skladištenje uz minimizaciju troškova. Pojavom koncepta *Just in time* i trenda smanjenja zaliha došlo je do pojave slabijeg interesa za velikim automatiziranim skladišnim sustavima, no pojavile su se neke manje izvedbe koje su našle svoju primjenu u proizvodnji, za skladištenje zaliha u procesu (eng. *work-in-process,* WIP) ili dijelova za montažu. Trend centralizacije u distribuciji opet je donio prilike i za veće izvedbe automatiziranih skladišnih sustava. Napredak i značajno jeftiniji računalni sustavi, kao i druga tehnološka rješenja, omogućili su razvoj brojnih različitih izvedbi automatiziranih skladišnih sustava koje danas možemo naći u ponudi i primjeni. Svakako da automatizacija odlaganja i izuzimanja u skladištima donosi određene prednosti. Prije svega to su financijske uštede u operativnim troškovima. Ljude zamjenjuju računala i automatizirani uređaji, čime se značajno smanjuju troškovi ljudskog rada. Dodatno, ovakve izvedbe daleko su kompaktnije (uži prolazi) od klasičnih izvedbi skladišta, a nerijetko koriste visinu daleko iznad klasičnih izvedbi. Sve to

[1] Doslovni prijevod bi značio automatizirani sustavi za skladištenje i izuzimanje.

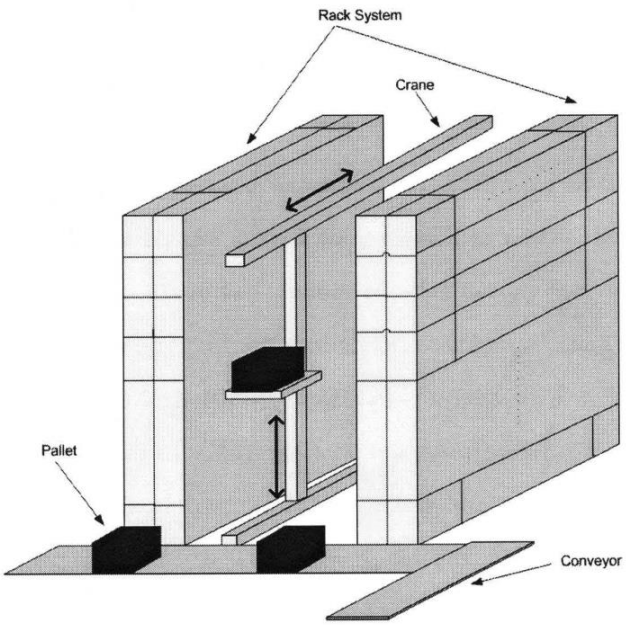
dovodi do smanjenih operativnih troškova grijanja, hlađenja i rasvjete skladišta, kao i do smanjenih investicijskih troškova zemljišta. Sama primjena računala za upravljanje procesom odlaganja i izuzimanja dovodi do veće točnosti operacija, manjeg oštećivanja robe i opreme te smanjenja mogućnosti nesreća i ozljeda na radu (eliminacijom ljudi iz procesa). No dakako postoje i određeni nedostaci. Jedan od najvažnijih su investicijski troškovi, jer automatizirani skladišni sustavi su relativno skupi u odnosu na najčešće primjenjene izvedbe sa klasišnim paletnim ili poličnim sustavom. Dakako tu su i povećani troškovi održavanja ovakvih sustava te općenito manja fleksibilnost u odnosu na tradicionalne sustave iako postoje više i manje fleksibilne izvedbe unutar skupine automatiziranih sustava. Fleksibilnost se odnosi na mogućnost adaptacije sustava kada se dogodi promjena u potrebnom skladišnom kapacitetu i protoku. [5]

Općenito govoreći, AS/RS se odnosi na skup računalom upravljanih metoda za automatsko skladištenje i izuzimanje tereta u i iz definiranih skladišnih lokacija. Pod AS/RS se ubrajaju slijedeće tehnologije: horizontalni i vertikalni karuseli, vertikalni podizni moduli i sustavi za skladištenje i izuzimanje s fiksnim prolazima (eng. *Fixed Aisle (F/A) Storage and Retrieval Systems, F/A SRS*). Zadnji sustav koristi specijalne strojeve za skladištenje i izuzimanje koji rukuju i transportiraju terete do pretovarnih stanica. Iako neke od ovih tehnologija datiraju iz 50-ih i 60-ih godina prošlog stoljeća, tek od 1990-ih se ime AS/RS koristi za više od samo sustava s fiksnim prolazima [4]. Zbog toga se mogu naći razlike u definicijama i klasifikaciji automatiziranih skladišnih sustava, koje će biti spomenute u slijedećim poglavljima. Iako ovaj relevantni izvor pod termin AS/RS objedinjuje sve spomenute tehnologije, još uvijek mnogi autori ne ubrajaju karusele u definiciju, štoviše pod tim terminom smatraju samo izvedbu s dizalicama unutar prolaza i njene varijacije.

2.1. Automatizirani sustavi s fiksnim prolazima

F/A SRS se sastoji od jednog ili više dugačkih, uskih prolaza između čeličnih (ili aluminijskih) skladišnih regala u i iz kojih se računalom upravlja automatskim skladištenjem i izuzimanjem tereta. Funkcija skladištenja i izuzimanja u svakom prolazu se može ostvariti na različite načine od kojih je najčešći dizalicom [4], stoga se ti sustavi još nazivaju automatizirani skladišni sustavi s dizalicama unutar prolaza (eng. *Crane in aisle AS/RS* ili *Crane based S/RS, CBS/RS*). Drugi način je takozvanim regalnim vozilima gdje se takvi sustavi nazivaju SBS/RS (prema eng. *Shuttle-based storage and retrieval system*) o kojima će biti riječi u trećem poglavlju. Kako je dizalica najčešće transportno sredstvo za odlaganje

(skladištenje) i izuzimanje (eng. *S/R Crane, S/R Machine*, SRM) pojam AS/RS je postao sinonim za izvedbe s dizalicama unutar prolaza, stoga će u nastavku teskta pojam AS/RS označavati navedeno. Automatske dizalice se horizontalno kreću unutar prolaza (između dva regala) te istovremeno podižu i spuštaju teret (vertikalni transport) na određenu razinu regala obavljajući na taj način operacije uskladištenja i izuzimanja, kako je ilustrirano na slici 1. Dizalica zamjenjuje operatere s viličarima, a svojom konstrukcijom i izvedbom omogućuje smanjenje širine prolaza te rukovanje materijalima na puno većim visinama. Time se postiže veća kompaktnost skladišne zone, tj. ušteda površine te bolja iskorištenost visine. S dizalicama je moguće posluživati regale visine do 40 ili 50 metara.



Slika 1. AS/RS s dizalicom [3]

Tipični AS/RS funkcionira na slijedeći način: „nadolazeći artikli se prvo sortiraju i slažu na palete ili u kutije. Tako složeni tereti se zatim važu kako bi osigurali da ostanu unutar dozvoljene težine. Za palete je također važno da veličine budu odgovarajuće. Tereti koji zadovoljavaju mjere se transportiraju do pretovarnih stanica[2], a pri tome se sadržaj tereta bilježi u centralnom računalu. Računalo također dodijeljuje skladišnu lokaciju regala teretu i pohranjuje lokaciju u memoriju. Teret se transportira od pretovarne stanice do skladišnog mjesta pomoću dizalice. Kada dođe nalog za izuzimanje nekog artikla, računalo će u memoriji

[2] Pretovarne stanice ili ulazno/izlazna mjesta (eng. *input/output*, I/O ili *pickup/delivery station, PD station*) su mjesta na početku prolaza tj. regala gdje tereti ulaze i izlaze iz sustava. Dizalice uzimaju i odlažu teret na njih. [7]

potražiti skladišnu lokaciju artikla i usmjeriti dizalicu po teret. Nadovezujući sustav transporta će odovesti teret od pretovarne stanice na željeno odredište.“ [6]

Kod sustava s dizalicom svaki prolaz može imati dizalicu (dizalica ne mijenja prolaz) ili čak dvije dizalice u prolazu pa se sustavi s takvom karakteristikom nazivaju *aisle captive*. Također, mogu postojati dizalice koje mijenjaju prolaz u slučaju manjeg broja dizalica od broja prolaza. Takva izvedba se zove *aisle to aisle* i primjenjuje se u situacijama kada količina naloga za uskladištenje i izuzimanje ne opravdava kupnju dizalice za svaki prolaz [7]. Primjer izvedbe *aisle captive* AS/RS-a je na slici 2 gdje su vidljiva tri prolaza s tri automatske dizalice.



Slika 2. *Aisle-captive* AS/RS [8]

Slika 3 prikazuje princip *aisle to aisle* dizalica.



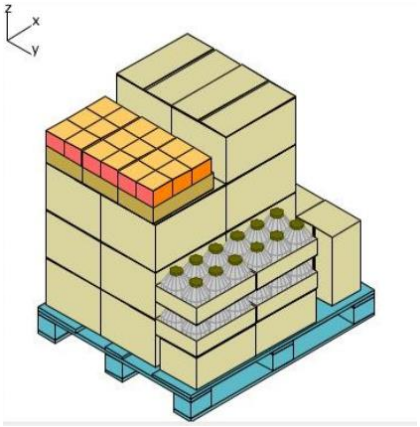
Slika 3. *Aisle-to-aisle* dizalica [9]

Prve izvedbe ovakvih sustava bile su za velike paletne terete, te su nazvane eng. *unit-load AS/RS*. Nakon toga nastale su izvedbe i za manje terete, nazvane eng. *mini-load AS/RS* i *micro-load AS/RS*. Ovi potonji kod mnogih autora se izostavljaju, odnosno svi se nazivaju *mini-load* AS/RS.[3] [5]

S obzirom da se klasifikacija radi obzirom na terete potrebno je prije svega ukratko objasniti što je to jedinični teret.

Jedinični teret, ili logistički jedinični teret, logistička jedinica (eng. *Unit load*), je onaj teret kojim se rukuje (transportira i uskladištuje) kao jednim entitetom i jednim zahvatom (paleta, sanduk, spremnik,...), neovisno o broju pojedinačnih komada koji čine takav teret. Jedan ili više komada postavljenih na posebna sredstva za odlaganje čine jedinični teret. Jedinični teret (skraćeno JT) ne mora nužno sadržavati više identičnih predmeta. Sredstva za odlaganje ili sredstva za oblikovanje jediničnih tereta su sredstva pomoću kojih se oblikuje jedinični teret. Najčešća sredstva za oblikovanje jediničnih tereta su palete (ravne, kutijaste, s okvirom), sanduci, stalci, kontejner, kutije, kasete, košare i dr. sa ili bez mogućnosti naslagivanja, izrađenih od različitih materijala ili kombinacija materijala. Na slici 4 je primjer kako je više različitih komada (artikala) objedinjeno u jedinični teret pomoću palete (sredstva za oblikovanje).

[3] Adekvatni nazivi za ove sustave na hrvatskom jeziku nisu jednostavni direktnim prijevodom. Dok bi pojmovi „automatizirani sustavi za odlaganje i izuzimanje malih i mikro tereta“ još bili razumljivi, pojam „automatizirani sustavi odlaganja i izuzimanja jediničnih tereta“ mogao bi stvoriti nedoumice, jer jedinični tereti mogu biti i tereti koji nisu paletnih dimenzija. No ovdje može pomoći terminologija na njemačkom jeziku. Naime, u njemačkom govornom području „unit-load AS/RS“ sustavi nazivaju se njem. (*Automatisierte) Hochregallager*, što je vrlo jednostavno prevesti kao (automatizirano) visokoregalno skladište. Sustavi s manjim teretima, dakle mini-load AS/RS i micro-load AS/RS, nazivaju se njem. *Automatisierte Kleinteilelager*, dakle automatizirana skladišta za male dijelove. Međutim, korištenje i predloženih prijevoda sa njemačkog jezika ima svoje zapreke. Primjerice, i automatizirani sustavi okretnih regala i vertikalni podizni moduli, kao i sustavi s vozilima, uglavnom su primjenjeni za male terete, te bi bilo teško razlučiti o kojem se točno tu sustavu radi. Iz tog razloga, a i iz razloga da je većina dostupne literature o ovim sustavima na engleskom jeziku, u nastavku će se ovi sustavi nazivati **unit-load AS/RS** i **mini-load AS/RS** usprkos uvažavanja razloga da se njeguje hrvatski jezik i iznađu adekvatni i u praksi i u teoriji prihvaćeni nazivi. [5]



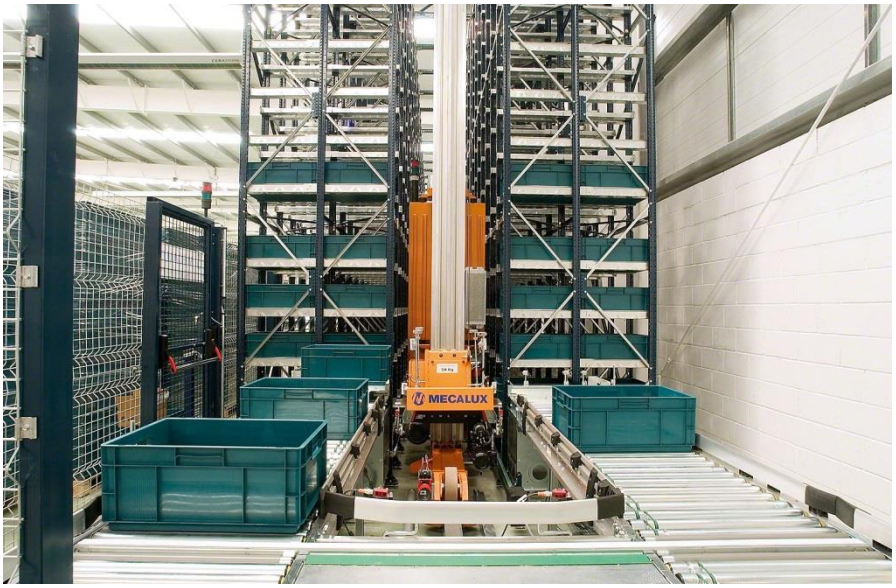
Slika 4. Jedinični teret

2.1.1. Unit-load AS/RS

Jedinični tereti su u ovom slučaju najčešće palete ili sanduci paletnih dimenzija težine od 250 kg na više. Skladišna sredstva u ovom sustavu su najčešće visoki paletni regali. Dok su paletni regali u neautomatiziranim skladištima kojeg poslužuju viličari visoki od 6 do najviše 12 metara, u *unit-load* AS/RS-u raspon visina regala se kreće od 10 do čak 50 metara jer dizalice mogu rukovati materijalima na većim visinama. U praksi se najčešće izvode visine od 20 do 30 metara. Nekim velikim teretima može se također rukovati i bez sredstava za oblikovanje jediničnog tereta, npr. kolutovi limova, papira, kablova…

2.1.2. Mini-load AS/RS

Mini-load AS/RS, ili automatizirani skladišni sustav za male dijelove, je tip automatiziranog sustava za odlaganje i izuzimanje tereta koji su obično u malim spremnicima ili sanducima (eng. *bin*), s ukupnom težinom između 50 i 250 kg (rijetko do 500 kg). Ukoliko se radi o vrlo malim spremnicima s ukupnom težinom manjom od 50 kg, neki autori koriste naziv *micro-load* AS/RS. No kako nema druge bitne razlike između njih, često se koristi samo naziv *mini-load* AS/RS. Na slici 5 prikazan je jedan *mini-load* AS/RS sustav, iz kojeg je vidljivo da se ponovno radi o sustavu s dizalicom unutar prolaza koja se kreće između dva regala i izuzima ili odlaže spremnike. No ovaj puta se radi o regalima dimenzioniranim za spremnike manjih dimenzija, te su i izvedbe puno manjih visina (3-15 m) i duljina (12-60 m). [5]

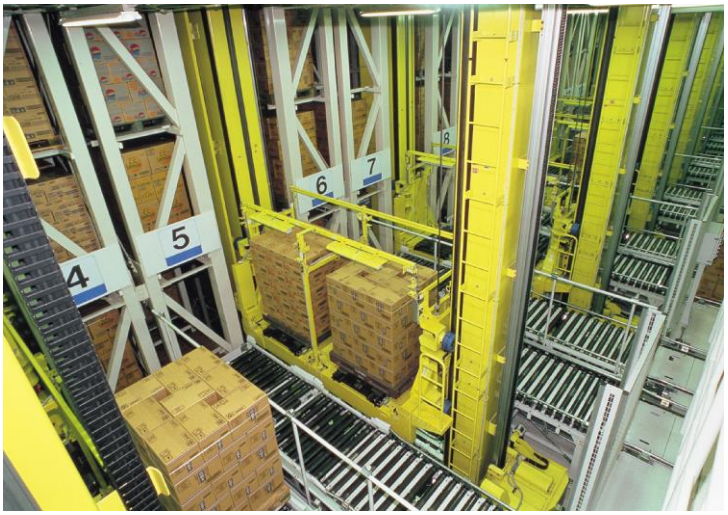


Slika 5. *Mini-load* AS/RS [8]

2.1.3. Varijacije osnovne izvedbe

Zbog različitih potreba koje ovakvi sustavi moraju zadovoljiti, a s ciljem optimizacije (minimizacije troškova putem minimizacije broja potrebnih dizalica, minimizacije površine ili prostora, maksimizacije protoka), postoje i razne varijacije osnovne izvedbe.Varijacije koje se mogu pojaviti u izvedbama odnose se na izvedbe regala, izvedbe dizalica, drugačije lokacije pretovarnih mjesta. [5]

Ako je potrebno povećati protok i iskorištenost dizalica mogu se upotrijebiti dizalice koje transportiraju dva ili čak tri tereta istovremeno. Takve dizalice imaju dvije odnosno tri platforme i u literaturi se nazivaju kao *dual-shuttle cranes* odnosno *triple-shuttle cranes*. Također neki izvori ih označavaju kao *multi-shuttle cranes*. To omogućuje da primjerice prvo izuzmu jedan teret nakon čega uskladište drugi na isto mjesto, a da u međuvremenu ne moraju ići do I/O mjesta [7]. Primjer dizalice s dvije platforme za rukovanje paletama je prikazan na slici 6.



Slika 6. *Dual-shuttle* dizalica [10]

Nadalje, dizalica može prevoziti jedan teret istovremeno po širini prolaza, čime je širina prolaza samo nešto malo veća od širine tereta te se takvi prolazi nazivaju prolazi jednostruke širine (eng. *single wide aisle*). Moguće su i izvedbe sa dizalicama koje prevoze dva tereta po širini prolaza, dakle unutar prolaza dvostruke širine (eng. *double wide aisle*). [5]

Također automatizirana skladišta se mogu kombinirati i s različtim izvedbama skladišnih regala. Paletni i polični regali mogu biti višestrukih dubina[4], a najčešće su dvostruke dubine[5]. Ako su paletni regali višestrukih dubina, za dohvaćanje tereta se koriste takozvana satelitska vozila ili regalna vozila (eng. *shuttles*) koja voze unutar regalnog kanala (detaljniji opis u poglavlju 3.2.1). Ovakvi *unit-load* AS/RS sustavi višestruke dubine se nazivaju *multi-deep* AS/RS ili *deep-lane* AS/RS. Osim toga moguće je izvesti *unti-load* AS/RS s protočnim regalima u gravitacijskoj ili pogonskoj izvedbi.

Ovi sustavi pogodni su u situacijama kada je potrebno skladištiti velike količine robe, a pritom je broj različite robe relativno mali. Drugim riječima velike količine istovrsne robe, manjeg asortimana, skladište se u regale višestruke dubine skladištenja [5].

2.1.4. Komisioniranje pomoću AS/RS-a

U slučaju koimisioniranja, za potrebe neke narudžbe, nije potrebno izuzeti cijeli jedinični teret već samo njegov dio. Izuzimanje pojedinog komada s jediničnog tereta uvijek čini čovjek stoga postoje dvije mogućnosti. Komisioniranje po principu čovjek robi[6], gdje čovjek

[4] eng. multi-deep rack
[5] eng. double-deep rack
[6] eng. picker to part

(komisioner) putuje do skladišne lokacije i izuzima komade s jediničnog tereta i po principu roba čovjeku[7] gdje se cijeli jedinični teret izuzima iz skladišne lokacije i transportira do komisionera. Mjesto komisioniranja se naziva komisijska stanica (eng. *pick station*), a više komisijskih stanica čini komisijsku zonu.

Komisioniranje po principu čovjek robi se ostvaruje čovjekom na dizalici gdje čovjek s dizalicom putuje do skladišnih lokacija. Ovi sustavi su rijetki i koriste se uglavnom za paletne terete. Puno češća opcija je po principu roba čovjeku gdje se komisijske stanice nalaze na kraju prolaza pa se takvi sustavi nazivaju *end-of-aisle system* [7]. Funkcioniraju na način da dizalice transportiraju jedinične terete na kraj reda gdje oni putem konvejera dolaze do komisione zone pri čemu komisionar izuzima potrebne predmete iz jediničnog tereta, nakon čega se preostali jedinični teret vraća na skladišnu lokaciju. Ovaj sustav se koristi za manje spremnike i zbog toga se *mini-load* AS/RS najčešće koristi za potrebe komisioniranja.

Zbog procesa komisioniranja ovdje mogu postojati varijacije izvedbi koje se razlikuju po broju komisionera, komisijsih zona, njihovom položaju i sl...

2.2. Karuseli i VLM

Druga grupa izvedbi automatizranih skladišnih sustava, nakon sustava s dizalicama, su sustavi automatiziranih okretnih regala i vertikalnih podiznih modula. S obzirom da su to sustavi u kojima se ili skladišna lokacija s materijalom ili uskladišteni spremnik s materijalom dovodi do mjesta uskladištenja i iskladištenja, u literaturi ih neki također nazivaju dinamički sustavi skladištenja, eng. *dynamic storage systems* i to su horizontalni okretni regali, vertikalni okretni regali i vertikalni pozidni moduli [5].

2.2.1. Horizontalni karuseli

Horizontalni karusel (eng. *horizontal carousel*) ili horizontalni okretni regal sastoji se od fiksnog broja skladišnih odjeljaka ili nosača (eng. *bin* ili *carrier*), mehanički povezanih s pogonskim mehanizmom u zatvorenoj petlji. Svaka kolona dodatno je podijeljena na fiksni broj skladišnih lokacija – polica. Odlaganje i izuzimanje je ručno ili automatsko [5]. Okretanje karusela je u većini slučajeva danas automatizirano, te se zbog toga svrstavaju u automatizirane skladišne sustave. Shematski prikaz jednog horizontalnog karusela je na slici 7.

[7] eng. part to picker



Slika 7. Horizontalni karusel [11]

Horizontalni karuseli postali su jedan od najpopularnijih uređaja za skladištenje i izuzimanje, posebno u distribucijskim okruženjima. Od njihova nastanka početkom 1960-ih do danas hardver je ostao relativno nepromijenjen, izuzev manjih poboljšanja i nadogradnji, međutim primjene i upravljanje veoma su se promijenili. Prvi industrijski horizontalni karusel razvio se od konfekcijskih konvejera kakvi se danas najčešće pronalaze u kemijskim čistionama. Međutim, usprkos njihovoj mehaničkoj jednostavnosti i povijesti, nisu smatrani glavnim faktorom na polju automatiziranih sustava do sredine 1980-ih. Danas ih se može naći sve više i više u primjeni, kako u skladištenju i distribuciji roba, tako i u proizvodnji i montaži. Razlozi leže u brojnim koristima koje imaju u odnosu na najčešću alternativu za skladištenje i komisioniranje manjih pojedinačnih dijelova – polične regale [12]. Horizontalni karuseli su tipičan predstavnik sustava komisioniranja po principu „roba čovjeku“, odnosno čovjek obavlja operacije na jednom mjestu zbog pomicanja skladišnih lokacija.

Glavna prednost je ušteda vremena jer se okretanjem regala izbjegava vremenski zahtjevno i neučinkovito hodanje komisionera po skladištu, već se roba dovodi do njega. Pogonski sustav rotira karusel lijevo ili desno da bi operateru doveo traženi materijal za izuzimanje. Uklanjanje potrebe za hodanjem znači veću produktivnost i potencijalno smanjenje sati rada. Činjenica da karusel ima pristup na jednom kraju, a ne uzduž cijele strane regala kao kod poličnih regala, čini slijedeću skupinu prednosti, a to je ušteda prostora. Nekoliko karusela može biti poslagano jedan uz drugi, čime se uklanjaju prolazi i štedi na podnom prostoru (u izvedbi s poličnim regalima neophodni su prolazi između regala). Visoki karuseli – 3 ili 3,5 metra – mogu biti korišteni s podiznim stolovima ili vertikalnom automatskom dizalicom. Dodatno, moguće je horizontalni karusel postaviti jedan na drugi, te koristiti podest za operatera ili automatsku dizalicu, čime se dobiva još veća iskoristivost prostora. Dodatno

sustav je moguće povezati s nadređenim računalnim sustavom upravljanja skladištem (eng. *Warehouse Management System, WMS*) putem kojega se okretni regal automatski zakreće bez potrebe da operater zatraži lokaciju. [12]

Horizontalni karuseli često su korišteni kao skladišta velike gustoće u okruženjima sa niskim stropom gdje je korisniku bitna ušteda podnog prostora. Primjena horizontalnih okretnih regala danas je najčešća u skladištenju i distribuciji robe, ali i u proizvodnji i montaži. Možemo ih naći kao instalirane samostalne uređaje ili radne stanice od više horizontalnih okretnih regala. Radna ćelija je integrirani radni centar od dva, tri ili četiri povezana karusela pod kontrolom jednog računala, koji ostvaruje više razine protoka [5]. Na slici 8 je prikazana jedna takva stanica.

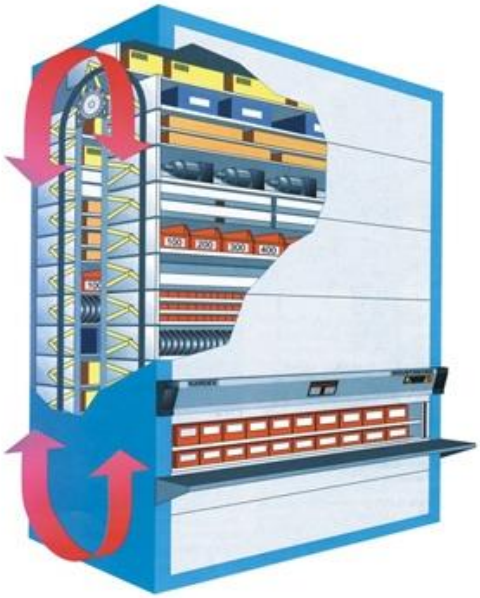


Slika 8. Radna stanica karusela [13]

Princip rada ovog sustava je zapravo jednostavan. Dok operater izuzima materijal iz jednog regala, drugi se zakreću upravljani računalom. Na ovaj način dolazi do eliminacije vremena čekanja operatera na zakretanje, koje postoji kod samostalnog horizontalnog karusela. Ovakvi sustavi koriste se tamo gdje postoji potreba za komisioniranje velikog broja narudžbi, pa je bitna ušteda vremena [12].

2.2.2. Vertikalni karuseli

Vertikalni karusel (eng. vertical carousel) ili vertikalni okretni regal sastoji se od fiksnog broja polica koje u zatvorenoj petlji rotiraju u vertiklanoj ravnini. Moguće je također automatsko odlaganje i izuzimanje, no rjeđe nego kod horizontalnih karusela. Dakle i ovdje govorimo o automatizaciji dovođenja lokacije do radnog mjesta (čovjeka), dok je stvarno uskladištenje i iskladištenje (komisioniranje) robe ručno od strane operatera [5]. Na slici 9 prikazan je jedan vertikalni karusel.



Slika 9. Vertikalni karusel [14]

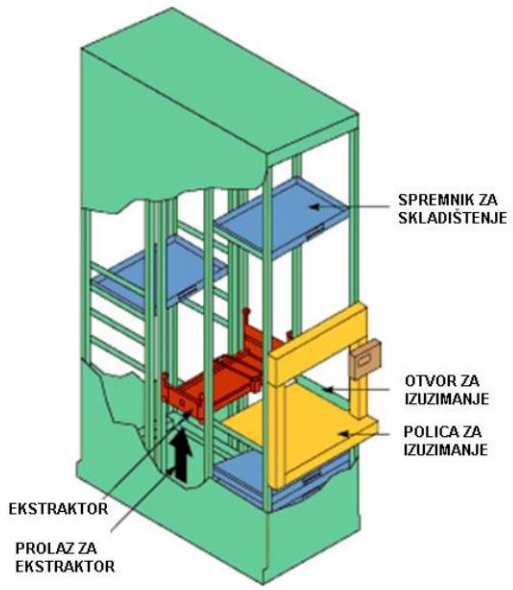
Vertikalni karuseli uvedeni su u ranim 1950-ima primarno kao sredstvo za skladištenje rolane robe, primjerice tepiha. Kada su proizvođači u njima prepoznali priliku za pohranjivanje robe, dijelova i zaliha, vertikalni karuseli postali su popularni zbog mogućnosti skladištenja dijelova prilično velikog volumena na relativno malenoj površini. Artikli se dovode operateru koji ne mora hodati da bi ih izuzimao kao kod uobičajenih statičnih poličnih regala. Danas su vertikalni karuseli znatno fleksibilniji te sposobni nositi se s velikim i teškim artiklima kao i s malim, laganim dijelovima. U 1990-ima razvoj softvera je omogućio vertikalnim karuselima značajnu primjenu u procesima komisioniranja visokim protocima. U sustavima za izuzimanje po narudžbi, više vertikalnih karusela je povezano zajedno sa softverom za procesuiranje narudžbi. [15]

Mnogi sustavi instalirani su kao odgovor na problem prostora u skladištima, te se može reći da je ušteda prostora glavna prednost primjene ovih sustava. Vertikalni karuseli su u početku uvođeni radi smanjenja skladišnog prostora potrebnog za skladištenje robe u statičnim klasičnim poličnim sustavima. Čak i sa ograničenom raspoloživom visinom stropa vertikalni karuseli mogu iskoristiti inače neupotrebljiv prostor. Nadalje, stavke se dovode direktno do operatera što rezultira znatnim skraćenjem vremena traženja koje mu je ranije bilo potrebno. Velik broj investicija u sustave vertikalnih karusela opravdan je već samim smanjenjem vremena izuzimanja [15]. Svaki vertikalni karusel može biti opskrbljivan kao potpuno zatvoren, šesterostrani ormar koji je čist i omogućava izuzetnu sigurnost za vrijedan sadržaj. Moguće je da vertikalni karuseli imaju više od jednog pristupnog prozora odnosno otvora za

odlaganje i izuzimanje. U nekim slučajevima, korisno je imati visoki uređaj koji povezuje više katova, kao primjerice u objektima gdje se poslužuju mnogobrojni odjeli. Karuseli također mogu imati pristup i sprijeda i straga te je moguće automatizirati odlaganje i izuzimanje u jedan ili više regala.

2.2.3. Vertikalni podizni modul

Vertikalni podizni moduli (eng. *vertical lift module, VLM*), ili vertikalni lift uređaji kako ih se negdje naziva, su skladišni sustavi koji se sastoje od dvije paralelene kolone s fiksnim policama, u kojima su uskladišteni spremnici (kutije ili ladice). Odlaganje i izuzimanje spremnika obavlja automatski uređaj – ekstraktor (eng. *shuttle* ili *extractor*), koji se elevatorom kreće vertikalno između kolona s policama. Spremnik se dostavlja do otvora (prozora) za izuzimanje (eng. *pick window*) odnosno stavlja na policu za izuzimanje [5]. Na slici 10 ilustriran je jedan VLM.



Slika 10. Shema vertikalnog podiznog modula [5]

Vertikalni podizni moduli (VLM-i) uvedeni su 1970-ih kao skladišne i industrijske aplikacije. Ranije verzije bile su prilično spore, namjenjene za lakše terete i limitiranih mogućnosti. Kako su se mogućnosti primjene širile, tako su rasli i zahtjevi za novu generaciju VLM-a koja je osigurala znatno veće težinske kapacitete, inteligentna korisnička sučelja i povećanu radnu brzinu. [16]

Osnovne prednosti VLM-a su velika ušteda prostora (ovisno o raspoloživoj visini stropa VLM može ostvariti prostorne uštede od 50% do 80% u odnosu na klasične polične regale),

ergonomičnost, povećana brzina izuzimanja i sigurnost skladištenja. Zapravo prednosti primjene su vrlo slične kao kod vertikalnih karusela. Razlika je u principu rada – vertikalni karuseli se zakreću dok se kod VLM-ova spremnici dovoze sa fiksnih skladišnih lokacija. No razlika je i u tome da su kod karusela dimenzije svake police jednake, dok je kod VLM-ova moguća varijabilnost prilagođena dimenzijama robe, te vrlo mali razmak između lokacija (razmak među spremnicima može biti najmanje 25 mm). Time se dodatno povećava gustoća skladištenja, odnosno iskoristivost prostora. Objekti koji nemaju posebno visok strop mogu iskoristiti sposobnost VLM-a da povezuje katove (maksimalna visina VLM-a može biti i do 24 m prema nekim proizvođačima opreme). Pa tako onda možemo u primjeni naći VLM-ove sa više otvora. [16]

Obično prozor za izuzimanje ima samo jedno mjesto (policu) za dostavljanje spremnika. Međutim, postoje također izvedbe sa dva mjesta, tzv. eng. *dual-tray VLM* ili *dual delivery configuration VLM* kao što ilustrira slika 11.



Slika 11. *Dual-tray* VLM [5]

Takvi sustavi sposobni su ostvarivati veće protoke, zbog toga jer lift uređaja obavlja ciklus dovođenja slijedećeg spremnika dok komisiner izuzima robu iz prethodno dostavljenog spremnika (princip rada kao kod *mini-load* AS/RS sustava). Time se značajno smanjuje vrijeme čekanja na dovođenje spremnika. [5]

3. SBS/RS

SBS/RS (eng. *Shuttle-based storage and retrieval system*) je relativno novi sustav koji svoju primjenu nalazi u brojnim skladištima uglavnom u Europi dok je AS/RS u upotrebi još od 1950-ih [17]. Ovaj automatizirani skladišni sustav s regalnim vozilima predstavlja posebnu vrstu *mini-load* AS/RS-a gdje se koriste regalna vozila za uskladištenje i izuzimanje tereta koji su u malim spremnicima (kutije i sl.) u sustavu regala. Ključne razlike između AS/RS-a i SBS/RS-a su u načinu kretanja tereta. Za razliku od dizalica koje istovremeno vrše vertikalni i horizontalni transport, on je u SBS/RS-u podijeljen na dva S/R vozila. Kod SBS/RS-a tereti se transportiraju takozvanim regalnim vozilima (eng. *shuttles*) koja se horizontalno gibaju po tračnicama/šinama uzduž prolaza između sustava pravokutnih regala, dok vertikalno gibanje osiguravaju dizala koja se nalaze uglavnom na krajevima regala [18]. Primjerice u *aisle capitve* AS/RS-u teret se istovremeno kreće horizontalno i vertikalno (Čebiševljeve putanje) dok SBS/RS koristi sekvencijalno kretanje u vertikalnom i horizontalnom smjeru rezultirajući u dužem očekivanom vremenu vožnje [19]. Međutim, duže očekivano vrijeme vožnje za jedan spremnik ne znači i manji protok[8] sustava, upravo suprotno. Iako jedna dizalica ima efikasniju putanju gibanja, samo jedna se nalazi u prolazu, dok ovdje postoji veći broj vozila koja istovremeno mogu izvršavati operacije skladištenja i izuzimanja.

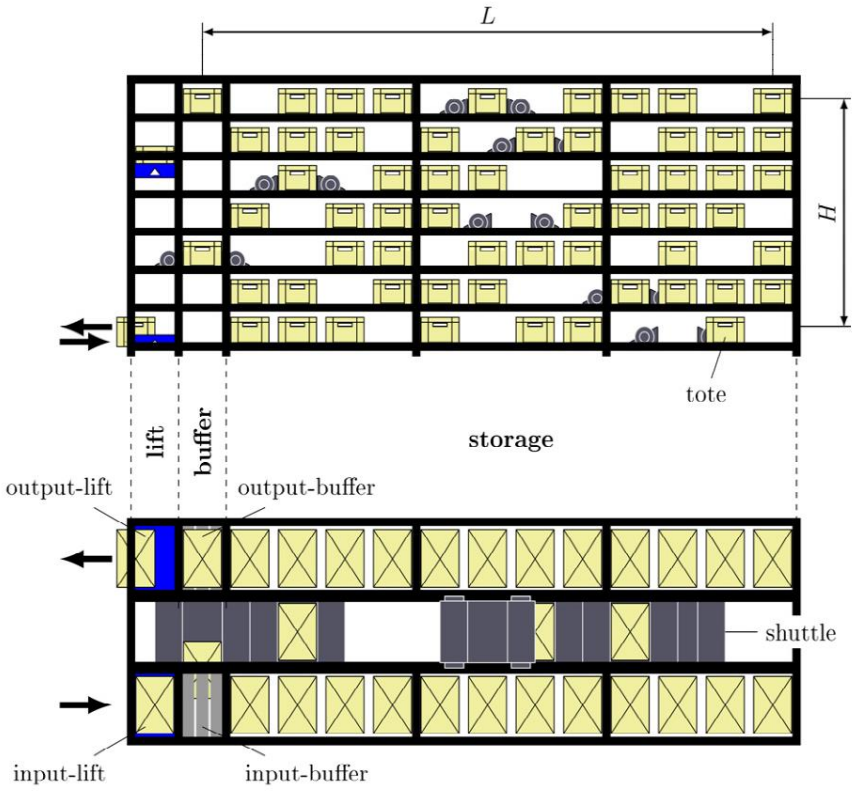
Sustav je spojen s drugim skladišnim procesima preko pretovarnih stanica pomoću kojih tereti izlaze i ulaze u sustav. Kako se SBS/RS često koristi u sustavima komisioniranja po principu roba čovjeku koristi se sustav konvejera za transport tereta do komisijskih stanica. U njima komisionar izuzima određeni broj komada iz spremnika nakon čega konvejeri transportiraju spremnike koji nisu ostali prazni nazad u SBS/RS, a prazne spremnike šalje na drugo mjesto [20].

3.1. Klasifikacija SBS/RS-a

Automatski skladišni sustavi koji koriste regalna vozila se u literaturi klasificiraju s obzirom na njihov stupanj slobode gibanja. Postoje sustavi s vozilima koja mogu promijeniti razinu (eng. *tier-to-tier*) tj. obaviti vertikalni transport pomoću dizala kao i sustavi gdje vozila ne mogu promijeniti razinu (eng. *tier-captive*), što znači da vertikalni transport vrši dizalo. Slično ovome postoji razlika u mogućnosti promjene prolaza između regala, dakle na sustave s

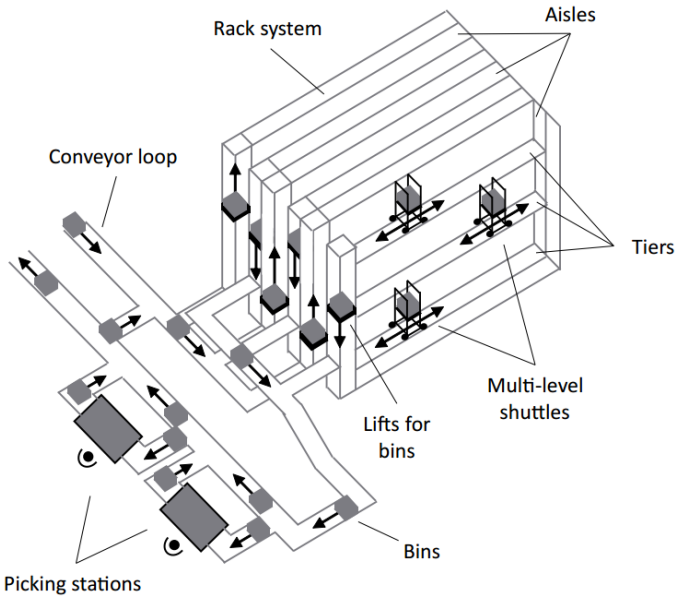
[8] Protok skladišne zone se može definirati kao broj uskladištenih i/ili izuzetih jediničnih tereta u jedinici vremena (najčešće sat vremena).

vozilima koja mogu promijeniti prolaz (eng. *aisle-to-aisle*) i na one koji ne mogu promijenti prolaz (eng. *aisle-captive*) [20]. Shema *tier-captive* izvedbe je prikazana na slici 12 gdje je teret označen kao eng. *tote*, a međuspremnici (eng. *buffer*), na koje vozila i dizala (eng. *lift*) uzimaju i odlažu terete.



Slika 12. *Tier-captive* SBS/RS [21]

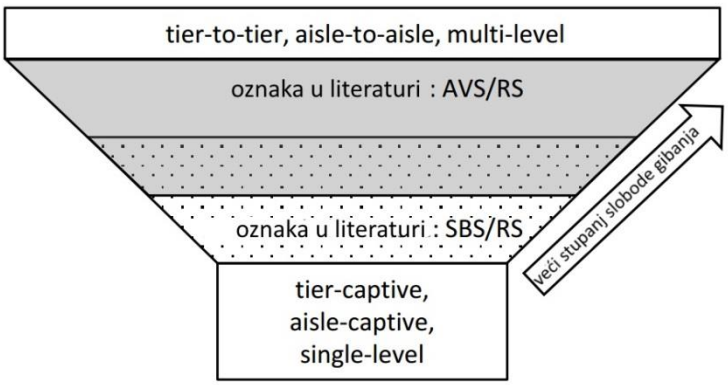
Postoji i dodatna podjela s obzirom na broj razina koje jedno vozilo može posluživati, pa tako postoje vozila koja mogu poslužiti više od jedne razine (eng. *multi-level shuttles*) i na vozila koja poslužuju samo jednu razinu regala (eng. *single-level shuttles*) [20]. Shema multi-level izvedbe je na slici 13 gdje su tereti označeni kao eng. *bin*, sa vozilima koja poslužuju više razina (eng. *tiers*).



Slika 13. *Multi-level* SBS/RS [20]

3.1.1. AVS/RS

U literaturi sustavi s većim stupnjem slobode gibanja regalnih vozila se nazivaju AVS/RS (eng. *Autonomous vehicle storage and retrieval systems*), dok oni s manjim stupnjem slobode gibanja se označavaju kao SBS/RS (kako je prikazano na slici 14). Jednako tako sustavi s autonomnim vozilima (AVS/RS) se više koristi sa sustave s većim jediničnim teretima dok SBS/RS sa sustave s manjim teretima [20]. Međutim oba imena se često koriste kako bi se opisao isti sustav tako da možemo reći da su u neku ruku sinonimi ili da je SBS/RS podvrsta AVS/RS-a kako se navodi u nekim izvorima. U nastavku će se koristiti oba imena prema upravo navedenoj podjeli.



Slika 14. Razlika između SBS/RS i AVS/RS [20]

3.2. Struktura i komponente SBS/RS-a

Sustav za transport tereta se sastoji od slijedećih elemenata: sustav tračnica po kojima se kreću regalna vozila, stup dizala na kojima može biti jedna platforma ili dvije platforme za vertikalni transport, regalna vozila, neka izvedba aktivnih konvejera koji spajaju SBS/RS s ostalim dijelovima skladišta i koji unutar sustava služe kao međuspremnici. Sustav regala je određen brojem i lokacijom razina, prolaza te brojem, dimenzijama i kapacitetom skladišnih lokacija. Regal je više manje identičan onome iz AS/RS-a za male terete (polični regal) uz dodatak tračnica između prolaza na svakoj razini. Regali imaju maksimalnu visinu od dvadesetak metara. Jedinični tereti su kutije, spremnici ili ladice [22]. Regali mogu biti jednostruke, dvostruke ili višestruke dubine čime se štedi prostor i povećava kapacitet. Veličina jediničnih tereta i kapacitet skladišne lokacije određuju njezinu dimenziju. Kada je definiran broj i veličina skladišnih lokacija i maksimalna površina i visina sustava, projektant može odrediti moguće kombinacije broja i lokacije razina i prolaza kao i dužinu prolaza. Ako vozila mogu promijeniti prolaz to mogu učiniti poprečnim prolazima na kraju regala ili kroz regal. Kako ti prolazi utječu na vrijeme vožnje vozila, važno je odrediti njihov broj i lokaciju.

Nadalje u *aisle-captive* sustavu mora biti jedno dizalo po prolazu kako bi transportiralo teret u i iz toga prolaza. Ovisno o željenom protoku može biti više dizala po prolazu. Ako je to slučaj vrlo često je jedno dizalo zaduženo za naloge skladištenja, a drugo za naloge izuzimanja. Pozicija tih dizala ovisi o pridruženim sustavima konvejera koji dopremaju i odvoze teret. Najčešće se dizala nalaze na početku prolaza jer se sustav konvejera nalazi samo s jedne strane SBS/RS-a. U *aisle-to-aisle* sustavima broj i lokacija dizala može varirati jer regalna vozila jedne razine mogu doći na svaku lokaciju te razine. Zbog toga je važno odrediti broj i lokaciju dizala kako bi se postigao željeni protok uz zadovoljavajuću iskorištenost dizala. Također i dimenzije dizala variraju ovisno o tome transportira li dizalo samo teret ili transportira regalno vozilo na kojemu se nalazi teret. [23]

U *tier-captive* sustavima, međuspremnici se nalaze na svakoj razini kako bi se ostvarila neovisnost između dizala i vozila. To znači da u slučaju uskladištenja dizalo ne mora čekati vozilo kako bi prebacilo teret na njega već odmah odlaže teret na međuspremnik (izveden kao konvejer), a vozilo ga preuzima kada dođe. Isto je i za proces izuzimanja gdje vozilo odlaže teret na međuspremnik kako ne bi moralo čekati dizalo (lift) na preuzimanje [24]. Dakle međuspremnici se nalaze između dizala i vozila. Važno je ispravno dimenzionirati međuspremnik kako bi se smanjila vjerojatnost blokiranja tj. čekanja na preuzimanje. Na

prvoj razini tj. na podnoj razini se nalaze pretovarne stanice koje spajaju SBS/RS sa sustavom konvejera te prebacuju ulazne terete s konvejera na dizalo, a izlazne terete s dizala na konvejer. Dakle broj i lokacija pretovarnih stanica ovisi o broju i lokaciji dizala.

Kao što je spomenuto SBS/RS je spojen sustavom konvejera s ostalim skladišnim procesima. To su najčešće valjčane ili trakaste izvedbe konvejera. Ako nema konvejera koriste se automatski vođena vozila (eng. *AGV*) ili viličari. [20]

3.2.1. Regalna vozila

Regalna vozila su u principu slična automatski vođenim vozilima, što znači da su to platformska vozila koja se samostalno kreću unutar regala (u prolazima između regala i regalnim kanalima) noseći teret i samostalno obavljaju pretovar. Postoji više vrsta regalnih vozila koja se klasificiraju prema stupnju slobode gibanja. U većini primjena, vozila imaju sposobnost gibanja u samo jednom smjeru i to duž tračnica jednog prolaza, takozvana *aisle-captive* vozila. Ako se mogu gibati u dva smjera pomoću poprečnih prolaza onda ih nazivamo *aisle-to-aisle* vozilima. Gibanje u dva smjera se može ostvariti rotirajućim kotačima na regalnom vozilu ili se može koristiti okretni stol na križanju prolaza i poprečnog prolaza. Dodatni stupanj slobode gibanja je mogućnost promjene razine koristeći dizalo, što rezultira već spomenutom razlikom između *tier-captive* i *tier-to-tier* vozila. U *tier-captive* izvedbi mora postojati barem jedno vozilo u svakoj razini, a ako su pri tome i *aisle captive* jedno vozilo je potrebno i u svakom prolazu jedne razine. Zadnji slučaj uzrokuje kraća vremena vožnje i posljedično veći protok. U *tier-to-tier* izvedbama broj vozila se može promijeniti ovisno o trenutnim potrebama što ovu izvedbu čini fleksibilnijom u odnosu na *tier-captive* izvedbu [18]. Uz to niža su početna investicijska ulaganja jer se sustav može opremiti s manjim brojem vozila ako se ne zahtijeva veliki protok, a s vremenom se može opremiti dodatnim vozilima kako raste potreba za većim protokom.

Dijelovi regalnog vozila su pogonski dio, baterije, uređaji za komunikaciju, platforma koja čini površinu za nošenje tereta i uređaji za rukovanje teretom s kojima se odlaže i izuzima teret s platforme. Uređaji za rukovanje teretom (eng. *load handling devices*) mogu biti različite izvedbe prihvatnica/hvataljki spremnika ili trakasti konvejeri. Oni mogu biti konstruirani tako da omogućavaju rukovanje tereta različitih veličina u isti regal, što pojednostavljuje logističke procese jer se primjerice gubi potreba za prepakiravanjem. Najčešća izvedba je teleskopska hvataljka ili teleskopski konvejer. Razvoj ovih tehnologija je uzrokovao vozilima čije prihvatnice mogu dohvatiti spremnike s više od jedne razine bez

promjene razine samog vozila. Takva vozila se nazivaju višerazinskim (eng. *multi-level shuttles*) dok vozila koja mogu dohvatiti teret samo s jedne razine nazivamo jednorazinskim (eng. *single-level shuttles*) [20]. Način kretanja *multi-level* vozila je u principu isti kao i kod dizalica u klasičnim AS/RS sustavima jer se prihvatnica može dizati i spuštati za vrijeme horizontalne vožnje. Primjer *single-level* regalnog vozila s teleskopskom hvataljkom je na slici 15 dok slika 16 prikazuje izvedbu *multi-level* vozila.



Slika 15. Single-level vozilo [25]



Slika 16. Multi-level vozilo [26]

Energetska opskrba vozila se vrši pomoću baterija ili električnih vodova koji su ugrađeni duž tračnica, dakle u svakoj razini regala. Koja izvedba će se koristiti ponajviše ovisi o vrsti tereta (težini). Tako se pri skladištenju paleta, zbog veće energetske potrošnje, koriste regalna vozila koja se uglavnom napajaju pomoću vodova koji su instalirani kroz prolaze, dok se za skladištenje malih spremnika do 50 kg koristi energija iz baterija. Punjenje baterija se obavlja na stanicama za punjenje koje je potrebno pravilno pozicionirati kako bi se omogućio nesmetan rad. Komunikacijska veza, tj. upravljački i informacijski signali, se ostvaruje bežičnim putem, dakle pomoću WLAN-a ili Bluetootha.

3.2.1.1 Kompaktni skladišni sustavi

Sustavi s regalnim vozilima se uglavnom koriste za rukovanje s malim spremnicima međutim postoje izvedbe za skladištenje paleta. Kako tereti odloženi na palete mogu težiti do 1500 kg, očito je da teleskopske hvataljke, konvejeri i ostali uređaji za rukovanje teretom neće biti dovoljni. Za takve situacije se koriste regalna vozila koja nemaju uređaje za rukovanje teretom već koriste podiznu platformu samog vozila. Naime, takvo vozilo se cijelo podvuče pod paletu te se izdigne. Izdizanjem se podiže i paleta nakon čega može nastupiti transport. Prikaz opisanog vozila je na slici 17.



Slika 17. Platformsko regalno vozilo [27]

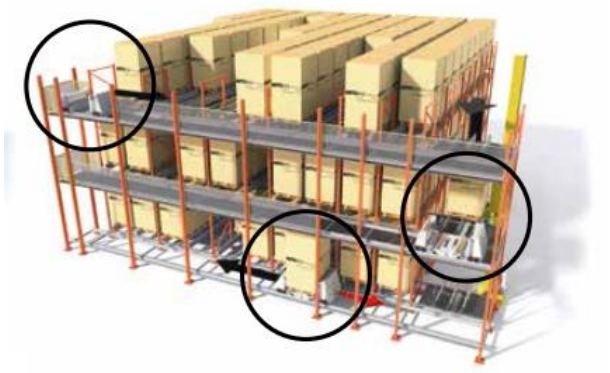
Oni se koriste u prolaznim regalima (eng. *drive-in, drive-through rack*) kao automatizirana alternativa tradicionalnih prolaznih regala s viličarima. Općenito, kompaktni skladišni sustavi su popularni za skladištenje proizvoda s relativno malom potražnjom te ih karakterizira visoka iskorištenost prostora. Oni eliminiraju potrebu za više prolaza što dovodi do male, a time i jeftinije konstrukcije. Nalazimo ih u hlađenim skladištima gdje je osobito važno smanjiti prostor za hlađenje ili u distribucijskim skladištima povezanim s proizvodnjom. Stoga oni predstavljaju zanimljivu alternativu tradicionalnim prolaznim regalima. Razvijeno je više vrsta kompaktnih skladišnih sustava sa različitim uređajima i vozilima za rukovanje teretom. Postoje kompaktni sustavi s dizalicama temeljeni na konvejerima, kompaktni sustavi s dizalicama i regalnim vozilima te samo s regalnim vozilima i dizalima. Dizalica vrši simultano vertikalno i horizontalno gibanje kroz poprečne prolaze dok sustav konvejera pomiče terete iz dubine regala. U drugoj vrsti regalna vozila s podiznom platformom (sateliti kako ih u ovoj primjeni nazivaju neki proizvođači) umjesto konvejera nose terete iz dubine regala. Ta vozila se gibaju ispod paleta duž dubine regala. Ako sustav ima manje vozila od regalnih kanala, dizalica se pomiče od jednog do drugog kanala premještajući vozilo. Ako nema dizalica već se koriste samo regalna vozila (eng. *live-cube compact storage system*),

onda ona izlaze iz regalnih kanala u prolaze dakle kreću se u *x* i *y* smjeru na svakoj razini. Vertikalni transport vrši dizalo. Ovaj sustav pruža visoku gustoću skladištenja. [28]

Ako se vozilo kreće samostalno u prolazu, tj. ima mogućnost promjene pravca kretanja, ono je otprilike duplo skuplje od onoga koje to ne može. Stoga postoje takozvana matična vozila ili transferna vozila, (eng. *Transfer Car*), koja primaju na sebe obično regalno vozilo s teretom te ih transportira kroz prolaz. Transferno vozilo ima ulogu dizalice međutim operira u samo jednoj razini stoga ili ono mijenja razinu pomoću dizala ili u svakoj razini postoji jedno transferno vozilo [28] (prikaz istoga na slici 18). Ilustracija opisanoga kompaktnoga skladišnog sustava je prikazana na slici 19.



Slika 18. Transferno vozilo [27]



Slika 19. Kompaktni skladišni sustav [27]

3.2.1.2 Tehničke karakteristike

Nosivost regalnih vozila s podiznom platformom koja rukuju paletama iznosi do 1500 kg (eventualno do 2000 kg), a brzina im je uglavnom oko 1 m/s. Nosivost *single-level* vozila je uglavnom do 50 kg ili duplo toliko u slučaju većeg kapaciteta vozila, dok se brzine najčešće kreću od 1,5 do 2,5 m/s iako ima izvebi i do 4 m/s, s akceleracijom od 1 m/s^2 do 3 m/s^2.

Multi-level izvedbe imaju nešto veću nosivost, uglavnom u iznosu od preko 100 kg, a iznosi brzine se kreću od 2,5 do 3 m/s. Navedene vrijednosti se temelje na informacijama nekoliko proizvođača takve opreme poput Schafera, Gebhardta i Automhe.

3.2.2. Dizalo

Transport spremnika u vertikalnom smjeru obavlja dizalo. Sažeto rečeno dizalo se sastoji od osovine dizala i podizne platforme koje je ovješena na osovinu. Ako postoji samo jedna podizna platforma govorimo o jednom dizalu, ako postoje dvije podizne platforme na istoj osovini koje se dižu i spuštaju neovisno jedna o drugoj tada govorimo o dva dizala (iako literatura takav slučaj zna navoditi kao jedno dizalo s dvije podizne platforme) [22]. Platforma dizala ima neku izvedbu konvejera koja transportira spremnike u slučaju *tier-captive* vozila. U *tier-to-tier* izvedbi, platforma ima tračnice ili konvejer kako bi regalno vozilo moglo naići na nju. Stoga kapacitet dizala ovisi o broju platformi i kapacitetu same platforme odnosno regalnog vozila kojeg prevozi. Dodatno, umjesto dizala se mogu primjeniti vertikalni karuseli [20].

3.3. Metode upravljanja

Uz samu fizičku izvedbu sustava primjenjene metode upravljanja (eng. *control policies*) imaju veliki utjecaj na ponašanje, a time i performanse AS/RS-a. Metode upravljanja AS/RS-a su metode odlaganja, metode parkirnih lokacija, sekvenciranje i metode grupiranja narudžbi [7]. Ove metode određuju fukncioniranje, tj. način izvođenja operacija AS/RS sustava. Kako je SBS/RS posebna vrsta AS/RS-a na njih se mogu primijeniti slične metode. Pošto se metode grupiranja narudžbi mogu primijeniti samo kod komisioniranja u *person-on-board* AS/RS sustavima ili u neautomatiziranim sustavima ona nije primjenjiva na SBS/RS stoga neće biti razmatrana. Međutim, zbog višestrukih S/R vozila i paralelnog načina njihova kretanja te više mogućih puteva do skladišne lokacije potrebno je razviti metode dodijeljivanja naloga S/R vozilima i metode usmjeravanja tih vozila [20]. Stoga su metode upravljanja koje će se razmotriti za SBS/RS slijedeće: metode odlaganja, sekvenciranje, dodijeljivanje naloga, metode usmjeravanja vozila i metode parkirnih lokacija.

3.3.1. Metode odlaganja

Metode odlaganja (eng. *storage methods, storage assignments*) određuju skladišnu lokaciju nadolazećeg tereta. Često korištene metode su metode dodijeljenog odlaganja, metoda

dodijeljenog odlaganja prema protoku, metode nasumičnog odlaganja, metoda najbliže slobodne lokacije, i metoda odlaganja po zonama. [7]

Kod metode dodjeljenog odlaganja (eng. *dedicated storage*) svaka vrsta artikla ima (unaprijed) određeno jedno ili više skladišnih mjesta (ovisno o maksimalnoj količini zaliha toga artikla). Nadopunjavanje toga artikla se vrši na toj lokaciji. Mogu se korisiti i nazivi metoda unaprijed određenog rasporeda ili metoda odlaganja po fiksnom rasporedu [5]. Glavni problem ove metode jest što su skladišna mjesta rezervirana i za artikle kojih više nema na zalihama pa je iskorištenost prostora slaba i potrebno je više skladišnog prostora u odnosu na druge metode. Ova metoda je u prednosti kod primjene u trgovinama ili kod skladištenja teških tereta na dno regala, ali se kod automatiziranih skladišnih sustava uglavnom ne primjenjuje. [7]

U AS/RS sustavu će se najčešće skladištiti više različitih artikala, koji se međusobno razlikuju po obrtaju. Neki artikli su popularniji, i često se takvi artikli nazivaju „brzi“ artikli (eng. *fast movers*), za razliku od nekih drugih koje moramo imati ali su manje popularni i rijetko se traže (eng. *slow movers*). Osnovna ideja za primjenu dodijeljenog odlaganja s tim kriterijem jest skladištiti brze artikle blizu ulaza/izlaza, a spore dalje od njega, te time utjecati na smanjenje vremena radnih ciklusa dizalica. Kada je kriterij protok, ova metoda se naziva dodijeljeno odlaganje prema protoku (eng. *full turnover method*).

Kod metode nasumičnog odlaganja ili slučajnog rasporeda odlaganja (eng. *random storage*), svaka slobodna lokacija ima jednaku vjerojatnost izabiranja za uskladištenje tereta što u konačnici rezultira manjim potrebnim brojem lokacija u odnosu na prethodno spomenutu metodu. Obično se koristi ili pravilo „potpuno slučajno odabrana lokacija“ (eng. *pure randomized storage*), ili pravilo „prva slobodna lokacija“ (eng. *closest open location*). U slučaju potonje, uz uvjet veće popunjenosti skladišta i FIFO principa, ista se ponaša kao i metoda potpuno slučajne lokacije [5]. Pravilo prve slobodne lokacije također smanjuje vrijeme vožnje S/R vozila, ali rezultira popunjenošću regala oko pretovarnih stanica. Negativna posljedica se može javiti ako se blizu pretovarnih stanica odlože tereti malog protoka pa oni visokog protoka moraju ići dalje što produžuje vožnju.

Odlaganje po zonama (eng. *class-based storage*) koristi prednosti nasumičnog odlaganja i dodijeljenog odlaganja. Artikli se rangiraju na temelju nivoa aktivnosti (protok, COI) i podijele u grupe (3 ili više). Svakoj grupi unaprijed se dodijeljuje zona odlaganja. Artikli određene grupe skladište se u dodijeljenoj zoni po nasumičnom rasporedu odlaganja. Ova

metoda objedinjuje prednosti unaprijed dodijeljenog odlaganja s obzirom na minimizaciju vremena vožnje, te prednosti nasumičnog odlaganja što se tiče potrebnog broja mjesta odlaganja. [20]

3.3.2. Sekvenciranje

Sekvenciranje (eng. sequencing) je metoda koja pokušava odrediti redoslijed obavljanja naloga na način da se minimizira ukupno vrijeme. Postoji više principa po kojima se mogu sekvencirati tj. rangirati postojeći i novopridošli nalozi za uskladištenje i izuzimanje.

Naime tereti koji čekaju na uskladištenje tj. nalozi uskladištenja uglavnom nemaju vremenski rok za ispunjenje jer točno vrijeme njihova izvršenja nije od velike važnosti za performanse sustava. Također, tereti tvore i fizički red koji nije lako presložiti, stoga se nalozi uskladištenja vrše prema principu FCFS (eng. *First Come First Served*) što bi značilo da se oni izvršavaju po redoslijedu nastanka. Suprotno tome nalozi izuzimanja uglavnom imaju vremenski rok izvršenja stoga spomenuti princip neće uvijek ispuniti vremenske rokove. Primjerenim rangiranjem ovih naloga se može poboljšati protok svih vrsta AS/RS-ova. [20]

Lista naloga se kontinuirano ažurira i mijenja tijekom vremena. Izvršeni nalozi se brišu s liste, a novi nalozi se dodaju. Ovaj dinamički problem se može rješavati na dva načina. Jedan način je blok sekvenciranjem (eng. *block sequencing*) gdje se prvo odabere blok/skupina hitnih naloga te se taj blok sekvencira. Drugi način je dinamičko sekvenciranje (eng. *dynamic sequencing*) gdje se vrši sekvenciranje svakim ažuriranjem tj. svaki put kada se na listu doda novi nalog. Različitim algoritmima i heuristikama je moguće sekvencirati naloge s ciljem minimizacije puta ili vremena vožnje. Sekvenciranje ovisi o tome hoće li se nalozi vršiti po principu jednog ili dvostrukog radnog ciklusa. [7]

3.3.2.1 Radni ciklusi

Vrijeme radnog ciklusa se sastoji od sume svih aktivnosti jednog prijevoza (uključujući i povratnu vožnju). Može se opisati pomoću formule ...

$$t_c = t_u + t_v + t_i + t_{pv} + t_d$$

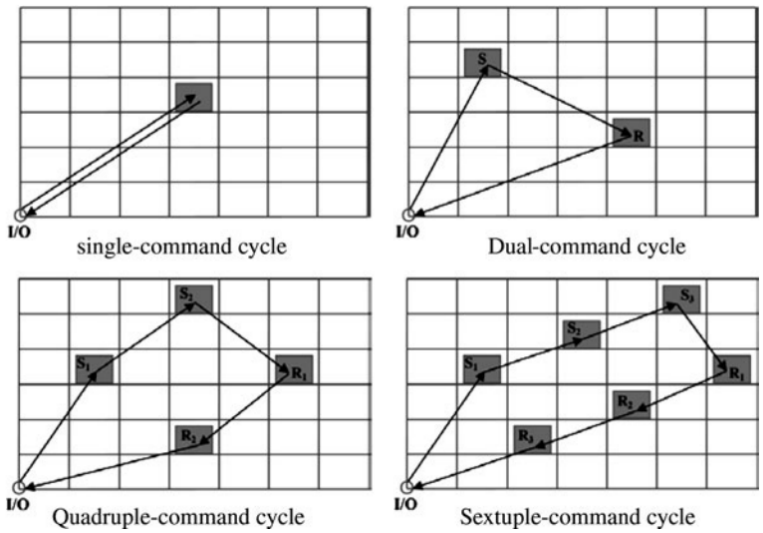
- t_u – vrijeme utovara
- t_v – vrijeme vožnje (pun)
- t_i – vrijeme istovara

- t_{pv} – vrijeme povratne vožnje (prazan)
- t_d – dodatno vrijeme po ciklusu

Jednostruki radni ciklus (eng. *single-command cycle,* skraćeno SCC) podrazumijeva izvršenje jednog naloga uskladištenja ili izuzimanja. U slučaju uskladištenja ciklus započinje utovarom tereta gdje su uzima u obzir vrijeme utovara t_u. Nakon utovara slijedi vožnja s teretom do skladišne lokacije u trajanju t_v, gdje se vrši istovar tereta u trajanju t_i. Ciklus završava povratkom na početnu tj. parkirnu lokaciju, što označava vrijeme povratne vožnje t_{pv} kada je vozilo prazno. U slučaju da se pri izvršenju ciklusa ne dogode nikakvi zastoji, blokiranja, čekanja i sl. neće biti dodatnog vremena po ciklusu t_d.Slično tome, jednostruki ciklus izuzimanja se sastoji od i započinje vožnjom od početne lokacije do lokacije za izuzimanje (vozilo je prazno), vremenom utovara izuzetog tereta, vremenom vožnje do početne lokacije (vozilo je puno) i završava vremenom istovara.

Složeni radni ciklusi izvršavaju dva ili više naloga prije vraćanja na početnu lokaciju. Primjerice, dvostruki radni ciklus (eng. *dual-command cycle,* skraćeno DCC) se sastoji od dva raznovrsna naloga, prvo uskladištenje nakon kojeg slijedi izuzimanje. Dakle, nakon uskladištenja S/R vozilo putuje do lokacije za izuzimanje umjesto da se vraća na početnu poziciju, čime se smanjuje prazni hod vozila, te je vrijeme dvostrukog ciklusa kraće od zbroja dva jednostruka ciklusa. Međutim, dvostruki (radni) ciklus je moguće izvesti samo ako na listi naloga postoje obje vrste koje se mogu upariti za jedno S/R vozilo. Ako se inzistira na dvostrukom ciklusu tada vozilo mora čekati nalog za uskladištenje iako je izuzimanje već na čekanju. Stoga je bolje primijenjivati hibridni (oportunistički) model gdje se vrši jednostruki ciklus ako nije moguće u tom trenutku ostvariti dvostruki [19].

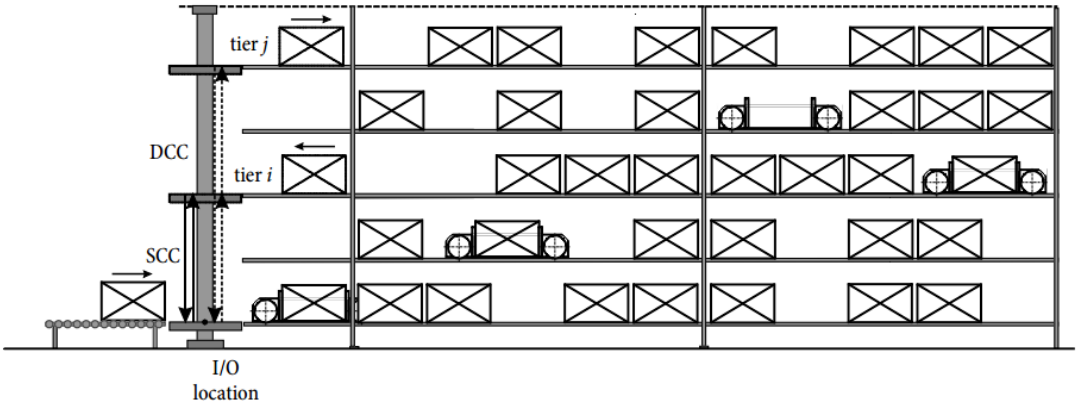
Višestruke radne cikluse je moguće ostvariti s *multi-shuttle* dizalicama gdje se može kombinirati veći broj naloga zbog povećanog kapaciteta dizalice. Tako *dual-shuttle* dizalica može ostvariti četverostruki ciklus (jer može ostvariti dva uskladištenja i dva izuzimanja u ciklusu), a *triple-shuttle* dizalica šesterostruki ciklus. Ilustracija radnih ciklusa za dizalicu je dana na slici 20 gdje strelice označavaju kretanje vozila.



Slika 20. Višestruki radni ciklusi dizalice [6]

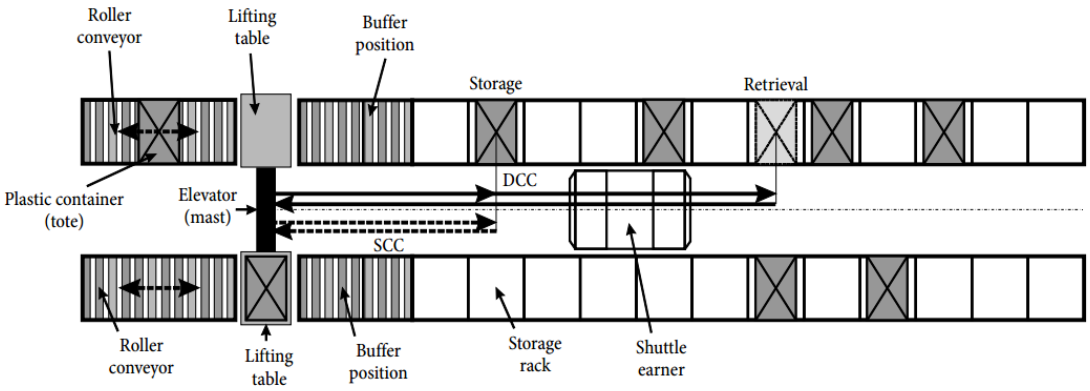
Radni ciklusi kod SBS/RS-a su složeniji jer kretanje tereta nije simultano već sekvencijalno pošto u njemu sudjeluju dva S/R vozila: dizalo i regalno vozilo. Prema tome mogu se definirati radni ciklusi posebno dizala, a posebno (regalnog) vozila čije su definicije jednake onima za dizalice iz AS/RS-a.

Dakle, jednostruki ciklus dizala se sastoji i započinje vremenom utovara tereta na dizalo s I/O točke, vremenom vožnje dizala na određenu razinu, vremenom istovara na međuspremnik te vremenom vožnje praznog dizala na razinu I/O točke. Slično se događa kod dvostrukog ciklusa gdje se nakon istovara tereta na međuspremnik *i*-te razine (vrijeme istovara), dizalo ne vraća odmah na početnu razinu nego putuje do *j*-te razine (vrijeme vožnje – prazno dizalo), gdje dizalo preuzima teret s međuspremnika *j*-te razine (vrijeme utovara), nakon čega putuje do I/O točke (vrijeme vožnje – pun) te istovaruje teret na I/O točku (vrijeme istovara) [24]. Ilustracija SCC i DCC ciklusa dizala je dana na slici 21 gdje strelice označuju kretanje dizala.



Slika 21. Radni ciklusi dizala [29]

Vrijeme jednostrukog ciklusa *tier-captive* regalnog vozila se sastoji od vremena utovara tereta s međuspremnika, vremena vožnje do skladišne lokacije, vremena istovara te vremena povratne vožnje. U slučaju izuzimanja je jednako samo što je prva vožnja prazna, a druga puna, te se prvo vrši utovar, a na kraju istovar. Dvostruki ciklus podrazumijeva da nakon uskladištenja, regalno vozilo putuje do lokacije za izuzimanje, utovaruje teret, putuje do međuspremnika te istovaruje teret. Na slici 22 je ilustrirano kretanje *tier-captive* regalnog vozila za SCC i DCC ciklus.



Slika 22. Radni ciklusi regalnog vozila [29]

U slučaju *tier-to-tier* regalnog vozila njegovi ciklusi mogu biti nešto drugačiji jer sadržavaju komponentu vertikalnog puta pošto mogu dobiti nalog za uskladištenje ili izuzimanje tereta koji se nalazi na drugoj razini regala. Važno je napomenuti kako prednost dvostrukog ciklusa ne vrijedi uvijek kod AVS/RS-a, gdje se nalozi uparuju po principu FCFS, jer postoji velika vjerojatnost da se treba pristupiti lokacijama na različitim razinama što može povećati vrijeme vožnje [19]. U tim slučajevima je bolje prepustiti regalnom vozilu druge razine da obavi izuzimanje.

3.3.3. Dodijeljivanje naloga

U tipičnom AS/RS-u za male spremnike, nalozi za jedan prolaz se dodijeljuju dizalici u tom prolazu. Suprotno tome, nalozi u SBS/RS-u se mogu dodijeliti skupu *aisle-to-aisle* i/ili *tier-to-tier* regalnih vozila od kojih više njih može pristupiti istoj skladišnoj lokaciji. Ovisno o vrsti naloga i lokaciji i stanju (zauzet ili dostupan) vozila potrebno je koristiti pravila koja će dodijeliti nalog onom vozilu koje će imati najkraće vrijeme vožnje. Isto vrijedi i za dodijeljivanje naloga dizalima, ako postoji više varijanti. Ovaj problem se može rješavati različitim metodama. U literaturi se u analitičkim modelima najčešće koristi metoda slučajnog dodjeljivanja naloga vozilima ili FCFS metoda. Međutim postoje i druge metode koje mogu smanjiti vrijeme izvršenja naloga. Metoda koja dodjeljuje nalog onom dostupnom vozilu koje ima najkraće vrijeme vožnje do potrebne lokacije ili najkraće vrijeme vožnje do dizala. [20]

3.3.4. Metode usmjeravanja vozila

Metoda usmjeravanja vozila (eng. *routing methods*) u ovom slučaju znači odrediti skup ruta flote vozila koja su smještena na jednom ili više polazišta za posjećivanje određenog broja skladišnih lokacija u svrhu skladištenja i izuzimanja. Cilj je pronaći optimalne rute, one s minimalnim udaljenostima tj. vremenima vožnje. Određivanje optimalne rute je specifičan problem putujećeg trgovca. To nije problem kod vozila koja ne mogu promijeniti prolaz jer će se uvijek odabrati najkraći put. Međutim, u sustavu gdje vozila mogu promijeniti prolaz i/ili razinu, problem usmjeravanja postaje složeniji. Za takve slučajeve su dostupne različite heuristike za generiranje rješenja. Najkraći put se može izračunati za jednostruki, dvostruki ili višestruki ciklus, ali ako više vozila mogu pristupiti istom prolazu u isto vrijeme može doći do blokiranja što naravno treba minimizirati [20].

3.3.5. Parkirna lokacija

Parkirna lokacija ili mjesto mirovanja (eng. *dwell point*) označava lokaciju koju dizalo ili vozilo zauzima nakon što završi nalog. Odabir te lokacije ima značajan utjecaj na vrijeme vožnje slijedećeg naloga. Ta lokacija može biti uvijek ista, pa govorimo o statičnim strategijama, ili se može mijenjati u odnosu na stanje sustava, pa govorimo o dinamičkim strategijama [7]. Najčešće parkirne lokacije su mjesto izvršenja zadnjeg naloga, skraćeno POSC od eng. *Point-of-service-completion*, vraćanje do pretovarne stanice (najčešće podrazumijeva početak prolaza) ili zauzimanje neke središnje pozicije (primjerice sredine prolaza).

4. OBLIKOVANJE I PERFORMANSE SKLADIŠTA

Općenito, SBS/RS, ali i bilo koji drugi sustav, treba biti oblikovan na način da efikasno funkcionira u uvjetima sadašanje i buduće potražnje i zahtjeva kapaciteta. Pri tome, poželjno je izbjeći pojavu uskih grla ili pak prekapacitiranosti sustava te uzeti u obzir utjecaj ostalih skladišnih procesa na samu skladišnu zonu [18]. Najvažniji zahtjevi i uvjeti pri oblikovanju SBS/RS-a su skladišni kapacitet, površina i visina prostora, protok i razina usluge. Skladišni kapacitet u smislu ukupnog broja skladišnih lokacija treba biti jednak ili malo viši od potrebnog broja skladišnih lokacija. Visina i površina SBS/RS-a naravno treba biti u skladu s dostupnim prostorom za gradnju. Željeni protok se definira kao broj naloga uskladištenja i izuzimanja koji se moraju izvršiti u određenom vremenskom periodu. Razina usluge se u ovom slučaju može definirati kao sposobnost SBS/RS-a da izuzme unaprijed određeni postotak od svih naloga izuzimanja u nekom vremenskom periodu. Vrijeme izuzimanja traje od dodavanja naloga izuzimanja na listu SBS/RS-a do odlaska tereta iz njega. Dodatno, sustav ne smije negativno utjecati na ostale skladišne procese što se može dogoditi kada su, primjerice akumulirajući konvejeri (međuspremnici), u sklopu pretovarnih stanica, nedovoljno dimenzionirani (premali kapacitet) te uzrokuju blokadu konvejera ispred SBS/RS-a. Nadalje, sukcesivni skladišni potprocesi su osjetljivi na vremensku razdiobu naloga izuzimanja. Obzirom na vremensku razdiobu dolaznih naloga, konfiguraciju skladišta i principe upravljanja SBS/RS-om, moguće je izračunati vrijeme posluživanja S/R vozila i njihovu stopu iskorištenosti. Nadalje moguće je izračunati vremensku razdiobu naloga izuzimanja i distribuciju broja naloga na čekanju. Ako je iskorištenost svakog elementa sustava manja od 100% tada će se moći ostvariti stopa protoka SBS/RS-a. [20]

4.1. Analitički modeli za procjenu performansi

U ovom poglavlju će se navesti i ukratko opisati neki od analitičkh modela za procjenu performansi SBS/RS-a i AVS/RS-a, koji se pojavljuju u literaturi. Uz analitičke modele se redovito koriste i simulacijski modeli koji služe za procjenu i validaciju analitičkih modela. Najčešći ciljevi analitičkih modela su izračun nekih pokazatelja performansi kao što su vrijeme radnih ciklusa (jednostrukog i dvostrukog), protok elemenata sustava ili cjelokupnog sustava, stupanj iskorištenosti i sl. na temelju kojih se mogu donositi odluke u ranoj fazi oblikovanja/projektiranja skladišta. Za modeliranje ovih problema se koriste modeli vremena vožnje i različite metode iz teorije redova.

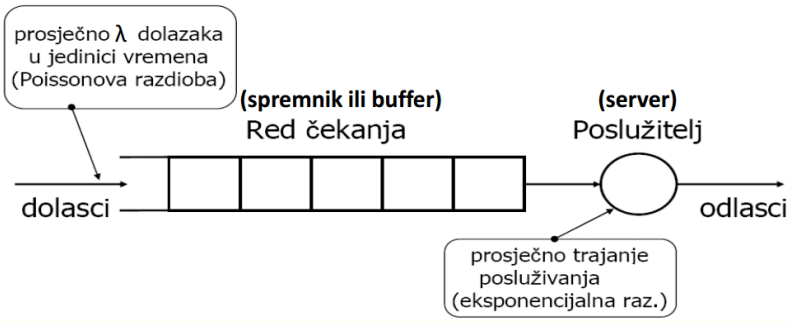
4.1.1. Modeli vremena vožnje

Modeli vremena vožnje računaju vrijeme vožnje S/R vozila unutar radnog ciklusa ili vrijeme cijelokupnog radnog ciklusa. Radni ciklusi koji se analiziraju su jednostruki ili dvostruki. Pošto oni ponajviše ovise o kinematici vozila i udaljenostima koja vozila moraju proći, utjecajne varijable su brzine i akceleracije S/R vozila te konfiguracija regala (dužina, visina, broj prolaza). Također, metode upravljanja utječu na kretanja vozila, kao što su metode odlaganja, parkirne lokacije, dodijeljivanje naloga, usmjeravanje vozila i sl. U ovim modelima su metode upravljanja unaprijed određene pa se najčešće variraju vrijednosti konfiguracije regala i kinematičkih veličina kako bi se izračunala prosječna vremena vožnje ili radnih ciklusa, na temelju kojih se mogu izvesti veličine poput protoka i donijeti razni zaključci o ponašanju sustava.

4.1.2. Modeli teorije redova

Teorija redova (model linija čekanja ili teorija čekanja) je područje matematike koje modelira ponašanje redova/linija čekanja. Jedna je od metoda operacijskih istraživanja koja proučava procese usluživanja slučajno pristiglih korisnika ili zahtjeva za nekom uslugom. Svrha teorije linije čekanja je istraživanje pojava zagušenja koja nastaju kada su potrebe za pružanjem usluge stohastičke prirode. Ako dolazak korisnika i trajanje pružanja usluge nisu poznati, dolazi do konflikata između korisnika zbog ograničenog resursa, a posljedica toga je čekanje korisnika u redu (linije čekanja). Modelima linije čekanja moguće je evaluirati performanse sustava nakon što je njegova struktura definirana te se zbog toga najviše koriste u fazi oblikovanja sustava [30].

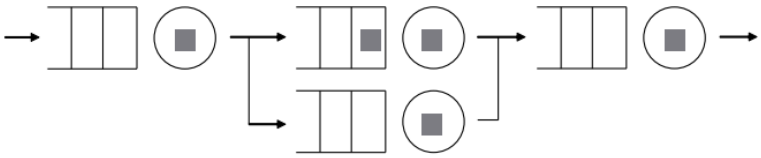
Struktura modela čekanja se sastoji od korisnika, reda čekanja i servera (poslužitelja, resursa za pružanje usluga) [31]. Korisnik može predstavljati osobe, zahtjeve za nekom operacijom ili u ovom slučaju terete i naloge za izdavanje i izuzimanje. Korisnici dolaze u red i čekaju na posluživanje. Red može imati određeni ili beskonačni kapacitet. Korisnici iz reda dolaze u server gdje borave određeno vrijeme te nakon završetka izlaze iz sustava ili idu dalje u neki drugi red. Red u principu predstavlja međuspremnik (akumulirajući konvejer) ili listu nadolazećih naloga, dok server predstavlja S/R vozilo. Ilustracija strukture modela čekanja je na slici 23.



Slika 23. Struktura modela čekanja [31]

U praksi se često javljaju sustavi kod kojih se korisnici poslužuju u više redova prije nego napuste sustav. Takvi sustavi modeliraju se mrežama redova (eng. *queuing networks*). Općenito, u mreži redova će korisnik koji izađe iz jednog reda (tj. čije posluživanje je završeno) ući u drugi red (moguće i u isti red). Mreže redova dijele se na:

- otvorene mreže redova (eng. *open queuing networks - OQN*)
- zatvorene mreže redova (eng. *closed queuing networks - CON*)
- poluotvorene mreže redova (eng. *semi open queuing networks - SOQN*)



Slika 24. Primjer otvorene mreže redova [20]

Otvorena mreža ima ulaz i izlaz na koji korisnici izvana ulaze i odlaze iz sustava, pri čemu se njihov broj mijenja tijekom vremena. U zatvorenoj mreži broj korisnika je određen te oni ne mogu ući ni izaći iz sustava. U poluotvorenoj mreži za pojedine korisnike mreža je otvorena, a za druge zatvorena. Korisnici su podijeljeni u razrede, a svaki razred ima svoja svojstva (zatvorenost, zahtjeve za posluživanje itd.). Korisnik može ući u sustav tek kad se upari s određenim resursom. Resurs je vezan za korisnika dok ne izađe iz sustava nakon čega je resurs opet dostupan za slijedećeg korisnika. Dakle, OQN implicitno pretpostavlja beskonačan broj tih resursa, a CQN pretpostavlja beskonačan broj korisnika, pa jedno ne treba čekati drugo. Kako to nije uvijek slučaj i korisnik nekad mora čekati resurs i obrnuto, SOQN je realističniji model za stvarne sustave poput *tier-to-tier* AVS/RS-a zbog čega je i zastupljeniji u literaturi u odnosu na prva dva. [3]

Teorija redova omogućuje određivanje većeg broja veličina u sustavu u odnosu na modele vremena vožnje. To mogu biti prosječno vrijeme čekanja, posluživanja, odziva, broj korisnika u redu, u serveru, u sustavu, varijance navedenih veličina i njihove razdiobe, protok sustava, iskoristivost servera, potrebne dimenzije sustava i sl [3]. Za analizu sustava primjenom teorije redova potrebno je poznavati sljedećih šest parametara sustava: Vremena međudolazaka korisnika (eng. *interarrival times*); razdioba vremena posluživanja (eng. *service time distribution*) - vrijeme potrebno da server usluži korisnika; broj servera; kapacitet sustava; broj korisnika - ukupan broj korisnika koji mogu pokušati ući u sustav (može biti beskonačan) te disciplina posluživanja *(*eng. *service discipline*) - redoslijed posluživanja korisnika koji čekaju, primjerice FCFS.

4.2. Primjena modela u literaturi

Epp (2017) [20] navodi kako Fukunari i Malmborg (2008) koriste model reda čekanja za aproksimaciju radnog ciklusa *tier-to-tier* AVS/RS-a sa slučajnim rasporedom odlaganja i hibridnim modelom radnih ciklusa. Uz to računaju postotak dvostrukih ciklusa. Fukunari i Malmborg (2009) analizira sustav s vozilima koja mogu biti u kvaru ili u fazi održavanja te koja mogu napustiti sustav. Izvedba je *tier-to-tier* AVS/RS modelirana pomoću zatvorene mreže redova. Pretpostavljaju hibridni model radnih ciklusa te korištenjem srednjih vrijednosti određuju prosječnu iskoristivost vozila i dizala. Kuo i ostali (2007) razvijaju model za konceptualizaciju *tier-to-tier* AVS/RS-a sa slučajnim rasporedom i POSC parkirnom lokacijom. Koriste model reda čekanja kako bi odredili vrijeme čekanja dizala i njegovu iskoristivost. Kuo i ostali (2008) rade isto kao i Kuo i ostali (2007) koristeći zatvorenu mrežu redova s odlaganjem po zonama. Ovaj model u odnosu na simulaciju daje adekvatnu točnost za oblikovnu fazu projektiranja. Kako bi se dužina vanjskog reda *tier-to-tier* AVS/RS-a točnije aproksimirala, u literaturi postoji veći broj radova koji u tu svrhu koristi polutovorenu mrežu redova. Roy i ostali (2015) analiziraju parametre oblikovanja jedne razine AVS/RS-a pomoću SOQN-a varirajući strategiju parkirnih lokacija i lokacija poprečnih prolaza i računaju performanse sustava. Nakon analize različitih konfiguracija prolaza i poprečnih prolaza, zaključuju kako je parkirna lokacija kraj pretovarne stanice bolja od POSC lokacije. Jedan od ograničnenja jest da ne uzimaju u obzir međusobna blokiranja vozila. Analiza blokiranja je napravljena u Roy i ostali (2014) gdje predlažu protokole za izbjegavanje blokade i na temelju njih rade SOQN mrežu. Roy i ostali (2012) analiziraju utjecaj blokada na vrijeme radnog ciklusa pri različitom broju vozila, veličine regala i sl. Zaključuju kako zanemarivanje blokiranja dovodi do značajnog podcjenjivanja iskoristivosti vozila i radnog

ciklusa. Naravno, utjecaj blokiranja raste s većim brojem vozila [20]. Heragu i ostali (2011) [17] analiziraju utjecaj *tier-captive* vozila AVS/RS-a koristeći OQN mrežu, gdje nalozi predstavljaju korisnike, a dizala i vozila redove. Računaju iskoristivost i prosječnu duljinu reda dizala i vozila.

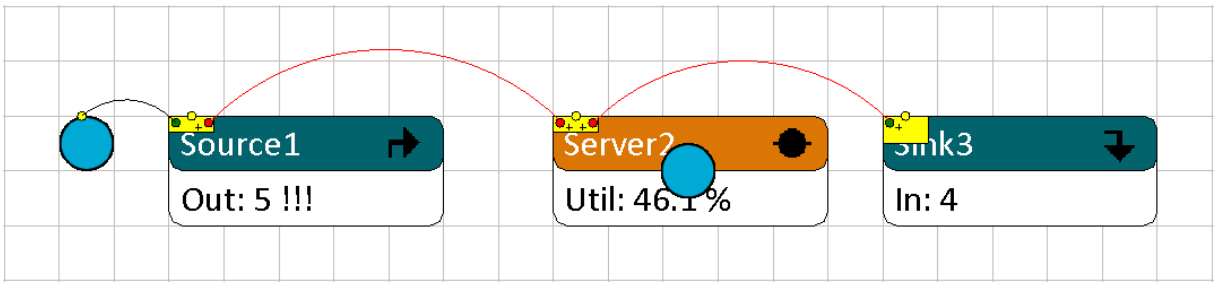
Za osnovni SBS/RS s dva neovisna dizala po prolazu Lerher i ostali (2015a) [22] prezentiraju model vremena vožnje koji izračunava prosječno vrijeme jednostrukog i dvostrukog radnog ciklusa zasebno dizala i zasebno regalnog vozila. Pretpostakve su slučajni raspored mjesta odlaganja, izuzimanje može biti iz različitih razina kada se računa ciklus dizala, dok je za izračun ciklusa vozila izuzimanje iz iste razine. Vremena su izračunata za različite konfiguracije regala (prolaza, razina i stupaca) i kinematičkih veličina. Temeljeno na ovoj metodi Lerher (2015b) [32] predstavlja model vremena vožnje za SBS/RS dvostruke dubine regala. Zaključuje da performanse sustava različitih konfiguracija ponajviše ovise o protoku dizala. Nadalje isti autor razvija model vremena vožnje za SBS/RS s multi-level vozilima. Također, Lerher (2016) [33] nadograđuje model vremena vožnje s modelom za izračun potrošnje energije SBS/RS-a s obzirom na konfiguraciju regala i profil brzina S/R vozila. Borovinšek i ostali (2017) [29] na temelju modela vremena vožnje rade višekriterijalnu optimizaciju oblikovanja SBS/RS-a. Cilj modela je minimizirati vrijednosti slijedeća tri kriterija uz zadani minimalni skladišni kapacitet: prosječno vrijeme radnog ciklusa, ukupni trošak i ukupna potrošnja energije. Za rješavanje navedenog problema korišten je genetički algoritam 2. Zajedničko svim modelima vremena vožnje pa tako i ovom je što ne uzimaju u obzir čekanja naloga i S/R vozila pa stoga ne mogu izračunati vrijeme naloga izuzimanja. Slično spomenutom, Epp (2017) [20] navodi kako Sari i ostali (2014) računaju jednostruke i dvostruke radne cikluse te provode simulaciju kako bi validirali modele. Također postoje publikacije modela vremena vožnje za SP-AS/RS (eng. *Split platform* AS/RS) koji se koristi za teške terete (primjerice kontenjeri). Princip je isti kao kod *tier-captive* SBS/RS-a samo što se dizalo zove vertikalna platforma, a regalna vozila horizontalna platforma te su većih dimenzija. Liu i ostali (2017) [34] računa vrijeme ciklusa sustava, a ne zasebno svake platforme.

Uz literaturu koja se fokusira na modele vremena vožnje, SBS/RS je proučavan i pomoću modela reda čekanja i mreža redova. Zbog toga je moguće izračunati i vremena čekanja. Marchet i ostali (2013) [18] razvijaju OQN mrežu gdje pretpostavljaju postojanje samo naloga za izuzimanje kako bi izračunali prosječno vrijeme za izvršenje naloga izuzimanja. Također, računaju i vrijeme čekanja naloga. Kartnig i Oser (2014) [35] računaju granični

protok SBS/RS-a uzimajući u obzir međuspremnike konačnih kapaciteta između dizala i vozila kako bi uvidjeli utjecaj blokiranja. Računajući vremena čekanja aproksimiraju čekanje zbog blokade. Epp (2017) [20] navodi kako Eder i Kartnig (2016) računaju granični protok SBS/RS-a višestruke dubine regala i konačnih međuspremnika. Aproksimiraju vrijeme međudolazaka i vrijeme posluživanja eksponencijalnom distribucijom kako bi kvantificirali utjecaj višestrukih dubina na protok i veličinu SBS/RS-a. Epp i ostali (2017) računaju vremensku distribuciju naloga za izuzimanje koristeći OQN mrežu s tehnikama dekompozicije iste. Zou i ostali (2016) [36] analiziraju utjecaj paralelnog kretanja, što znači da nalog za izuzimanje istovremeno pokreće vozilo i dizalo. Izvodeći numeričke eksperimente uspoređuju paralelni način rada sa uobičajenim sekvencijalnim. Zaključuju kako za male sustave paralelni način rada je brži dok je slučaj suprotan u velikim sustavima jer to povećava čekanje dizala na vozila.

5. ENTERPRISE DYNAMICS

Enterpise Dynamics (ED) je objektno orijentirani softverski program za modeliranje, simulaciju, vizualizaciju i kontrolu dinamičkih procesa. Korisnici slažu modele koristeći objekte, koji se nazivaju atomi, koji se predefinirano nalaze u knjižnici atoma. Atom može predstavljati stroj, server, proizvod i sl. ali može imati i nefizički karakter poput grafa. Korisnici mogu stvarati nove atome, primjerice stroj s nekim specifičnim karakteristikama. Svakom atomu se mogu mijenjati različite karakteristike. Kako bi se ostvario tok materijala i informacija između atoma, atomi se spajaju pomoću ulaznih i izlaznih kanala. ED ima svoj programski jezik naziva 4DScript koji se koristi za namještanje nekih specifičnih uvjeta. Primjer jednog modela je prikazan na slici 25 gdje se vide četiri različita atoma spojenih pomoću ulaznih i izlaznih kanala.



Slika 25. Primjer modela

ED se može koristiti primjerice kada se žele testirati performanse nekog sustava dok je on u fazi planiranja, za testiranje predloženih promjena nekog sustava prije nego što one postanu operativne naravi, za procjenu učinka nekih neizvjesnih događaja poput kvarova, mijenjanje parametara i praćenje promjena već postojećeg sustava. Cijeli operativni sustavi poput neke tvornice se mogu modelirati i simulirati, kako bi se radile analize i vizualiziralo proces pomoću 3D animacija.

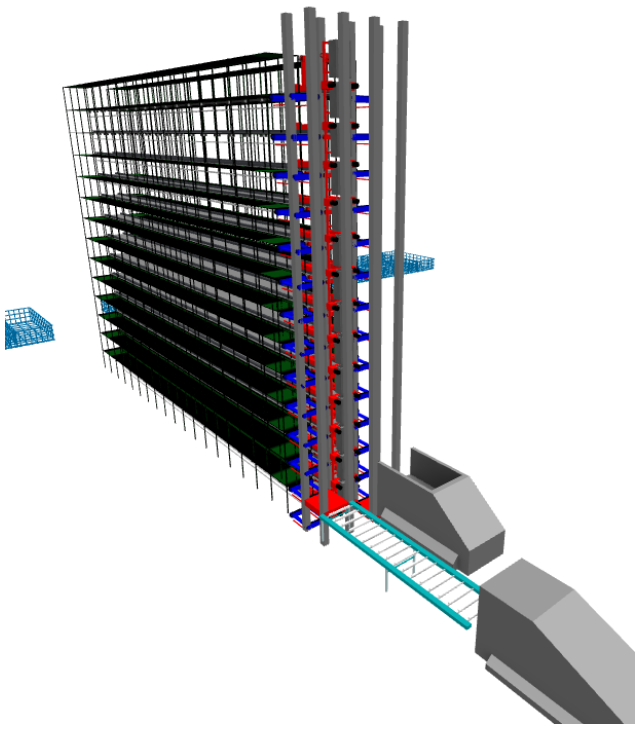
6. KOMPOZICIJA MODELA

Model se sastoji od dva regala jednostruke dubine koji čine jedan prolaz u kojem se nalaze regalna vozila. Regali su istih dimenzija s 14 razina i 18 skladišnih mjesta u svakoj razini. Razlog za takve brojke razina i skladišnih mjesta su ograničenje programskog paketa i primijenjenih rješenja o kojima će dalje biti riječ.

Dakako u svakoj razini se nalazi jedno regalno vozilo koje opslužuje oba regala u procesu uskladištenja i izuzimanja. Regalno vozilo radi dvostruki ciklus što znači da prvo uskladišćuje teret nakon čega odmah radi izuzimanje s neke skladišne lokacije.

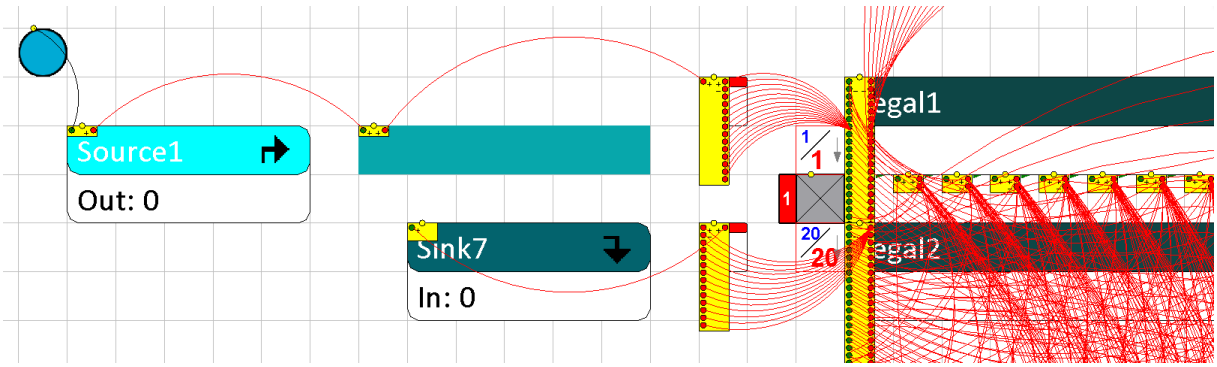
Na početku svakog regala se nalazi po jedno dizalo. Jedno dizalo (dizalo 1) služi samo za proces uskladištenja, a drugo dizalo (dizalo 2) za proces izuzimanja. Treba napomenuti kako izgrađeni model ima mogućnost promjene načina rada dizala tako da svaki obavlja funkcije oba procesa po potrebi kako bi se mogao analizirati i takav način rada.

Ispred dizala za uskladištenje se nalazi akumulirajući konvejer s kojega dolaze tereti u sustav i s kojeg dizalo izuzima terete stoga ima ulogu pretovarne stanice. Ispred drugog dizala se nalazi konvejer na koji dizalo odlaže terete te oni odlaze iz sustava. 3D prikaz modela napravljen u Enterprise Dynamicsu je prikazan na slici 26.



Slika 26. 3D model

Dio sheme modela u 2D prikazu je prikazan na slici 27.



Slika 27. 2D model

Atom *Source* generira dolazak tereta u sustav. Tereti se odlažu na akumulacijski konvejer tako što je atom *Source* spojen s njime. Konvejer djeluje kao pretovarna stanica s kojeg dizalo1 uzima terete. Dizalo 1 ima 14 izlaznih kanala koji su spojeni na 14 međuspremnika koliko ima i razina u regalu. Svako regalno vozilo uzima terete s ulaznog međuspremnika i uskladišćuje ih u regale. U procesu izuzimanja regalna vozila ostavljaju terete na izlazne međuspremnike koji su spojeni na dizalo 2 zbog čega on ima 14 ulaznih kanala po jedan za svaku razinu. Dizalo 2 šalje terete u atom *Sink* koji označava kraj procesa, tj. ti tereti izlaze iz sustava.

6.1. Izgradnja modela

6.1.1. Atomi Product i Source

Atomi *product* predstavljaju terete u skladišnom sustavu, a u nekom drugome slučaju bi mogli predstavljati obratke, sirovine ili proizvode u proizvodnji, neke događaje, ljude i sl. Atome *product* stvara atom imena *Source* na kojem se mogu namjestiti vrijeme dolaska prvog *producta* (u daljnjem tekstu tereta), vremena dolaska tereta tj. distribuciju vremena između svakog slijedećeg tereta, broj tereta, kanal na koji se ti teret šalju i sl. U svrhu testiranja modela i validacije namješteno je da tereti dolaze svakih 10 sekundi. Nadalje potrebno je definirati u koji regal pojedini teret se skladišti, njegovu skladišnu lokaciju što znači definirati razinu i redni broj paletnog mjesta u toj razini. Namješteno je slučajno dodijeljivanje skladišnih lokacija, što znači da svaka skladišna lokacija ima jednaku vjerojatnost da će biti dodijeljena nekom teretu, iako se daljnjom simulacijom modela to može promijeniti. Programsko rješenje je slijedeće:

```
do(
```

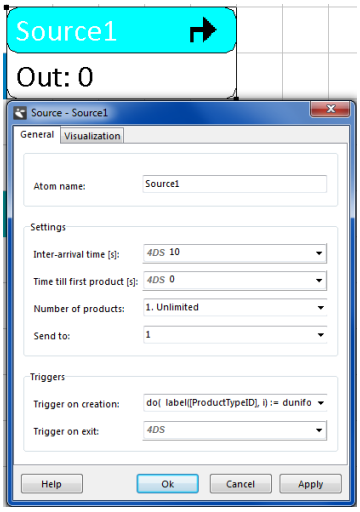
```
    label([TeretTypeID], i) := duniform(1,18),
    Label([regal],i) := duniform(1,2),
    label([razina],i) := duniform(1,14)
)
```

Za ovakve probleme ključno je korištenje labela/oznaka (eng. *Label*). Pomoću njih se mogu spremati neke informacije na određene atome, najčešće na *producte* (terete). Primjerice neki tereti mogu imati labele koje nose informaciju o težini proizvoda, vremenu proizvodnje, serijskom broju itd. Ilustracija značenja labela je prikazana na slici 28 gdje plavi krug predstavlja *product*.



Slika 28. Ilustracija labela

U ovom slučaju svi tereti će pomoću labela nositi informacije skladišne lokacije. Labela imena ProductTypeID nosi redni broj paletnog mjesta u nekoj razini. Labela regal sadrži informaciju kojem regalu teret pripada, da li regalu1 ili regalu2. Labela razina sadrži broj razine gdje teret treba biti uskladišten. Slučajno dodijeljivanje između dva regala, između 14 razina te između 18 paletnih mjesta u razini se čini pomoću funkcije duniform. Ona generira slučajni cijeli broj iz uniformne distribucije koja je zadana s dva argumenta, gornja i donja granica. Dakle za slučaj 14 razina generira broj iz uniformne razdiobe intervala od 1 do 14. Jednako tako za ostale slučajeve. Funkcija do se koristi kako bi se izvršile sve funkcije 4DScripta tj. svaka linija koda.

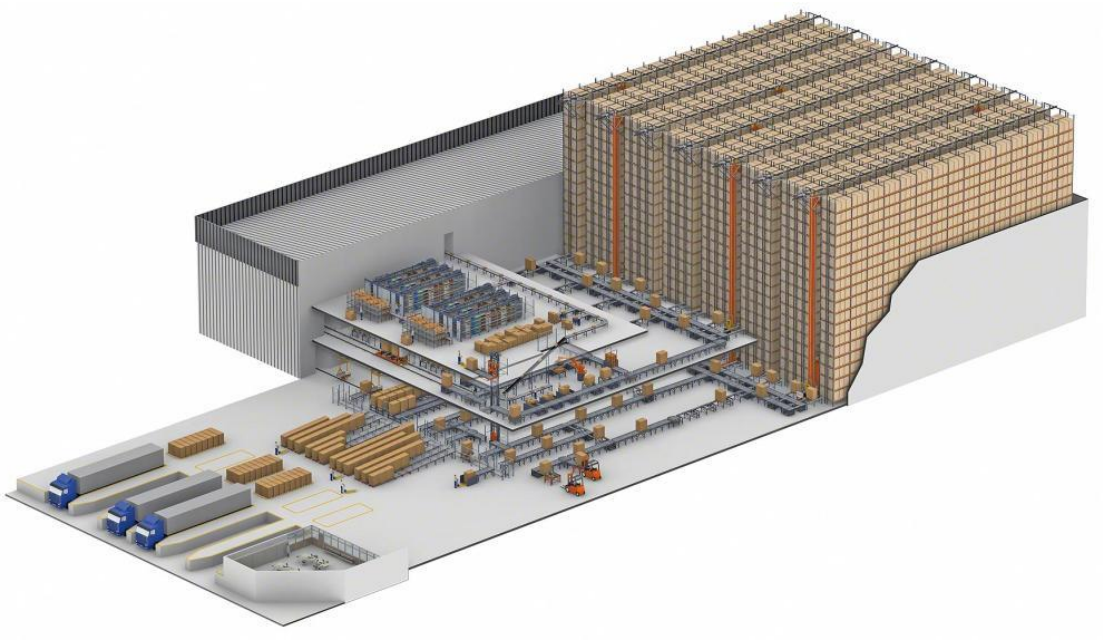


Slika 29. Atom Source

Atom *Source* je spojen jednim izlaznim kanalom na ulazni kanal atoma konvejer.

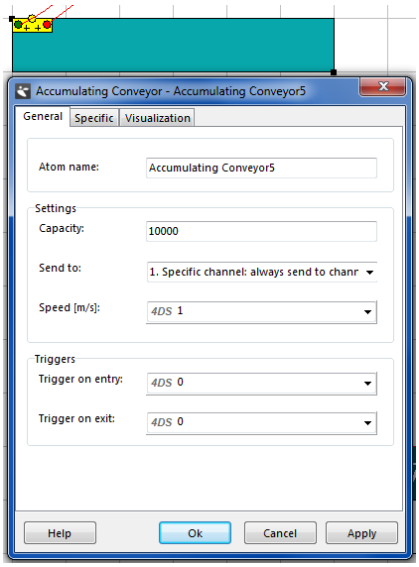
6.1.2. Atom Accumulating Conveyor

Korišten je atom akumulirajući konvejer koji se u stvarnosti ponaša kao konvejer s valjcima. Tim konvejerom tereti dolaze u sustav i ima ulogu pretovarne stanice stoga je on spojen s dizalom koji služi za proces uskladištenja. Akumulirajući znači da on služi također kao jedna zona međuspremnika što znači dok je izlaz iz konvejera zatvoren on akumulira terete. Kako je automatizirano skladište samo dio skladišnog sustava (što ilustrira slika 30), zajednička uloga atoma *Source* i konvejer jest da simuliraju prethodni dio skladišnog sustava, dakle dolaske tereta, sortiranje i njihov trasnport do skladišnih regala.



Slika 30. Cjelokupni skladišni sustav [37]

Inicijalni parametri, poput kapaciteta, brzine transporta i sl., nisu namještavani jer nije bilo potrebe. Slika 31 prikazuje grafičko sučelje opisanog atoma i njegov 2D prikaz.

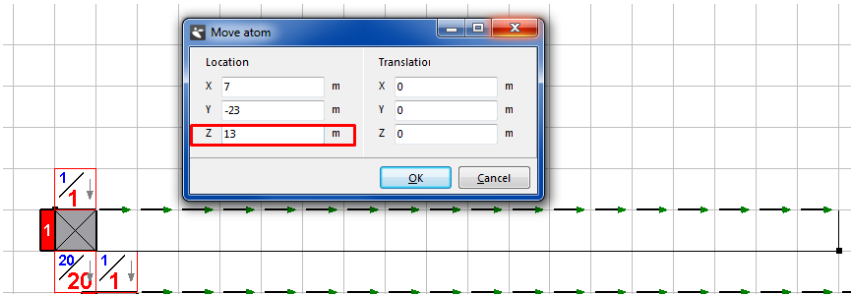


Slika 31. Atom akumulirajući konvejer

6.1.3. Atom Elevator

Atom dizalo (eng. *Elevator*) služi za transport tereta na način da oni ulaze u dizalo preko ulaznog kanala (jednog ili više), dizalo se translatira po z osi dok se ta vrijednost ne izjednači sa vrijednošću z komponente lokacije atoma koji je spojen na izlazni kanal. Dakle za ispravno funkcioniranje dizala potrebno je prethodno namjestiti lokacije tj. visinu na kojoj se nalaze

izlazni atomi. Lokacija atoma se može podesiti odabirom atoma i pritiskom na tipku F8 kojom se otvara izbornik za namještavanje lokacije kako je prikazano na slici 32.

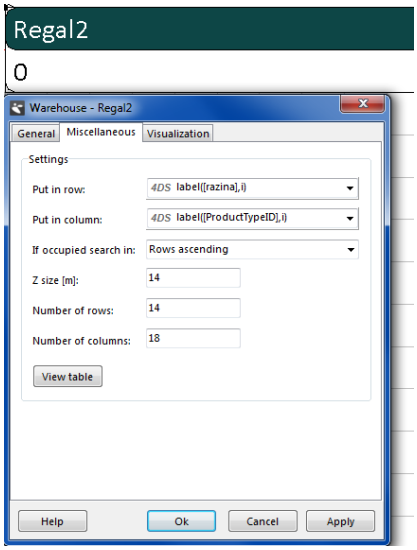


Slika 32. Promjena lokacije atoma

Pošto imamo 14 razina koju dizalo mora poslužiti on sadrži 14 izlaznih kanala. Dizalo šalje atome na odgovarajuću razinu tako što pročita vrijednost labele razina s tereta. To je namješteno u izborniku *Send to*, opcija 7. Izlazni kanali su spojeni na slijedeći atom imena *TransferCar*, međutim prije nego što se objasni njegova složena uloga objasniti će se atom skladište.

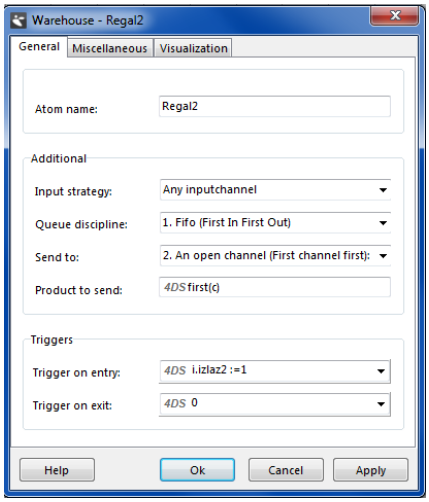
6.1.4. Atom Warehouse

Skladište (eng. *Warehouse*) je atom koji ima određeni kapacitet za skladištenje tereta na neku specifičnu lokaciju. Atom skladište je u principu jedan skladišni regal koji je koncipiran tako da ima tablicu s određenim brojem redaka, što označava razinu, i određenim brojem stupaca, što označava redni broj regalnog/skladišnog mjesta. Dakle jedna ćelija tablice predstavlja jednu skladišnu lokaciju, koja je definirana brojem retka i stupca. Kako bi osigurali da svaki teret dođe na prethodno zadanu skladišnu lokaciju ponovno će se koristit labele. U tabu *Miscellaneous*, izbornici *Put in row* i *Put in column*, može se odrediti prema kojoj funkciji 4DScripta će se vršiti popunjavanje skladišta. Kao i u prethodnom slučaju vrijednost labele razina će odrediti vrijednost retka u koji se sprema teret, a vrijednost labele ProductTypeID vrijednost stupca. Naravno prije toga je namještena veličina regala kako je prikazano na slici 33 s 14 redaka i 18 stupaca.



Slika 33. Atom skladište

Dodatni parametri atoma skladište su slijedeći: strategija ulaza gdje se definira s kojih ulaznih kanala i po kojem principu će skladište primati terete. Neki od principa su primanje tereta s bilo kojeg ulaznog kanala istovremeno ako postoji takva potreba, primanje tereta u krug tj. prvo je otvoren prvi ulazni kanal, zatim drugi, treći do zadnjeg i tako ispočetka, zatim primanje tereta s onog atoma koji ima najduži ili najkraći red i sl. Za ovu primjenu izabran je prvi režim rada dakle s bilo kojeg ulaznog kanala istovremeno kako je prikazano na slici 34.



Slika 34. Atom skladište - parametri

Slijedeći parametar je *Queue discipline*. Naime osim što tereti koji ulaze u regal ostaju zabilježeni u skladišnu tablicu, ovaj atom također pamti redoslijed po kojem su svi tereti ušli. *Queue discipline* određuje način rangiranja tereta. To je potrebno kako bi se omogućio princip skladištenja FIFO ili LIFO. Dakle po principu FIFO teret koji je zadnji ušao u red zadobiva vrijednost zadnjeg ranga, što znači ako je devet tereta u redu onaj zadnji koji je ušao ima

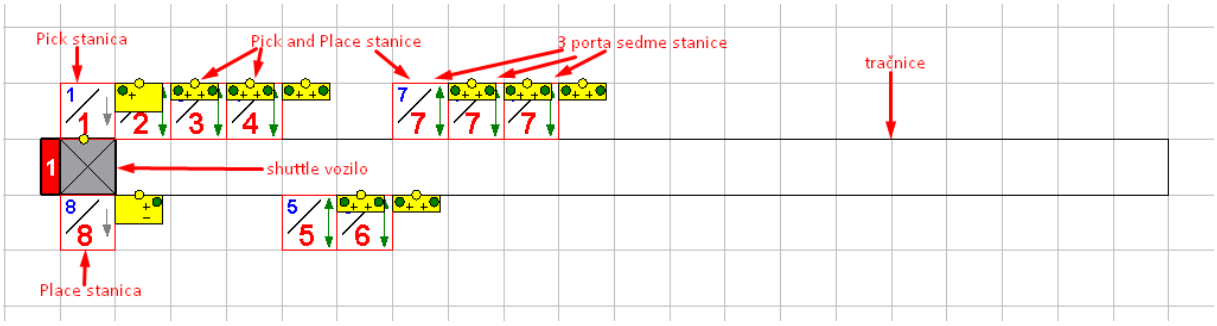
vrijednost deset. Pošto je u izborniku *Product to send* namješteno da prvi teret u redu izlazi van, a prvi u redu je onaj s vrijednošću jedan očito je da se postiže princip FIFO. Suprotno je za LIFO gdje zadnji teret koji je ušao u red zadobiva vrijednost jedan, a oni koji su već bili u redu se pomiču za jedno mjesto niz rang.

Kako je u modelu namješteno slučajno dodijeljivanje skladišnih lokacija tako se želi slučajno odabrati skladišna lokacija za izuzimanje, pod uvjetom da se na njoj nešto već nalazi. Ovdje se javlja problem koji teret i kako poslati iz skladišta u drugom dijelu ciklusa tj. u procesu izuzimanja. Slanje točno određenog tereta iz nekog retka i stupca se ne može namjestiti mijenjanjem koda za rangiranje jer ne znamo rang tereta koji se nalazi primjericu u trećem retku i drugom stupcu. Stoga je odlučeno da će se ostaviti FIFO princip, ali to znači da se neće isprazniti ona skladišna lokacija koju želimo da se isprazni, već ona čiji je teret prvi u redu. Zbog toga će neki drugi atomi morati imati sposobnost bilježenja praznih i popunjenih skladišnih lokacija. Iako će iz skladišta izlaziti tereti s krivih skladišnih lokacija ono će još uvijek imati točan broj uskladištenih tereta pa će se u simulaciji koristiti za mjerenje popunjenosti tj. kapaciteta skladišta.

6.1.5. Atom TransferCar Controller

Atom *TransferCar Controller* služi za modeliranje regalnog vozila, dakle za brzi i linearni transport materijala s jedne ili više ulaznih točaka do jedne ili više izlaznih točaka marerijala. Ono je najvažniji i najsloženiji korišteni atom koji uz atom *UserEvents* radi regulaciju dvostrukog ciklusa sustava. Složen je zato što se sastoji od nekoliko podatoma. Sastoji se od regalnog vozila na tračnicama koji uzduž tračnica ima transfer stranice za odlaganje i/ili izuzimanje tereta radi transporta te kontrolera koji upravlja ponašanjem sustava. Regalno vozilo može imati jedno, dva ili tri mjesta za transport tereta, ali je za ovaj model odabrano jedno mjesto. Način rada je da se teret transportira s ulazne transfer stanice do izlazne transfer stanice.

Postoje tri vrste transfer stanica: stanica za izuzimanje (eng. *Pick Station*) na koju dolaze tereti s drugih atoma pa ima samo ulazni kanal; stanica za odlaganje (eng. *Place Station*) s koje tereti odlaze iz atoma *TransferCar* stoga ima samo izlazni kanal; te kombinacija to dvoje dakle stanica za izuzimanje i odlaganje (eng. *Pick-and-Place Station*) koja ima ulazne i izlazne kanale. Maksimalni broj stanica je 20. Na slici 35 je vidljiv primjer atoma u 2D prikazu.

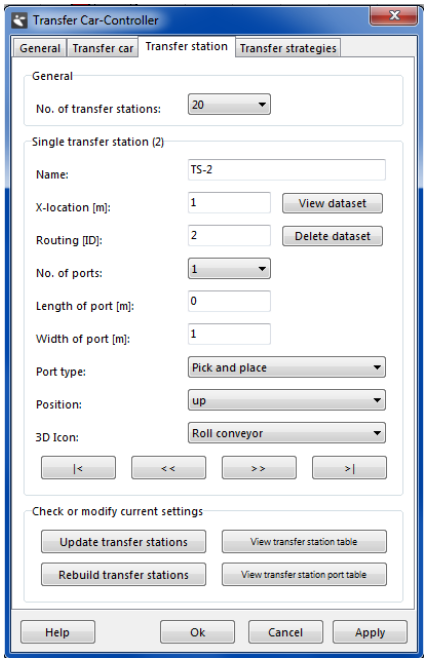


Slika 35. 2D prikaz atoma TransferCar

Nadalje svaka transfer stanica može imati do 6 *Portova*. *Portovi* su transfer stanice koje imaju obilježja matične transfer stanice, a na njih se tereti odlažu samo ako je matična transfer stanica popunjena.

Regalno vozilo se kreće po tračnicama od jedne transfer stanice do druge i zbog toga transfer stanica predstavlja jednu skladišnu lokaciju. Primjerice ako je potrebno doći do skladišne lokacije u šestom stupcu regala, regalno vozilo će transportirati teret do transfer stanice koja na *x* koordinati tračnica ima vrijednost 6 m, ako je početak tračnica na početku regala. Uglavnom, regalno vozilo mora prijeći put od 6 m. *Portovi* se ne mogu koristiti u ovom modelu jer se ne može programirati da regalno vozilo odloži teret na primjerice treći *port* neke stanice. Kako maksimalni broj transfer stanica iznosi 20, a jedna mora služiti za prihvat tereta i jedna za slanje tereta na dizalo za izuzimanje (međuspremnici), ostaje 18 transfer stanica za modeliranje skladišnih lokacija. Iz toga proizlazi činjenica da se u simulacijskom modelu ovog projekta može simulirati sustav s maksimalno 18 stupaca regala.

Rezultat navedenoga jest da atom *TransferCar* ima 20 transfer stanica, od toga je jedna stanica za izuzimanje koja prima terete od dizala (ima ulogu ulaznog međuspremnika), jedna je stanica za odlaganje koja odlaže terete na drugo dizalo (izlazni međuspremnik), a preostalih 18 su stanice za izuzimanje i odlaganje koje odlažu terete u regal i primaju terete iz regala kako bi ih preuzelo regalno vozilo. Na slici 36 se vidi izbornik za programiranje transfer stanica gdje se osim navedenih parametara mogu namjestiti i fizičke dimenzije stanica, njihov položaj u odnosu na tračnice, izvedbu stanice (valjčani, lančani konvejer i sl.) itd.



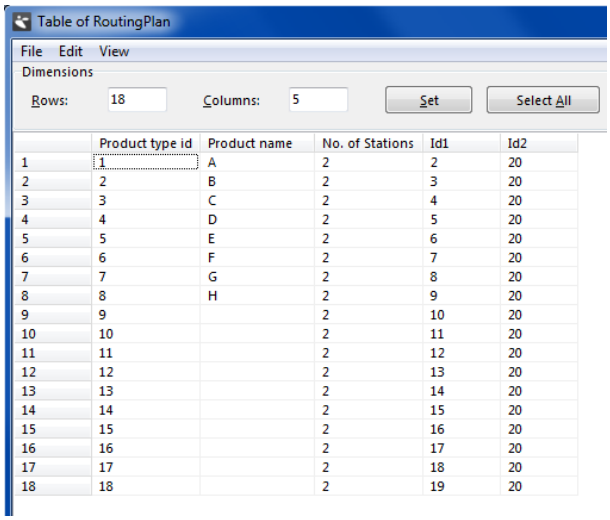
Slika 36. TransferCar - parametri

Potrebno je ponovno napomenuti kako se transfer stanice koriste kako bi se osiguralo da regalno vozilo putuje uz regal točno koliko treba. Realni sustav nema stanice na koje regalno vozilo odlaže terete pa se s tih stanica odlaže u regal već se tereti neposredno odlažu sa vozila u regal. Zbog toga je vrijeme odlaganja i izuzimanja produkata sa 18 stanica namješteno na nulu, tj. instantno se vrši prebačaj tereta preko stanice pa se vremenski efekt modela ne razlikuje od stvarnog sustava. Uz to je i prostorna dimenzija, točnije rečeno dužina porta/stanice svedena na nulu pa se u 3D prikazu modela 18 transfer stanica gotovo ne vidi.

Dužina tračnica iznosi 19 metara, jedan metar duže od regala zbog dvije transfer stanice koje se nalaze na kraju regala i služe kao međuspremnici s kapacitetom jednog tereta. Jedan *TransferCar Controller* atom se koristi za jednu razinu u regalu. Za razine iznad potrebno je namjestiti da regalno vozilo bude u visini slijedeće razine tako što će se promijeniti *z* lokacija drugih takvih atoma kako bi dizala putovala na visinu na koju bi i u stvarnosti putovala. Nadalje u tabu *TransferCar* potrebno je namjestiti inicijalnu *x* lokaciju regalnog vozila, lokaciju na kojoj se vozilo nalazi na početku simulacije. Namještena je vrijednost nula kako bi vozilo čekalo terete uz stanicu 1 (slika 35) koja se također nalazi na toj lokaciji.

Nakon definiranja strukture sustava potrebno je namjesitit transportnu strategiju koja sadrži upute za funkcioniranje onakvog transporta kakav je opisan u prethodnim paragrafima. Odabire se *Push* sustav gdje kontoroler čita labelu ProductTypeID svakog tereta i prema njoj

šalje na odgovarajuću stanicu. Koincidencija labele ProductTypeID i transfer stanice se definira u tablici *Routing plan* koja je prikazana na slici 37.



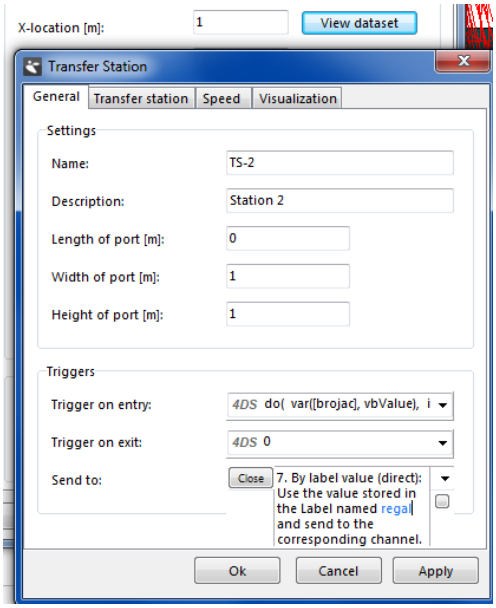
	Product type id	Product name	No. of Stations	Id1	Id2
1	1	A	2	2	20
2	2	B	2	3	20
3	3	C	2	4	20
4	4	D	2	5	20
5	5	E	2	6	20
6	6	F	2	7	20
7	7	G	2	8	20
8	8	H	2	9	20
9	9		2	10	20
10	10		2	11	20
11	11		2	12	20
12	12		2	13	20
13	13		2	14	20
14	14		2	15	20
15	15		2	16	20
16	16		2	17	20
17	17		2	18	20
18	18		2	19	20

Slika 37. Routing tablica

Stupac *Product name* se može zanemariti. U trećem stupcu se upisuje koliko stanica sudjeluje u transportu određenog tereta. *Id1* označava transfer stanicu na koju regalno vozilo odlaže teret nakon što ga pokupi sa stanice 1, a *Id2* označava stanicu na koju vozilo odlaže teret kojeg je pokupilo sa stanice iz prethodnog stupca (*Id1*). Konkretno svi tereti se uzimaju sa stanice 1 nakon čega se odlažu u jednu od 18 stanica. Nakon odlaganja ide proces izuzimanja s jedne od 18 transfer stanica gdje se tereti uvijek odlažu u zadnju stanicu s brojem 20 tj. u izlazni međuspremnik.

6.2. Povezivanje kanala i detaljna razrada

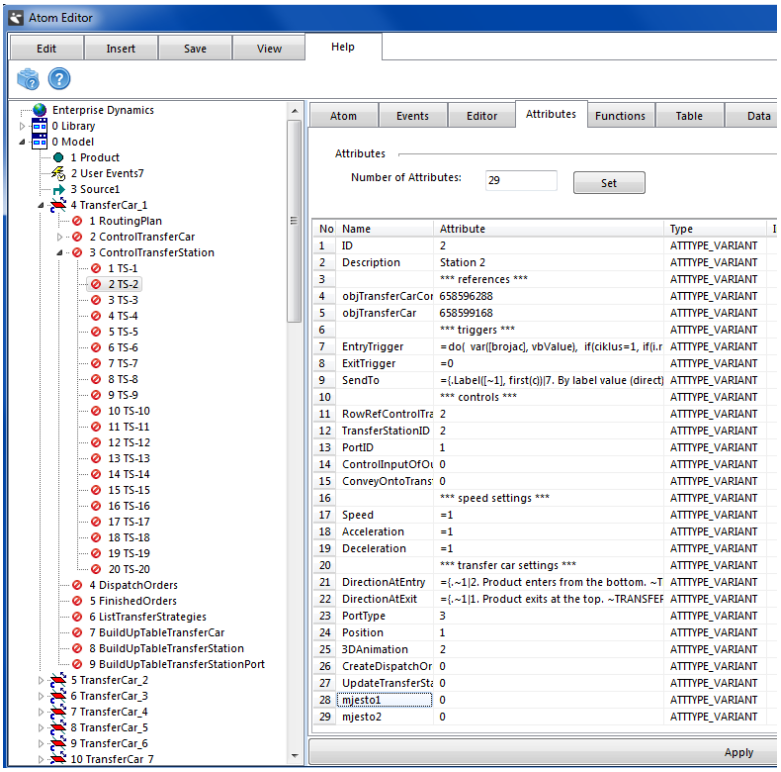
Daljnja izgradnja modela će biti objašnjenja idući uz tok materijala. Atom *Source* je jednim kanalom povezan s konvejerom isto kao i konvejer s dizalom 1 (dizalo za proces uskladištenja). Dizalo 1 ima 14 izlaznih kanala, po jedan za svaku razinu, koji su spojeni na ulazni međuspremnik (stanicu 1) pojedinog *TransferCar Controllera*. Nakon što regalno vozilo preuzme teret sa stanice 1, transportira ga na jednu od 18 stanica. Pošto jedno vozilo radi u prolazu između dva regala ono naravno opslužuje oba regala. Stoga transfer stanica za izuzimanje i odlaganje ima dva izlazna kanala, prvi je spojen na prvi ulazni kanal regala 1 dok je drugi spojen na regal 2. Navigacijom kroz izbornik *TranferCar Controllera* (tab *transfer station – view dataset – send to*) odabire se slanje tereta s transfer stanice prema vrijednosti labele regal. To znači da će teret koji ima vrijednost 1 labele regal izaći iz atoma transfer stanica kroz prvi izlazni kanal, tj. završiti će u regalu 1.



Slika 38. Parametri transfer stanice

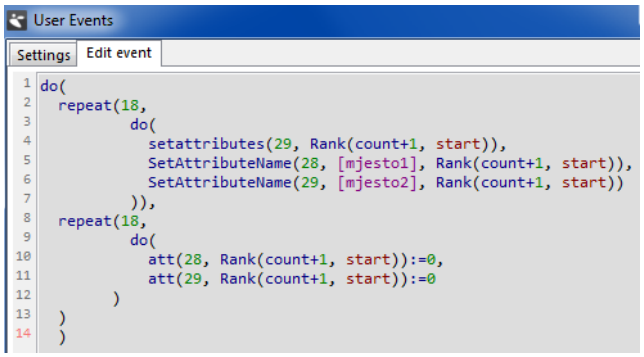
Nakon ovoga je ostvaren jednostruki radni ciklus. Kako bi ostvarili dvostruki ciklus mora se ostvariti veza između izlaznih kanala regala i ulaznih kanala stanica. Ovdje se javlja problem gdje regal izbacuje sve terete istovremeno na otvorene izlazne kanale. Zatim je potrebno odabrati za izuzimanje tereta onu stanicu koja već ima nešto uskladišteno jer se teret u drugom ciklusu ne smije uzeti s one stanice tj. s onog skladišnog mjesta koje je prazno. Da bi se to moglo učiniti potrebno je nešto što će bilježiti status te stanice. Ako je stanica uskladištila teret u regal 1 neka se bilježi da je mjesto u regalu 1 zauzeto, ako je uskladištila teret u regal 2 da je mjesto u regalu 2 zauzeto, te ako je uskladištila teret u oba regala da su oba mjesta zauzeta. Navedeni problem je riješen korištenjem atributa atoma.

Svaki atom sadrži atribute i oni se mogu opisati kao svojstva atoma koja pohranjuju varijable ili 4DScript izraze pojedinog atoma. Atributi mogu sadržavati četiri vrste informacija: vrijednosti, tekst, 4DScript izraze te reference atoma. Podatom transfer stanica (TS) ima 27 različitih atributa. Odlučeno je stvoriti nova dva atributa imena mjesto1 i mjesto2 kako je prikazano na slici 39.



Slika 39. Atom Editor

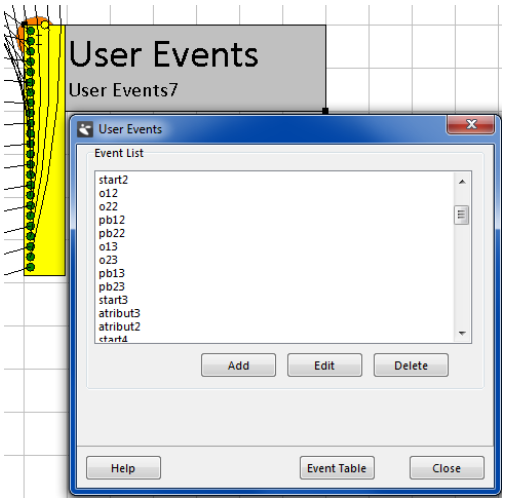
Mjesto1 i 2 označavaju stanje na skladišnoj lokaciji regala 1 i 2. Ako je vrijednost atributa mjesto1 ili 2 jednaka nuli to znači da ništa nije uskladišteno na toj lokaciji, dok vrijednost atributa jedan znači da je lokacija zauzeta. Kodovi koji stvaraju nove atribute, dodijeljuju im ime i vrijednost su prikazani slijedećim kodovima (slika 40):



Slika 40. Definiranje atributa

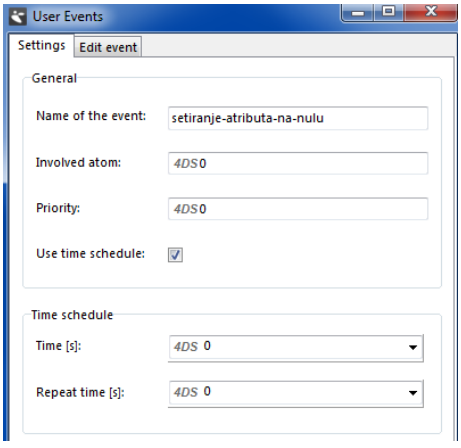
Funkcija SetAttributes mijenja broj atributa s 27 na 29 atributa. Potrebno je još definirati ta dva nova atributa imenom i vrijednošću. SetAttributeName dodijeljuje ime, dok funckija Att vraća sadržaj referenciranog atributa ali se u ovom slučaju namješta njegova vrijednost pomoću sintakse := 0. Funkcija Repeat se koristi kako bi se 18 puta izvršili ti kodovi dakle na svakoj *Pick and Place* stanici. Kodovi su zapisani u jednom događaju atoma *UserEvents*.

Atom *UserEvents* se koristi za kreiranje korisničkih događaja. Događaj je zapravo neki 4DScript kod koji se izvršava u određeno vrijeme. Događaj se izvršava prema nekom definiranom vremenskom rasporedu, jednom ili opetovano, ili nekom pobudom (eng. *trigger*) tj. pozivanjem događaja upisivanjem imena događaja u nekoj drugoj skripti.



Slika 41. Atom UserEvents

Za slučaj novih atributa stvoreni su događaji koji ih kreiraju i setiraju na nulu prema vremenskom rasporedu odnosno svaki puta kada se pokrene simulacija, točnije rečeno kada je vrijednost parametra vrijeme jednaka nuli. Potrebno ih je svaki puta setirati na nulu jer u suprotnom pri ponovnom pokretanju simulacije zadržale bi se vrijednosti atributa iz prethodne simulacije. Atom *UserEvents* ima samo ulazne kanale koji se spajaju na one atome na koje se želi utjecati. U ovom slučaju nije bilo potrebno spajati kanale jer u kodu postoje reference na transfer stanice. Drugi pristup ovom problemu je kreirati i definirati te atribute i nakon toga napraviti novi atom s tim karakteristikama.



Slika 42. Događaj u UserEventsu

Nakon definiranja atributa potrebno je osmisliti način na koji će se vrijednost tih atributa mijenjati tokom rada. Princip rada je slijedeći: kada teret ide na skladištenje, ulazi u stanicu i odmah izlazi iz nje odlazeći u regal. U trenutku kada teret izlazi iz stanice napraviti će se promjena atributa mjesto iz nula u jedan. U povratnom ciklusu kada teret dolazi u stanicu iz regala i izlazi iz stanice na regalno vozilo potrebno je vratiti vrijednost atributa mjesto na nulu jer je regalno mjesto prazno. Kako se oba slučaja događaju kada teret izlazi iz stanice (*Trigger on exit*) potrebno je uvesti jednu globalnu varijablu i dodati novu labelu na svaki teret kako bi se napravila diferencijacija između dva slučaja. Globalna varijabla imena ciklus ima dva stanja: jedan i nula. Kada teret izađe iz stanice 1 jer ide na uskladištenje, vrijednost ciklusa se namješta na jedan. Kada teret izađe iz stanice za izuzimanje i odlaganje prvi dio ciklusa je završen i vrijednost varijable ciklus je nula. Dakle dok je ciklus =1 atributi se mogu setirati na jedinicu, ako nije ne mogu jer se radi o izuzimanju tereta. Pri izuzimanju tereti koji dolaze iz regala imaju labelu imena izlaz1 ili izlaz2, ovisno iz kojeg regala dolaze, čija je vrijednost jedan. Ako tereti imaju tu labelu vrijednost atributa mjesto se mijenja u nulu. Ovaj princip je ostvaren pomoću ugnježđenih if funkcija.

```
if(ciklus=1, if(i.regal=1, att(28,c):=1, if(i.regal=2, att(29,c):=1))),
if(i.izlaz1=1, att(28,c):=0, if(i.izlaz2=1, att(29,c):=0)),
```

Nakon što su stvoreni preduvjeti za izabiranje one stanice koja ima nešto uskladišteno potrebno je pobrojiti stanice koje imaju vrijednost atributa jednak jedan i od tih stanica slučajno izabrati jednu. Nakon toga se mora spojiti izlazni kanal odgovarajućeg regala s ulaznim kanalom jedne stanice. Brojanje stanica jednog *TransferCar* atoma se čini pomoću funkcije CountMatch. Ona ima tri argumenta, prvi označava koliko puta se moraju usporediti vrijednosti izraza drugog i trećeg argumenta. Rezultat funkcije je broj podudaranja posljednja dva argumenta.

```
countmatch(18, Or(att(28,Rank(count+1, start))=1, att(29,Rank(count+1, start))=1), 1)
```

Drugi argument sadrži funkciju Or (ili) koja provjerava je li atribut 28 jednak 1 i je li atribut 29 jednak 1. Ako bilo koji atribut zadovoljava jednakost rezultat funkcije Or je jedinica. Konačno, CountMatch 18 puta provjerava koliko puta je vrijednost argumenta dva jednaka jedinici tj. trećem argumentu. Primjerice ako je deset skladišnih lokacija u jednoj razini zauzeto, rezultat navedene funkcije će biti deset.

Od tih deset potrebno je slučajno izabrati jednu, što se radi umetanjem prethodno napisane funkcije u funkciju duniform. A kako bi tu vrijednost mogli pozivati u daljnjim linijama koda

jedne skripte spremiti ćemo ju kao lokalnu varijablu. Lokalna varijabla je dostupna samo u skripti u kojoj je definirana i stvara se funkcijom var.

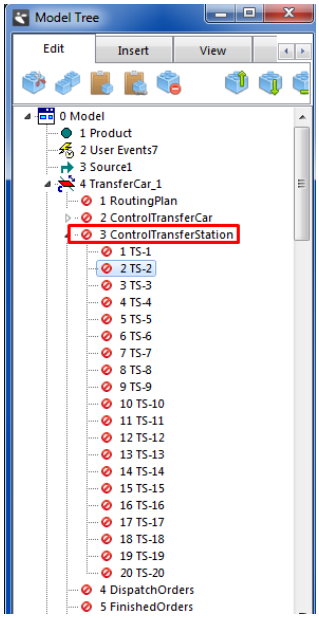
```
var([bs], vbValue, duniform(1, countmatch(18, Or(att(28,Rank(count+1, start))=1, att(29,Rank(count+1, start))=1), 1))),
```

Dakle varijabla bs predstavlja broj stanica u jednoj razini koje imaju nešto uskladišteno. Ako se slučajno odabere sedma stanica od njih deset, kako je navedeno u primjeru, to ne znači da je i u nizu od 18 stanica ta na sedmom mjestu. Razmotrimo to na slijedećem primjeru.

Matrica A prikazuje stanja atributa stanica gdje vrijednost 1 označava da je barem jedan od atributa pojedine stanice jednak 1. Matrica deset puta sadrži vrijednost jedan i veličine je 1 x 18. U nizu od 18 stanica sedma stanica koja ima vrijednost atributa 1 je u stvari na 12. mjestu u rangu stanica počevši od prve do zadnje stanice za izuzimanje i odlaganje.

$$A = [0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]_{1x18}$$

Pošto postoji 20 transfer stanica i jer u hijerarhiji podatoma prva stanica za izuzimanje i odlaganje je na drugom mjestu, kako je prikazano na slici 14, biti će potrebno spojiti izlazni kanal regala sa 13. transfer stanicom. Zbog toga u CountMatch kodu piše count+1.



Slika 43. Hijerarhija atoma

Još se može spomenuti kako se transfer stanice referenciraju pomoću varijable start koja je u biti referenca na podatom *ControlTransferStation* kako je naglašeno na slici 43.

Funkcija pomoću koje je određen redni broj stanice se zove LoopUntil. Prvo će se dati konkretni kod nakon kojeg slijedi objašnjenje.

```
LoopUntil(brojac=bs,
  do(
    if(Or(att(28,Rank(count+1, start))=1, att(29,Rank(count+1, start))=1),brojac:=brojac+1),
    Count
  ),
  18
)
```

Prvi argument je izraz koji se procjenjuje: brojac=bs. Brojač je lokalna varijabla s početnom vrijednošću nula. Dokle god taj izraz ne postane istinit petlja će se nanovo pokretati i izvršavati drugi argument. U drugom argumentu se brojaču povećava vrijednost za jedan ako je barem jedan od atributa pojedine stanice jednak 1. Brojač Count broji koliko puta je petlja pokrenuta. Treći argument, broj 18, određuje maksimalni broj petlji i služi kao osigurač od ulaska u beskonačnu petlju. Rezultat funkcije je vrijednost drugog argumenta iz zadnje petlje. To će u ovom slučaju biti vrijednost brojača Count, konkretnije rečeno transfer stanica pod rednim brojem 12 iz primjera. Ta vrijednost se sprema u lokalnu varijablu rbs, što znači redni broj stanice.

Kako bi konačno ostvarili dvostruki ciklus mora se spojiti izlazni kanal regala i ulazni kanal odabrane stanice. Međutim još uvijek je ostao problem gdje regal izbacuje sve terete istovremeno na otvorene izlazne kanale. Prvi korak u rješavanju toga je princip spajanja kanala prema kojem će svaki regal imati po 14 izlaznih kanala, jedan za svaku razinu. Jedan kanal će se svaki puta u drugom dijelu ciklusa prespajati na drugu stanicu. Kod koji to osigurava je slijedeći:

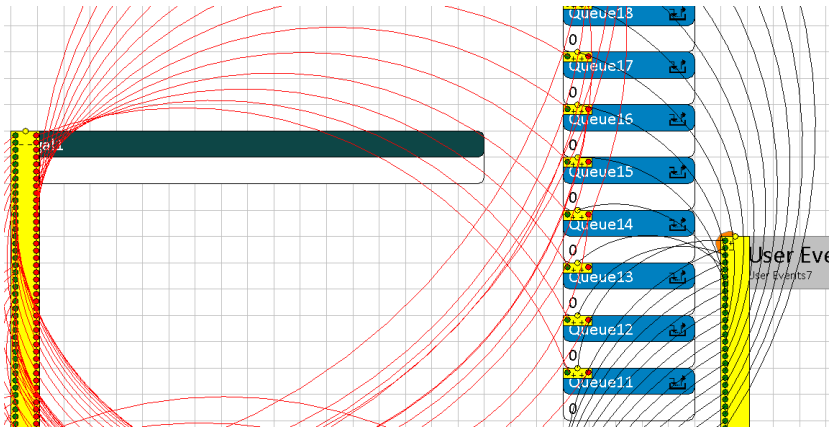
```
1  if(&(ciklus=1, Time>t1),if(&(att(28,Rank(brojstanice+1, start))=1,att(29,Rank(brojstanice+1, start))=1),
2      connect(1, case(duniform(1,2), do(var([donji],vbValue,1),AtomByName([Queue11],model)),
   do(var([gornji],vbValue,1),AtomByName([Queue21],model))), 1, Rank(brojstanice+1, start)),
3      if(att(28,Rank(brojstanice+1, start))=1, do(connect(1,AtomByName([Queue11],model),1,
   Rank(brojstanice+1, start)),o1), do(connect(1, AtomByName([Queue21],model), 1,Rank(brojstanice+1,
   start)),o2))
    )),
```

Prva sekcija koda znači: ako je ciklus=1 i ako su oba atributa odabrane stanice jednaka 1; (sekcija 2) slučajno odaberi regal1 ili regal2 i spoji ga na stanicu; (sekcija 3) u protivnom provjeri je li atribut 28 jednak 1 i ako je, spoji regal1 sa stanicom u protivnom spoji regal2 sa stanicom.

Spajanje regala na stanicu je posredno preko dodatnih atoma koji služe za regulaciju izlazaka tereta iz regala. I u kodu je vidljivo da postoje dodatni atomi imena *Queue*. Razlog tome je

naveden, a to je da kada god regalno vozilo izuzme teret sa stanice, regal ponovno pošalje teret na tu stanicu i tako bude dokle god se regal ne isprazni. Zato je potrebno na neki način blokirati kanal koji spaja te atome tj. ograničiti količinu poslanih tereta na jedan. Korištenje funkcija CloseIc i OpenIc na atomu skladišta ne funkcionira, koji zatvaraju odnosno otvaraju pojedine kanale atoma, zato što tereti prolaze kroz kanal bez obzira što je izlazni kanal skladišta zatvoren.

Taj problem je rješen tako što je svaki izlazni kanal regala spojen na atom red (eng. *Queue*) koji se pak prespaja na pojedine stanice kako je prikazano na slici 44.



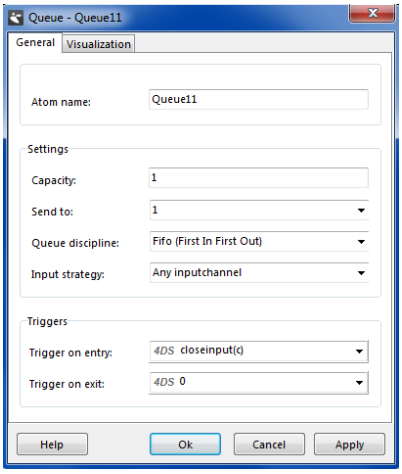
Slika 44. Spojeni kanali

Red se koristi za privremeno spremanje tereta koji u redu čekaju dok ih slijedeći atom ne primi. Za svaku razinu jednog regala postoji jedan red. *Queue11* označava da je spojen na regal1, prva razina tj. prvi izlazni kanal. Kapacitet reda je namješten na jedan, što znači da se u atomu može nalaziti samo jedan teret. Na početku simulacije je blokiran ulaz u red što je učinjeno kreiranjem događaju u *UserEventsu*. Događaj se pokreće na početku simulacije i blokira ulaz funkcijom CloseInput tako da nijedan teret iz regala ne može ući u red.

Nakon što se izvrše linije koda koje odabiru i spajaju odabrani *Queue* atom sa stanicom, potrebno je propustiti samo jedan teret. Kako bi taj jedan teret ušao u red koji je početno blokiran napravljeni su događaji za svaki atom red koji otvara ulaze funkcijom OpenInput. Ime tih događaja je o*xy*, gdje *x* predstavlja regal 1 ili 2, a *y* predstavlja razinu. Oni se pozivaju slijedećim kodom:

```
if(&(time>t1,ciklus=1),if(regal1=1, o11, if(regal2=1,o21)))
```

Nakon što se ulaz u red otvori i teret uđe, u *Trigger on entry* atoma red je upisana funkcija CloseInput koja ponovno zatvara ulaz kako je prikazano na slici 45.



Slika 45. Atom Queue

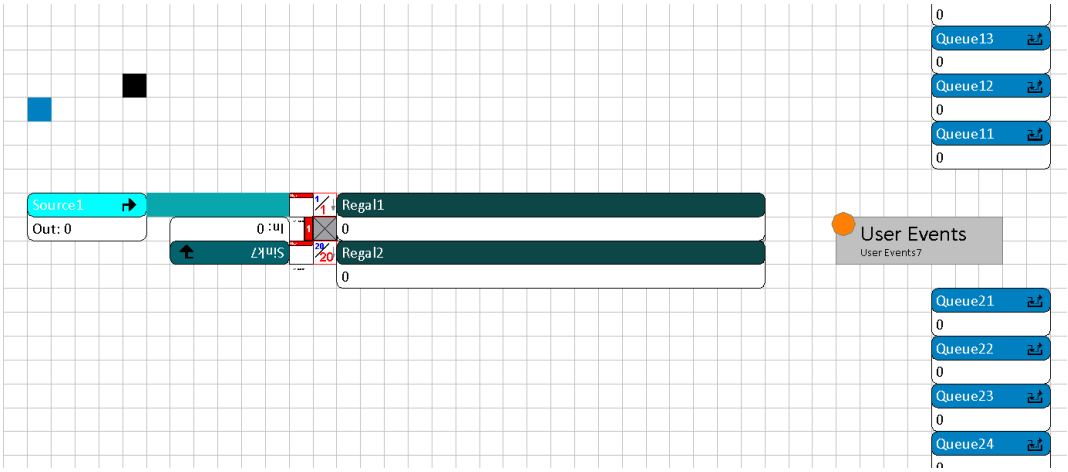
Teret iz reda odlazi u stanicu. Preostali tok materijala je slijedeći: regalno vozilo preuzima teret sa stanice i transportira je na zadnju dvadesetu stanicu. S te stanice drugo dizalo preuzima teret, spušta se na početnu razinu i odlaže terete u atom *Sink* koji je kraj procesa. U njemu tereti napuštaju simulacijski model (izbrisani su). Time je konačno ostvaren dvostruki radni ciklus ovog skladišnog sustava.

Treba još objasniti ulogu vremenske varijable t1 iz prethodnog koda. Ona odgađa ostvarenje procesa izuzimanja kako bi se u simulaciji skladište prvo napunilo određenim brojem tereta. Dakle ako uvjet time>t1 nije postignut, pri čemu je time proteklo vrijeme simulacije, nemoj spajati kanale tj. nemoj otvarati ulaz u red. Konačni prikaz koda koji se izvršava u skripti parametra *Trigger on exit* svake stanice za izuzimanje i odlaganje je prikazan na slici 46.

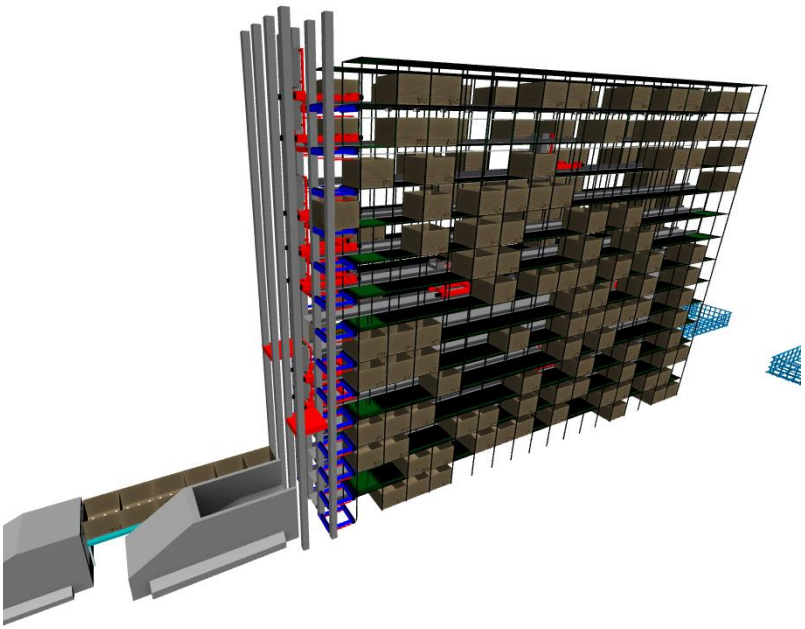


Slika 46. Konačni kod

Model u 2D i 3D pogledu izgleda kako je prikazano na slikama 47, 48 i 49.



Slika 47. 2D prikaz modela



Slika 48. 3D prikaz modela I



Slika 49. 3D prikaz modela II

7. REZULTATI SIMULACIJE

Glavni nedostatak analitičkih modela je što ne mogu evaluirati vrlo složene sustave. Zbog toga se uvijek rade pojednostavljenja i pretpostavke kako bi se modelirao realni sustav. Stoga su njihovi rezultati aproksimacija. Međutim ignorirajući neke manje bitne razine detalja stvarnog sustava dovodi do bržih rješenja čime se može evaluirati puno veći broj varijanti nego što je to moguće simulacijom. Stoga je uobičajeno prvo analitičkim modelima izabrati nekoliko najperspektivnijih varijanti sustava nakon čega se metodom simulacije s većom razinom detalja procjenjuje i odabire optimalna [3]. Naime, simulacija se koristi u kasnijoj fazi projektiranja jer u takvom modelu nije lako mijenjati fizičku konfiguraciju sustava i metode upravljanja stoga se njome ne može otkriti koja varijanta je blizu nekom optimumu [7]. Zbog toga je ovaj simulacijski model napravljen za jednu konfiguraciju regala, gdje je računat protok pri različitim profilima brzina i za različite metode skladištenja u svrhu povećanja protoka.

Kako je već spomenuto, u Lerher i ostali (2015) [22] je prezentiran model vremena vožnje koji izračunava prosječno vrijeme jednostrukog i dvostrukog radnog ciklusa zasebno dizala i zasebno regalnog vozila. Međutim, takvi analitički modeli vremena vožnje pretpostavljaju međuspremnike beskonačnog kapaciteta. Jedna od prednosti simulacijskog modela jest što on ima međuspremnike konačnog kapaciteta stoga uzima u obzir čekanje dizala na vozilo i obrnuto tj. blokiranje dizala i vozila zbog popunjenog međuspremnika. Kartnig i Oser (2014) [35] pomoću modela reda čekanja računaju granični protok SBS/RS-a uzimajući u obzir međuspremnike konačnih kapaciteta između dizala i vozila kako bi uvidjeli utjecaj blokiranja. Računajući vremena čekanja aproksimiraju čekanje zbog blokade. Stoga je ova simulacija kombinacija modela vremena vožnje, koji izračunava prosječno vrijeme jednostrukog i dvostrukog radnog ciklusa i modela reda čekanja gdje se mogu računati vremena čekanja. Dodatno, simulacija nudi mogućnost optimizacije sustava, u ovom slučaju promjenom metoda skladištenja.

Regal je dužine 18 metara, a visine 7,8 metara gdje visina svake police iznosi 0,6m. Dizala rade po jednostrukom ciklusu jer jedno dizalo (dizalo 1) služi za operacije uskladištenja, a drugo (dizalo 2) za operacije izuzimanja.

Simulacijski parametri koji su bilježeni su oni pomoću kojih se mogu vrlo jednostavno izračunati najčešći pokazatelji performansi, a to su: prosječni radni ciklus i stupanj

iskorištenosti dizala i vozila. Proveden je niz simulacijskih eksperimenata gdje su varirane metode odlaganja, profili brzina dizala i vozila te vrijeme međudolazaka tereta tj. naloga za uskladištenje. U obzir je uzet slučaj tri različite metode odlaganja: slučajni raspored odlaganja, kako je već spomenuto u poglavlju o izgradnji modela, i dvije varijante metode odlaganja po zonama. Profili brzina i pripadnih akceleracijskih veličina su dani u tablici 1.

Tablica 1. Profili brzina i akceleracija

	Veličine regalnih vozila			Veličine dizala		
	$v_x[m/s]$	$a_x^+[m/s^2]$	$a_x^-[m/s^2]$	$v_y[m/s]$	$a_y^+[m/s^2]$	$a_y^-[m/s^2]$
vp1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
vp2	1,5	1,5	1,5	2	1,5	1,5
vp3	3	2	2	2	1,5	1,5
vp4	3	2	2	3	2	2
vp5	4	3	3	4	5	5

Prvo su provedeni eksprimenti za metodu slučajnog odlaganja s pet profila brzina kako bi se izračunala „idealna“ vremena radnih ciklusa. Pod terminom idealna vremena se misli na slučaj kada se radni ciklus napravi bez ikakvih smetnji, dakle bez ikakvog blokiranja i sl. Takvo idealno vrijeme podrazumijevaju mnogi analitički modeli naročito oni s modelima vremena vožnje. Rezultati su dani u tablici 2.

Tablica 2. Idealna vremena radnih ciklusa

	$T(DC)_{RV}$ [s]	$T(SC)_D$ [s]
vp1	35,9	10
vp2	35,9	9,28
vp3	28,42	9,28
vp4	28,42	8,16
vp5	25,67	6,38

pri čemu je $T(DC)_{RV}$ prosječno vrijeme dvostrukog radnog ciklusa regalnog vozila, a $T(SC)_D$ prosječno vrijeme jednostrukog radnog ciklusa dizala.

Na temelju dobivenih podataka može se izračunati maksimalni idealni protok, koji je obrnuto proporcionalan vremenu radnog ciklusa, prema jednadžbama (1) i (2). U ovom slučaju on označava broj izuzetih jediničnih tereta po satu [JT/h].

$$\lambda_{RV} = \frac{3600}{T(DC)_{RV}} * m \qquad \textbf{(1)}$$

$$\lambda_D = \frac{3600}{T(SC)_D} \quad \textbf{(2)}$$

- pri čemu je λ_{RV} protok regalnih vozila, λ_D protok dizala, a *m* je broj razina tj. broj vozila

Maksimalni idealni protok se računa na temelju idealnog ciklusa kako se to radi kod analitičkih modela. Rezultati su dani u tablici 3.

Tablica 3. Protoci sustava

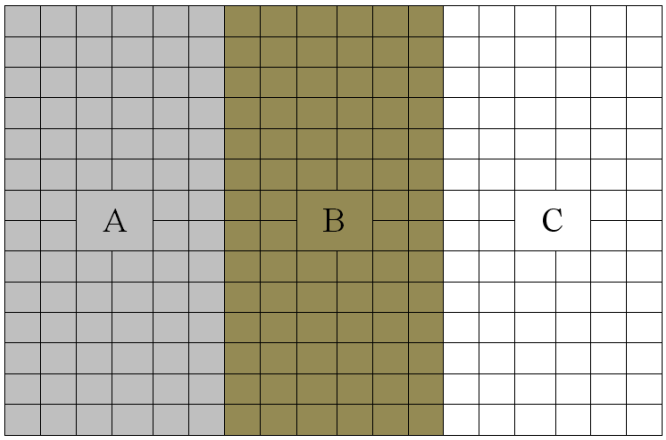
	λ_{RV} [JT/h]	λ_D [JT/h]	λ_{max}[JT/h]	E(%)	% blokade
vp1	1403,9	360	348	3,33	2,57
vp2	1403,9	387,9	373,3	3,77	3,65
vp3	1773,4	387,9	380,2	1,99	1,75
vp4	1773,4	441,2	428,4	2,90	2,63
vp5	1963,4	564,3	522,2	7,45	3,78

$$E(\%) = \frac{\lambda_D - \lambda_{max}}{\lambda_D} * 100 \quad \textbf{(3)}$$

Očito da je dizalo usko grlo sustava jer mu je maksimalni idealni protok manji od protoka regalnih vozila, stoga ono određuje maksimalnu protočnost sustava. Iako je ciklus dizala manji od ciklusa vozila, što bi značilo veći protok dizala naspram jednog vozila, treba uzeti u obzir kako postoji 14 regalnih vozila stoga se protok jednog vozila množi s 14. Kako se često utjecaj blokiranja zanemaruje jer se često pretpostave međuspremnici beskonačnog kapaciteta, bilo bi poželjno otkriti kolika je ta greška, odnosno koliko je idealni maksimalni protok analitičkih modela precijenjen. Greška E(%) je izračunata prema jednadžbi (3). Stoga su provedeni eksperimenti kako bi se utvrdio stvarni maksimalni protok λ_{max} koji se pojavio u simulaciji pri najvećem opterećenju sustava, tj. pri maksimalnoj iskorištenosti dizala, gdje je vrijeme međudolazaka tereta manje od ciklusa dizala (uzeto je vrijeme od 5 s). Rezultati su dati u tablici 3. Vidljivo je da je postignuti maksimalni protok redovito manji od idealnoga i to u iznosima od 2% do 7,5%, što je ujedno greška modela vremena vožnje u odnosu na simulacijski model. To je zbog čekanja dizala 1 na vozila i, u ovom slučaju u puno manjoj mjeri, čekanja vozila na dizalo 2. Ako se pogleda postotak vremena blokade dizala 1 očito je da se tu u najvećoj mjeri gubi na protoku. Dodatno, razlika između S/R vozila s prvim

profilom brzine i onih sa zadnjim profilom brzine pokazuju kako je moguće ostvariti povećanje protoka za 33,36% (s 348 na 522 JT/h).

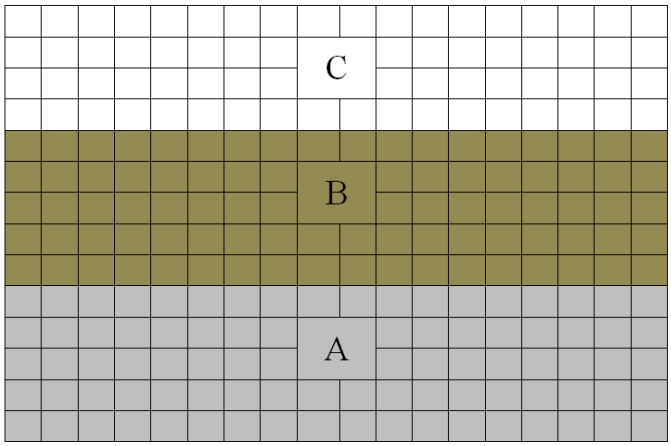
Optimizacija sustava sa svrhom povećanja protoka može se napraviti zamjenom metode slučajnog odlaganja s metodom odlaganja po zonama (eng. *class-based storage*). Svi artikli su podijeljeni u tri grupe (nazivaju se i klase), kako se najčešće i radi u praksi (ABC analiza). Grupe se razlikuju na temelju nivoa aktivnosti tj. na temelju protoka artikala iz te grupe. U ovom slučaju je odabrano da grupa A ima protok od 60% sveukupnih naloga za skladištenje i izuzimanje, grupa B 30% i grupa C 10%. Zone odlaganja u prvom slučaju su jednakog kapaciteta, a njihov raspored je prikazan na slici 50.



Slika 50. Horizontalne zone

U ovom slučaju prosječno vrijeme radnog ciklusa regalnog vozila iznosi 31,33 s što je 12,7% manje u odnosu na slučajno skladištenje (31,33 s naspram 35,9 s). Prosječni ciklus dizala je 10 s što je jednako kao i kod slučajnog skladištenja, ali i očekivano jer je po visini još uvijek potpuno slučajan odabir između prve i zadnje razine. Protok kod slučajnog skladištenja je jednak kao i protok pri ovim horizontalnim zonama jer su dizala uska grla i oni prvi utječu na protok bez obzira na smanjenje ciklusa vozila. Pošto ovaj slučaj ne može povećati protok napravljen je samo jedan eksperiment s prvim profilom brzina.

Poboljšanje protoka se može očekivati u vertikalnom zoniranju regala. Varijanta koja je odabrana je ilustrirana na slici 51.



Slika 51. Vertikalne zone

Protok po zonama je jednak kao i u prethodnom slučaju u omjeru 60:30:10. Zona A zauzima prvih 5 razina, zona B drugih 5 razina te zona C najviše 4 razine za artikle koji se rijetko zatražuju kako bi se smanjio put dizala. Ovakvom formom se očekuje smanjenje vremena radnog ciklusa dizala, a time povećanjem protoka dizala što za posljedicu ima i povećanje protoka cijelog sustava. Za ovaj slučaj su napravljeni eksperimenti za pet različitih profila brzina, a rezultati vremena ciklusa su u tablici 4.

Tablica 4. Vrijeme radnih ciklusa pri vertikalnim zonama

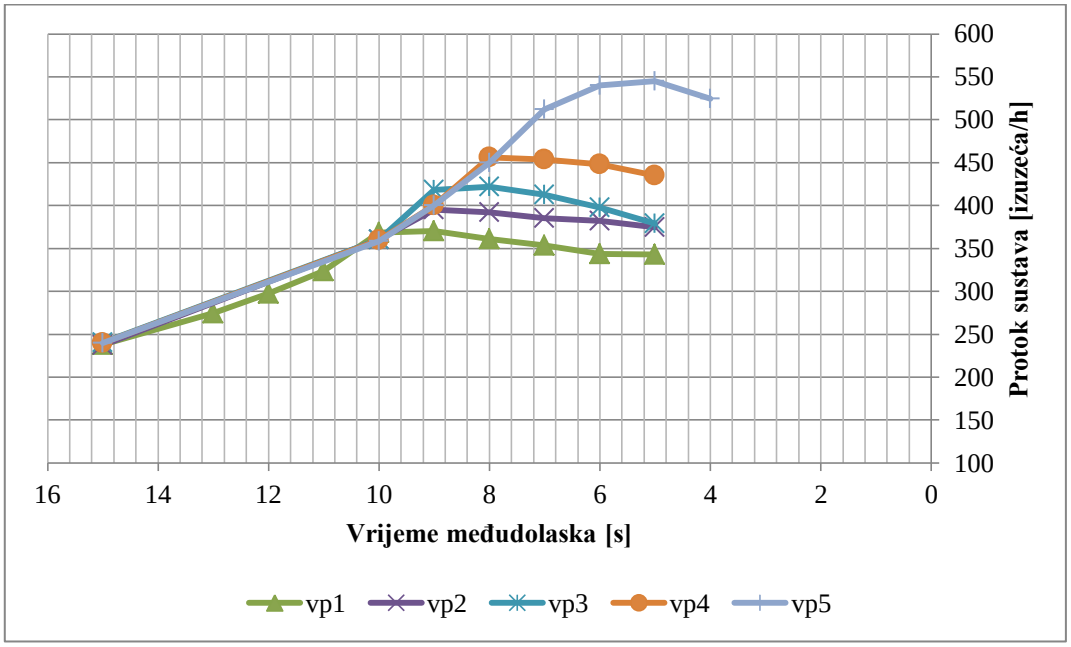
	$T(DC)_{RV}{}'$ [s]	$T(SC)_D{}'$ [s]	$T(SC)_D$ [s]	E(%)
vp1	35,9	8,28	10	17,20
vp2	35,9	7,93	9,28	14,55
vp3	28,42	7,93	9,28	14,55
vp4	28,42	7,09	8,16	13,11
vp5	25,67	5,66	6,38	11,29

Vrijeme dvostrukog ciklusa vozila je za vp1 i vp2 te vp3 i vp4 jednak jer je nepromijenjena brzina vozila. Isti je slučaj kod vp2 i vp3 za ciklus dizala. Vertikalnim zoniranjem smanjeno je vrijeme ciklusa dizala u iznosima od 11% do 17%. To smanjenje vremena ciklusa povećava protok sustava od 4% do 10% u odnosu na sustav sa slučajnim skladištenjem. Preostaje izračunati idealni protok i usporediti ga s maksimalnim ostvarenim protokom iz simulacijskog modela, kako je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Protoci sustava pri vertikalnim zonama

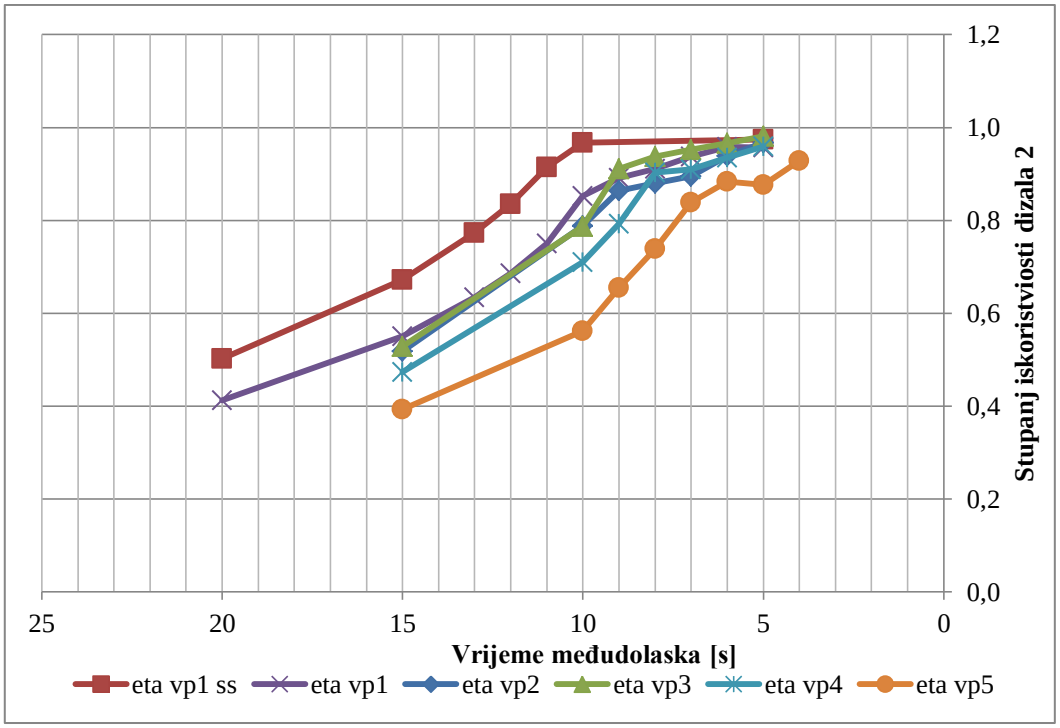
	λ_{RV}' [JT/h]	λ_D' [JT/h]	λ_{max}[JT/h]	E(%)	% blokade
vp1	1403,9	434,8	370,32	14,83	9,93
vp2	1403,9	454,0	395,38	12,91	13,29
vp3	1773,4	454,0	421,78	7,10	6,19
vp4	1773,4	507,8	456,28	10,15	9,28
vp5	1963,4	636,0	545,18	14,28	12,35

Protoci sustava za vertikalne zone i različita vremena međudolazaka i profila brzina su prikazani na slici 52.



Slika 52. Protok sustava za vertikalne zone

Na temelju dobivenih rezultata izabrani su najveći ostvareni protoci za svaki slučaj i uspoređeni s idealnim kako je prikazano u tablici 5. Može se uočiti kako su razlike veće nego kod metode sa slučajnim odlaganjem. Razlog leži u činjenici što je dizalo 1 puno veći postotak vremena blokirano zato što češće odlaže na iste razine pa dizalo mora čekati da vozilo završi s ciklusom i oslobodi međuspremnik preuzimanjem tereta. Nadalje, koliki postotak vremena je dizalo 1 blokirano toliko je dizalo 2 slobodno. Zbog toga dizalo 2 nikad nema iskoristivost 1 kako je prikazano na slici 53. Slično kao i kod metode slučajnog skladištenja, ostvareno povaćenje protoka primjenom bržih S/R vozila iznosi 32% (s 370 na 545 JT/h).



Slika 53. Stupanj iskoristivosti dizala za vertikalne zone

Vidimo da je iskoristivost (eta) dizala 2 manja i kasnije postiže maksimum što ono ima veću brzinu i što je dizalo 1 više blokirano.

8. ZAKLJUČAK

Tradicionalni automatizirani skladišni sustavi s dizalicama zahtjevaju visoke investicijske troškove te su relativno nefleksibilni. Zbog toga je bitno dobro projektirati sustav, kako bi se izbjegla pojava uskih grla ili pak prekapacitiranosti uslijed promjene eksploatacijskih uvjeta, koja su u mnogim okruženjima vrlo vjerojatna. Odgovor na ovaj problem se pokušava nadići primjenom automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima koja su malo fleksibilnija zbog mogućnosti promjene broja regalnih vozila i dizala. Nadalje, ovi sustavi mogu ponuditi veće stope protoka za komisioniranje malih tereta nego što to mogu učiniti *mini-load* AS/RS izvedbe.

Oblikovanje ovakvih sustava se čini razmatranjem različitih izvedbi sustava, poput *tier-captive* ili *tier-to-tier* izvedbi, traženjem optimalne fizičke konfiguracije (strukture regala, kinematičke veličine S/R vozila i sl.) te uspostavom razlitičih metoda upravljanja. Istraživanje tih utjecajnih faktora se čini analitičkim ili simulacijskim modelima.

U ovom radu je za zadanu konfiguraciju regala i principa rada napravljen simulacijski model *tier-captive* SBS/RS-a. Istraživao se utjecaj različitih profila brzina dizala i regalnih vozila, različitih vremena međudolazaka i metoda skladištenja na prosječna vremena radnih ciklusa S/R vozila, njihov stupanj iskorištenosti te protok samog sustava. Istraživanje različitih profila brzina S/R vozila može pomoći u odluci o tome kakve kinematičke karakteristike trebaju imati dizala i regalna vozila za potrebne uvjete eksploatacije. Rezultati simulacije pri metodi slučajnog skladištenja pokazuju razliku u protoku od 33% od najsporijeg profila brzina do najbržeg. Jednako tome, povećanje protoka kod metode zonskog odlaganja za različite profile brzina iznosi 32%.

Jedna od prednosti simulacijskog modela jest što on uzima u obzir čekanje dizala na vozilo i obrnuto tj. blokiranje dizala i vozila zbog popunjenog međuspremnika. Kako bi se istražio utjecaj blokiranja uspoređeni su rezultati idealnog protoka (kada ne postoji blokiranje) i realnog protoka kada se pojavljuje blokiranje. Za slučaj nasumičnog skladištenja razlika između protoka dobivenog po principu modela vremena vožnje i simulacijskog modela iznosi od 2% do 7,5%. Za toliku razliku je uglavnom odgovorno čekanje dizala 1 na regalno vozilo.

Optimizacija sustava s ciljem poboljšanja protoka je pokušana promjenom metode skladištenja. Prvi pokušaj je bio uspostavom horizontalnih zona dijeljenjem artikala u tri grupe prema količini protoka. On je rezultirao smanjenjenjem prosječnog dvostrukog radnog

ciklusa regalnog vozila od 12,7% u odnosu na metodu slučajnog skladištenja, međutim prosječno vrijeme radnog ciklusa dizala nije smanjeno stoga je protok ostao jednak, pošto je dizalo usko grlo sustava.

Drugi pokušaj je bio vertikalnim zoniranjem regala. On nije smanjio prosječno vrijeme radnog ciklusa regalnog vozila, međutim smanjio je prosječno vrijeme ciklusa dizala. Ispitivanje je vršeno za svih pet profila brzina te se smanjenje ciklusa dizala kreće od 11% do 17% što uzrokuje povećanje protoka u rasponu od 4% do 10%. Ovdje je dizalo 1 puno veći postotak vremena blokirano zato što češće odlaže terete na iste razine pa dizalo mora čekati da vozilo završi s ciklusom i oslobodi međuspremnik preuzimanjem tereta. Nadalje, koliki postotak vremena je dizalo 1 blokirano toliko je dizalo 2 slobodno, zbog čega ono nikad nema iskoristivost 1.

Pošto pravi simulacijski modeli zahtjevaju puno vremena i vještine za razvoj, implemenataciju i validaciju, u prvim fazama projektiranja automatiziranog skladišnog sustava obavezna je uporaba analitičkih modela zbog brzine i jednostavnosti primjene, kako bi se u kratkom roku dobili inicijalni rezultati. Nakon toga je korisno imati simulacijski model gdje se mogu točnije utvrditi iznosi pokazatelja performansi, te kako bi poslije mogao poslužiti za optimizaciju sustava. Stoga projektanti na ovom području trebaju imati znanja iz oba pristupa kako bi implementacija jednog takvog sustava bila uspješna.

LITERATURA

[1] R. Manzini, M. Gamberi i A. Regattieri, »Design and Control of an AS/RS,« *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* br. 28, pp. 766-774, 2006.

[2] Rajković, Miloš i dr., »Multi-objective optimization model for double-deep automated storage and retrieval systems,« u *XXII INTERNATIONAL CONFERENCE ON "MATERIAL HANDLING, CONSTRUCTIONS AND LOGISTICS*, Beograd, 2017.

[3] X. Cai, »Performance evaluation of warehouses with automated storage and retrieval technologies,« Electronic Theses and Dissertations, 2010.

[4] http://www.mhi.org/as-rs. [Mrežno].

[5] G. Đukić, »Posebna poglavlja tehničke logistike,« Recenzirani nastavni materijal, 2017.

[6] Vasili M. R. i dr., »Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies,« u *Warehousing in the Global Supply Chain*, Springer, 2012.

[7] K. J. Roodbergen i I. F. Vis, »A survey of literature on automated storage and retrieval systems,« *European Jorunal of Operational Research,* pp. 343-362, 2009.

[8] »https://www.interlakemecalux.com/automated-storage-retrieval-systems-asrs/arsr-boxes-miniload,« [Mrežno].

[9] »https://www.daifuku-logisticssolutions.com/en/product/asrs/unitload.html,« [Mrežno].

[10] »https://www.muratec-usa.com/machinery/material-handling/asrs,« [Mrežno].

[11] »http://www.primatlogistika.hr/hr/proizvodi-i-sustavi/skladisni-sustavi/horizontalni-karusel/horizontalni-karusel,« [Mrežno].

[12] R. Frye i C. Roche, »Horizontal Carousels,« u *The Essentials of Material Handling,*

Material Handling Industry of America, 2004.

[13] »https://verticalstorageusa.com/storage-solutions/horizontal-carousels/,« [Mrežno].

[14] »http://www.primatlogistika.hr/en/products-and-systems/storage-systems/megamat-vertical-carusel/okretni-regal-megamat,« [Mrežno].

[15] Fanning, M., »Vertical Carousels,« u *The Essentials of Material Handling*, Material Handling Industry of America, 2004.

[16] E. Romaine, »Vertical Lift Modules,« u *The Essentials of Material Handling*, Material Handling Industry of America, 2004.

[17] Heragu, S. i dr., »Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems,« *International Journal of Production Research,* 2011.

[18] G. Marchet, M. Melacini, S. Perotti i E. Tappia, »Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems,« *International Journal of Production Research,* 2013.

[19] C. J. Malmborg, »Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems,« *International Journal of Production Research,* 2002.

[20] Epp, M., Performance evaluation of shuttle-based storage and retrieval systems using discrete-time queueing network models, Doktorski rad: Karlsruher Institut für Technologie, 2017.

[21] Eder, M. i Kartnig, G., »Calculation method to determine the throughput and the energy consumption of S/R shuttle systems,« u *XXII INTERNATIONAL CONFERENCE ON "MATERIAL HANDLING, CONSTRUCTIONS AND LOGISTICS*, Beograd, 2017.

[22] T. Lerher, B. Y. Ekren, G. Dukic i B. Rosi, »Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 78, pp. 1705-1725, 2015.

[23] Ning, Z. i dr., »An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system,« *Simulation Modelling Practice and Theory,* 2016.

[24] Lerher, Tone i dr., »Next generation logistics: Reinventing the warehouse by using autonomous vehicle storage and retrieval systems,« u *XXII INTERNATIONAL CONFERENCE ON "MATERIAL HANDLING, CONSTRUCTIONS AND LOGISTICS"*, Beograd, 2017.

[25] »https://www.stoecklin.com/en/intralogistik-systeme/small-parts-warehouse,« [Mrežno].

[26] »https://www.gebhardt-foerdertechnik.de/en/products/warehouse-technology/shuttle-systems/totes-and-cartons-storebiter-300-mls/,« [Mrežno].

[27] »https://www.automha.it/en/autosatmover/,« [Mrežno].

[28] Tappia, E. i dr., »Modeling, Analysis, and Design Insights for Shuttle-Based Compact Storage Systems,« *Transportation Science,* 2016.

[29] Borovinšek, M. i dr., »Multi-objective optimisation model of shuttle-based storage and retrieval system,« *Transport,* 2016.

[30] D. Lisjak, »Informatički menadžment,« Nastavni materijal, 2018.

[31] »http://e-student.fpz.hr/Predmeti/O/Osnove_prometnog_inzenjerstva/Materijali/OPI_PREDAVANJE_2012.pdf,« [Mrežno].

[32] Lerher, T., »Travel time model for double-deep shuttle-based storage and retrieval systems,« *International Journal of Production Research,* 2015.

[33] Lerher, T., Throughput and Energy Related Performance Calculations for Shuttle Based Storage and Retrieval Systems, New York: Nova Science Publishers, 2016.

[34] Liu, Tian i dr., »Travel time analysis of the dual command cycle in the split-platform AS/RS with I/O dwell point policy,« *Flexible Services and Manufacturing Journal,* svez. 28, pp. 442-460, 2015.

[35] Kartnig, G. i J. Oser, »Throughput analysis of S/R shuttle systems,« *Progress in Material Handling Research,* 2014.

[36] B. Zou, X. Xu, Y. Gong i R. De Koster, »Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems,« *European Journal of Operational Research*, 2016.

[37] https://www.mecalux.com.au/automated-warehouses-for-pallets/conveyor-system-for-pallets. [Mrežno].

PRILOG

I. CD-R disc