

# Analiza modela oblikovanja automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima

---

**Rodin, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:165890>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Rodin**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Goran Đukić

Student:

Filip Rodin

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc.Goranu Đukiću na pruženoj pomoći i savjetima. Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su bili neiscrpna podrška tijekom studija.

Filip Rodin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Rodin**

JMBAG: **0035224224**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza modela oblikovanja automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of design models for shuttle-based storage/retrieval systems (SB-S/RS)**

Opis zadatka:

Jedan od novijih tipova automatiziranih skladišnih sustava su sustavi s regalnim vozilima, poznatiji pod kraticom SB-S/RS. Princip rada tih sustava, odnosno kretanje robe prilikom uskladištenja i izuzimanja, događa se pomoću radnih ciklusa koji se u pravilu sastoje od vertikalnog kretanja liftovima i horizontalnog kretanja regalnim vozilima. Iz tog razloga u oblikovanju se koriste razvijeni modeli oblikovanja temeljeni na procjeni vremena tih ciklusa.

U radu je potrebno:

- Dati ukratko prikaz tipova automatiziranih skladišnih sustava.
- Prezentirati varijante izvedbi automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima.
- Prikazati odabrane modele oblikovanja (FEM norma i znanstveni članci).
- Za odabrani skup varijanti izvedbi (varirajući broj razina i duljine regala, uz isti skladišni kapacitet) usporediti rezultate odabranih modela oblikovanja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Goran Đukić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI .....	3
2.1. Osnovne izvedbe.....	3
2.1.1. Automatizirani skladišni sustavi s dizalicama unutar prolaza.....	3
2.1.1.1. Unit load .....	3
2.1.1.2. Mini load.....	5
2.1.1.3. Person on board.....	7
2.1.2. Automatizirani okretni regali i vertikalni podizni moduli .....	8
2.1.2.1. Horizontalni okretni regali.....	8
2.1.2.2. Vertikalni okretni regali .....	9
2.1.2.3. Vertikalni podizni moduli.....	11
3. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI S REGALNIM VOZILIMA .....	13
3.1. SBS/RS.....	13
3.2. Dijelovi sustava .....	14
3.2.1. Regalno vozilo .....	14
3.2.2. Dizalo(lift).....	15
3.3. Princip rada.....	16
3.4. Izvedbe automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima.....	17
3.4.1. Tier captive.....	17
3.4.2. Tier to tier configuration .....	18
3.4.3. Multi-tier captive .....	19
3.4.4. Non-aisle captive .....	19
20	
3.4.5. Kompaktni sustavi višestruke dubine .....	20
3.4.6. Multidirectional OPEX Perfect pick sustav .....	21
4. MODELI OBLIKOVANJA AUTOMATIZIRANIH SKLADIŠNIH SUSTAVA S REGALNIM VOZILIMA .....	23
4.1. Jednostruki radni ciklus automatiziranog skladišnog sustava s regalnim vozilima ...	23
27	
UKUPNI JEDNOSTRUKI RADNI CIKLUS.....	27
4.2. Proračun jednostrukog ciklusa .....	27
4.3. Dvostruki radni ciklus automatiziranog skladišnog sustava s regalnim vozilima.....	29
4.4. Proračun dvostrukog ciklusa .....	32

---

5. USPOREDBA APROKSIMACIJSKOG MODELA SA SIMULACIJSKIM I ANALITIČKIM MODELOM OBLIKOVANJA AUTOMATIZIRANIH SKLADIŠNIH SUSTAVA S REGALNIM VOZILIMA .....	36
5.1. Simulacijski model oblikovanja .....	36
5.2. Usporedba aproksimacijskog i simulacijskog modela .....	36
5.3. Usporedba aproksimacijskog i analitičkog modela .....	38
6. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA.....	43
PRILOZI .....	45

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Global warehouse automation market size 2012-2026 [25].....	2
Slika 2.	Unit load AS/RS [15] .....	5
Slika 3.	Mini load AS/RS [16].....	6
Slika 4.	Person on board AS/RS [17].....	8
Slika 5.	Vertikalni karusel [18].....	11
Slika 6.	SBS/RS [23].....	13
Slika 7.	Single tier shuttle[25] .....	15
Slika 8.	Multi-tier shuttle[25] .....	15
Slika 9.	Double mast elevator [25] .....	16
Slika 10.	Single mast elevator [25].....	16
Slika 11.	Dijelovi SBS/RS sustava [27] .....	17
Slika 12.	Tier captive [25].....	18
Slika 13.	Tier to tier [25].....	18
Slika 14.	Multi-tier captive [25] .....	19
Slika 15.	Non-aisle captive [25] .....	20
Slika 16.	Vanderlande [26].....	20
Slika 17.	Transfer car [26].....	21
Slika 18.	Multi-deep Lane Compact Storage Systems [26] .....	21
Slika 19.	OPEX Perect Pick [19].....	22
Slika 20.	Tier-captive SBS/RS [10].....	24
Slika 21.	Aproksimirani prikaz kretanja lifta i vozila [28] .....	25
Slika 22.	3D prikaz simulacije [14] .....	36
Slika 23.	Graf $v1 < v^2/2a$ [28].....	38
Slika 24.	Throughput of a rack of length 105 m of single-deep storage [21] .....	39



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Popis oznaka – jednostruki ciklus.....	26
Tablica 2. Konfiguracije regala.....	28
Tablica 3. Vremena jednostrukog ciklusa za pojedine konfiguracije.....	29
Tablica 4. Protoci za pojedine konfiguracije.....	29
Tablica 5. Popis oznaka – dvostruki ciklus.....	31
Tablica 6. Vremena dvostrukog ciklusa .....	34
Tablica 7. Protoci dvostrukog ciklusa .....	34
Tablica 8. Usporedba analitičkog i simulacijskog modela .....	37
Tablica 9. Usporedba aproksimacijskog i analitičkog modela.....	38

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$T_{JC}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa
$T_{JCL}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa lifta
$T_{JCRV}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa regalnog vozila
$T_{kl}$	s	Vrijeme komisioniranja lifta
$T_{vl}$	s	Vrijeme vožnje lifta
$v_y$	m/s	Brzina lifta
$a_y$	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija lifta
$H$	m	Visina regala
$M$		Broj razina
$t_{krv}$	s	Vrijeme komisioniranja regalnog vozila
$t_{vrv}$	s	Vrijeme vožnje regalnog vozila
$v_x$	m/s	Brzina regalnog vozila
$a_x$	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija regalnog vozila
$L$	m	Duljina prolaza
$K$		broj ciklusa
$N_{RV}$		Broj regalnih vozila
$N_L$		Broj liftova
$q_{jcl}$	Jedinica/h	Protok lifta, jednostruki ciklus
$q_{jcrv}$	Jedinica/h	Protok regalnih vozila, jednostruki ciklus
$q_{reg}$	Jedinica/h	Protok regala
$T_{DC}$	s	trajanje dvostrukog ciklusa
$T_{DCL}$	s	Vrijeme dvostrukog ciklusa lifta
$T_{DCRV}$	s	Vrijeme dvostrukog ciklusa regalnog vozila
$t_{vl0-i}$	s	Vrijeme vožnje lifta od buffer pozicije do razine izuzimanja

---

$t_{vl\ i-j}$	s	Vrijeme vožnje lifta od razine izuzimanja do razine uzimanja tereta
$t_{vl\ j-0}$	s	Vrijeme vožnje lifta od razine uzimanja do buffer pozicije
$t_{vrv\ 0-1}$	s	Vrijeme vožnje regalnog vozila od mjesta preuzimanja do mjesta uskladištenja
$t_{vrv\ 1-2}$	s	Vrijeme vožnje regalnog vozila od mjesta uskladištenja do mjesta iskladištenja tereta
$t_{vrv\ 2-0}$	s	Vrijeme povratka regalnog vozila na mjesto izuzimanja tereta
$q_{dcl}$	Jedinica/h	Protok lifta, dvostruki ciklus
$q_{dcrv}$	Jedinica/h	Protok regalnih vozila, dvostruki ciklus

---

**SAŽETAK**

U ovom radu prikazane su različite izvedbe automatiziranih skladišnih sustava (AS/RS) te osnova njihovog rada. Poseban fokus je na automatiziranim sustavima s regalnim vozilima, SBS/RS (Shuttle based storage and retrieval system). Navedeni sustav je detaljno analiziran, napravljen je proračun vremena i protoka za određene oblike i dimenzije skladišnih regala. Na temelju rezultata proračuna može se utvrditi ovisnost maksimalnog protoka sustava o dizajnu regala ili sustava. Proračun je izvršen analitičkim (aproksimacijskim) modelom te je uspoređen s rezultatima dobivenim simulacijskim modelom proračuna iz literature.

Ključne riječi: automatizirani skladišni sustavi, SBS/RS, vrijeme, protok, analitički model, simulacijski model

---

**SUMMARY**

This paper presents various implementations of Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) and the principles of their operation. Special focus is on automated systems with shuttle-based storage and retrieval systems (SBS/RS). The mentioned system is thoroughly analyzed, including the calculation of time and flow for specific forms and dimensions of storage racks. Based on the calculation results, the dependence of the maximum system flow on the design of racks or the system can be determined. The calculation was performed using an analytical (approximation) model and compared with the results obtained from the simulation model of calculations found in the literature.

Keywords: automated storage and retrieval systems, SBS/RS, time, throughput, analytical model, simulation model

## 1. UVOD

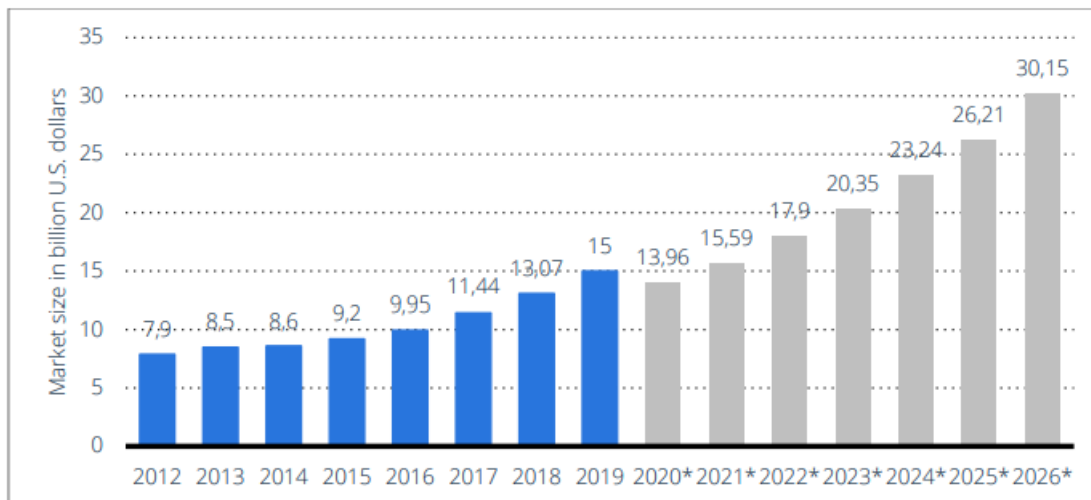
U suvremenom poslovnom okruženju, brza evolucija tehnologije igra ključnu ulogu u transformaciji industrijskih procesa. Jedno od značajnih područja inovacija leži u automatizaciji skladišnih sustava, gdje se tradicionalni pristupi zamjenjuju naprednim tehnološkim rješenjima. Automatizirani skladišni sustavi postaju kičma moderne logistike, omogućujući tvrtkama da učinkovito upravljaju zalihama, smanje troškove i poboljšaju ukupnu operativnu učinkovitost. Povijest automatizacije skladišnih sustava prožeta je inovacijama koje su omogućile prijelaz od ručnih postupaka do visoko sofisticiranih, računalom vođenih sustava. Ovaj rad se ukratko dotiče osnovnih automatiziranih skladišnih sustava, a posebna pažnja bit će posvećena skladišnim sustavima s regalnim vozilima.

Raznolikost automatiziranih skladišnih sustava odražava se u njihovoj sposobnosti da adresiraju različite logističke izazove. Od sustava za pohranu paleta do sofisticiranih robotskih rješenja za sortiranje i pakiranje, tehnološki napredak donosi efikasnije i pouzdanije operacije. Osim toga, integracija senzora, RFID tehnologije i umjetne inteligencije dodatno proširuje granice mogućnosti automatiziranih skladišta.

Dok automatizacija obećava povećanje produktivnosti i smanjenje pogrešaka, postavlja se pitanje kako ova transformacija utječe na radnu snagu, troškove implementacije i opću društvenu dinamiku. Ovaj rad analizira prednosti i izazove automatizacije u skladišnom sektoru te istražuje etička pitanja i sigurnosne aspekte koji prate ovu tehnološku revoluciju.

Na kraju, rad će analizirati ekonomske i društvene implikacije automatizacije skladišta, pružajući perspektivu o budućnosti ovog dinamičnog područja. Ipak, dok tehnološki napredak donosi mnoge prednosti, postoji i potreba za pažljivim upravljanjem promjenama kako bi se osiguralo da se radna snaga prilagodi novim zahtjevima. Osim toga, pitanja privatnosti podataka, sigurnosti sustava i ekoloških utjecaja također su važna za razmatranje u kontekstu šireg društvenog prihvaćanja automatizacije skladišnih sustava. Kroz analizu ovih aspekata, možemo bolje razumjeti kako automatizacija oblikuje naše gospodarstvo i društvo u cjelini, te kako se možemo pripremiti za buduće izazove i prilike koje donosi ova tehnološka revolucija.

Slika 1. prikazuje globalne veličine tržišta automatizacije skladišta, koja predviđa kontinuirani rast do 2026. godine.



**Slika 1. Global warehouse automation market size 2012-2026 [25]**

## 2. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI

### 2.1. Osnovne izvedbe

Osnovne izvedbe automatiziranih skladišnih sustava su:

1. Automatizirani skladišni sustavi s dizalicama unutar prolaza
2. Automatizirani okretni regali
3. Automatizirani vertikalni moduli

#### 2.1.1. *Automatizirani skladišni sustavi s dizalicama unutar prolaza*

Automatizirani skladišni sustavi s dizalicama unutar prolaza (eng. Crane in aisle AS/RS) su sustavi sa automatskim dizalicama za odlaganje i izuzimanje (eng. S/R crane , S/R machine) koje se kreću između regala odlažući i izuzimajući teret. Drugi naziv koji se može naći u literaturi za ove sustave jest automatizirani sustavi odlaganja i izuzimanja s fiksnim prolazima (eng. Fixed-aisle (F/A) storage and retrieval systems) [1]. Ovakvi sustavi predstavljaju vrhunsku tehničku inovaciju u logističkom sektoru, pružajući učinkovito rješenje za pohranu i manipulaciju teškim paletama unutar skladišta. Ovaj koncept donosi visok stupanj automatizacije, koristeći sofisticirane dizalice kako bi optimizirao prostor, smanjio vrijeme dohvaćanja i minimizirao potrebu za ljudskom intervencijom. Glavni pojmovi koji opisuju ovaj sustav su: automatizirane dizalice i računalno vođenje.

Automatizirane dizalice su visokotehnološke dizalice opremljene senzorima omogućuju automatsko podizanje i premještanje paleta unutar uskih prolaza u skladištu.

Računalno vođenje predstavlja centralizirane sustave upravljanja koji koriste algoritme i senzore za precizno kretanje dizalica, osiguravajući optimalnu putanju i sigurnost operacija.

Prve izvedbe ovakvih sustava bile su za velike paletne terete, te su se nazvale 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. Kako je unutar tih sustava, zbog veće fleksibilnosti i omogućavanja komisioniranja manjih količina pojedinog proizvoda od uskladištene jedinice skladištenja, moguće koristiti i čovjeka na dizalici, takve izvedbe nazvane su eng. person-on-board AS/RS [1].

##### 2.1.1.1. *Unit load*

Unit load jest skladišni sustav s dizalicama unutar prolaza dizajniran za rukovanje većim teretom koji obično teži preko 180 kg. Ovakvi sustavi predstavljaju vrhunsku tehnologiju u



automatizaciji skladišta, pružajući učinkovito rješenje za pohranu, manipulaciju i dohvaćanje robe. Sustav je dizajniran uzimajući u obzir široki raspon parametara kako bi se postigla optimalna fleksibilnost, brzina i učinkovitost [2].

Generalno visina dizalica doseže otprilike od 10 do 50 metara, omogućavajući pohranu paleta na različitim visinama u regalima. Duljina redova regala kreće se od 10 do 100 metara, pružajući značajnu fleksibilnost za pohranu različitih količina robe.

Svaki prolaz obuhvaća regale s obje strane, stvarajući učinkovit prostor za pohranu. Dizalice su smještene duž svakog prolaza, omogućujući im pristup regalima s obje strane. Ova postavka minimizira vrijeme putovanja i optimizira dostupnost robe.

Prolazi su najčešće jednostruke širine, što znači da su tek malo širi od same širine tereta. Ovo osigurava precizno i sigurno kretanje dizalica uz minimalan prostor potreban za manevar.

Dizalice su opremljene sustavom za horizontalno i vertikalno kretanje, što omogućava brzo i precizno pozicioniranje paleta na različitim razinama skladišnih regala. Horizontalna brzina dizalica kreće se između 2 i 4 m/s, dok se vertikalna brzina kreće od 0,3 do 1,3 m/s, osiguravajući efikasno kretanje robe kroz sustav.

Vrijeme izuzimanja tereta u prihvatnim stanicama varira između 7 i 12 sekundi, pridonoseći brzom i učinkovitom procesu dohvaćanja robe.

Unit Load sustavi s dizalicama unutar prolaza moraju zadovoljiti različite potrebe, a glavni cilj je optimizacija, koja se postiže minimizacijom troškova. To uključuje minimizaciju broja potrebnih dizalica, smanjenje površine skladišta, maksimizaciju protoka robe te povećanje gustoće skladištenja.

Varijacije u izvedbama ovakvih sustava uključuju različite dizajne regala, mogućnost mijenjanja prolaza dizalicama, različite vrste dizalica te različite lokacije pretovarnih mjesta. Primjena regala dvostruke dubine (double deep rack) predstavlja jedan od načina povećanja gustoće skladištenja i istovremeno smanjenja broja dizalica. Ova izvedba omogućava pohranu dviju jedinica na jednoj lokaciji regala, što dovodi do izvedbi dizalica koje prevoze dva tereta po širini prolaza.

Gustoća skladištenja može se dodatno povećati primjenom regala višestruke dubine (deep-lane AS/RS). Ove izvedbe, koje se nazivaju i deep-lane AS/RS ili multi-deep AS/RS, koriste regale s mogućnošću pohrane više od dvi jedinice na jedno regalno mjesto. Takvi sustavi su pogodni za skladištenje velikih količina robe s ograničenim asortimanom.

U situacijama gdje postoji relativno veliki zahtjev za skladišnim kapacitetom u odnosu na potrebu za protokom, izvedbe sa dvostrukom ili višestrukom dubinom su idealne jer smanjuju broj potrebnih dizalica. Međutim, treba napomenuti da nisu pogodne za skladištenje širokog asortimana robe. U tim situacijama, preferiraju se izvedbe AS/RS sustava s dizalicama koje mogu mijenjati prolaze (multi aisle AS/RS ili aisle changing AS/RS). Ove izvedbe omogućuju dizalicama da mijenjaju prolaze, čime se smanjuje potreba za dodatnim dizalicama.

Dodatne varijacije uključuju izvedbe dizalica s više prihvatnih stanica (multi-shuttle AS/RS) s dvije (dual-shuttle) ili tri (triple-shuttle) prihvatne stanice. Razumijevanje različitih vrsta radnih ciklusa dizalica ključno je za shvaćanje rada ovih kompleksnih sustava. Varijacije u izvedbi Unit Load AS/RS sustava prilagođene su specifičnim potrebama skladišta te pružaju različite mogućnosti za postizanje optimalne učinkovitosti i ekonomske isplativosti.



**Slika 2. Unit load AS/RS [15]**

#### 2.1.1.2. Mini load

Mini-Load AS/RS, poznat i kao automatizirani skladišni sustav za male dijelove, specifičan je tip automatiziranog sustava dizajniran za pohranu i dohvaćanje tereta koji obično dolaze u malim spremnicima ili sanducima (bin). Ti tereti obično imaju ukupnu težinu između 50 i 250 kg, rijetko više (do 500kg). U slučaju vrlo malih spremnika s ukupnom težinom manjom od 50 kg, zna se koristiti naziv micro-load AS/RS.

Mini-Load sustavi imaju dizalicu koja se kreće unutar prolaza između dva regala te izuzima ili odlaže spremnike. Regali su prilagođeni za spremnike manjih dimenzija, što rezultira izvedbama s manjim visinama (3-15 m) i duljinama (12-60 m). [1]



**Slika 3. Mini load AS/RS [16]**

Osnovna funkcija Mini-Load sustava je komisioniranje. Komisioner ručno izuzima manje količine proizvoda iz dovezenih spremnika, dok se preostala roba u spremniku vraća na skladišnu lokaciju u regalu. Proces pretpostavlja da čovjek komisionira robu na I/O mjestu, koje je ujedno i mjesto komisioniranja (pick position).

Princip rada Mini-Load sustava uključuje kontinuirano dovođenje spremnika s potrebnom robom do pozicija komisioniranja dok komisioner obavlja izuzimanje tražene količine robe iz dovezenih spremnika. Ovaj princip komisioniranja poznat je kao "roba-čovjeku". Mini-Load AS/RS predstavlja tipičan primjer sustava koji slijedi ovaj princip.

Iako Mini-Load AS/RS sustavi imaju osnovnu izvedbu prema opisanom principu, moguće su razne varijacije u izvedbama. To uključuje regale dvostruke ili višestruke dubine, dizalice za transport više sanduka, izvedbe s ulaznim i izlaznim bufferima na kraju svakog prolaza u obliku

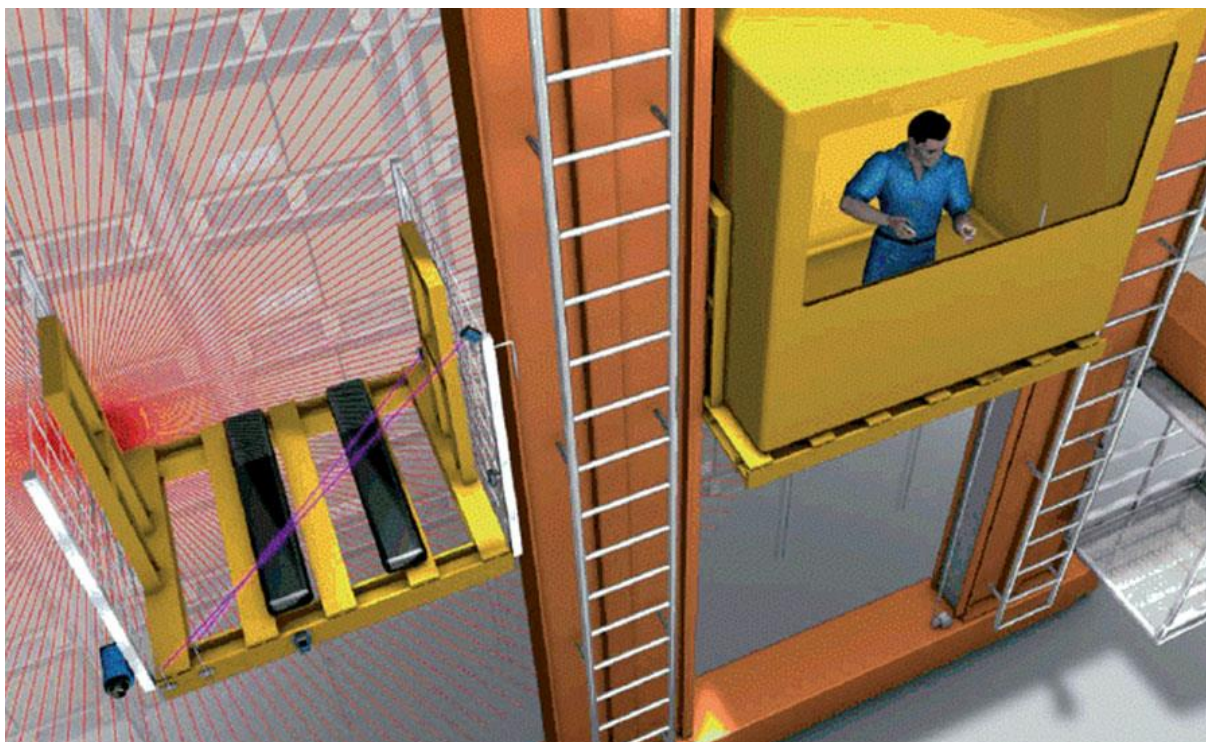
potkove, izvedbe s komisionerom na više prolaza, te izvedbe s izdvojenim mjestima komisioniranja do kojih se sanduci prevoze sustavom konvejera.

### 2.1.1.3. *Person on board*

Još jedan oblik as/rs sustava dolazi pod nazivom person on board ili man on board as/rs. Iz samog imena može se dosta rasaznati. Cilj je dizajnirati dizalicu tako da osoba može putovati s njom i obavljati zadane radnje. Umjesto automatskog izdvajanja cijele palete s određene lokacije, radnik na dizalici može odabrati jedan predmet s te lokacije. Ovakav način komisioniranja naziva se komisioniranje po principu „čovjek – robi“. Glavna razlika, koja ovaj sustav izdvaja od ostalih (gore navedenih) je ta što se komisioniranje ne izvodi na kraju prolaza između regala već bilo gdje unutar prolaza, ovisno o potrebama u danom trenutku. Važno je također naglasiti da se uskladištenje robe odvija na isti princip kao što je to slučaj kod unit load AS/RS sustava [1].

Ovakav sustav automatiziranih skladišta rijedak je i često nije standardna praksa. U svrhu pridržavanja visokih standarda sigurnosti, uključivanje osobe na samu dizalicu može povećati rizik od ozljeda ili nesreća. Umjesto toga, više je uobičajen pristup u kojem radnici odvojeno upravljaju AS/RS sustavom. Radnik može biti odgovoran za postavljanje narudžbi, praćenje sustava izvan područja opasnosti, te rukovanje proizvodima kada ih AS/RS dostavi na radno mjesto. Ovo smanjuje rizik od ozljeda i omogućava učinkovito korištenje automatizirane tehnologije bez nepotrebnog izlaganja radnika opasnostima.

U praksi, AS/RS sustavi često se integriraju s radnim stanicama gdje radnici mogu obavljati zadatke poput komisioniranja ili pakiranja proizvoda, a AS/RS samostalno obavlja zadatke pohrane i dohvata na siguran način.



**Slika 4. Person on board AS/RS [17]**

### **2.1.2. Automatizirani okretni regali i vertikalni podizni moduli**

Sljedeća izvedba automatiziranih skladišnih sustava, nakon sustava s dizalicama, su automatizirani okretni regali i vertikalni podizni moduli. Glavna odlika ovih sustava je smanjeno kretanje zaposlenika te poboljšanje ergonomskih uvjeta rada (manje nepotrebnih pokreta, bez naginjanja operatera).

#### **2.1.2.1. Horizontalni okretni regali**

Horizontalni okretni regal, poznat i kao horizontalni karusel (eng. horizontal carousel), sastoji se od određenog broja fiksnih skladišnih odjeljaka ili nosača (eng. bin ili carrier) koji su mehanički povezani s pogonskim mehanizmom u zatvorenoj petlji. Svaka kolona dodatno je podijeljena na unaprijed određeni broj skladišnih lokacija, odnosno polica (eng. shelves). Postupak odlaganja i izdvajanja može se obavljati ručno ili automatski. Okretanje karusela u većini slučajeva danas je automatizirano, što rezultira svrstavanjem ovog sustava među automatizirane skladišne sustave [1]. Horizontalni karusel je uređaj za manipulaciju materijalom po principu "roba-čovjeku" koji pomiče police s proizvodima do operatera. Kako

ime sugerira, horizontalni karusel se kreće horizontalno, slično kao što se vrti vrtuljak, i većina primjena uključuje više jedinica koje opskrbljuju svakog operatera.

Istovremeno dva ili tri karusela mogu donositi više proizvoda istom operateru. Operater može istovremeno birati iz više košara, obično vođen svjetlima koja ukazuju na ispravne stavke i količinu. To znači da operateri mogu birati stotine pojedinačnih stavki na sat i raditi na više radnih naloga istovremeno. Horizontalni karuseli mogu se koristiti i u internim i eksternim procesima distribucije. Također su široko korišteni unutar proizvodnih pogona za pripremu narudžbi koje se distribuiraju eksterno klijentima [3]. Jedan od ključnih benefita primjene automatiziranih horizontalnih okretnih regala nedvojbeno je ušteda vremena. Rotacijom regala eliminira se potreba za vremenski zahtjevnim i neefikasnim hodanjem komisionera po skladištu, budući da se roba automatski dovodi do njega. Pogonski sustav okreće karusel lijevo ili desno kako bi operateru dostavio traženi materijal za izdvajanje. Uklanjanje potrebe za hodanjem rezultira povećanom produktivnošću i potencijalnim smanjenjem radnih sati. Operateri sada mogu obavljati i druge zadatke, kao što su papirologija, vaganje i brojenje, dok karusel automatski dovodi tražene artikle. S obzirom na to da jedan operater može raditi s više karusela istovremeno, otvara se mogućnost dodatnog povećanja produktivnosti eliminacijom gubitaka vremena [1].

#### 2.1.2.2. Vertikalni okretni regali

Vertikalni okretni regali su sustavi za pohranu koji koriste vertikalno okretanje platformi ili polica kako bi optimizirali prostor i olakšali pristup pohranjenim artiklima. Ovi regali često koriste automatizirane mehanizme za rotaciju i podizanje platformi na različite razine, omogućavajući maksimalno iskorištavanje vertikalnog prostora u skladištima.

Vertikalni okretni regali su posebno korisni u situacijama gdje je prostor za pohranu ograničen. Rotacija i podizanje platformi omogućuju korištenje visokih skladišnih prostora, što rezultira povećanom gustoćom pohrane.

Većina vertikalnih okretnih regala koristi automatizirane sustave za rotaciju i podizanje. Ovo pomaže u učinkovitom i brzom pristupu artiklima, smanjujući potrebu za ručnim radom i ubrzavajući procese pohrane i dohvata.

Platforme vertikalnih okretnih regala obično se mogu prilagoditi različitim veličinama i oblicima proizvoda. To ih čini fleksibilnima za različite vrste robe, od manjih predmeta do većih i nepravilno oblikovanih artikala.

Automatizirani sustavi vertikalnih okretnih regala često su precizni u postavljanju platformi i izuzimanju artikala. To poboljšava točnost inventara i smanjuje mogućnost grešaka u rukovanju robom. Zahvaljujući automatizaciji, vertikalni okretni regali omogućuju brz pristup pohranjenim artiklima, čime se smanjuje vrijeme koje je potrebno za izdvajanje proizvoda.

Vertikalni okretni regali su posebno popularni u industriji gdje se često koriste za pohranu i dohvat malih dijelova, elektroničkih komponenti, ili u logističkim centrima gdje je potrebno efikasno upravljati inventarom i ubrzati procese rukovanja materijalom.

U 1990-ima razvoj softvera omogućio je 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, a moguća je i primjena dodatnih uređaja za bržu identifikaciju odjeljka lokacija, čitača bar koda, automatiziranih konvejerima, mjeračima težine i sl. Jedno PC računalo dovoljno je za upravljanje radnom stanicom karusela ili sustavom vertikalnih karusela sa više lokacija za izuzimanje [1].



**Slika 5. Vertikalni karusel [18]**

### 2.1.2.3. Vertikalni podizni moduli

Vertikalni podizni modul (VLM) je sustav za pohranu koji se sastoji od dviju paralelnih kolona s fiksnim policama, na kojima su pohranjeni spremnici poput kutija ili ladica. Automatski uređaj (shuttle/extractor) obavlja odlaganje, izdvajanje i transport (vertikalni) spremnika. Vertikalni podizni modul omogućuje značajne uštede skladišnog prostora, a dostupne su izvedbe visine do 20 metara koje mogu povezivati više katova. Ova konfiguracija rezultira većom produktivnošću komisionera jer im nije potrebno kretanje, što ubrzava izvršavanje zadataka. Također postoje izvedbe s čak 4 ulaza/izlaza za dodatni poboljšani protok, a moguće su i konfiguracije s više extractora. Početne izvedbe bile su prilagođene rukovanju manjim teretima i dimenzijama, dok današnji razvoj, koji traje od 1970-ih, omogućuje izvedbe s nosivošću do 50 tona ili više, uz nosivost extractora od otprilike jedne tone.

Kao osnovni dijelovi vertikalnih podiznih modula mogu se navesti:

1. postolja za odlaganje;
2. lift ( shuttle, extractor ) i vodilice;
3. otvor (prozor) za komisioniranje;
4. tijelo VLM-a;



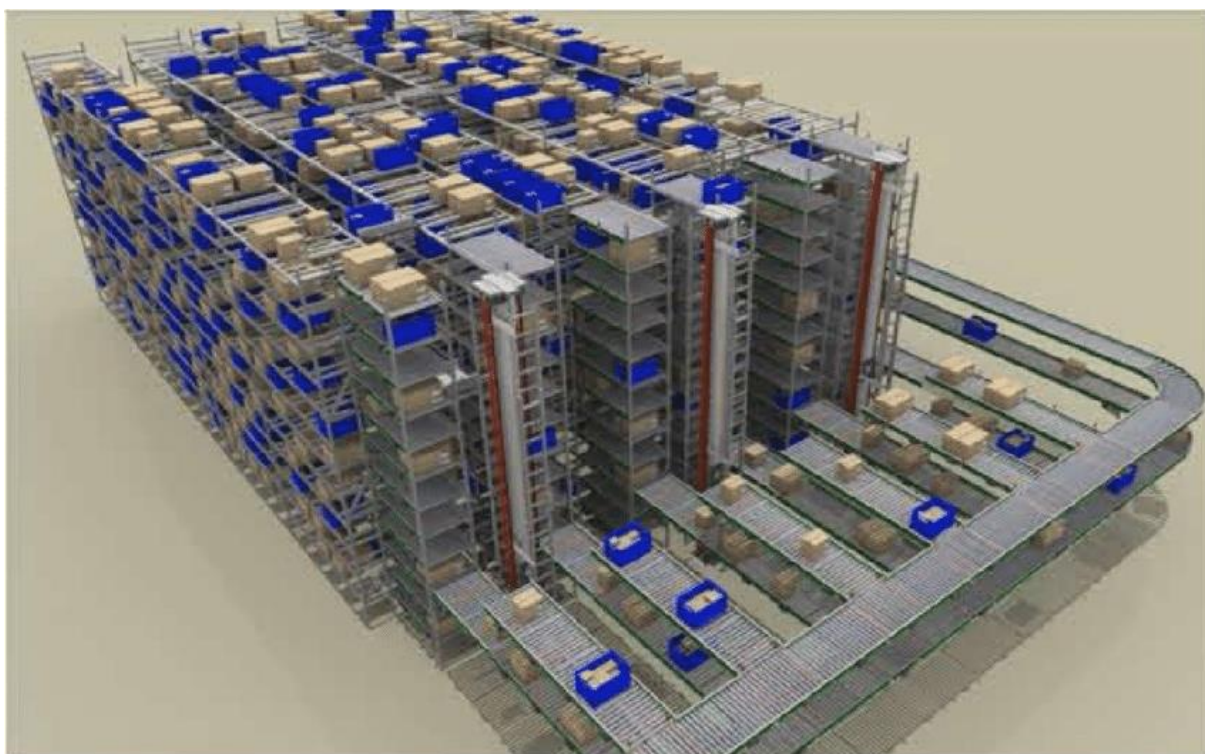
---

5. upravljačka jedinica.

### 3. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI S REGALNIM VOZILIMA

#### 3.1. SBS/RS

SBS/RS je skraćenica za shuttle-based storage and retrieval system, što je vrsta automatiziranog sustava za pohranu i dohvata robe koji uključuje regalna vozila (eng. shuttles). U različitim literaturama autori upotrebljavaju različite nazive za ovaj sustav pa se tako negdje umjesto pojma shuttle može pronaći pojam vehicle odnosno punim nazivom Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System (AVS/RS). Najčešće se pohranjuju mali tereti u kutijama ili spremnicima, stoga je se SBS/RS uglavnom zamjena za mini load sustave. SBS/RS sustav omogućuje brzo, učinkovito i fleksibilno rukovanje robom u skladištima. Razvijen je kao odgovor na rastuća očekivanja kupaca za brzom i lokalnom isporukom robe. SBS/RS ima prednosti kao što su visoka gustoća pohrane, niska potrošnja energije, jednostavno održavanje i visoka pouzdanost. Ovakvi sustavi se koriste u različitim industrijama, kao što su prehrambena, farmaceutska, kozmetička, automobilska i druga [4].



Slika 6. SBS/RS [23]

### 3.2. Dijelovi sustava

1. *Regal* - metalna konstrukcija koja ima više razina i prolaza, u kojima se pohranjuju kutije s robom. Regal je obično visok i uzak, kako bi se iskoristio prostor u visini i smanjio prostor za prolaze.

2. *Regalno vozilo (eng. shuttle)* - malo električno vozilo koje se kreće po vodilicama unutar regala, preuzimajući i odlaganjući kutije s robom. Svaki shuttle ima svoju bateriju i senzore za komunikaciju i navigaciju. Šatl može biti fiksiran za jednu razinu regala (nefleksibilni SBS/RS) ili može mijenjati razine unutar jednog prolaza (fleksibilni SBS/RS)

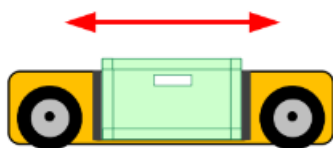
3. *Dizalo (lift)* - mehanizam koji prenosi kutije između različitih razina regala i ulazno/izlazne točke. Lift se također kreće po vodilicama, koje su postavljene na kraju ili u sredini regala. Lift može biti jednostavan (samo za kutije) ili složen (za shuttle i kutije).

4. *Ulazno/izlazna točka* - to je mjesto gdje se kutije s robom preuzimaju i predaju između SBS/RS sustava i drugih sustava za transport i sortiranje robe, kao što su pokretne trake, roboti, ili viljuškari.

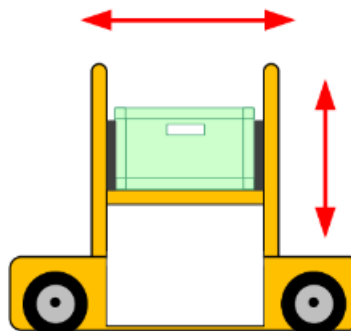
5. *Upravljački sustav* - skup hardvera i softvera koji omogućuje koordinaciju i kontrolu rada SBS/RS sustava. Upravljački sustav prima zahtjeve za odlaganje i izuzimanje robe, određuje optimalne strategije za kretanje šatla i liftova, prati stanje i performanse sustava, te komunicira s drugim sustavima i operatorima.

#### 3.2.1. Regalno vozilo

To je vozilo koje se koristi u sustavima za automatizirano skladištenje i izvlačenje robe. Ono obavlja horizontalno kretanje u smjeru x, a ponekad i vertikalno kretanje u smjeru y. Maksimalna masa tereta koju može nositi je 50 kg, s dimenzijama između 150 x 200 x 80 mm i 600 x 400 x 250 mm. Brzina regalnog vozila ovisi o dizajnu sustava i kreće se između 1,5 m/s i 4 m/s. Općenito, regalno vozilo ima pogone, kontrole i senzore za precizno pozicioniranje. Može biti napajano električnim vodičima ili litij-ionskom baterijom te koristi tehnologiju rekuperacije energije. Komunicira s centralnim sustavom putem bežične WLAN mreže [25].



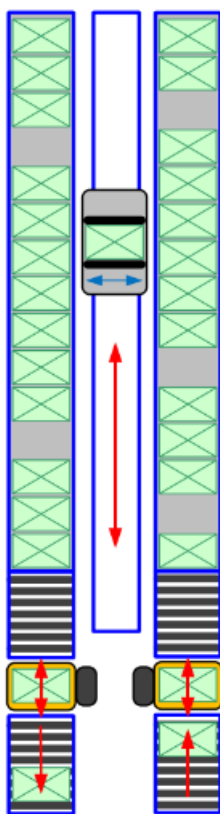
Slika 7. Single tier shuttle[25]



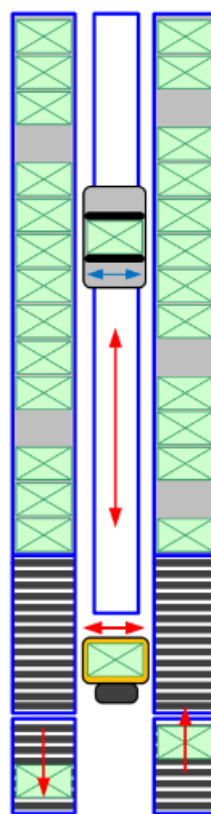
Slika 8. Multi-tier shuttle[25]

### 3.2.2. Dizalo(lift)

Dizalo pozicionirano ispred svake SR pruža vertikalno kretanje teretnim jedinicama (TUL) do/iz lokacija bufera. Obično, dizala su uska grla u SBS/RS-ovima koja se trebaju planirati prema potrebama. Ovisno o potrebnoj propusnosti, u praksi se često koristi dizalo s jednim stolom za podizanje (Slika 10). Međutim, za veću propusnost, razvijen je poseban dizajn s dva neovisna dizala, svako s pripadajućim stolom za podizanje (Slika 9). U toj soluciji, svako dizalo može raditi neovisno, pa je gotovo udvostručena propusnost kapaciteta (Borovinšek et al., 2017; Ekren, 2017; Lerher et al., 2015a; Lerher et al., 2015b). U oba dizajna (Slike 9 i 10), TUL dolazi u sustav preko desnog valjkastog transportera i napušta sustav preko lijevog valjkastog transportera. Brzina stola za podizanje dizala ovisi o dizajnu SBS/RS-a i može se kretati između  $v_y = 3 \text{ m/s}$  do  $v_y = 6 \text{ m/s}$  [25].



Slika 10. Single mast elevator [25]

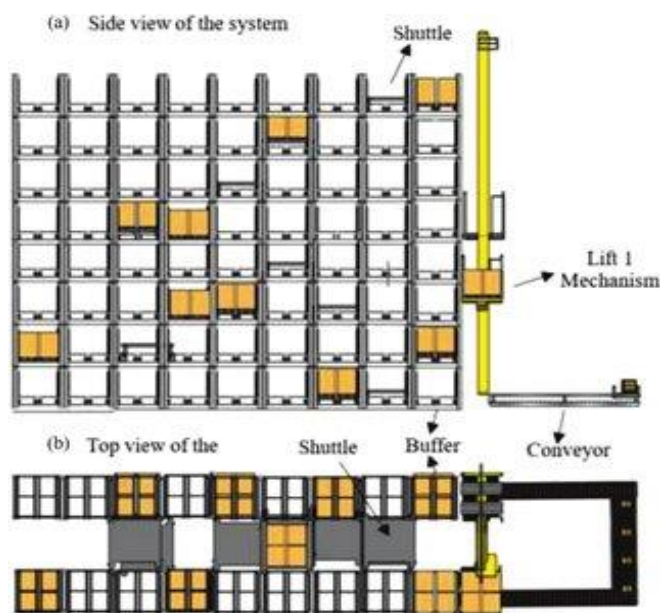


Slika 9. Double mast elevator [25]

### 3.3. Princip rada

SBS/RS se sastoji od sustava za horizontalno kretanje koji se kako je već spomenuto naziva shuttle ili na hrvatskom tračno ili regalno vozilo i sustava za vertikalno kretanje, odnosno dizalo (lift). Razlikuje se od AS/RS sustava u načinu vođenja tereta. Umjesto korištenja dizalica koje istovremeno obavljaju vertikalni i horizontalni transport, SBS/RS je organiziran s gore navedena dva sustava kretanja za skladištenje i izdavanje (eng. S/R vozila). Tereti se premještaju pomoću regalnih vozila koja se nalaze na svakoj razini i u svakom redu sustava. Ova vozila se horizontalno kreću duž tračnica/šina između redova pravokutnih regala. Njihova svrha je brzo skladištenje i/ili izdavanje tereta, a s obzirom da se na svakoj razini nalazi jedno takvo vozilo, dizalo često postaje ograničavajući faktor odnosno „usko grlo“ u takvom sustavu.

Za vertikalno kretanje koriste se dizala koja prenose jedinice za skladištenje ili odakle se izdavaju skladištene jedinice, a obično su smještena na krajevima regala [5]. Moguće su izvedbe u kojima je na svakoj razini regala nalazi jedno vozilo (eng. tier-captive AVS/RS) ili izvedbe u kojima se vozila mogu također liftom prebacivati s jedne na drugu razinu (eng. tier-to-tier AVS/RS) [1].

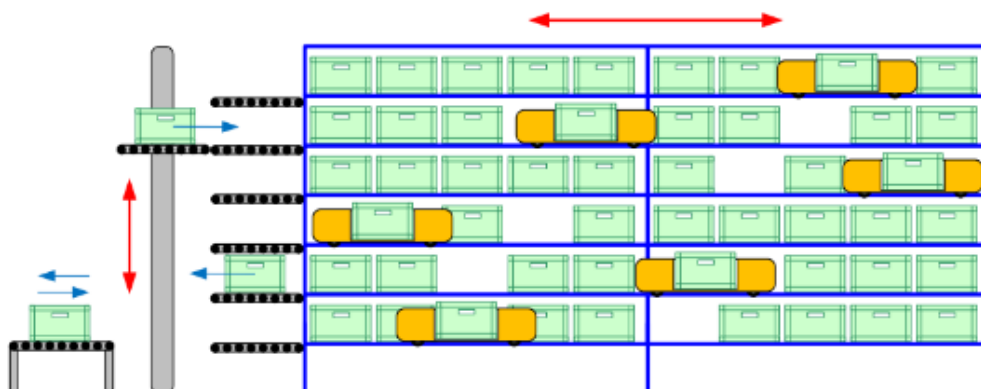


Slika 11. Dijelovi SBS/RS sustava [27]

### 3.4. Izvedbe automatiziranih skladišnih sustava s regalnim vozilima

#### 3.4.1. Tier captive

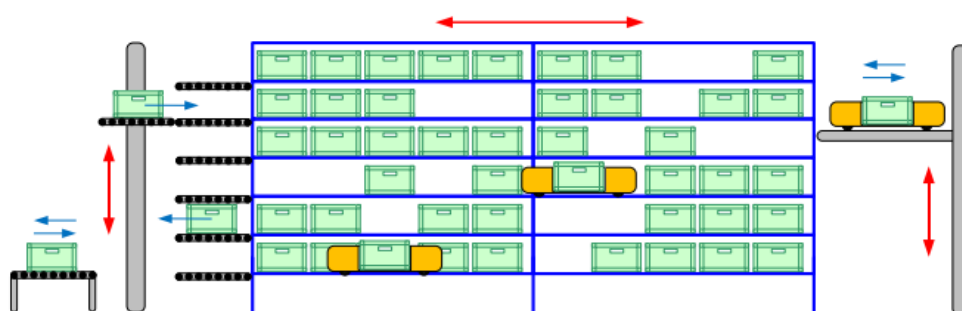
Tier captive konfiguracija predstavlja sustav vozila s automatskim navođenjem na svakoj razini regala te liftova pozicioniranih na krajevima prolaza (na jednom ili oba kraja). Najveći nedostatak ovakvih sustava su liftovi koji obično predstavljaju usko grlo ograničavajući ukupan protok sustava što posljedično dovodi do vrlo niske iskoristivosti regalnih vozila. Kako bi se poboljšali navedeni nedostaci, često se koriste sustavi liftova dvostrukih kapaciteta, ali liftovi i dalje ostaju usko grlo[24].



Slika 12. Tier captive [25]

### 3.4.2. Tier to tier configuration

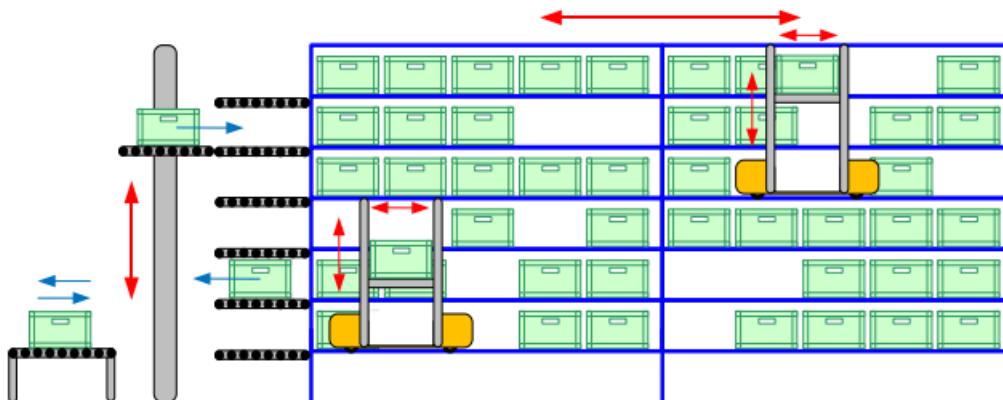
Slika 13. prikazuje „tier to tier“ izvedbu sustava ili u slobodnom prijevodu „od reda do reda“. U odnosu na tier captive konfiguraciju regalno vozilo više nije ograničeno kretanjem unutar samo jedne razine. Sada postoji lift koji može osim tereta prevoziti vozila s jedne razine na drugu. Najčešće je na jednom kraju lift koji prevozi teret, a na drugom kraju lift koji prevozi vozila. Glavna prednost ovih sustava je povećanje produktivnosti samih vozila koji više ne moraju čekati na dolazak liftova već svako slobodno vozilo prema zadanom sistemu prelazi s jedne razine na drugu. Jedini nedostatak koji se može navesti je dodatna investicija u još jedan lift, ali to se može pokriti uštedom koja se dobije izbacivanjem regalnih vozila s pojedinih razina.



Slika 13. Tier to tier [25]

### 3.4.3. Multi-tier captive

Multi tier captive zapravo je vrlo sličan tier to tier izvedbi. Regalna vozila ponovno mogu mijenjati razine i nisu više zarobljeni unutar jednog reda. Glavna razlika je u načinu kretanja vozila. U multi-tier captive konfiguraciji vozila se mogu kretati i horizontalno i vertikalno po y osi. Više ne postoji potreba za dodatnim liftom koji bi morao prenositi vozila s razine na razinu već ona to mogu činiti samostalno.

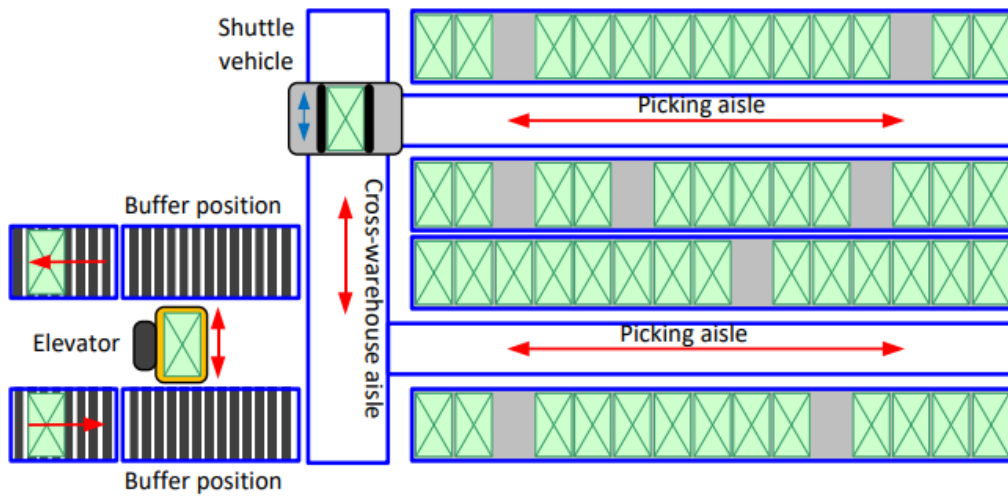


Slika 14. Multi-tier captive [25]

### 3.4.4. Non-aisle captive

Glavna karakteristika non-aisle captive konfiguracije je kretanje regalnog vozila na samo jednoj razini, ali s mogućnošću mijenjanja prolaza. Ovaj sustav također je vrlo fleksibilan u pogledu broja regalnih vozila u sustavu, gdje se može dodati ili ukloniti više regalnih vozila na temelju potrebnog protoka [25].





Slika 15. Non-aisle captive [25]



Slika 16. Vanderlande [26]

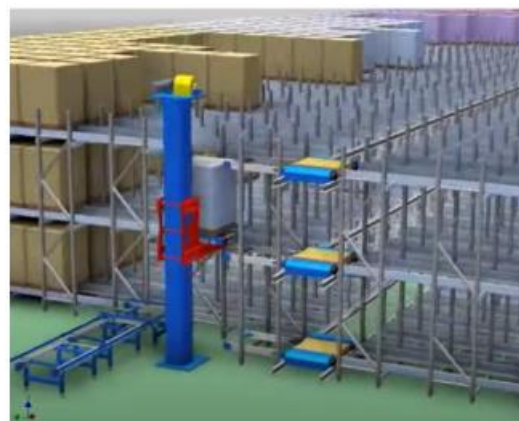
### 3.4.5. Kompaktni sustavi višestruke dubine

Sastoje se od lifta, regalnog vozila i satelitskog vozila (transfer car). Lift dovodi skladišnu jedinicu na određenu razinu pri čemu regalno vozilo sa satelitskim vozilom na sebi preuzima taj teret i kreće se horizontalno između dva reda skladišnih lokacija. Dolaskom do zadanog mjesta iskladištenja, satelitsko vozilo se zajedno s teretom odvaja od regalnog vozila i poprečno

se kreće na zadanu dubinu skladišne lokacije. Prednosti ovakvih kompaktnih skladišnih sustava su visoka fleksibilnost, skalabilnost, minimalan prostorni zahtjev, maksimalna gustoća skladištenja, niski investicijski, operativni i troškovi održavanja.



Slika 17. Transfer car [26]



Slika 18. Multi-deep Lane Compact Storage Systems [26]

#### 3.4.6. *Multidirectional OPEX Perfect pick sustav*

Perfect Pick je automatizirano rješenje za skladištenje i prikupljanje robe koje koristi dokazanu iBOT™ tehnologiju za prikupljanje i pohranu robe. Za razliku od klasičnog SBS/RS sustava, Perfect pick je rješenje koje eliminira lifotve, odnosno jedno regalno vozilo ima mogućnost vertikalnog i horizontalnog kretanja [1]. Ovo rješenje je energetski učinkovito i najbrže u industriji, s brzinom do 1000 prikupljenih predmeta na sat.

Prednosti OPEX Perfect Pick sustava:

Smanjuje izazove radne snage: OPEX Perfect Pick smanjuje ovisnost o radnoj snazi za prikupljanje i slanje narudžbi. Smanjuje se potreba za radnicima koji prikupljaju i šalju narudžbe, što smanjuje troškove radne snage i povećava produktivnost.

Povećava točnost narudžbi: OPEX Perfect Pick koristi LED svjetla i zvučne signale kako bi upozorili radnike na točne lokacije za prikupljanje predmeta. Ovo smanjuje pogreške pri prikupljanju narudžbi i povećava točnost narudžbi.

Povećava gustoću skladištenja: OPEX Perfect Pick koristi vertikalni prostor skladišta kako bi povećao gustoću skladištenja. Ovo omogućuje skladištenje više predmeta na manje prostora, što smanjuje troškove skladištenja i povećava učinkovitost.

Jednostavan za korištenje: OPEX Perfect Pick je jednostavan za korištenje i može se brzo instalirati. Ovo smanjuje vrijeme potrebno za obuku radnika i povećava produktivnost [8].



**Slika 19. OPEX Perect Pick [19]**

## **4. MODELI OBLIKOVANJA AUTOMATIZIRANIH SKLADIŠNIH SUSTAVA S REGALNIM VOZILIMA**

Modeli oblikovanja predstavljaju skup matematičkih formula potrebnih za izračun osnovnih parametara automatiziranih skladišnih sustava. U ovom slučaju glavni parametri koji će se određivati su vrijeme i protok sustava. Parametar vremena odnosi se na vrijeme potrebno za regalno vozilo i lift da obave operacije pohrane i dohvata. Protok sustava je količina robe koja prođe sustavom u određenom vremenu. Oni ovise o različitim čimbenicima poput konfiguracije regala, karakteristikama regalnih vo i liftova, lokaciji ulaza/izlaza te vrsti naredbe. Postoje različite vrste modela vremena putovanja (eng. Travel time models) za SBS/RS, kao što su analitički, aproksimativni i simulacijski modeli. Analitički i aproksimacijski modeli temelje se na teoriji vjerojatnosti i pružaju točna i pojednostavljena rješenja. Simulacijski modeli temelje se na simulaciji diskretnih događaja i pružaju realna rješenja [10]. Trenutno, istraživači u ovom području intenzivno rade na postavljanju optimalnog modela za sustave s regalnim vozilima (SBS/RS). Ovaj je proces izazovan jer su SBS/RS sustavi iznimno složeni, a kao što je prethodno prikazano postoje razne izvedbe takvih sustava sa različitim modulima rada i s mnogim varijablama koje utječu na performanse pa to predstavlja dodatni izazov. Kako bi se pronašlo optimalno rješenje, istraživači istražuju različite pristupe i metode.

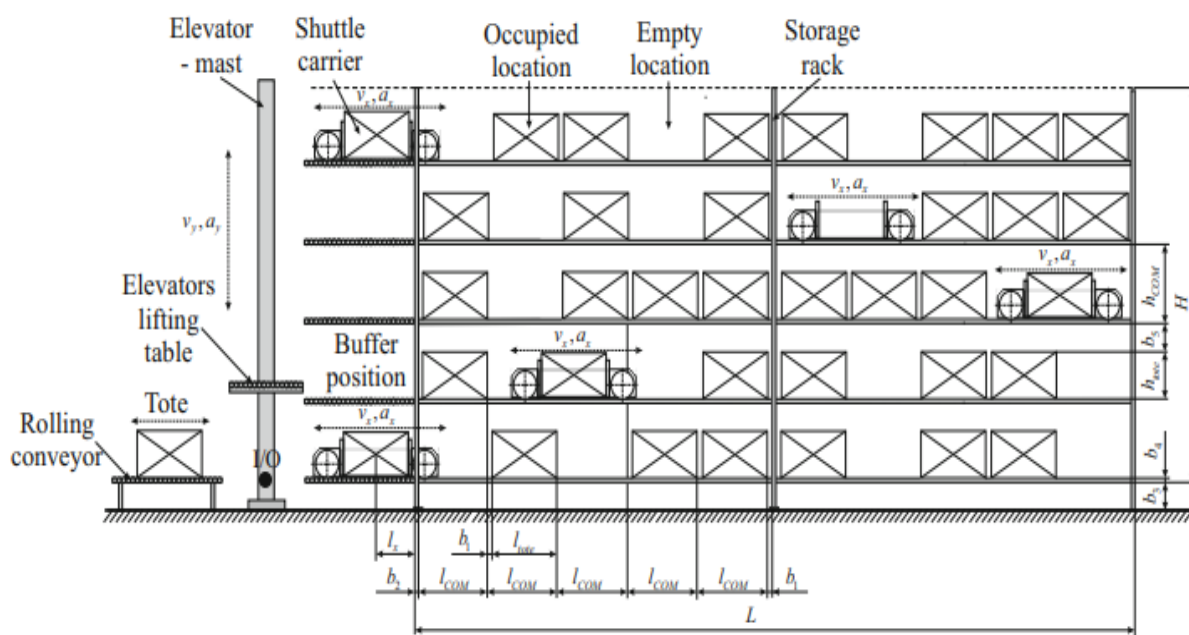
Nedostatak definiranog standarda za optimalni model dodatno komplicira situaciju. Različiti autori nude različite jednadžbe, formule i metode, što čini proces usklađivanja i usporedbe zahtijevnijim. Stoga, istraživanje u ovom području još uvijek traje kako bi se postavio konsenzus o optimalnom modelu koji će zadovoljiti zahtjeve učinkovitog upravljanja SBS/RS sustavima. Ova težnja za optimalnim rješenjem potiče daljnje istraživanje i razvoj tehnologija kako bi se unaprijedila funkcionalnost i performanse ovih sustava skladištenja i dohvata.

### **4.1. Jednostruki radni ciklus automatiziranog skladišnog sustava s regalnim vozilima**

Pojam "radni ciklus" preuzet je iz klasičnih transportnih i skladišnih sustava, a prenesen u ovo područje, može se definirati kao ciklus uskladištenja i/ili iskladištenja koji se ponavlja ciklički. Dakle, vrijeme radnog ciklusa predstavlja ukupno vrijeme aktivnosti unutar jednog takvog ciklusa. Na primjeru ciklusa uskladištenja skladišnih jedinica u regale kod sustava AS/RS vidljivo je da se jedan ciklus sastoji od prihvata skladišne jedinice na pretovarnoj stanici, vožnje do skladišne lokacije u regalu, odlaganja skladišne jedinice u regal, te povratka dizalice do pretovarnog mjesta kako bi započela sljedeća iteracija. Slično se opisuje i radni ciklus iskladištenja, gdje se vožnja obavlja do skladišne lokacije gdje je već uskladištena skladišna

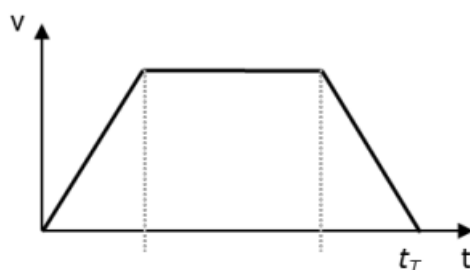
jedinica, nakon čega slijedi izuzimanje skladišne jedinice, vožnja (transport) do mjesta pretovara te odlaganje skladišne jedinice na pretovarno mjesto.

U SBS/RS sustavima, složenost radnih ciklusa je nešto veća. Ukupni radni ciklus sastoji se od dva glavna ciklusa: ciklusa lifta i ciklusa vozila. Ciklus lifta obuhvaća proces izuzimanja tereta s ulazne buffer pozicije, podizanje lifta s teretom do odgovarajuće razine, ostavljanje tereta na izlaznom bufferu te spužtanje lifta nazad do buffer pozicije. S druge strane, ciklus vozila uključuje proces preuzimanja tereta s izlaznog buffera, vožnju do mjesta za odlaganje tereta te povratak nazad do pozicije buffera. Ukratko, radni ciklus u SBS/RS sustavu sastoji se od složene kombinacije ciklusa lifta i ciklusa vozila. Ovako opisani radni ciklus u sebi sadrži ili jedno odlaganje (usklađivanje) ili jedno izuzimanje (isklađivanje) za svako vozilo zasebno, te se naziva jednostruki radni ciklus (eng. single command, SC).



Slika 20. Tier-captive SBS/RS [10]

Zbog olakšanja samog proračuna u obzir će se uzeti neka pojednostavljena u procesu. Za proračun bit će predviđena brzina lifta od 2 m/s, a regalnog vozila 3 m/s. Kod liftova i regalnih vozila u obzir će biti uzeta akceleracija, tj. vrijeme potrebno za ubrzanje na maksimalnu razinu i smatrat će se da su visina i širina svake razine dovoljne da liftovi i vozila u svakom kretanju dostignu maksimalnu brzinu (slika 21.). Akceleracije kod ubrzanja i usporenja su jednake. Akceleracija lifta je  $1.5 \text{ m/s}^2$ , a akceleracija regalnog vozila je  $3 \text{ m/s}^2$ . Vrijeme komisioniranja lifta je 1.5 s. a regalnog vozila 3 s.



**Slika 21. Aproximirani prikaz kretanja lifta i vozila [28]**

Ostale pretpostavke koje će se uzeti u obzir su da su regali jednostruke dubine odnosno da se na jednu skladišnu lokaciju može uskladištiti samo jedan teret. Također, lift ni u jednom trenutku ne čeka dolazak tereta na buffer poziciji, već je on uvijek tamo, te regalno vozilo uvijek spremno čeka lift da izuzme teret od njega.

Proračun će biti napravljen prema aproksimacijskom modelu iz članka "Travel Time Model for Shuttle-based Storage and Retrieval Systems" (T. Lerher, B. Y. Ekren, G. Dukic and B. Rosi), odnosno primjenom teorije vjerojatnosti (vertikalno kretanje lifta), te prema modelu FEM 9.851 (horizontalno kretanje regalnog vozila). Jednostruki ciklus lifta započinje podizanjem na polovicu od ukupne visine regala (aproksimirana vrijednost kretanja lifta) gdje izuzima teret te se vraća na početnu poziciju. Regalno vozilo kupi teret te ga odvozi na polovicu duljine reda regala (aproksimirana vrijednost kretanja vozila) gdje ga uskladištuje na regalno mjesto. Nakon uskladištenja vraća se na mjesto preuzimanja. Matematički model ovakvog ciklusa pokazan je u nastavku.

Tablica 1. Popis oznaka – jednostruki ciklus

Oznaka	Jedinica	Opis
$T_{JC}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa
$T_{JCL}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa lifta
$T_{JCRV}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa regalnog vozila
$t_{kl}$	s	Vrijeme komisioniranja lifta
$t_{vl}$	s	Vrijeme vožnje lifta
$v_y$	m/s	Brzina lifta
$a_y$	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija lifta
$H$	m	Visina regala
$M$		Broj razina
$t_{krv}$	s	Vrijeme komisioniranja regalnog vozila
$t_{vrv}$	s	Vrijeme vožnje regalnog vozila
$v_x$	m/s	Brzina regalnog vozila
$a_x$	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija regalnog vozila
$L$	m	Duljina prolaza
$K$		broj ciklusa
$NRV$		Broj regalnih vozila
$NL$		Broj liftova
$q_{jcl}$	Jedinica/h	Protok lifta, jednostruki ciklus
$q_{jcrv}$	Jedinica/h	Protok regalnih vozila, jednostruki ciklus
$q_{reg.}$	Jedinica/h	Protok regala

### JEDNOSTRUKI CIKLUS LIFTA ( $T_{JCL}$ )

$$T_{JCL} = 2t_{kl} + 2t_{vl} \quad [s]$$

$$t_{vl} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{2v_y} \quad [s]$$

$$T_{JCL} = 2 \cdot t_{kl} + 2 \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{v_y} \quad [s]$$

**JEDNOSTRUKI CIKLUS REGALNOG VOZILA ( $T_{JCRV}$ )**

$$T_{JCRV} = 2t_{krv} + 2t_{vrv} \quad [s]$$

$$t_{vrv} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{2v_x} \quad [s]$$

$$T_{JCRV} = 2 \cdot t_{krv} + 2 \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{v_x} \quad [s]$$

**UKUPNI JEDNOSTRUKI RADNI CIKLUS**

$$T_{JC} = T_{JCL} + T_{JCRV}$$

**PROTOK REGALA**Protok jednostrukog ciklusa lifta

$$q_{jcl} = \frac{3600}{T_{JCL}} k \cdot N_L \quad \frac{[s]}{[s]}$$

Protok jednostrukog ciklusa regalnog vozila

$$q_{jcrv} = \frac{3600}{T_{JCRV}} \cdot k \cdot N_{RV} \quad \frac{[s]}{[s]}$$

Ukupni protok regala

$$q_{reg.} = \min \{q_{jcl}, q_{jcrv}\}$$

**4.2. Proračun jednostrukog ciklusa**

U ovom dijelu će se na temelju podataka o dimenzijama regala iz literature [10] napraviti proračun koristeći jednadžbe iz prošle točke. Važno je naglasiti da jednadžbe vrijede za slučajni raspored odlaganja tereta, a to može biti najbliža slobodna lokacija ili potpuno nasumična lokacija. Odabrane su tri konfiguracije regala, jedini uvjet je bio da svi imaju isti kapacitet te



da je broj regala jednak kako bi se kasnije mogli usporediti rezultati. Podatci o regalima dani su u tablici 2.

**Tablica 2. Konfiguracije regala**

Konfiguracija	Broj razina (M)	Broj regala (A)	Broj kolona (C)	Duljina regala (L)	Visina regala (H)	Kapacitet skladišta (Q)
1.	10	6	84	42	3.50	10 080
2.	15	6	56	28	5.25	10 080
3.	20	6	42	21	7.00	10 080

$$T_{JCL} = 2t_{kl} + 2t_{vl}$$

$$t_{vl} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{2v_y} = \frac{2}{1.5} + \frac{3.5}{2 \cdot 2} = 2.2 \text{ s}$$

$$T_{JCL} = 2 \cdot 1.5 + 2 \cdot 2.2 = 7.4 \text{ s}$$

$$T_{JCRV} = 2t_{krv} + 2t_{vrv} = 22 \text{ s}$$

$$t_{vrv} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{2v_x} = \frac{3}{3} + \frac{42}{2 \cdot 3} = 8 \text{ s}$$

$$T_{JCRV} = 2 \cdot 3 + 2 \cdot 8 = 22 \text{ s}$$

$$T_{JC} = T_{JCL} + T_{JCRV}$$

$$= 7.4 + 22$$

$$= 29.4 \text{ s}$$

Protok jednostrukog ciklusa:

$$q_{jcl} = \frac{3600}{T_{JCL}} = \frac{3600}{7.4} = 486.49 \text{ jedinica/h}$$

$$q_{jcrv} = \frac{3600}{T_{JCRV}} \cdot N_{RV} = \frac{3600}{22} \cdot 10 = 1636.36 \text{ jedinica/h}$$

$$q_{reg.} = \min \{q_{jcl}, q_{jcrv}\} = 486.49 \text{ jedinica/h}$$

Za ostale dvije konfiguracije rješenja se nalaze u tablici 3. odnosno tablici 4. budući da je postupak računa isti.

**Tablica 3. Vremena jednostrukog ciklusa za pojedine konfiguracije**

Konfiguracija	$t_{kl}$ [s]	$t_{vl}$ [s]	$T_{JCL}$ [s]	$t_{krv}$ [s]	$t_{vr}$ [s]	$T_{JCRV}$ [s]	$T_{JC}$ [s]
1.	1.5	2.2	7.4	3	8	22	29.40
2.	1.5	2.65	8.3	3	5.67	17.34	25.64
3.	1.5	3.08	9.16	3	4.5	15	24.16

**Tablica 4. Protoci za pojedine konfiguracije**

Konfiguracija	$q_{jcl}$ [jedinica/h]	$q_{jcrv}$ [jedinica/h]	$q_{reg.}$ [jedinica/h]	Usko grlo
1.	486.49	1636.36	<b>486.49</b>	Lift
2.	433.74	3114.19	<b>433.74</b>	Lift
3.	393.01	4800	<b>393.01</b>	Lift

#### 4.3. Dvostruki radni ciklus automatiziranog skladišnog sustava s regalnim vozilima

Dvostruki radni ciklus dosta je složeniji od jednostrukog ciklusa te se sastoji od dvostrukog ciklusa lifta i dvostrukog ciklusa regalnog vozila. Lift, nakon što skupi jedinicu na buffer poziciji istovara tu istu jedinicu na određenoj razini regala koju onda preuzima regalno vozilo, a zatim odlazi do sljedeće određene razine gdje pokupi jedinicu koje je regalno vozilo ostavilo te je nosi na mjesto iskladištenja. Dvostruki ciklus regalnog vozila započinje preuzimanjem jediničnog tereta od lifta kojeg prevozi na mjesto uskladištenja. Nakon što uskladišti teret odlazi do

određenog regalnog mjesta na istoj razini gdje skupi jединicu za iskladištenje te je vodi na početak reda gdje je lift preuzima. U aproksimativnom modelu su vrijednosti puta koje lift i vozilo u dvostrukom ciklusu prijeđu aproksimirane kao što i ime modela govori pa se pretpostavlja da:

- Lift istovara teret na 1/3 visine regala
- Penje se za još 1/3 visine gdje skupi teret za istovar
- Vraća se na početnu poziciju gdje istovara teret
- Regalno vozilo, nakon što preuzme teret od lifta, vozi isti na polovicu duljine regala ( $1/2L$ )
- Horizontalno se nastavlja kretati u duljini  $1/6 L$  te uzima jединicu za istovar
- Vozi pokupljenu jединicu na početak reda (ukupna duljina puta:  $2/3 L$ )

Matematički model temeljen na ovim pretpostavkama prikazan je u nastavku.

Oznaka	Jedinica	Opis
$T_{DC}$	s	trajanje dvostrukog ciklusa
$T_{DCL}$	s	Vrijeme dvostrukog ciklusa lifta
$T_{DCRV}$	s	Vrijeme dvostrukog ciklusa regalnog vozila
$t_{vl\ 0-i}$	s	Vrijeme vožnje lifta od buffer pozicije do razine izuzimanja
$t_{vl\ i-j}$	s	Vrijeme vožnje lifta od razine izuzimanja do razine uzimanja tereta
$t_{vl\ j-0}$	s	Vrijeme vožnje lifta od razine uzimanja do buffer pozicije
$t_{vrv\ 0-1}$	s	Vrijeme vožnje regalnog vozila od mjesta preuzimanja do mjesta uskladištenja
$t_{vrv\ 1-2}$	s	Vrijeme vožnje regalnog vozila od mjesta uskladištenja do mjesta iskladištenja tereta
$t_{vrv\ 2-0}$	s	Vrijeme povratka regalnog vozila na mjesto izuzimanja tereta
$q_{dcl}$	Jedinica/h	Protok lifta, dvostruki ciklus
$q_{dcrv}$	Jedinica/h	Protok regalnih vozila, dvostruki ciklus

Tablica 5. Popis oznaka – dvostruki ciklus

Napomena: Vrijeme komisioniranja lifta je  $t_{kl} = 1.5$  s, a regalnog vozila  $t_{krv} = 3$  s.

**DVOOSTRUKI CIKLUS LIFTA ( $T_{DCL}$ )**

$$T_{DCL} = 4 \cdot t_{kl} + t_{vl0-i} + t_{vli-j} + t_{vj-0} \quad [s]$$

$$t_{vl0-i} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{3v_y} \quad [s]$$

$$t_{vli-j} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{3v_y} \quad [s]$$

$$t_{vj-0} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{2H}{3v_y} \quad [s]$$

$$\begin{aligned} T_{DCL} &= 4 \cdot t_{kl} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{3v_y} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{3v_y} + \frac{v_y}{a_y} + \frac{2H}{3v_y} \\ &= 4 \cdot t_{kl} + \frac{3v_y}{a_y} + \frac{4H}{3v_y} \end{aligned}$$

**DVOOSTRUKI CIKLUS REGALNOG VOZILA ( $T_{DCRV}$ )**

$$T_{DCRV} = 4 \cdot t_{krv} + t_{vrv0-1} + t_{vrv1-2} + t_{vrv2-0} \quad [s]$$

$$t_{vrv0-1} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{2v_x} \quad [s]$$

$$t_{vrv1-2} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{6v_x} \quad [s]$$

$$t_{vrv2-0} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{2L}{3v_x} \quad [s]$$

$$\begin{aligned} T_{DCRV} &= 4 \cdot t_{krv} + \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{2v_x} + \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{6v_x} + \frac{v_x}{a_x} + \frac{2L}{3v_x} \\ &= 4 \cdot t_{krv} + 3 \frac{v_x}{a_x} + \frac{4L}{3v_x} \end{aligned}$$

UKUPNI DVOSTRUKI RADNI CIKLUS ( $T_{DC}$ )

$$\boxed{T_{DC} = T_{DCL} + T_{DCRV}}$$

Protok dvostrukog radnog ciklusa:

$$q_{dcl} = \frac{3600}{T_{DCL}} \cdot k \cdot N_L \quad \frac{[s]}{[s]}$$

$$q_{dcrv} = \frac{3600}{T_{DCRV}} \cdot k \cdot N_{TV} \quad \frac{[s]}{[s]}$$

$$q_{reg.} = \min \{q_{dcl}, q_{dcrv}\}$$

#### 4.4. Proračun dvostrukog ciklusa

Proračun će se provoditi kao za jednostruki ciklus prema podacima iz tablice 2.

$$T_{DCL} = 4 \cdot t_{kl} + t_{vl0-i} + t_{vl i-j} + t_{vl j-0}$$

$$t_{vl0-i} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{3v_y} = \frac{2}{1.5} + \frac{3.5}{3 \cdot 2} = 1.92 \text{ s}$$

$$t_{vl i-j} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{H}{3v_y} = \frac{2}{1.5} + \frac{3.5}{3 \cdot 2} = 1.92 \text{ s}$$

$$t_{vl j-0} = \frac{v_y}{a_y} + \frac{2H}{3v_y} = \frac{2}{1.5} + \frac{2 \cdot 3.5}{3 \cdot 2} = 2.5 \text{ s}$$

$$T_{DCL} = 4 \cdot 1.5 + 1.92 + 1.92 + 2.5 = 12.34 \text{ s}$$

$$T_{DCRV} = 4 \cdot t_{krv} + t_{vrv0-1} + t_{vrv1-2} + t_{vrv2-0}$$

$$t_{vrv0-1} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{2v_x} = \frac{3}{3} + \frac{42}{2 \cdot 3} = 8 \text{ s}$$

$$t_{\text{rvv1-2}} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{L}{6v_x} = \frac{3}{3} + \frac{42}{6 \cdot 3} = 3.33 \text{ s}$$

$$t_{\text{rvv2-0}} = \frac{v_x}{a_x} + \frac{2L}{3v_x} = \frac{3}{3} + \frac{2 \cdot 42}{3 \cdot 3} = 10.33 \text{ s}$$

$$T_{\text{DCRV}} = 4 \cdot 3 + 8 + 3.3 + 10.33 = 33.63 \text{ s}$$

$$T_{\text{DC}} = T_{\text{DCL}} + T_{\text{DCRV}}$$

$$= 12.34 + 33.63$$

$$= 45.97 \text{ s}$$

*Protok dvostrukog radnog ciklusa:*

$$q_l = \frac{3600}{T_{\text{DCL}}} \cdot 2 = \frac{3600}{12.34} \cdot 2 = 583.47 \text{ jedinica/h}$$

$$q_{\text{rv}} = \frac{3600}{T_{\text{DCRV}}} \cdot 2 \cdot N_{\text{RV}} = \frac{3600}{33.63} \cdot 2 \cdot 10 = 2140.95 \text{ jedinica/h}$$

$$q_{\text{reg.}} = \min \{q_l, q_{\text{rv}}\} = 494.5 \text{ jedinica/h}$$

Za ostale dvije konfiguracije rješenja se nalaze u tablici 6. odnosno tablici 7. budući da je postupak računa isti.

Tablica 6. Vremena dvostrukog ciklusa

Konfiguracija	$t_{kl}$ [s]	$t_{vl0-i}$ [s]	$t_{vl i-j}$ [s]	$t_{vl j-0}$ [s]	$T_{DCL}$ [s]	$T_{krv}$ [s]	$t_{vrV 0-1}$ [s]	$t_{vrV 1-2}$ [s]	$t_{vrV 2-0}$ [s]	$T_{DCRV}$ [s]	$T_{DC}$ [s]
1.	1.5	1.92	1.92	2.5	12.34	3	8	3.3	10.33	33.63	45.97
2.	1.5	2.21	2.21	3.08	13.5	3	5.67	2.56	7.22	27.45	40.95
3.	1.5	2.5	2.5	3.66	14.66	3	4.5	2.17	5.67	24.34	39

Tablica 7. Protoci dvostrukog ciklusa

Konfiguracija	$q_{dcl}$ [jedinica/h]	$q_{dcrv}$ [jedinica/h]	$q_{reg}$ [jedinica/h]	Usko grlo
1.	583.47	2140.95	583.47	Lift
2.	533.33	3934.43	533.33	Lift
3.	491.13	5916.19	491.13	Lift

Uspoređujući rezultate jednostrukog i dvostrukog ciklusa, primjećujemo očekivano povećanje ukupnog vremena ciklusa, ali i povećanje protoka sustava. Međutim, zabrinjavajući podatak je taj da su protoci regalnih vozila u nekim slučajevima više od 10 puta veći od protoka lifta. Unatoč tom visokom protoku, regalna vozila ne doprinose značajno ukupnoj vrijednosti sustava jer je lift taj koji ograničava ukupni protok odnosno lift je usko grlo sustava.

Ovi rezultati govore da regalna vozila većim dijelom ostaju neiskorištena, provodeći znatno vrijeme čekajući lift. Ova situacija nije samo ekonomski neisplativa, već i ograničava operativnu učinkovitost skladišnog sustava. Zbog neusklađenosti u protoku između regalnih vozila i lifta, gubi se potencijal za maksimalno iskorištavanje resursa i povećanje ukupne produktivnosti.

Dosadašnji modeli SBS/RS-a često su uključivali dedikaciju vozila za svaku razinu regala (slika 12.) i to je bio slučaj i u ovom proračunu, tzv. nefleksibilni sustav. Međutim, istraživanja su pokazala, a i što je vidljivo u ovom radu da se ukupni protok tereta zapravo ograničava brzinom i kapacitetom liftova. Stoga, imati vozilo na svakoj razini regala može biti nepotrebno i ekonomski neisplativo.

---

Uz fleksibilni pristup, vozila se mogu koristiti na više razina regala. To se postiže instalacijom posebnih liftova koji omogućuju vozilima vertikalno kretanje između razina. Ova fleksibilnost omogućuje dinamičko raspoređivanje vozila tamo gdje su trenutno najpotrebnija.

Prednosti ovog pristupa su brojne. Prije svega, smanjen je broj vozila potrebnih za optimalan rad sustava, što rezultira smanjenjem investicijskih troškova. Osim toga, dinamičko raspoređivanje vozila omogućuje bolje iskorištavanje kapaciteta liftova i optimizaciju protoka cjelokupnog sustava [11].

Dodatno, fleksibilni sustavi liftova omogućuju lakše prilagodbe i nadogradnje sustava u skladu s promjenjivim potrebama skladišta. To osigurava dugoročnu održivost i skalabilnost sustava.

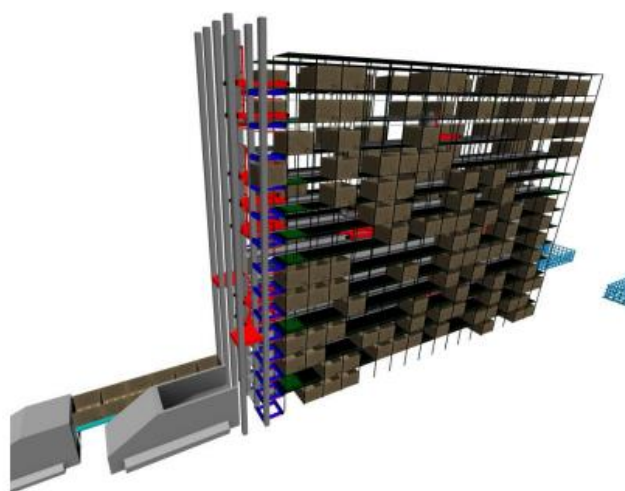
U zaključku, prelazak na fleksibilne sustave liftova predstavlja ključnu strategiju za optimizaciju protoka u SBS/RS sustavima s regalnim vozilima. Ovakav pristup omogućuje bolje iskorištavanje resursa, smanjenje troškova i poboljšanje ukupne učinkovitosti skladišta.



## 5. USPOREDBA APROKSIMACIJSKOG MODELA SA SIMULACIJSKIM I ANALITIČKIM MODELOM OBLIKOVANJA AUTOMATIZIRANIH SKLADIŠNIH SUSTAVA S REGALNIM VOZILIMA

### 5.1. Simulacijski model oblikovanja

Simulacijski modeli su ključni alati u analizi i optimizaciji kompleksnih sustava. Oni omogućuju repliciranje stvarnog ponašanja sustava u virtualnom okruženju, gdje su komponente sustava (lift, vozila, buffer...) u međusobnoj interakciji. Za razliku od analitičkih modela, simulacijski modeli uzimaju u obzir različita ograničenja koja se javljaju u stvarnom svijetu.



Slika 22. 3D prikaz simulacije [14]

Jedna od bitnih karakteristika simulacijskih modela je korištenje međuspremnik konačnog kapaciteta. To znači da se uzima u obzir čekanje dizala na vozila i obrnuto, te blokiranje dizala i vozila zbog popunjenih međuspremnik [14]. Ovakav pristup omogućuje preciznije modeliranje stvarnih situacija i ponašanja sustava, uzimajući u obzir dinamičke promjene i ograničenja koja se mogu pojaviti u realnom svijetu.

### 5.2. Usporedba aproksimacijskog i simulacijskog modela

Za usporedbu aproksimacijskog i simulacijskog modela koristit će se prethodno izračunati podaci za aproksimacijski model te gotovi podaci preuzeti iz literature [10.] za simulacijski model koji su prikazani u tablici 8.

Greška je izračunata po formuli :  $X = \frac{(TDCa - TDCs)}{TDCa} \cdot 100$

**Tablica 8. Usporedba aproksimacijskog i simulacijskog modela**

Konfiguracija	Aproksimacija $T_{DCLa}$ [s]	Simulacija $T_{DCLs}$ [s]	Greška X (%)	Aproksimacija $T_{DCRVa}$ [s]	Simulacija $T_{DCRVs}$ [s]	Greška (%) [s]
1.	12.34	11.60	6	33.63	33.70	0.2
2.	13.5	12.90	4.44	27.45	27.40	0.18
3.	14.66	14.30	2.46	24.34	24.40	0.25

Prema tablici 8. odstupanje vremena dvostrukog ciklusa lifta aproksimacijskog u odnosu na simulacijski model je u rasponu od 2% do 6%, a za regalno vozilo je to u rasponu do 0.3%. Prema tome se može reći da su aproksimacijski modeli napravljeni za izračun radnog ciklusa lifta prilično dobri, ali još nedovoljno usavršeni i mogu pokazivati nerealne rezultate prilikom optimizacije sustava. Nasuprot tome, predloženi aproksimacijski model radnog ciklusa regalnog vozila pokazuje zadovoljavajuće devijacije. Stoga, tako predloženi model može pokazivati dobre performanse i biti koristan alat za projektiranje SBS/RS sustava. Može se uočiti kako greška vremena radnog ciklusa lifta opada s povećanjem visine regala. To možemo povezati sa samom brzinom lifta, budući da smo u aproksimacijskom modelu pretpostavili da on između svake razine uspije postignuti maksimalnu brzinu, ali u stvarnosti on to tek postiže na većim visinama pa je očekivano da je na većim visinama bliže rezultatima simulacijskog modela.

Glavni nedostatak aproksimacijskih modela leži u njihovoj ograničenosti u procjeni vrlo složenih sustava. Stoga je često nužno koristiti pojednostavljenja i pretpostavke kako bi se stvorio model koji odražava stvarnost. Takvi sustavi su samo aproksimacija kompleksnog sustava. Međutim, upravo zbog pojednostavljenja brže se dolazi do konačnih rješenja. Zbog toga je često praksa da se, korištenjem analitičkih i aproksimacijskih modela, odabere nekoliko najperspektivnijih varijanti sustava, nakon čega se koristi simulacija koja detaljnije razrađuje čitavu problematiku nakon čega se odabir optimalna varijante [12]. Simulacija se često koristi u kasnijoj fazi projektiranja [13].

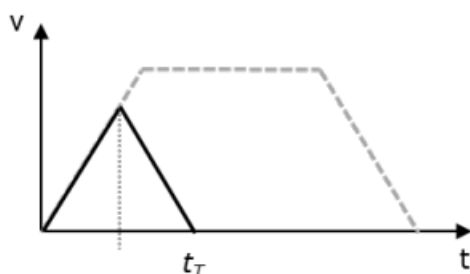
### 5.3. Usporedba aproksimacijskog i analitičkog modela

Podatci dobiveni putem analitičkog proračuna preuzeti su iz literature [10].

**Tablica 9. Usporedba aproksimacijskog i analitičkog modela**

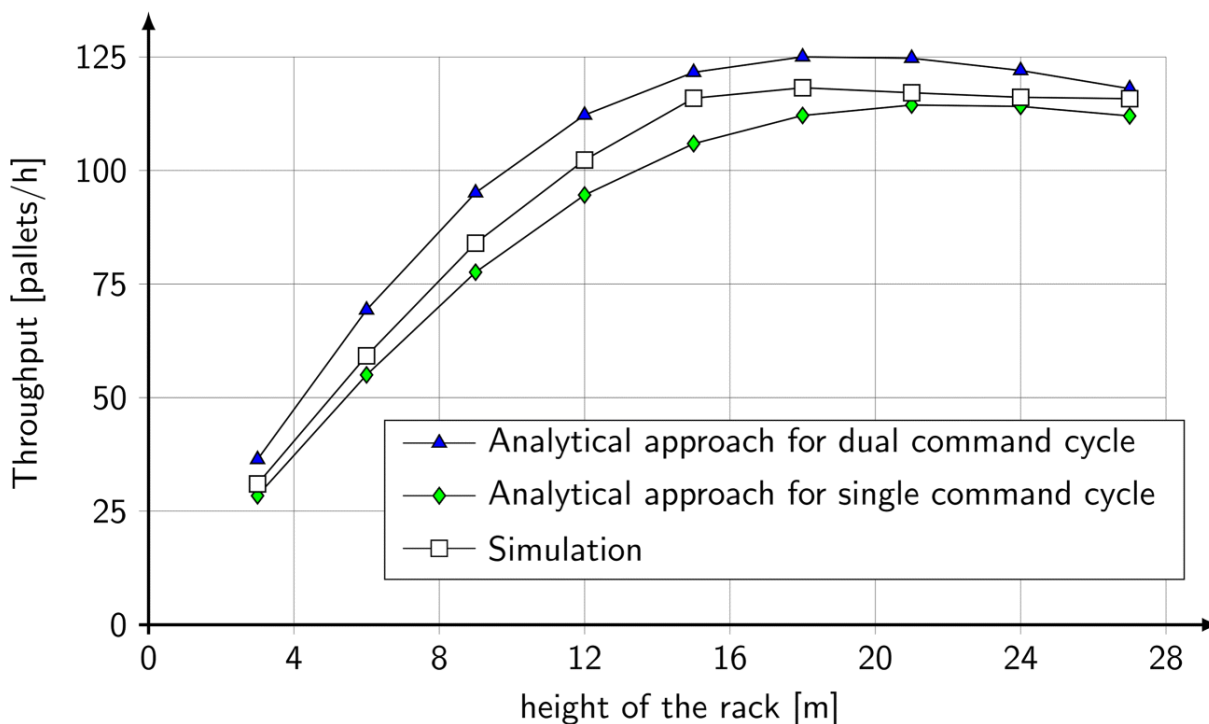
Konfiguracija	Aproksimacija $T_{DCLa}$	Analitika $T_{DCL}$	Greška X (%)	Aproksimacija $T_{DCRVa}$	Anaitika $T_{DCRV}$	Greška (%)
1.	12.34	11.70	5.19	33.63	33.62	0.03
2.	13.5	13.07	3.19	27.45	27.38	0.26
3.	14.66	14.34	2.18	24.34	24.24	0.41

Odstupanja aproksimacijskog modela od analitičkog modela nešto su manja nego što je slučaj sa simulacijskim modelom što je i očekivano. Analitički model prikazuje manje realne podatke nego simulacijski model, ali opet svojim modelom dosta je bliži stvarnosti nego su to aproksimacijski modeli. Za razliku od aproksimacijskog modela, analitički model ima manje pojednostavljenja. Najveća razlika je u pogledu na brzinu kretanja lifta i vozila. Kao što je već rečeno, aproksimacijskim modelom pretpostavlja se da lift i vozilo u svakom svom putovanju dostižu maksimalnu brzinu  $v_{max}$  (slika 21.). Analitički model pak uzima obzir da ako je udaljenost putovanja prekratka (manja od  $v^2/2a$ ), ubrzanje se zaustavlja pri nižoj brzini i pokreće se proces kočenja odnosno jednolikog usporenja (slika 23.).



**Slika 23. Graf  $v_1 < v^2/2a$  [28]**

Slika 24. prikazuje koliko je sustavu modeliranom analitičkim putem potrebno da se približi rezultatima simulacijskog modela.



Slika 24. Throughput of a rack of length 105 m of single-deep storage [21]

Iz grafa je vidljivo da nakon određene visine regala analitički model prikazuje približno iste rezultate kao što je to slučaj u simulacijskom modelu. Graf je izvađen iz literature [21], a izračun je napravljen za regal dug 105 m koji pohranjuje palete.

Analitički modeli pružaju temeljito razumijevanje sustava putem matematičkih jednadžbi te omogućuju visoku preciznost u predviđanjima. Međutim, njihova složenost zahtijeva duboko tehničko znanje i vremenski zahtjevne proračune, što može otežati njihovu implementaciju, posebno u situacijama gdje su potrebni brzi rezultati ili kada resursi za detaljne analize nisu dostupni. S druge strane, aproksimacijski modeli nude jednostavniji pristup analizi sustava koristeći pojednostavljenje, heuristike ili empirijske podatke. Ovi modeli su brži za implementaciju i često su dovoljno precizni za praktične svrhe. Uzimajući u obzir konstantnu akceleraciju kao aproksimaciju, mogu se koristiti za brze analize i optimizaciju sustava.

Konačno, odabir između analitičkog i aproksimacijskog modela ovisi o specifičnim zahtjevima projekta, dostupnim resursima te važnosti brzine i preciznosti u analizi sustava. U nekim

---

situacijama može biti korisno kombinirati ove pristupe kako bi se postigla najbolja moguća analitička i praktična razumijevanja sustava.

## 6. ZAKLJUČAK

Automatizirani skladišni sustavi su postali ključni za konkurentnost vodećih industrijskih kompanija, no potrebno je kontinuirano raditi na njihovom poboljšanju i optimizaciji kako bi se maksimizirala učinkovitost. U ovom radu je prezentiran automatizirani skladišni sustav s regalnim vozilima (SBS/RS) i analizirane su njegove performanse kako bi se utvrdilo koliko je optimalan. Iako su postignuti određeni napretci, SBS/RS je i dalje u procesu optimizacije, posebno u pronalaženju najboljih modela za oblikovanje takvog sustava. Pokazalo se da je lift ključni element u ovom sustavu i često predstavlja usko grlo. U simulacijskim modelima se zna dogoditi da lift čeka regalno vozilo i da ono postaje usko grlo sustava. Stoga je bitno posvetiti pažnju optimizaciji učinkovitosti samog lifta te razviti preciznije modele koji bi bolje prikazivali njegov proces rada. Također, kod velikih sustava, koji posjeduju velik broj regala s puno razina, a samo jedan ili dva lifta po regalu, treba razmišljati o optimalnom broju regalnih vozila kako ne bi predugo čekali dolazak lifta, tada je bitno razmišljati o fleksibilnim sustavima. Tada bi se uvelike smanjilo vrijeme čekanja i povećala produktivnost, što bi rezultiralo i smanjenjem investicijskih troškova. Budućnost ovih sustava je obećavajuća, ali je važno obratiti pažnju na ovakve specifičnosti i riješiti određene izazove kako bi se olakšali procesi u logistici i osigurala daljnja optimizacija. Sustavi kao što je SBS/RS imaju potencijal transformirati način na koji se skladište i distribuiraju proizvodi, pružajući mogućnosti za efikasnije i fleksibilnije operacije. Pored toga, potrebno je naglasiti važnost kontinuiranog istraživanja i razvoja kako bi se identificirale i riješili eventualni nedostaci u postojećim modelima. To bi uključivalo i implementaciju naprednih tehnologija poput umjetne inteligencije i strojnog učenja kako bi se sustavi mogli prilagoditi dinamičnim promjenama u okolini i potrebama tržišta. Dodatno, razmatranje ekoloških aspekata u dizajnu i operativnosti sustava također je ključno za njihov dugoročni uspjeh. Optimizacija rada liftova i transportnih vozila može rezultirati smanjenjem potrošnje energije i emisije CO<sub>2</sub>, što nije samo ekološki prihvatljivo već i ekonomski isplativo. Isto tako, važno je kontinuirano uključivanje korisnika i stručnjaka iz prakse u proces razvoja i optimizacije, kako bi se osiguralo da novi modeli i pristupi odgovaraju stvarnim potrebama i izazovima u industriji. U konačnici, ulaganje u istraživanje, razvoj i implementaciju naprednih tehnoloških rješenja za automatizirane skladišne sustave ne samo da će poboljšati učinkovitost i konkurentnost tvrtki, već će također doprinijeti globalnim ciljevima održivosti i smanjenju ekološkog otiska industrijskih operacija. Sveukupno gledajući, kontinuirani napredak u optimizaciji automatiziranih skladišnih sustava

---

ključan je za postizanje efikasnijih, ekonomski isplativijih i ekološki prihvatljivijih operacija u logistici i proizvodnji.

**LITERATURA**

- [1] Đukić, G., Posebna poglavlja tehničke logistike, podloge za predavanja, 2014.-2015.
- [2] <https://www.conveyco.com/technology/asrs/unit-load-asrs/> , (Pristup 01.12.2023.)
- [3] <https://whitesystems.com/what-is-a-horizontal-carousel/> , (Pristup 01.12.2023.)
- [4] <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/762>, (Pristup 04.12.2023.)
- [5] 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.
- [6] Travel time models for split-platform ASRS\_Liu, Gong, De Koster
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=Iu73Ekn-cL0>, (Pristup 10.12.2023.)
- [8] <https://www.warehouseautomation.com/asrs/perfect-pick/> , (Pristup 22.12.2023.)
- [9] <https://www.sypsex.com/products/kardex-vertical-buffer-module/> , (Pristup 08.01.2024.)
- [10] T. Lerher, B. Y. Ekren, G. Dukic and B. Rosi, "Travel Time Model for Shuttle-based Storage and Retrieval Systems", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 78, no. 9–12, pp. 1705-1725, 2015.
- [11] Y. Ekren, Berk Kaya, Melis Küçükysar, "Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems Designs from Multi-Objective Perspectives: Total Investment Cost, Throughput Rate and Sustainability"
- [12] X. Cai, „Performance evaluation of warehouses with automated storage and retrieval“ technologies,« *Electronic Theses and Dissertations*, 2010.
- [13] K. J. Roodbergen i I. F. Vis, »A survey of literature on automated storage and retrieval systems,« *European Journal of Operational Research*, pp. 343-362, 2009
- [14] [https://repositorij.fsb.hr/8951/1/Dujman\\_2018\\_diplomski.pdf](https://repositorij.fsb.hr/8951/1/Dujman_2018_diplomski.pdf), (Pristup 01.02.2024.)
- [15] <https://www.gieicom.com/productos/almacenamiento-automatico/unitload-asrs/>, (Pristup 01.02.2024.)
- [16] <https://www.craftsmanstorage.com/miniload-asrs>, (Pristup 01.02.2024.)
- [17] <https://www.refrigeratedfrozenfood.com/gdpr-policy?url=https%3A%2F%2Fwww.refrigeratedfrozenfood.com%2Farticles%2F94826-industry-40-technologies-revolutionize-asrs>, (Pristup 14.02.2024.)
- [18] <https://cisco-eagle.com>, (Pristup 15.02.2024.)
- [19] <https://precisionwarehouse.design.com/product/perfect-pick/>, (Pristup 14.02.2023.)
- [20] <https://www.vhhdlg.com/products/vertical-carousel/>. (Pristup 14.02.2024.)
- [21] *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (Pristup 15.02.2024.)



- 
- [22] B.Jerman, B.Y.Ekren, Melis Küçükyaşar, T.Lehrer, „Simulation-Based Performance Analysis for a Novel AVS/RS Technology with Movable Lifts“
- [23] [https://www.researchgate.net/figure/SBS-RS-warehouse-Dematic-Multishuttle-2-White-Paper-2013\\_fig1\\_332706025](https://www.researchgate.net/figure/SBS-RS-warehouse-Dematic-Multishuttle-2-White-Paper-2013_fig1_332706025), (Pristup 18.02.2024.)
- [24] B.Y.Ekren, T.Lerher, M.Küçükyaşar, B.Jerman, „Cost and performance comparison of tier-captive SBS/RS with a novel AVS/RS/ML“
- [25] T.Lerhera, J.Marolt, F.Sgarbossa, B.Y.Ekrend, G.Đukić, „Chapter xx: Design and operation of single- and multi-deep Shuttle-based Storage and Retrieval Systems (SBS/RS)“
- [26] Đukić, G., Posebna poglavlja tehničke logistike, prezentacija s predavanja
- [27] Y.B.Ekren, B.Arsian, „A reinforcement learning approach for transaction scheduling in a shuttle-based storage and retrieval system“
- [28] <https://www.fem-eur.com/> . (Pristup 20.02.2024.)

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc