

# Analiza i simulacija skladišnog sustava temeljenog na automatiziranim vođenim vozilima

---

**Domitrek, Tin**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:604045>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-22**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Tin Domitrek**

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Filip Šuligoj

Student:

Tin Domitrek

Zagreb, 2024. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Filipu Šuligoju na usmjeravanju tijekom pisanja zadatka, te Skladišnoj Logistici na pomoći, te podacima i znanju stečenim tijekom rada u tvrtki.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i podršci tijekom mog fakultetskog obrazovanja.

Tin Domitrek



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



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tin Domitrek** JMBAG: 0035215426

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza i simulacija skladišnog sustava temeljenog na automatiziranim vođenim vozilima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis and simulation of a warehouse system based on automated guided vehicles**

Opis zadatka:

Tema diplomskog rada obuhvaća detaljnu analizu automatiziranih vođenih vozila (eng., AGV - automated guided vehicle) i njihovu primjenu u skladišnim sustavima. Glavni cilj rada je prikazati funkcionalnosti AGV sustava, njihovu strukturu i navigacijske metode. Potrebno je provesti analizu simulacije skladišnog sustava pomoću Flexsim simulacijskog softvera, s fokusom na usporedbu AGV sustava i manualnih skladišta. U okviru rada pregledat će se studije slučaja iz stvarnog svijeta, kako bi se istaknuli rizici i potencijalna ograničenja AGV sustava.

Zadaci koje student treba ispuniti:

- Pregled relevantne literature i postojećih tehnologija vezanih uz AGV sustave.
- Klasifikacija različitih vrsta AGV vozila i objašnjenje razloga njihove upotrebe.
- Opis i analiza hardverskih i softverskih komponenti AGV sustava, uključujući senzore, komunikacijske sustave, navigacijske metode i sigurnosne mjere.
- Razrada procesa simulacije AGV sustava korištenjem Flexsim softvera, uključujući dizajn simulacijskog modela skladišta, pokretanje simulacije i interpretaciju rezultata.
- Provođenje komparativne analize između AGV sustava i manualnih skladišta.
- Analiza stvarnih primjera primjene AGV sustava u industriji te identifikacija rizika i ograničenja ovakvih sustava.
- Opis komisioniranja AGV sustava.
- Pisanje zaključka koji sumira dobivene rezultate i preporuke za daljnja istraživanja.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
26. rujna 2024.	28. studeni 2024.	5., 6. i 9. prosinca 2024.
Zadatak zadao:		Predsjednik Povjerenstva:
Doc. dr. sc. Filip Šuligoj		Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. OPĆENITO O AGV SUSTAVIMA .....	2
2.1. Vrste AGV vozila .....	3
2.2. Prednosti upotrebe .....	4
2.3. Komunikacija .....	5
2.4. Hardverske komponente.....	7
2.4.1. Senzori.....	9
2.5. Navigacijske metode.....	10
2.5.1. Laserska navigacija .....	10
2.5.2. Navigacija induktivnom žicom.....	12
2.6. Sigurnosni sustavi.....	14
2.7. Softverska podrška.....	16
3. SIMULACIJA AGV SUSTAVA.....	18
3.1. Flexsim simulacijski softver.....	18
3.1.1. Opis korištenih 3D objekata .....	19
3.1.2. Vozne putanje i kontrola prometa.....	21
3.1.3. Nadzorna ploča i analitički grafovi.....	23
3.2. <i>Process Flow</i> alat za izradu kontrolnih petlji.....	24
3.2.1. Pregled osnovnih elemenata .....	25
3.2.2. Kontrolna petlja za simulaciju AGV sustava .....	28
3.3. Dizajniranje simulacijskog modela skladišta .....	30
3.3.1. 3D okoliš simulacije.....	30
3.3.2. Protoci robe i distribucija protoka .....	34
3.3.3. Parametri simulacije.....	35
3.4. Pokretanje simulacije .....	36
3.4.1. Optimizacija AGV mreže.....	36
3.4.2. Maksimalni mogući protok.....	37
3.4.3. Rezultati simulacije.....	38
4. ANALIZA AGV SUSTAVA .....	41
4.1. Komparativna analiza: AGV sustav – Manualno skladište.....	41
4.1.1. Efikasnost i produktivnost.....	41
4.1.2. Iskoristivost prostora i optimizacija operacija.....	43
4.1.3. Sigurnost i prevencija nesreća .....	45
4.1.4. Skalabilnost i fleksibilnost .....	46
4.1.5. Zaključak i preporuke .....	47

---

4.2. ROI analiza.....	49
4.2.1. Početna ulaganja .....	49
4.2.2. Troškovi održavanja.....	49
4.2.3. Troškovi rada i operativni troškovi.....	49
4.2.4. Energetski troškovi .....	50
4.2.5. Povrat investicije.....	50
4.3. Studije slučaja i primjena u stvarnom svijetu.....	52
4.3.1. TORO – automatizacija skladišta uz prisustvo manualnih operacija [16] .....	52
4.3.2. Optimizacija prometa implementacijom AGV sustava u češkoj tvornici za automobilsku industriju [17] .....	52
4.3.3. Haval – jedno AGV vozilo za više skladišnih operacija [16] .....	53
4.4. Rizici i ograničenja AGV sustava.....	54
5. PROCES PUŠTANJA U RAD AGV SUSTAVA.....	56
5.1. Naručivanje vozila i periferne infrastrukture .....	56
5.2. Dizajn rasporeda reflektora, AGV mreže i prometa sustava.....	56
5.3. Postavljanje Wi-Fi mreže .....	57
5.4. Instalacija I/O ormarića, stanica za punjenje i reflektora.....	58
5.5. Postavljanje servera, te instalacija upravljačkog i navigacijskog softvera .....	58
5.6. Kalibracija senzora i parametara vozila, te postavljanje stanica za preuzimanje/odlaganje .....	59
5.7. Test sigurnosnog sustava i kočenja.....	60
5.8. Test tehničke ispravnosti na lokaciji (Site Acceptance Testing - SAT) .....	60
5.9. Primopredaja sustava i obuka osoblja.....	61
6. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	64
IZVORI SLIKA.....	65

## POPIS SLIKA

Slika 1. AGV-ovi u skladišnom okruženju [18].....	2
Slika 2. Vučni AGV (JBT Corporation) [19].....	3
Slika 3. Nosač jediničnog tereta (Toyota Material Handling) [20].....	3
Slika 4. Podizni paletni AGV Trey (Gideon Brothers) [21].....	4
Slika 5. Montiranje Wi-Fi antena (Access Points) [22].....	6
Slika 6. Primjer Heatmape [23].....	6
Slika 7. Automatsko punjenje baterija [20].....	8
Slika 8. AGV upravljački kontroler kompanije Kollmorgen [24].....	8
Slika 9. Skener i retro-reflektori u AGV sustavu [25].....	9
Slika 10. Sigurnosni laserski senzor Hokuyo [26].....	9
Slika 11. Fork bumper senzori na AGV-u [27].....	10
Slika 12. a) Referentna točka vozila, b) Nagib vozila, c) xy-koordinata vozila.....	11
Slika 13. Komponente laserskog navigacijskog sustava AGV-a [28].....	11
Slika 14. Komponente induktivnog navigacijskog sustava AGV-a [28].....	12
Slika 15. Korištenje različitih zona frekvencija kod induktivnog navigacijskog sustava.....	13
Slika 16. Magnetsko polje oko induktivne žice.....	14
Slika 17. Sigurnosna polja senzora Hokuyo UAM [26].....	14
Slika 18. Sick S3000 sigurnosni skener [29].....	15
Slika 19. Primjer Geofencing zona unutar skladišta [30].....	15
Slika 20. Korisničko sučelje softvera Flexsim.....	18
Slika 21. Source i Queue elementi.....	19
Slika 22. Sink element.....	19
Slika 23. Task Executor u obliku AGV vozila.....	20
Slika 24. Postavke Task Executora.....	20
Slika 25. Alati za AGV simulaciju.....	21
Slika 26. Vozne putanje AGV mreže.....	21
Slika 27. Kontrolne točke na AGV mreži.....	22
Slika 28. Kontrolne zone AGV mreže.....	22
Slika 29. Nadzorna ploča sa primjerima izrađenih analitičkih grafova.....	23
Slika 30. Elementi alata Process Flow.....	24
Slika 31. Token.....	25
Slika 32. Aktivnost.....	25
Slika 33. Shared Assets.....	26
Slika 34. Konektor.....	26
Slika 35. Kontrolna petlja za AGV operacije.....	28
Slika 36. Ulazak "na vilice" kod lokacije Sink 2.....	30
Slika 37. Dizajn sustava unutar softvera Flexsim s prikazanim protocima.....	32
Slika 38. Udaljenosti između relevantnih stanica.....	33
Slika 39. Postavljanje uniformne distribucije dolazaka paleta na pokretnu traku.....	34
Slika 40. Postavljanje log-normal distribucije dolazaka paleta na pokretnu traku.....	35
Slika 41. Prva verzija simulacije prije optimiziranja mreže.....	36
Slika 42. Optimizirana simulacija.....	37
Slika 43. Grafovi osnovnih značajki.....	38
Slika 44. Usporedba broja paleta kroz vrijeme u neoptimiziranoj i optimiziranoj simulaciji.....	39
Slika 45. Usporedba stanja AGV vozila u neoptimiziranoj i optimiziranoj simulaciji.....	39



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Dostupne statističke varijable unutar softvera Flexsim .....	24
Tablica 2. Korišteni elementi u Process Flow alatu .....	27
Tablica 3. Parametri simulacije .....	35
Tablica 4. Maksimalni mogući protok sustava .....	38
Tablica 5. KPI-jevi efikasnosti i produktivnosti .....	43
Tablica 6. KPI-jevi iskoristivosti prostora i optimizacija operacije .....	44
Tablica 7. KPI-jevi sigurnosti i prevencije nesreća .....	45
Tablica 8. KPI-jevi skalabilnosti i fleksibilnosti .....	47
Tablica 9. Sažetak komparativne analize .....	47
Tablica 10. Početni troškovi sustava .....	50
Tablica 11. Kumulativni godišnji troškovi .....	50

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i> – automatizirano vođeno vozilo
WMS	<i>Warehouse Management System</i> – sustav za upravljanje skladištem
AP	<i>Access Point</i> – pristupna točka
FMCG	<i>Fast Moving Consumer Goods</i> – roba široke potrošnje
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> – ključni pokazatelji učinka
ROI	<i>Return of Investment</i> – povrat investicije
SAT	<i>Site Acceptance Test</i> – test tehničke ispravnosti na lokaciji

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad istražuje dizajn, upotrebu i prednosti sustava automatiziranih vođenih vozila (AGV) u modernoj logistici. Započinje pregledom tipova AGV-ova, komponenti, navigacijskih metoda i sigurnosnih sustava.

Kroz simulaciju pomoću softvera FlexSim, pokazuje se kako dizajnirati, optimizirati i analizirati AGV sustav u virtualnom okruženju, pružajući uvid u kontrolu prometa, protok robe i operativnu učinkovitost.

Komparativna analiza AGV sustava i manualnih skladišnih operacija utvrđuje AGV sustave kao superiornu alternativu manualnim procesima, te se analizom povrata investicija pokazuje ekonomska izvedivost ovih sustava. Studije slučaja ilustriraju stvarne primjene AGV-ova, naglašavajući njihovu svestranost u različitim industrijama.

Diplomski rad također detaljno opisuje proces puštanja u rad AGV sustava, od projektiranja, instalacije, pa sve do testiranja sustava i obuke osoblja.

Ključne riječi: automatizirano vođena vozila (AGV), sigurnost, simulacija, FlexSim, komparativna analiza

## **SUMMARY**

This thesis explores the design, use, and benefits of automated guided vehicle (AGV) systems in modern logistics. It begins with an overview of AGV types, components, navigation methods, and safety systems.

Through simulation using FlexSim software, it is shown how to design, optimize, and analyze an AGV system in a virtual environment, providing insight into traffic control, goods flow, and operational efficiency.

A comparative analysis of AGV systems and manual warehouse operations establishes AGV systems as a superior alternative to manual processes, and a return-on-investment analysis demonstrates the economic feasibility of these systems. Case studies illustrate real-world applications of AGVs, highlighting their versatility in various industries.

The thesis also details the process of commissioning an AGV system, from design and installation to system testing and staff training.

**Key words:** automated guided vehicles (AGV), safety, simulation, FlexSim, comparative analysis

## 1. UVOD

Automatizacija je značajno transformirala industriju logistike i skladištenja. Automatizirano vođena vozila (AGV) ključni su dio ove promjene, nudeći učinkovita rješenja za rukovanje materijalom unutar skladišta ili proizvodnog pogona. AGV-ovi rade autonomno, poboljšavajući radnu učinkovitost, smanjujući troškove rada i povećavajući sigurnost, a to je u ovo doba starenja populacije i gubljenja radne snage jako bitno. Iako prilično nov pojam na Hrvatskom tržištu, AGV-ovi se sve više implementiraju u skladišta zapadnih europskih zemalja. Kompanije poput TOYOTA Material Handling i JBT Corporation su vodeći lideri na globalnom tržištu, a u Hrvatskoj se tvrtka Gideon Brothers pokušava probiti sa novim tehnologijama u sferi AGV-ova i AMR-ova. Njihov AGV Trey je jedno od prvih AGV vozila koje može rukovati paletama izravno iz kamiona.

Ovaj diplomski rad ispituje AGV sustave u automatizaciji skladišta, fokusirajući se na proces puštanja u rad, simulaciju, te analizu istog. Rad je podijeljen u tri dijela.

Prvi dio upoznaje čitatelja sa AGV sustavima, uključujući njihove primjere upotrebe (use cases), način komunikacije, hardverske komponente, senzore, softverske zahtjeve, te navigacijske metode. Također se raspravlja i o sigurnosnim protokolima potrebnima za siguran i pravilan rad AGV sustava.

Drugi dio koristi FlexSim za simulaciju AGV sustava u skladišnom okruženju. Ovaj odjeljak detaljno opisuje kreiranje modela virtualnog skladišta, protoke robe unutar skladišta, konfiguriranje AGV operacija i prikaz rezultata simulacije kako bi se identificirala poboljšanja.

U trećem dijelu se provodi analiza AGV sustava i uspoređuje ga se s manualnim skladišnim operacijama. Ova usporedba naglašava prednosti, izazove i rizike implementacije AGV-ova, fokusirajući se na poboljšanje produktivnosti, smanjenje troškova i sigurnost. Također se provodi analiza povrata investicije usporedno sa manualnim skladištem. Pri samom kraju ovog rada, kratko se opisuje proces puštanja u rad AGV sustava.

Ovaj diplomski rad ima za cilj pružiti uvid u ulogu AGV-ova u modernom skladištu, naglašavajući važnost simulacije u procesu optimizacije skladišnih operacija za bolju produktivnost i sigurnost.

## 2. OPĆENITO O AGV SUSTAVIMA

Prema jednoj od definicija, automatizirano vođena vozila (AGV – Automated Guided Vehicles) su autonomna, računalno upravljana vozila dizajnirana za prijevoz materijala. Opremljeni su navigacijskim sustavima i sustavima za izbjegavanje sudara, što im omogućuje rad bez ljudskih vozača. [1]

Automatizirano vođena vozila se koriste u raznim industrijama za automatizaciju rukovanja materijalom. Ne postoji tipični AGV. Vozila su raznolika kao i roba koju prevoze. Može biti veliko vozilo koje prevozi 20 tona čeličnog lima u roli ili mala platforma za mikročipove. Ali najčešći primjeri upotrebe uključuju prijevoz sirovina u proizvodnim pogonima, te premještanje robe unutar skladišta. Primarna svrha AGV-ova je povećanje operativne učinkovitosti, smanjenje troškova rada i povećanje sigurnosti na radnom mjestu minimiziranjem ljudske intervencije u ponavljajućim i opasnim zadacima. [2]

AGV-ovi su se značajno razvili od svojih početaka ranih 1950-ih. Prvi AGV, koji je 1953. predstavio Barrett Electronics iz Northbrooka, Illinois, bio je kamion za vuču koji je pratio žicu ugrađenu u pod. Tijekom desetljeća, AGV-ovi su prešli s jednostavnih žičano vođenih sustava na sofisticirane strojeve koji koriste tehnologije poput laserske navigacije i umjetne inteligencije, povećavajući njihovu učinkovitost i prilagodljivost u različitim industrijama. [3]



Slika 1. AGV-ovi u skladišnom okruženju [18]

## 2.1. Vrste AGV vozila

AGV-ovi su zapravo viličari ili mobilne platforme modificirane sa hardverskom i softverskom podrškom za automatsko upravljanje. AGV-ovi se mogu podijeliti u nekoliko kategorija na temelju njihovog dizajna i funkcionalnosti prema [4]:

1. Vučna vozila (Towing vehicles): Ovi AGV-ovi su dizajnirani za vuču kolica ili prikolica. Obično se koriste u proizvodnim pogonima za premještanje sirovina do proizvodnih linija i gotovih proizvoda do skladišta.



Slika 2. Vučni AGV (JBT Corporation) [19]

2. Nosači jediničnog tereta (Unit load carriers): Ova vozila su mobilne platforme koje nose teret izravno na vozilu. Koriste se za prijevoz paleta, kontejnera i drugih vrsta jediničnog tereta.



Slika 3. Nosač jediničnog tereta (Toyota Material Handling) [20]

3. Paletni viličari: Ovi AGV-ovi se koriste za rukovanje paletiziranim teretima. Najfleksibilniji oblik AGV-ova, može se koristiti i za prijevoz sirovina i za podizanje na niske i visoke razine regala u skladištu. Ovakav oblik viličara ćemo simulirati u sklopu ovog diplomskog rada u kasnijem poglavlju, točnije električni visokopodizni ručni AGV viličar koji može dizati 3-5 metara. Još se mogu podijeliti na regalne AGV viličare koji dižu na visine do 10 metara, te čeone AGV viličare (counterbalance truck) koji mogu dizati veće težine tereta.



Slika 4. Podizni paletni AGV Trey (Gideon Brothers) [21]

## 2.2. Prednosti upotrebe

AGV sustavi se primarno koriste zbog poboljšanja slijedećih operativnih zahtjeva [1, 4]:

- Povećana točnost: AGV-ovi slijede unaprijed programirane putanje s visokom preciznošću, smanjujući pogreške povezane s ručnim rukovanjem teretom poput sudara, ogrebotina i padanja tereta.
- Poboljšano upravljanje skladišnim procesima: AGV-ovi se mogu integrirati sa sustavima za upravljanje skladištem (WMS) za praćenje zaliha i zadavanje narudžbi u stvarnom vremenu.
- Poboljšana fleksibilnost: AGV-ovi se mogu programirati za obavljanje različitih zadataka i ruta, te mogu obavljati transport 24/7.
- Poboljšanje produktivnosti: AGV-ovi rade kontinuirano bez prestanka, što dovodi do povećane propusnosti skladišta i učinkovitosti. Mogu se programirati da slijede optimalne putanje, smanjujući vrijeme potrebno za prijevoz robe. Na primjer, u



velikom distribucijskom centru, AGV-u možemo poslati stanje narudžbe preko I/O signala, osiguravajući pravovremeno ispunjavanje narudžbi.

- Smanjenje troškova rada: AGV-ovi smanjuju ovisnost o ljudskim radnicima za zadatke koji se ponavljaju. To dovodi do značajnih ušteda u troškovima rada i omogućuje zaposlenicima da se usredotoče na složenije aktivnosti s dodanom vrijednošću. Na primjer, u proizvodnom pogonu, AGV-ovi mogu transportirati sirovine do proizvodnih linija, oslobađajući radnike da se koncentriraju na zadatke montaže. AGV sustav primarno košta više od manualnog sustava (viličar i čovjek koji radi), ali povrat investicije u sustav se vidi već nakon 3-6 godina, ovisno o kojoj državi se radi.
- Sigurnost: AGV-ovi su opremljeni naprednim sensorima i sigurnosnim sustavima za sprječavanje sudara i nesreća. To rezultira sigurnijim radnim okruženjem, smanjujući rizik od ozljeda povezanih s manualnim rukovanjem materijalom. Na primjer, AGV-ovi u skladištu smanjuju brzinu ispred prepreka, te mogu i potpuno stati ako se prepreka nalazi preblizu.

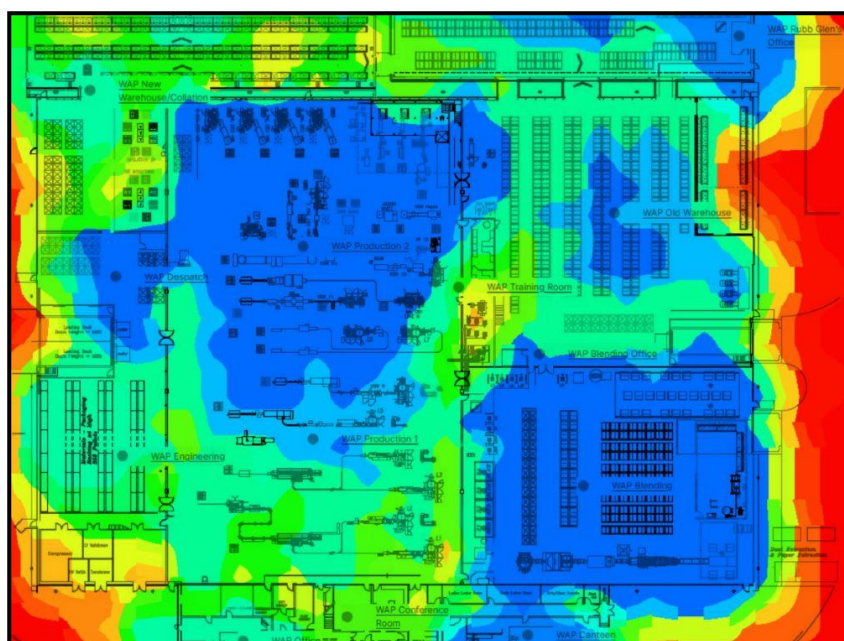
### 2.3. Komunikacija

AGV-ovi se oslanjaju na komunikacijske sustave za razmjenu podataka sa središnjim kontrolnim sustavom (WMS ili interni softver od dobavljača AGV sustava) i drugim AGV-ovima. To uglavnom uključuje [5]:

- Wi-Fi: Wi-Fi omogućuje razmjenu podataka u stvarnom vremenu, što omogućava dinamičke prilagodbe rute i dodjelu zadataka. Skladište ili proizvodni pogon mora biti u potpunosti pokriven Wi-Fi mrežom kako bi AGV sustav mogao normalno raditi. To se postiže postavljanjem Wi-Fi antena koje se uglavnom montiraju na strop skladišta ili na zidove. Pravilno postavljanje Wi-Fi antena smanjuje smetnje uzrokovane metalnim regalima ili strojevima unutar skladišta. Također, napredne tehnike filtriranja signala mogu se koristiti za smanjenje šuma koji se javlja od drugih bežičnih sustava koji rade u istom frekvencijskom rasponu. Prije montiranja provodi se posjet lokaciji (site survey) kako bi se odredila optimalna mjesta postavljanja antena (Access Points) unutar skladišta zbog dobre pokrivenosti signalom. Tehnologija koja pomaže pri ovom procesu je Heatmapping. Wi-Fi heatmape pokazuju snagu signala kroz skladišni prostor i mjere se posebnim softverskim alatom. Alternativa ovom je postavljanje većeg broja Wi-Fi antena u skladište sa gušćom raspodjelom.



Slika 5. Montiranje Wi-Fi antena (Access Points) [22]



Slika 6. Primjer Heatmape [23]

- I/O signali: I/O signali se uglavnom koriste za periferne zadatke kao podrška AGV sustavu. Njima se, na primjer, šalju signali za otvaranje/zatvaranje vrata, za slanje narudžbe, za takozvano „rukovanje sa pokretnom trakom“ (conveyor handshake), za potvrdu dolaska palete na pokretnu traku i slično. Ovim signalima upravlja I/O ormarić, koji djeluje kao posrednik između AGV-ovog upravljačkog sustava i perifernih uređaja. Ormarić također olakšava održavanje i nadogradnju, te pristup svim ulaznim i izlaznim priključcima.

## Opis conveyor handshakea

Prije nego AGV dođe preuzeti paletu, signalizira pokretnoj traci da je došao na poziciju za preuzimanje, pokretna traka zatim provjerava da je paleta spremna i da je područje slobodno. Nakon potvrde, pokretna traka šalje signal spremnosti natrag AGV-u, omogućujući mu da uđe u prostor ispred pokretne trake i sigurno preuzme paletu. Nakon uspješnog preuzimanja, AGV šalje signal o završetku preuzimanja palete, te zatim transportna traka nastavlja s radom. Ovo rukovanje koji se izvršava pomoću I/O signala osigurava siguran, učinkovit i precizan prijenos paleta u AGV sustavu.

## 2.4. Hardverske komponente

AGV sustavi se sastoje od nekoliko ključnih hardverskih komponenti kao i viličari, ali i od par dodatnih komponenti:

1. **Motori i pogoni:** Većina viličara je električno pogonjeno, međutim postoje i plinski i dizel viličari koje se uglavnom koriste na otvorenom. Električni motori i pogonski sustavi se odabiru na temelju potrebne brzine, nosivosti tereta i radnog okruženja. AGV-ovi obično koriste istosmjerne (DC) motore ili izmjenične (AC) motore.
2. **Šasija i okvir:** Šasija i okvir pružaju strukturnu potporu za viličar. Dizajnirani su da izdrže manje sudare i oštećenja koja se javljaju tijekom rada. Međutim kod AGV-ova se javlja manje strukturalnih oštećenja što uklanja čestu potrebu za servisom.
3. **Kotači i gume:** Kotači i gume viličara odabiru se na temelju radnog okruženja i zahtjeva površine. AGV-ovi mogu koristiti razne gume po zahtjevima pojedinog skladišta. Kod AGV sustava treba paziti na nagibe prostora unutar skladišta jer se u tom slučaju treba kompenzirati brzina vožnje na kosim površinama.
4. **Mehanizam za podizanje:** Viličari koji rukuju paletama ili jediničnim teretom opremljeni su mehanizmima za podizanje kao što su vilice ili platforme. Mehanizmi za dizanje pokreću se hidrauličkim ili električnim pokretačima, omogućujući AGV-ovima podizanje i spuštanje tereta za transport i postavljanje. AGV može savršeno upravljati visinom podizanja vilica i pozicioniranjem prema utorima palete što potpuno uklanja mogućnost udara vilica po regalu ili paleti.
5. **Baterije:** Električni viličari zahtijevaju prisutnost punjive baterije, koje se biraju na temelju faktora kao što su gustoća energije, vrijeme punjenja i trajanje rada. Uobičajene vrste baterija koje se koriste u AGV-ima uključuju olovne kiselinske baterije i litij-ionske (*Li-ion*) baterije. Olovne kiselinske su isplative i pouzdane, ali imaju duže vrijeme punjenja i ako je razina tekućine u njima premala mora se nadodati

destilirane vode što je također dugi proces. Li-ionske baterije pružaju visoku gustoću energije, brzo vrijeme punjenja i dulji životni vijek, što ih čini preferiranim izborom za moderne AGV-ove [6]. AGV-ovi se mogu automatski puniti na za to predodređenim stanicama. Automatski prepoznaju razinu baterije, te se pravovremeno odvezu na stanicu za punjenje.



**Slika 7. Automatsko punjenje baterija [20]**

6. Upravljači (kontroler): Viličari imaju svoju kontrolnu jedinicu za upravljanje raznim parametrima kod vožnje, međutim u AGV-ovima se većinom nalazi dodatna upravljačka jedinica koja upravlja navigacijom, izvršavanjem zadataka, korisničkim parametrima i programibilnosti AGV-a, te komunicira sa softverskom podrškom proizvođača AGV sustava. Upravljači su uglavnom mikroprocesori i ugrađeni softver za obradu podataka senzora, izvršavanje kontrolnih algoritama i komunikaciju s drugim sustavima, te priključcima za spajanje na kontrolnu jedinicu viličara.

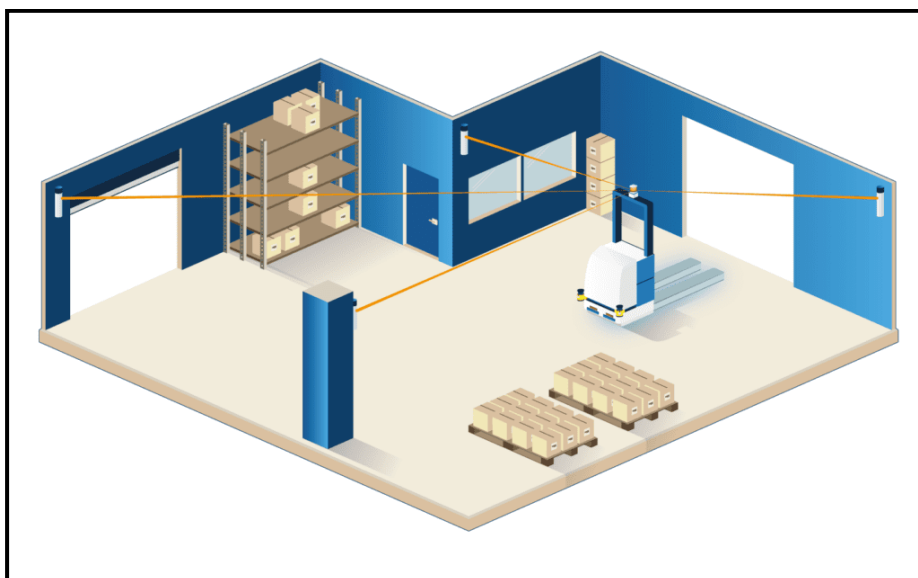


**Slika 8. AGV upravljački kontroler kompanije Kollmorgen [24]**

### 2.4.1. Senzori

AGV-ovi koriste razne senzore, koji pružaju podatke potrebne za navigaciju, otkrivanje prepreka i izvršavanje zadataka. Uobičajene vrste senzora koji se koriste u AGV-ovima uključuju:

- Laserski skener za navigaciju – AGV-ovi su opremljeni laserskim skenerom koji šalje svjetlosne zrake prema retro-reflektorima postavljenima na zidu ili regalima. Skener se uglavnom montira na najvišu točku AGV-a da svjetlost ne bude blokirana od strane ostale opreme u skladištu. Više o skeneru i laserskoj navigaciji u poglavlju Navigacija.



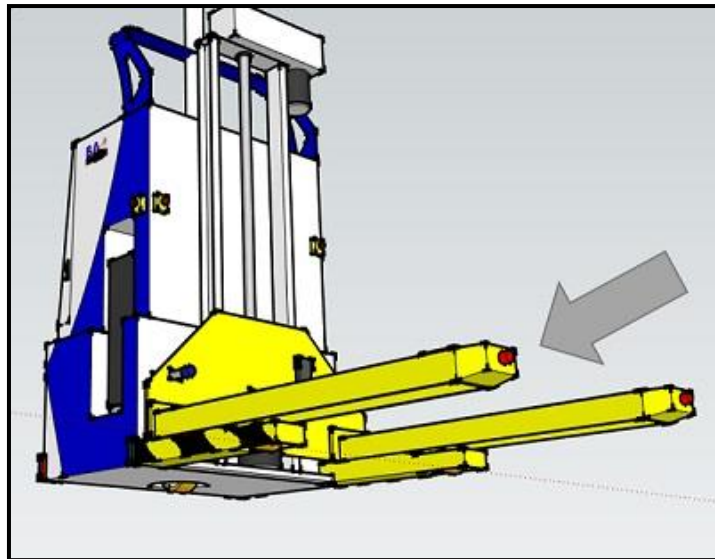
Slika 9. Skener i retro-reflektori u AGV sustavu [25]

- Laserski senzor za sigurnost – Sigurnosni sustav AGVa koristi dva laserska senzora s prednje strane i jedan sa stražnje strane za detekciju prepreka. Primjer proizvođača takvih senzora su Hokuyo i Sick. Više o sigurnosti u poglavlju Sigurnosni sustavi.



Slika 10. Sigurnosni laserski senzor Hokuyo [26]

- Optički senzori za pomoć kod upravljanja teretom – Na vilicama se nalaze optički senzori koji prepoznaju pozicije greda i paleta na gredama kod podizanja vilica, te pomažu kod odlaganja tereta na pravilnu visinu i dubinu.
- Fork bumper senzor – Na vilicama pojedinih AGV-ova nalaze se senzori dodira koji šalju signal ako vilice udare u prepreku. Bitni su za ostavljanje paleta u deepstack pozicijama.



Slika 11. Fork bumper senzori na AGV-u [27]

- Enkoderi – Mjere rotacijsku poziciju i brzinu kotača AGV-a. Bitni za upravljačku jedinicu i sigurnost.
- Senzor nosivosti - Senzori nosivosti daju povratne informacije u stvarnom vremenu o tome prelazi li težina tereta sigurne granice. Preopterećenje viličara može uzrokovati njegovo prevrtanje, što može biti opasno za vozilo ili za radnike koji se nalaze u blizini.

## 2.5. Navigacijske metode

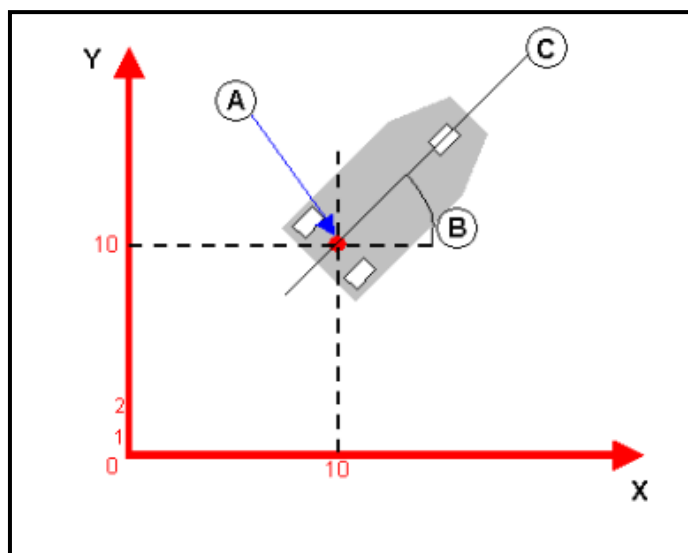
AGV-ovi koriste različite navigacijske metode za točno i učinkovito kretanje unutar svog radnog okruženja. Izbor metode navigacije ovisi o čimbenicima kao što su složenost okruženja, potrebna razina fleksibilnosti i trošak implementacije. Dvije metode su se pokazale kao najefikasnije i najisplativije, a mogu se koristiti i u kombinaciji [1, 4, 7]:

### 2.5.1. Laserska navigacija

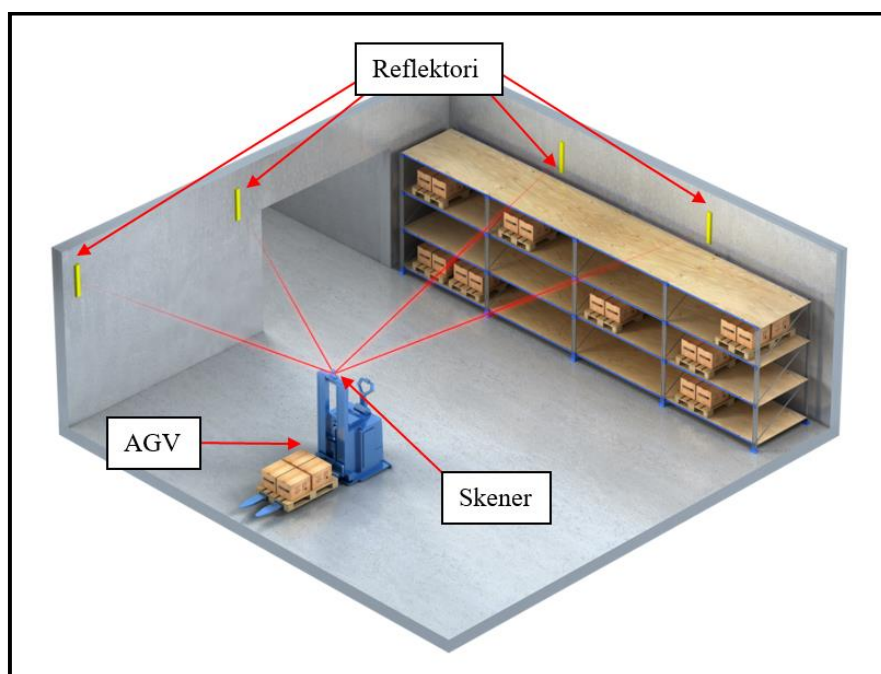
U metodi laserske navigacije retro-reflektori su strateški postavljeni u operativno područje. Svi reflektori su identični i sastoje se od nosača za postavljanje na zid/regal i retro-



reflektirajuće trake. Vozilo vođeno reflektorom koristi laserski skener za slanje svjetlosne zrake i otkrivanje reflektora postavljenih u okolini. Laserski skener kontinuirano mjeri kutove u odnosu na reflektore. Ova mjerenja koristi se u kombinaciji sa signalima enkodera za određivanje položaja (X, Y) i kuta vozila u odnosu na globalni koordinatni sustav skladišta. Tlocrt skladišta i pozicije reflektora su mapirane unutar softverske podrške AGV sustava i upravljačke jedinice AGV-a.



Slika 12. a) Referentna točka vozila, b) Nagib vozila, c) xy-koordinata vozila



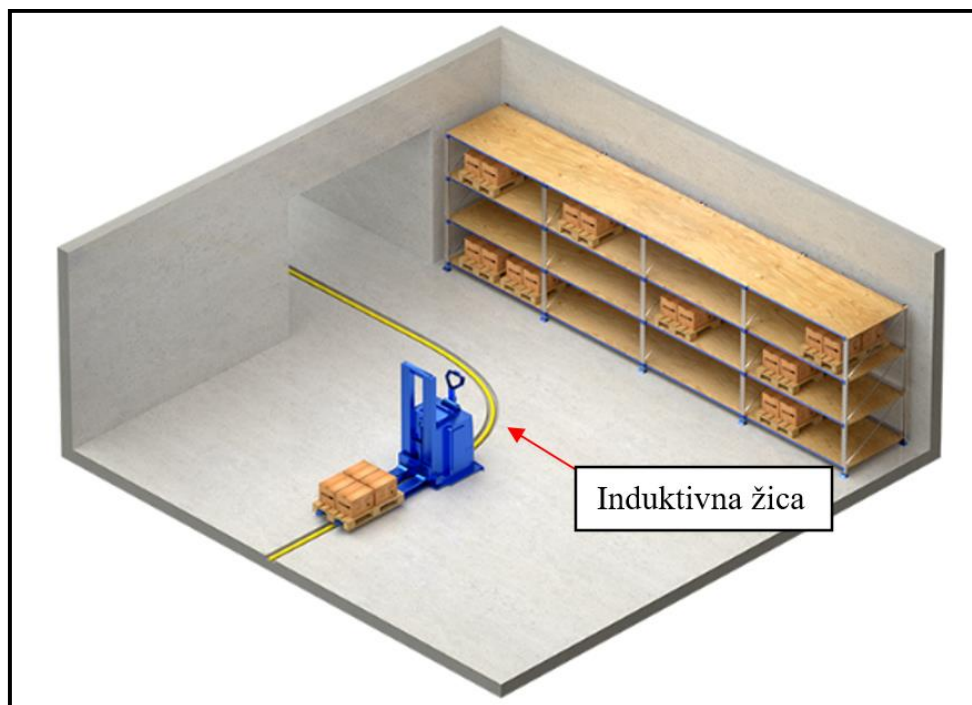
Slika 13. Komponente laserskog navigacijskog sustava AGV-a [28]

Preciznost vozila s laserskom navigacijom ovisi o brojnim čimbenicima. Čimbenici koji poboljšavaju preciznost navigacije su:

- Dobra raspodjela vidljivih reflektora - u svakom trenutku vozilo mora vidjeti barem tri reflektora. Ovo je zbog toga što AGV navigacijski sustav koristi triangulaciju za računanje položaja, stoga je potrebno barem tri referentne točke da bi se izračunala potpuno točna pozicija.
- Dobro podešavanje vozila i parametara vozila – kod puštanja u rad AGV vozila potrebno je podešavanje tvorničkih parametara vozila koji su možda narušeni u fazi transporta do lokacije. Ti parametri su najčešće: kut laserskog skenera, tolerancija zaustavljanja (kočenja), te točnost pogonskog i upravljačkog enkodera.
- Dobri uvjeti poda (floor condition) – pod skladišnog ili pogonskog okruženja mora biti čist i bez većih oštećenja.
- Cijevi, te drugi metalni i reflektirajući predmeti mogu reflektirati lasersku zraku sa signalom sličnim reflektoru, na što treba paziti.

### 2.5.2. Navigacija induktivnom žicom

Vozila s ovom vrstom navigacije koriste induktivne žice u podu koje induciraju magnetsko polje. Vozilo je opremljeno s dvije ili više antena za otkrivanje magnetske indukcije žica, te pomoću njih prepoznaje da se nalazi iznad žice. Navigacija induktivnom žicom osobito je korisna kada je teško postaviti reflektore u radnoj okolini ili ako je nemoguće montirati laserski skener na vozilo (na primjer ako su vrata skladišta preniska).



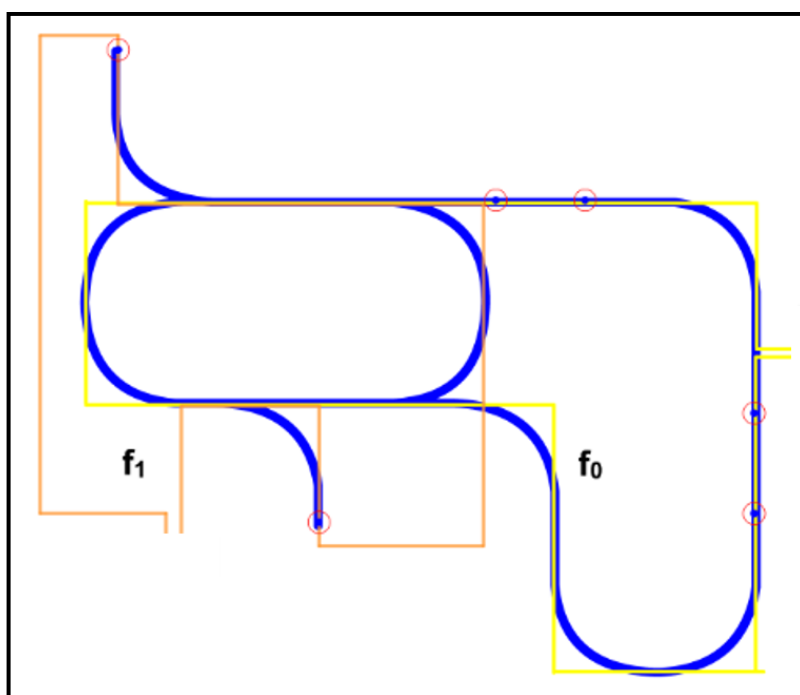
Slika 14. Komponente induktivnog navigacijskog sustava AGV-a [28]



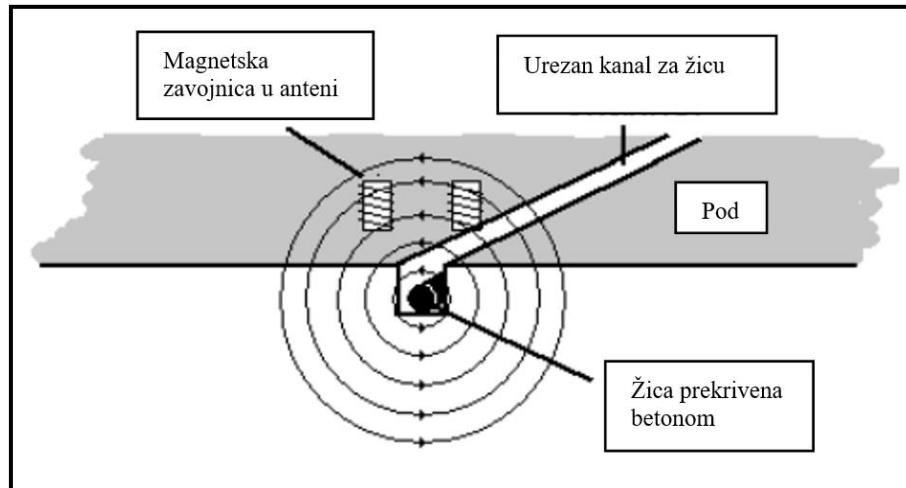
Navigacija radi na način da vozila prate svoj globalni položaj pomoću antena za otkrivanje induktivne žice u podu, dok je pozicija žice mapirana u softverskoj podršci AGV sustava i u upravljačkoj jedinici AGV-a isto kao i kod reflektora. Zatim se usporedbom otkrivenih žica u podu s očekivanim položajem žica u mapiranom rasporedu može odrediti položaj vozila. Kako bi poboljšao točnost svoje procjene položaja, kontroler vozila koristi markere na podu koji aktiviraju signal kada vozilo prelazi preko markera s digitalnim sensorom, šaljući svako malo potvrdu točnog položaja.

Mapirani raspored se također mora podijeliti u grupe frekvencija kao što je prikazano na donjoj slici zbog interferencije pri skretanjima. Korištenjem odvojenih frekvencija vozilo može odabrati drugu rutu kada je na račvanju u rasporedu. Žice trebaju imati različite frekvencije kada su blizu jedna drugoj ili ako dijele istu putanju u podu, pa ne smiju ometati jedna drugoj električna polja. Električni vodič kroz koji teče struja stvara magnetsko polje koje prepoznaje antene postavljene na vozilo. Što je bliže vodiču, polje je jače.

Usmjerena antena na vozilu sastoji se od dvije zavojnice smještene s obje strane induktivne žice. Razlika u naponu između zavojnica generira upravljački signal za kontrolu motora AGV-a. Kada je antena centrirana iznad žice, napon u zavojnicama je jednak i upravljački signal je nula. Ako antena odstupa od centra, napon u jednoj zavojnici se povećava dok se u drugoj smanjuje. Ova razlika u naponima generira upravljački signal koji kontrolira smjer i kut rotacije motora kako bi vozilo ostalo centrirano iznad žice.



Slika 15. Korištenje različitih zona frekvencija kod induktivnog navigacijskog sustava



Slika 16. Magnetsko polje oko induktivne žice

## 2.6. Sigurnosni sustavi

AGV-ovi su opremljeni brojnim sigurnosnim sustavima kako bi se osigurao siguran rad u dinamičnom okruženju. Sustavi pomažu kod zaštite radnika, opreme i samih AGV-ova. Ključni sigurnosni sustavi uključuju [1, 4, 8]:

- Sustav za izbjegavanje sudara: AGV-ovi koriste laserske senzore za otkrivanje prepreka, sprječavajući sudare s objektima ili osobama. Ovaj sustav kontinuirano nadzire okolinu s prednje i stražnje strane AGV-a i prilagođava njegovu brzinu prema sigurnosnim poljima senzora, a vozila se mogu i u potpunosti zaustaviti kočenjem ispred prepreke. Polja se postavljaju korisničkim parametrima u softverskoj podršci AGV sustava i uglavnom ovise o radnom okruženju i potrebnoj razini sigurnosti. Ovakvi senzori uglavnom imaju kut skeniranja u rangu  $190^\circ$  do  $270^\circ$ . Neki od primjera ovakvih senzora su Hokuyo UAM i Sick S3000.



Slika 17. Sigurnosna polja senzora Hokuyo UAM [26]



**Slika 18. Sick S3000 sigurnosni skener [29]**

- Kontrola rada po zonama: AGV-ovi su opremljeni mehanizmima za kontrolu rada kako bi se osigurao siguran rad u različitim dijelovima pogona. Ograničenja brzine mogu se postaviti na temelju lokacije i vrste aktivnosti. Na primjer, AGV-ovi mogu raditi većim brzinama na otvorenim područjima i smanjiti brzinu u uskim prolazima ili u blizini radnih stanica. Ova tehnologija zove se Geofencing. Geofencing stvara virtualne granice unutar skladišta pomoću Wi-Fi-ja unutar softverske podrške AGV sustava. Kada AGV prijeđe ove unaprijed definirane zone, mijenjaju mu se postavke rada, poput podešavanja brzine, promjene sigurnosnih polja ili preusmjerenja.



**Slika 19. Primjer Geofencing zona unutar skladišta [30]**

- Zvučna i vizualna upozorenja: AGV-ovi koriste zvučna i vizualna upozorenja kako bi obavijestili radnike o svojoj prisutnosti i radnjama. Ova upozorenja uključuju zvučne signale upozorenja, bljeskajuća svjetla i indikatore statusa vozila. Zvučna upozorenja

moгу upozoriti radnike na približavanje AGV-ova, dok vizualna upozorenja pružaju informacije o statusu i namjerama AGV-ova. Upozorenja povećavaju svijest o situaciji i smanjuju rizik od nesreća.

- Obuka rukovatelja: Odgovarajuća obuka ključna je za osiguranje sigurne interakcije između radnika i AGV-ova. Operateri i radnici trebaju biti obučeni o sigurnosnim protokolima AGV-ova, postupcima u slučaju nužde i sigurnoj radnoj praksi.
- Održavanje i pregledi: Redovito održavanje i pregledi ključni su za osiguravanje sigurnog rada AGV-ova. Aktivnosti održavanja uključuju provjeru senzora, baterija, kotača i upravljačkog sustava. Inspekcije bi se trebale provoditi kako bi se identificirali i riješili svi potencijalni sigurnosni problemi prije nego što dođe do nesreće.

Kada se sve uzme u obzir, AGV-ovi u pravilu smanjuju učestalost nesreće i do 60-70% u odnosu na klasično manualno skladište.

## 2.7. Softverska podrška

Uspješna implementacija AGV sustava oslanja se na softverska rješenja koja upravljaju i koordiniraju njihovim operacijama. Ključni softverski zahtjevi uključuju:

1. AGV softver za upravljanje: ovaj softver nadzire rad pojedinačnih AGV-ova, osiguravajući da učinkovito obavljaju zadatke i slijede optimalne rute. Ovaj softver uključuje značajke kao što su raspoređivanje zadataka prema prvom praznom vozilu, planiranje putanje i praćenje lokacije vozila u stvarnom vremenu.
2. Upravljanje voznim parkom: softver za upravljanje voznim parkom upravlja koordinacijom svih vozila unutar jednog AGV sustava, upravlja raspodjelom zadataka, planiranjem rute i kontrolom prometa kako bi se spriječile gužve i sudari. Sustavi za upravljanje voznim parkom optimiziraju korištenje AGV-ova uravnotežujući raspodjelu zadataka između flote AGV-ova.
3. Softver za održavanje i dijagnostiku: Softver za održavanje nadzire ispravnost i performanse AGV-ova, planira aktivnosti održavanja kako bi se smanjilo vrijeme zastoja i produžio životni vijek vozila. Ovaj softver prati parametre kao što su razina baterije, performanse motora i podaci senzora kako bi se otkrili potencijalni problemi prije nego dovedu do kvarova. U slučaju kvara pruža funkciju dohvaćanja takozvane crne kutije (BlackBox) iz koje se točno može iščitati problem koji je nastao. Softver također u nekim slučajevima daje uvid u performanse sustava, iskoristivost i ostalo.

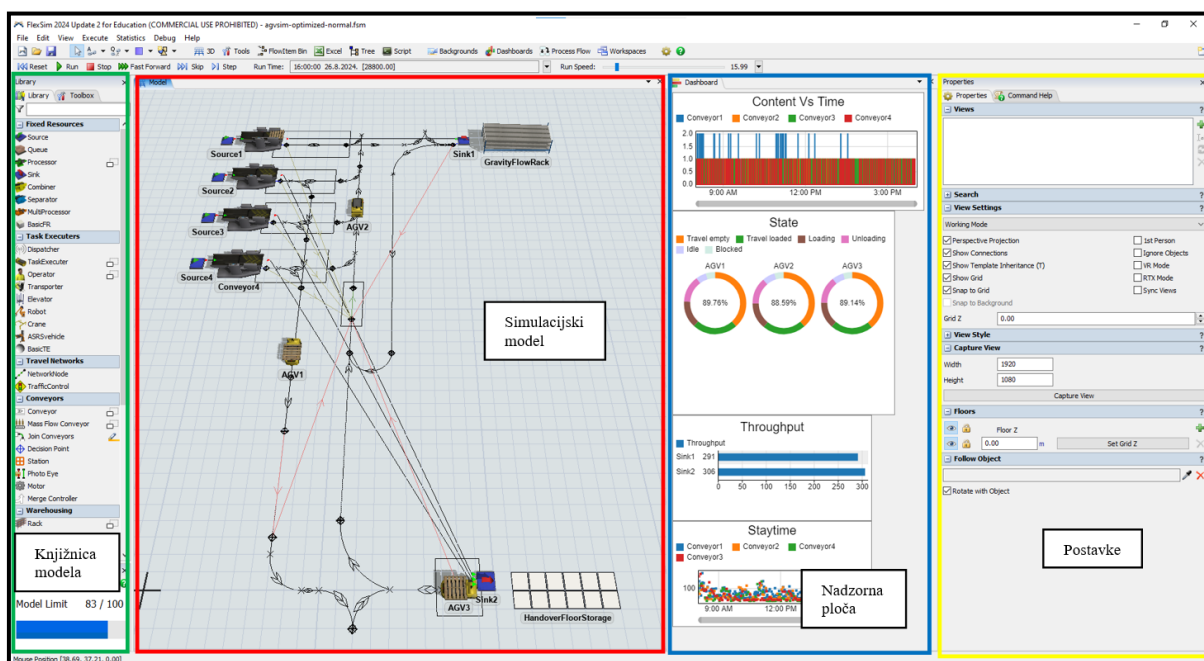
4. Navigacijski softver: Navigacijski softver koristi podatke sa senzora i karte za vođenje AGV-ova duž njihovih staza. Uključuje alate za planiranje i crtanje AGV mreže puteva vožnje, kreiranje prometnih pravila, te za lokalizaciju vozila u prostoru.
5. Korisničko sučelje (UI): Korisničko sučelje omogućuje operaterima interakciju s AGV sustavom, pružajući alate za nadzor, kontrolu i konfiguraciju. Korisnička sučelja mogu biti grafička ili tekstualna, a dizajnirana su da budu intuitivna i laka za korištenje.
6. Softver za simulaciju: Softver za simulaciju koristi se za modeliranje i testiranje AGV sustava prije postavljanja. Operaterima omogućuje procjenu različitih scenarija, optimiziranje performansi sustava i prepoznavanje potencijalnih problema. Softver za simulaciju može modelirati fizičko okruženje, ponašanje AGV-ova i interakciju s drugim sustavima, pružajući dragocjene uvide za dizajn i optimizaciju sustava.

### 3. SIMULACIJA AGV SUSTAVA

Simulacijom AGV sustava tvrtke mogu identificirati potencijalna uska grla, potvrditi performanse sustava i istražiti različite operativne scenarije bez prekida aktivne proizvodnje. Simulacijom se mogu pravovremeno prepoznati rizici i limitacije prije narudžbe sustava. U ovom poglavlju izraditi će se simulacija skladišnog procesa pomoću softvera Flexsim.

#### 3.1. Flexsim simulacijski softver

FlexSim je 3D simulacijski softver koji se koristi za modeliranje, vizualizaciju i analizu različitih industrijskih procesa, uključujući i AGV sustave. Flexsim koristi drag-and-drop sučelje za izradu modela, pa je prilično jednostavan za korištenje, čak i za korisnike s ograničenim znanjem o programiranju. Softver omogućuje prikaz simulacije u stvarnom vremenu, kao i fast forward funkciju kojom se može simulirati cijeli radni dan u nekoliko sekundi. Edukacijska licenca pomoću koje je izrađena simulacija u sklopu ovog diplomskog rada omogućuju korištenje do 100 objekata što je dovoljno za izradu manjeg industrijskog procesa. FlexSim sadrži i alate za analizu podataka, omogućujući korisnicima mjerenje performansi sustava. Korisnici mogu testirati različite scenarije, kao što su povećanje/smanjenje propusnosti, povećanje/smanjenje broja AGV vozila ili promjenu prometnih pravila unutar AGV sustava. Sučelje softvera prikazano je na slici 20.



Slika 20. Korisničko sučelje softvera Flexsim

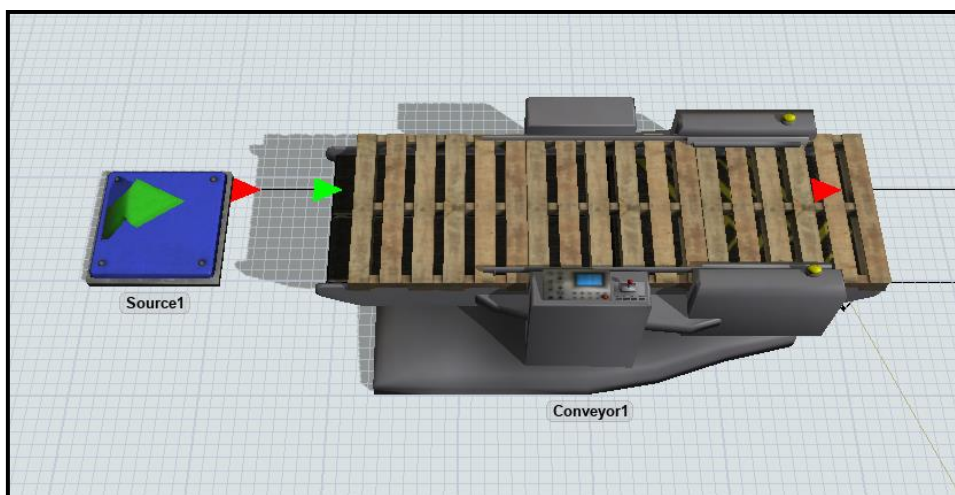


### 3.1.1. Opis korištenih 3D objekata

#### Source i queue

*Source* je objekt koji stvara nove artikle, u ovom slučaju palete. Artikli se stvaraju u intervalima prema nekoj od matematičkih distribucija vjerojatnosti.

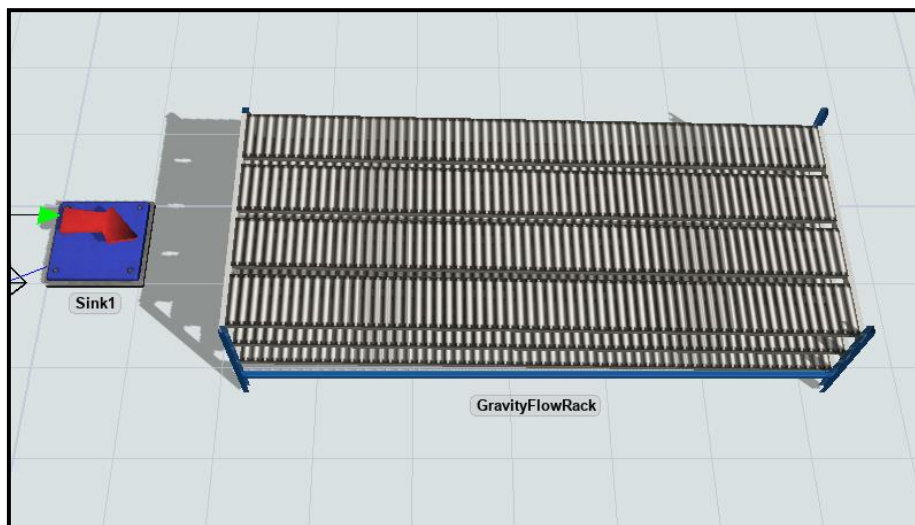
*Queue* je objekt na kojem se redaju novi artikli nakon stvaranja unutar *Source* elementa. U simulaciji je prikazan kao pokretna traka. Na slici 21. vidimo tri izredane palete na pokretnoj traci.



Slika 21. Source i Queue elementi

#### Sink

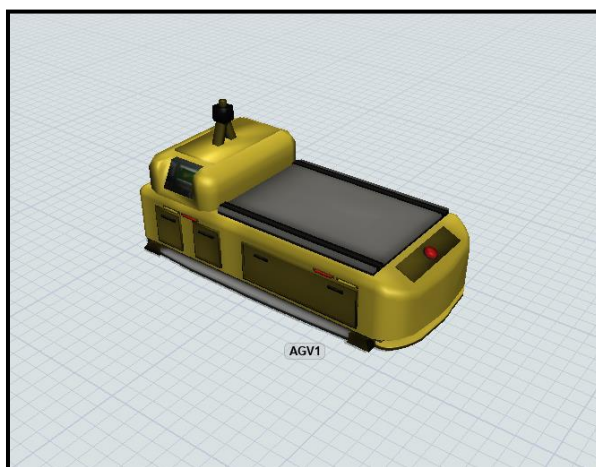
*Sink* je objekt koji služi kao mjesto odlaganja paleta za AGV vozila. Istovremeno prati ukupan broj artikala koji su odloženi na njemu. Unutar simulacije prikazan je kao gravitacijski regal i podne primopredajne pozicije.



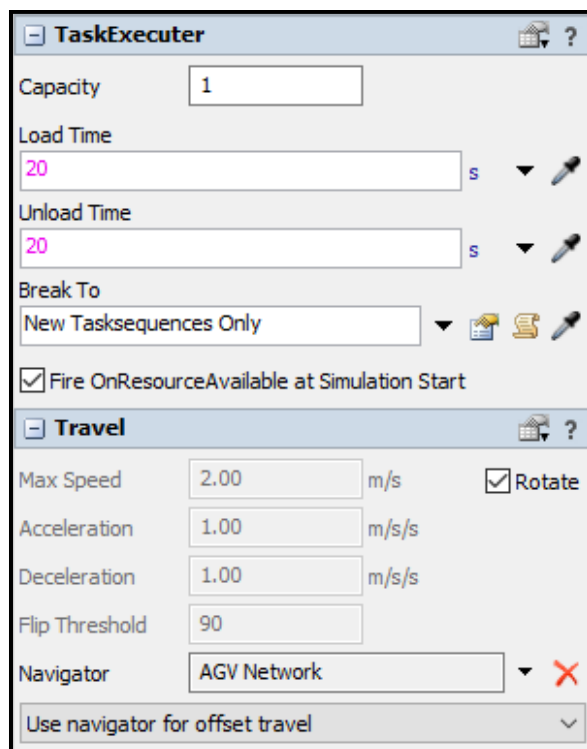
Slika 22. Sink element

### Task Executor (AGV)

*Task Executor* je objekt koji obavlja zadatke unutar simulacije poput preuzimanja i ostavljanja paleta sa *Queue* i *Sink* objekata. Njemu se pridodaje kontrolna petlja koja upravlja načinom izvršavanja zadataka. Unutar simulacije prikazan je kao AGV mobilna platforma, međutim ovo je samo grafički prikaz, te se u sklopu ove simulacije zapravo radi o AGV visokopodiznom viličaru. Unutar postavka postavljamo maksimalnu brzinu vožnje od 2 m/s, akceleraciju od 1 m/s<sup>2</sup>, te vrijeme preuzimanja i ostavljanja paleta od 20 sekundi kao što je prikazano na slici.



Slika 23. Task Executor u obliku AGV vozila

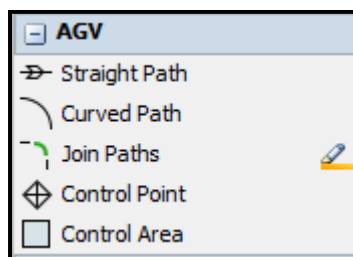


Slika 24. Postavke Task Executora



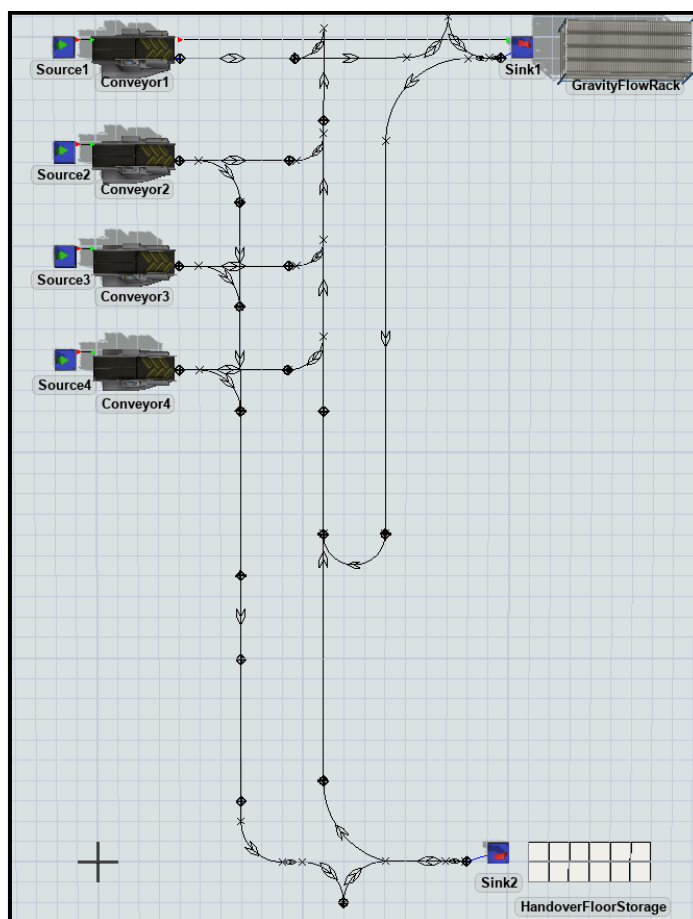
### 3.1.2. Vozne putanje i kontrola prometa

Slijedeći alati se koriste za izradu mreže simuliranog AGV sustava:



Slika 25. Alati za AGV simulaciju

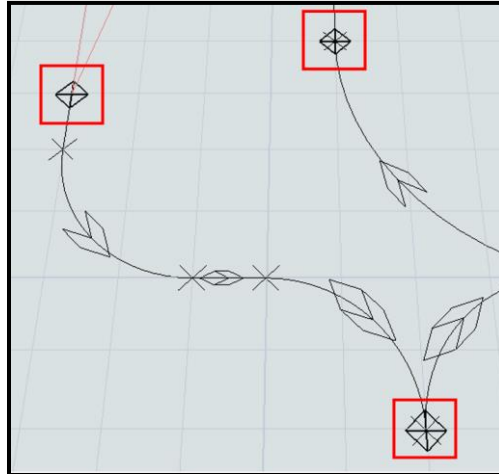
**Voznim putanjama** određujemo staze i lokacije po kojima AGV može voziti da dođe do svoje destinacije. Putanje se crtanju pomoću *Straight path* i *Curve path* alata. Sve putanje zajedno zovemo mreža AGV sustava.



Slika 26. Vozne putanje AGV mreže

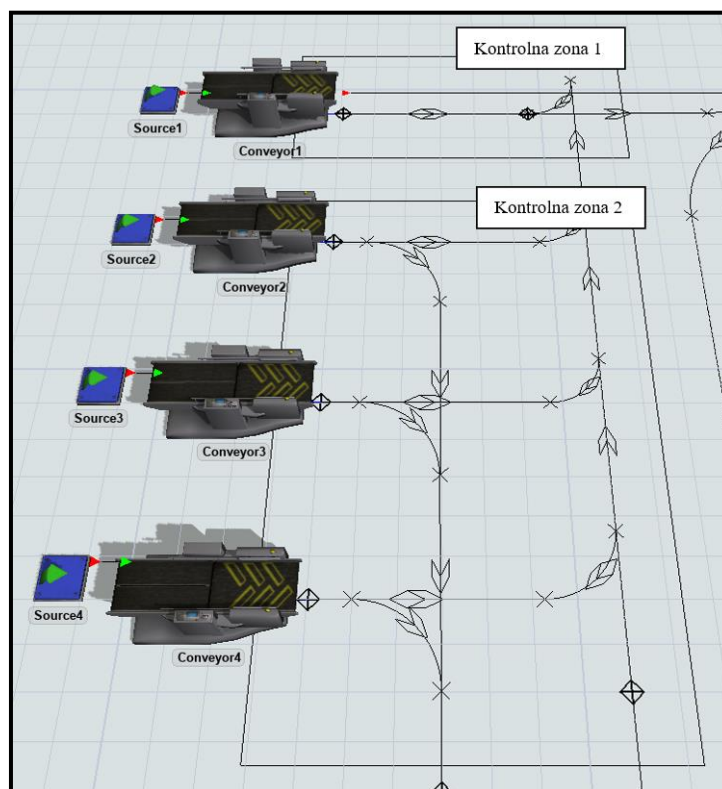
**Kontrolne točke** (*Control points*) su točke na AGV mreži gdje se odvija različita kontrolna logika sustava. Primjeri su: točka na kojoj AGV-ovi preuzimaju ili ostavljaju artikle, točka zaustavljanja na AGV mreži gdje vozila čekaju da uđu u kontrolnu zonu ili čekaju da prođe neko drugo vozilo, točka odluke gdje AGV traži posao preuzimanja ili ostavljanja, točka

odluke gdje se AGV šalje na neku drugu točku na mreži, ovisno o dostupnosti mreže. Kontrolne točke također djeluju kao točke dodjele/dealokacije na mreži. AGV-ovi stalno automatski traže svoju sljedeću kontrolnu točku nakon što napuste trenutnu, te se ta točka mora dodijeliti tom AGV-u prije nego što nastave vožnju po mreži. Sva ova logika zajedno sa kontrolnim zonama upravlja prometom AGV mreže.



Slika 27. Kontrolne točke na AGV mreži

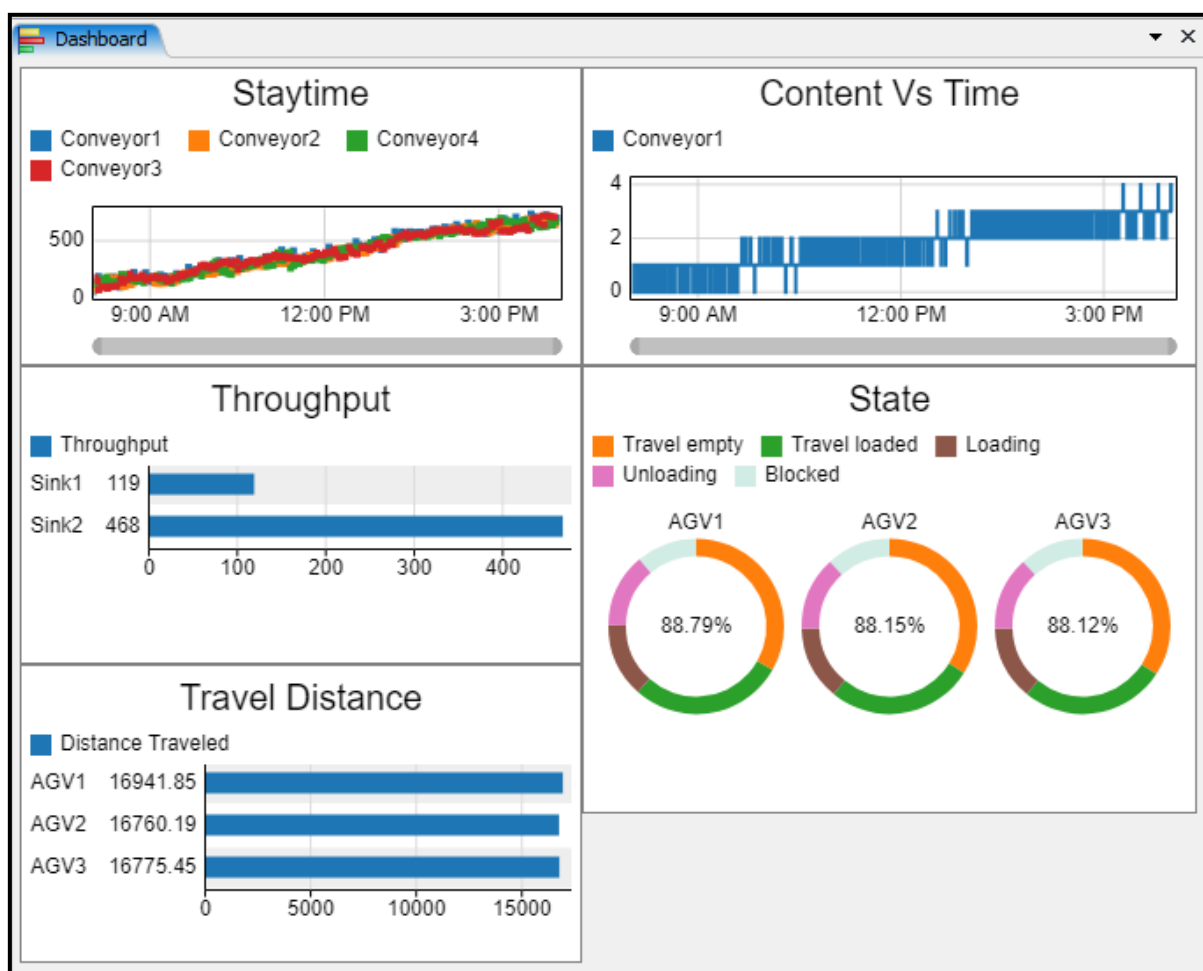
**Kontrolne zone** (Control area) koriste se za ograničavanje broja AGV vozila u nekom području. Na primjer, koriste se kod ulaska na pokretnu traku ili kod raskrižja u AGV mreži.



Slika 28. Kontrolne zone AGV mreže

### 3.1.3. Nadzorna ploča i analitički grafovi

Simulacija generira podatke u stvarnom vremenu dok se izvodi. U FlexSimu neke od tih podataka generiraju 3D objekti i aktivnosti u interakciji s protocima i AGV-ovima, te se zatim upisuju u statističke varijable. Općenito, ove statističke varijable su podaci koje većina simulacijskih inženjera obično želi dobiti iz svojih modela za daljnju analizu. Na primjer, većina 3D objekata prikuplja statistiku sadržaja/propusnosti (content/throughput) koja prati koliko artikala neki objekt trenutno sadrži, kao i njegov minimalni, maksimalni i prosječni sadržaj/propusnost. Zatim imamo praćenje vremena stajanja palete na pokretnoj traci, ukupnu udaljenost prijeđenog puta AGV vozila i stanje AGV vozila. Sve ove statistike prikazuju se analitičkim grafovima koji su sadržani unutar nadzorne ploče, te se mogu konfigurirati i modificirati na brojne načine.



Slika 29. Nadzorna ploča sa primjerima izrađenih analitičkih grafova

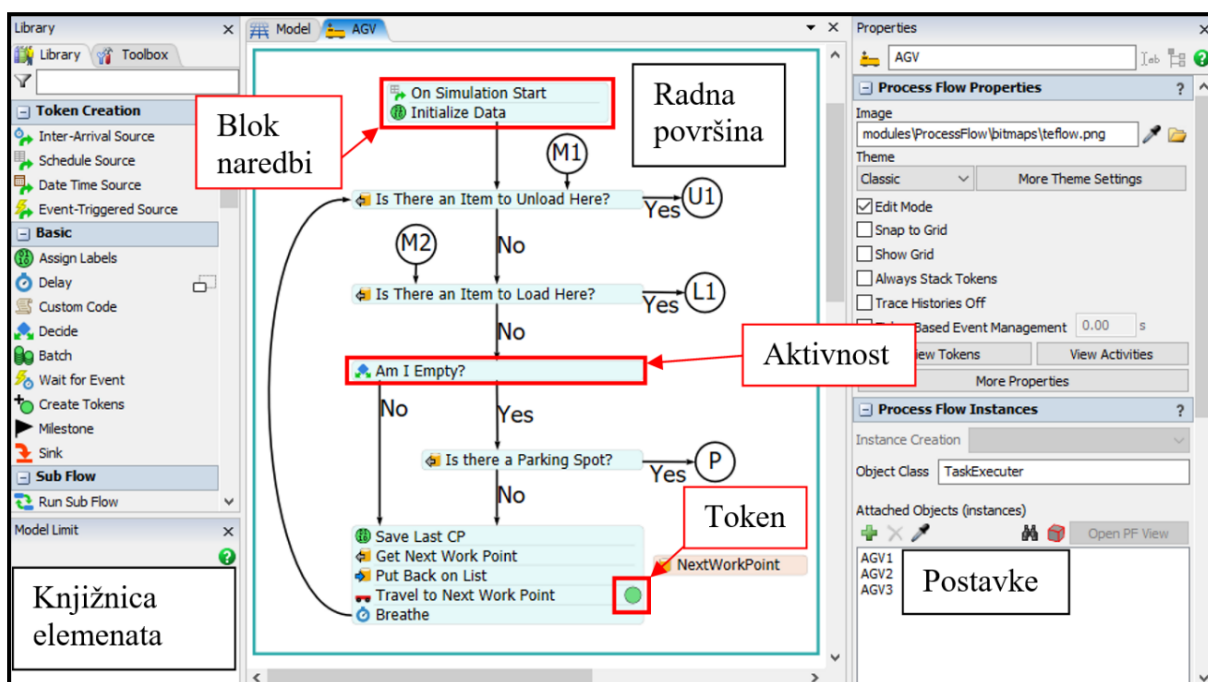
Tablica 1. pruža pregled općih kategorija standardnih statističkih varijabli dostupnih za 3D objekte i/ili aktivnosti tijekom procesa.

Tablica 1. Dostupne statističke varijable unutar softvera Flexsim

Kategorija	Objašnjenje
Sadržaj	Prati količinu artikala protoka (paleta) u 3D objektima. Zadana statistika može dati trenutni, minimalni, maksimalni i prosječni sadržaj 3D objekta.
Stanje	Prikazuje trenutno stanje 3D objekta. Na primjer, <i>Queue</i> ima stanje prazno i stanje puno, dok na primjer AGV ima velik broj mogućih stanja što možemo vidjeti u analitičkom grafu <i>State</i> .
Vrijeme stajanja	Prati koliko vremena artikl protoka ostaje u fiksnom 3D objektu. Zadana statistika može dati minimalno, maksimalno i prosječno vrijeme boravka.
Propusnost	Prati koliko artikala protoka prolazi kroz 3D objekt tijekom procesa. Zadana statistika može dati trenutni ulaz i izlaz objekta ili aktivnosti.
Udaljenost	Prati ukupnu udaljenost koju <i>Task Executor</i> prijeđe, izmjerenu u jedinicama zadane simulacijske udaljenosti.

### 3.2. Process Flow alat za izradu kontrolnih petlji

U ovom poglavlju opisuje se alat za kreiranje i konfiguraciju kontrolnih petlji za upravljanje AGV operacijama unutar Flexsim softvera. Unutar softvera ovaj alat i sučelje se zajednički nazivaju *Process Flow*. Najvažniji elementi alata *Process Flow* označeni su na Slici 30.



Slika 30. Elementi alata Process Flow

### 3.2.1. Pregled osnovnih elemenata

#### Token

Najosnovnija komponenta *Process Flowa* je token. Tokeni su objekti koji prolaze kroz aktivnosti u kontrolnoj petlji tijekom izvođenja simulacije. Kao i artikli, tokeni se kreću od jedne aktivnosti do sljedeće, slično kao što se artikli kreću od *Sourcea* do *Queuea*, pa do *Sinka* i tako dalje. Za razliku od artikala, tokeni ne moraju nužno predstavljati fizički objekt koji se kreće kroz sustav, već mogu predstavljati bilo što. Tokeni su logički povezani s fizičkim objektima u sustavu.



Slika 31. Token

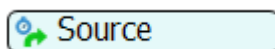
Na najosnovnijoj razini, token je samo skup podataka koji se kreće kroz kontrolnu petlju. Svaki token može sadržavati sljedeće osnovne informacije:

**ID** - Kada se token kreira pomoću aktivnosti stvaranja tokena, automatski mu se dodjeljuje jedinstveni ID broj koji se može koristiti kao referentna točka za pozivanje. ID broj će biti jedinstven među svim objektima kontrolne petlje.

**Ime i oznaka (label)** - Imenovanje tokena koristi se za lakšu identifikaciju njegove svrhe, funkcije ili pozicije u kontrolnoj petlji. Oznake pohranjuju informacije o tokenu koje se mogu koristiti za utjecaj na ono što se događa s tim tokenom dok se kreće kroz kontrolnu petlju.

#### Aktivnost

Aktivnosti su logičke operacije ili koraci u kontrolnoj petlji, te su osnovni elementi kontrolne petlje.



Slika 32. Aktivnost

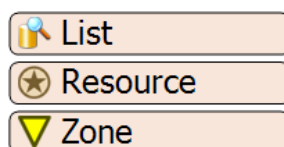
Aktivnosti se međusobno povezuju konektorima (crne strelice). Kako token ulazi u aktivnost, tako izvodi logiku povezanu s tom vrstom aktivnosti. To može uključivati dodjeljivanje oznaka, provjeru okupiranosti kontrolne točke, traženje posla, vožnju na poziciju preuzimanja palete u slučaju AGV-ova itd.

U nekim aktivnostima, kao što je aktivnost dodjele oznaka, token će započeti i završiti aktivnost bez protoka vremena u simulacijskom satu. Tijekom pokretanja simulacije token

neće biti vidljiv u toj aktivnosti. Međutim, korištenjem gumba Korak (*Step*) na alatnoj traci Flexsima, možemo vidjeti kako se token kreće kroz svaku aktivnost korak po korak.

### **Shared Assets**

*Shared Assets* predstavljaju ograničene resurse koje tokeni mogu zatražiti ili osloboditi u određenim dijelovima kontrolne petlje.

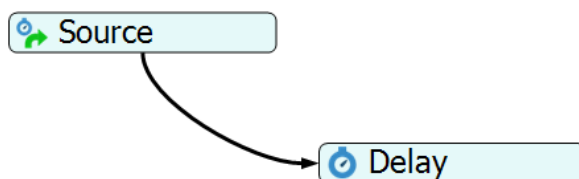


**Slika 33. Shared Assets**

*Shared Asset* može nametnuti ograničenja na tokene tako što će token čekati ako traženi *Shared Asset* nije dostupan. Primjer ovoga iz stvarnog života bio bi određeni alat koji dijele tri različite radne stanice. Ako jedna postaja treba alat dok ga je već preuzela druga stanica, ta stanica mora pričekati dok alat ne postane dostupan. Na isti način, ako je tokenu potrebno sredstvo za prelazak na sljedeću aktivnost što će u slučaju ove simulacije biti zadatak preuzimanja/odlaganja palete, token će čekati na svojoj trenutnoj aktivnosti dok sredstvo ne bude dostupno. Na primjer, u simulaciji se koriste liste za dodjeljivanje zadataka putem kontrolnih točaka. Kada se stvori paleta na pokretnoj traci, stvara se zadatak preuzimanja koji je sadržan na listi i onda kontrolna petlja dodjeljuje zadatak određenom AGV Task Executoru.

### **Konektor**

Konektor je poveznica između dviju aktivnosti. Tijekom izvođenja simulacije, tokeni koriste konektore za prijelaz s jedne aktivnosti na sljedeću u nizu.















**Slika 34. Konektor**

### **Subflow**

*Subflow* možemo opisati kao funkciju unutar programa. Predstavlja potprogram koji se može pozvati unutar glavne kontrolne petlje. Na primjer, unutar ove simulacije koriste se *subflowovi* loading i unloading za preuzimanje i odlaganje paleta, kao i *subflow* parking za parkiranje AGV-a na parkirnu kontrolnu točku. Dakle oni imaju zasebnu logiku odvojenu od glavne kontrolne petlje.

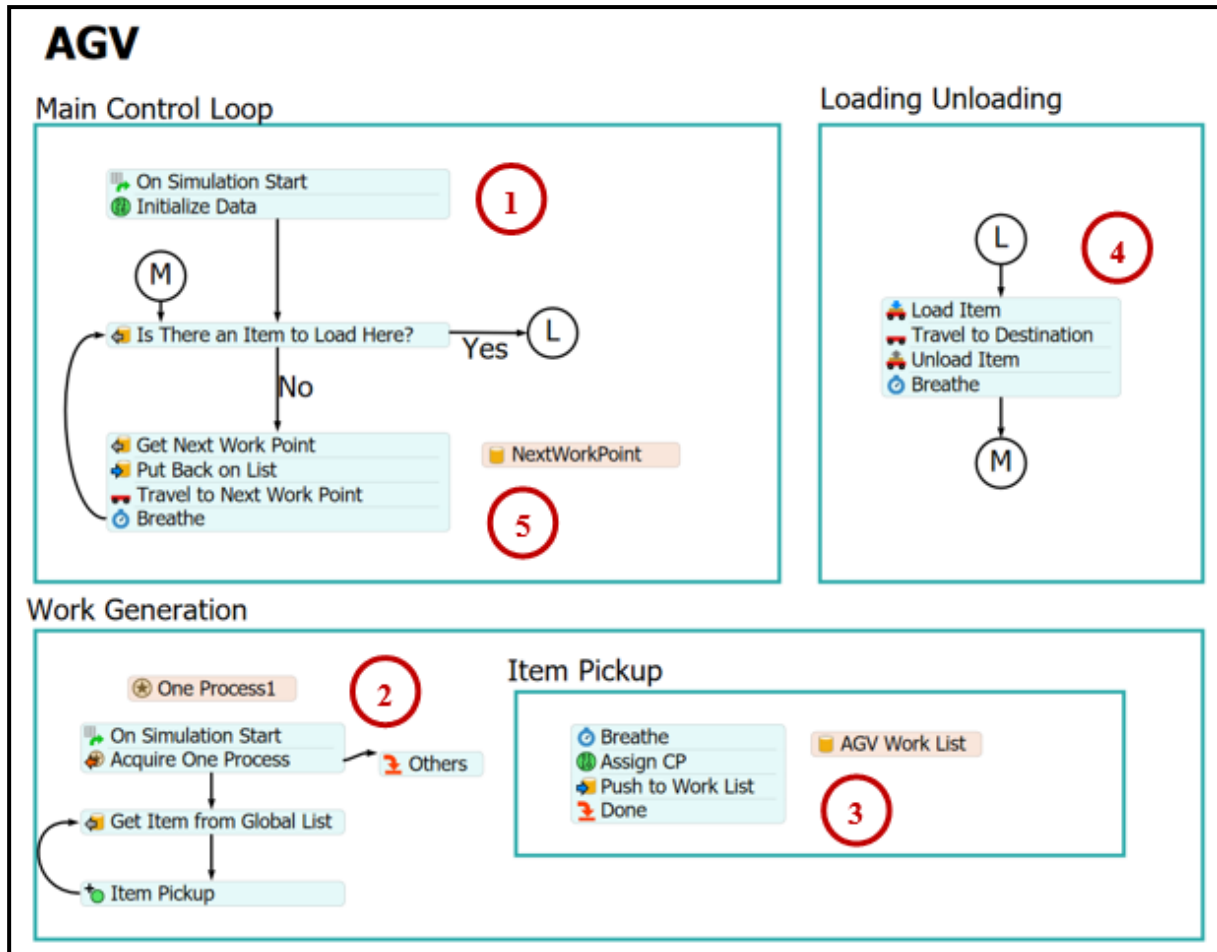
U tablici 2. opisani su svi korišteni elementi u sklopu simulacije ovog diplomskog rada.

**Tablica 2. Korišteni elementi u Process Flow alatu**

 <p>Schedule Source</p>	Ova aktivnost stvara nove tokene. Većinom se koristi pri inicijalizaciji kontrolne petlje.
 <p>Assign Labels</p>	Pridaje ili mijenja oznake na raznim objektima unutar kontrolne petlje. Oznake se mogu koristiti za pohranu važnih podataka o različitim objektima.
 <p>Delay</p>	Zadržava token određeno vrijeme pridajući mu kašnjenje.
 <p>Create Tokens</p>	Stvara jedan ili više novih tokena i automatski ih šalje na neku drugu aktivnosti ili <i>subflow</i> .
 <p>Sink</p>	Uništava tokene, uklanjajući sve podatke pohranjene u tim tokenima. Uglavnom se koristi na kraju kontrolne petlje ili <i>subflowa</i> .
 <p>Resource</p>	Predstavlja ograničenu zalihu nekog resursa koji se može koristiti ili osloboditi.
 <p>List</p>	Predstavlja popis tokena, artikala, Task Executora (AGV) itd. Kontrolna petlja može koristiti lokalnu ili globalnu listu. Globalnoj listi se može pristupiti iz kontrolne petlje ili bilo kojeg <i>subflowa</i> .
 <p>Push to List</p>	Koristi se za dodavanje tokena, artikala, Task Executora (AGV) itd. na listu.
 <p>Pull from List</p>	Koristi se za dohvaćanje tokena, artikala, Task Executora (AGV) itd. s liste.
 <p>Travel</p>	Koristi se za slanje AGVa do određenog objekta u 3D simulacijskom modelu.
 <p>Load</p>	Tjera AGV da preuzme objekt u 3D simulacijskom modelu. Na primjer, možemo natjerati AGV da pokupi paletu sa pokretne trake (Source).
 <p>Unload</p>	Tjera AGV da ostavi objekt u 3D simulacijskom modelu. Na primjer, možemo natjerati AGV da ostavi objekt na <i>Sink</i> .

### 3.2.2. Kontrolna petlja za simulaciju AGV sustava

Na sljedećoj slici prikazana je kontrolna petlja za upravljanje AGV operacijama napravljena unutar softvera Flexsim.



Slika 35. Kontrolna petlja za AGV operacije

Pri inicijalizaciji petlje kreira se token koji će putovati po ostatku petlje. Zatim zadajemo oznake objektima, poput ID oznake AGV-a, ParkPoints, capacity itd. koje se koriste kroz kontrolnu petlju i za prikupljanje analitičkih podataka, ovo se vidi pod oznakom 1 na slici 35.

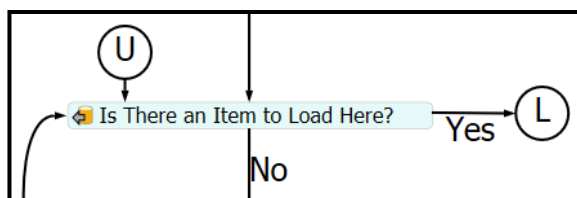
Istovremeno kreće inicijalizacija dispečera koji generira nove zadatke za AGV sustav. Logikom dispečera upravlja kombinacija kontrolnih točaka, AGV kontrolne petlje i globalne liste pod nazivom AGV Work List. U trenutku stvaranja palete na pokretnoj traci, pokretna traka zatraži transport artikla na drugu lokaciju (Sink), šalje taj artikl na globalnu listu nazvanu AGV Work List. Artikl koji se stavlja na listu predstavlja "zadatak". Kontrolna petlja odmah povlači taj zadatak s liste, traži gdje se taj artikl nalazi i gura ga natrag na listu AGV Work List, ali ovaj put dodjeljuje ga kontrolnoj točki povezanoj s tim transportom (lokacija Sinka). Oznake 2 i 3 na slici 35.



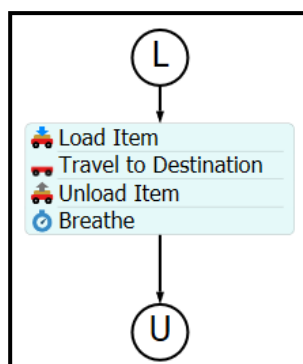
Ovaj mehanizam dispečera omogućuje funkciju petlje za traženje zadataka od strane AGV Task Executera, koji u svakom trenutku traže novi zadatak koji im se dodjeljuje s obzirom na lokaciju i dostupnost AGV-a. Ključna stvar koju treba imati na umu jest da je dodjeljivanje zadataka uglavnom određeno lokacijom AGV-ova i fiksnih objekata u 3D simulacijskom modelu. Kada AGV stigne na kontrolnu točku, provjerava postoje li dostupni zadaci, u ovom slučaju palete za preuzimanje. Ako u tom trenutku postoji zadatak, AGV će ga preuzeti. Inače će se pomaknuti na sljedeću kontrolnu točku.

Istovremeno sa dispečerom radi i glavna kontrolna petlja koja upravlja AGV Task Executorima na sljedeći način:

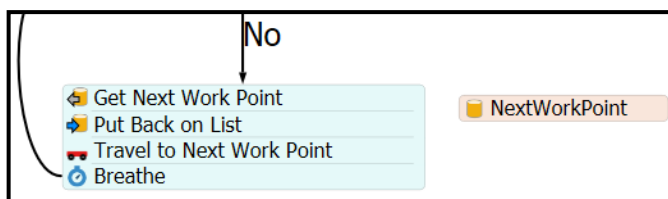
1. Na trenutnoj kontrolnoj točki provjeri postoji li artikl za preuzimanje u sustavu.



2. Ako postoji artikl za preuzimanje u trenutnoj točki, preuzmi ga, otputuj do lokacije za ostavljanje, istovari artikl i ponovi petlju. Ovo možemo vidjeti na slici 35. pod oznakom 4.



3. Ako ne postoji artikl za preuzimanje, idi do sljedeće kontrolne točke i ponovi petlju. Ovo možemo vidjeti na slici 35. pod oznakom 5.



Kontrolna petlja se izvršava sve dok se simulacija ne zaustavi ili dok se ne od simulira određeno vrijeme procesa.

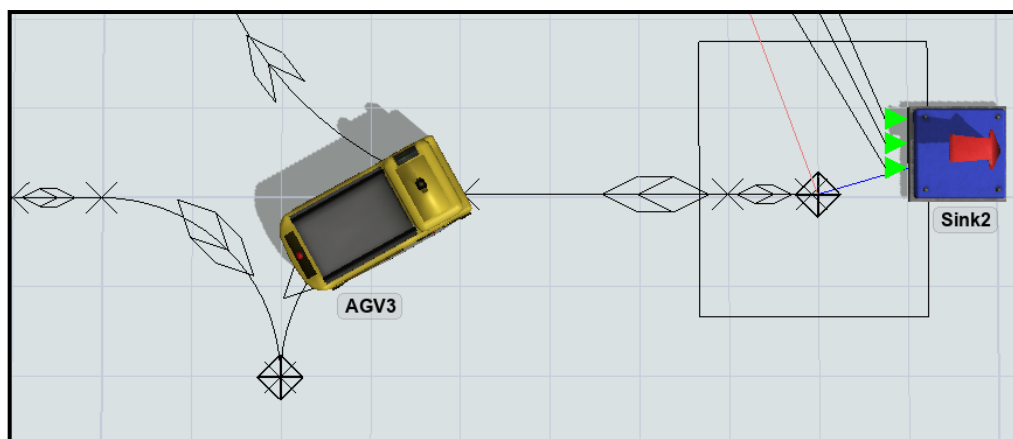
### 3.3. Dizajniranje simulacijskog modela skladišta

U svrhu izrade simulacije i analize osmišljeno je skladište koje spada u vrstu FMCG (*fast moving consumer goods*) sa dva protoka robe. Ovakva skladišta dizajnirana su za rukovanje robom koja se prodaje brzo i po relativno niskoj cijeni. Ovi proizvodi obično uključuju kvarljive artikle ili robu s kratkim rokom trajanja, kao što su hrana, piće, toaletne potrepštine, proizvodi za čišćenje, lijekovi bez recepta i drugi potrošni materijal. Glavna karakteristika ovakvih skladišta je visoka propusnost (throughput) robe. Pretpostavljamo upotrebu električnog visokopodiznog ručnog AGV viličara koji može vršiti funkcije podizanja do 3-5 metara što je dovoljno za podizanje na prve dvije do tri razine gravitacijskog regala, te može vršiti funkciju tegljenja paleta do podnih primopredajnih pozicija. Pretpostavljena je potpuna automatizacija radnog okoliša, tj. da ne postoje ljudi i manualni viličari koji operiraju u prostoru rada AGV sustava.

#### 3.3.1. 3D okoliš simulacije

Unutar flexsima prvo se stvaraju objekti Source koji predstavljaju pokretne trake sa kojih dolaze artikli na paletama iz proizvodnog pogona. Stvaraju se gore lijevo u radnom prozoru modela simulacije. Ukupna propusnost pokretne trake 1 je različita od ostalih pa je označena posebno. Zatim se stvaraju objekti Sink koji predstavljaju gravitacijske regale i podne primopredajne pozicije, te služe kao pozicije odlaganja paleta. Stvaraju se gore i dolje desno na udaljenostima kako je prikazano na slici 38.

Nakon objekata nacrtana je AGV mreža sa putevima i kontrolnim točkama. Putevi prate zamišljene hodnike i u obzir je uzet način vožnje AGV-a u stvarnosti, na primjer kada AGV prilazi do lokacije preuzimanja/odlaganja prilazi tako da se okrene „na vilice“ kako bi uopće mogao preuzeti paletu. Prikaz ovog pokreta je na slici 36.



Slika 36. Ulazak "na vilice" kod lokacije Sink 2

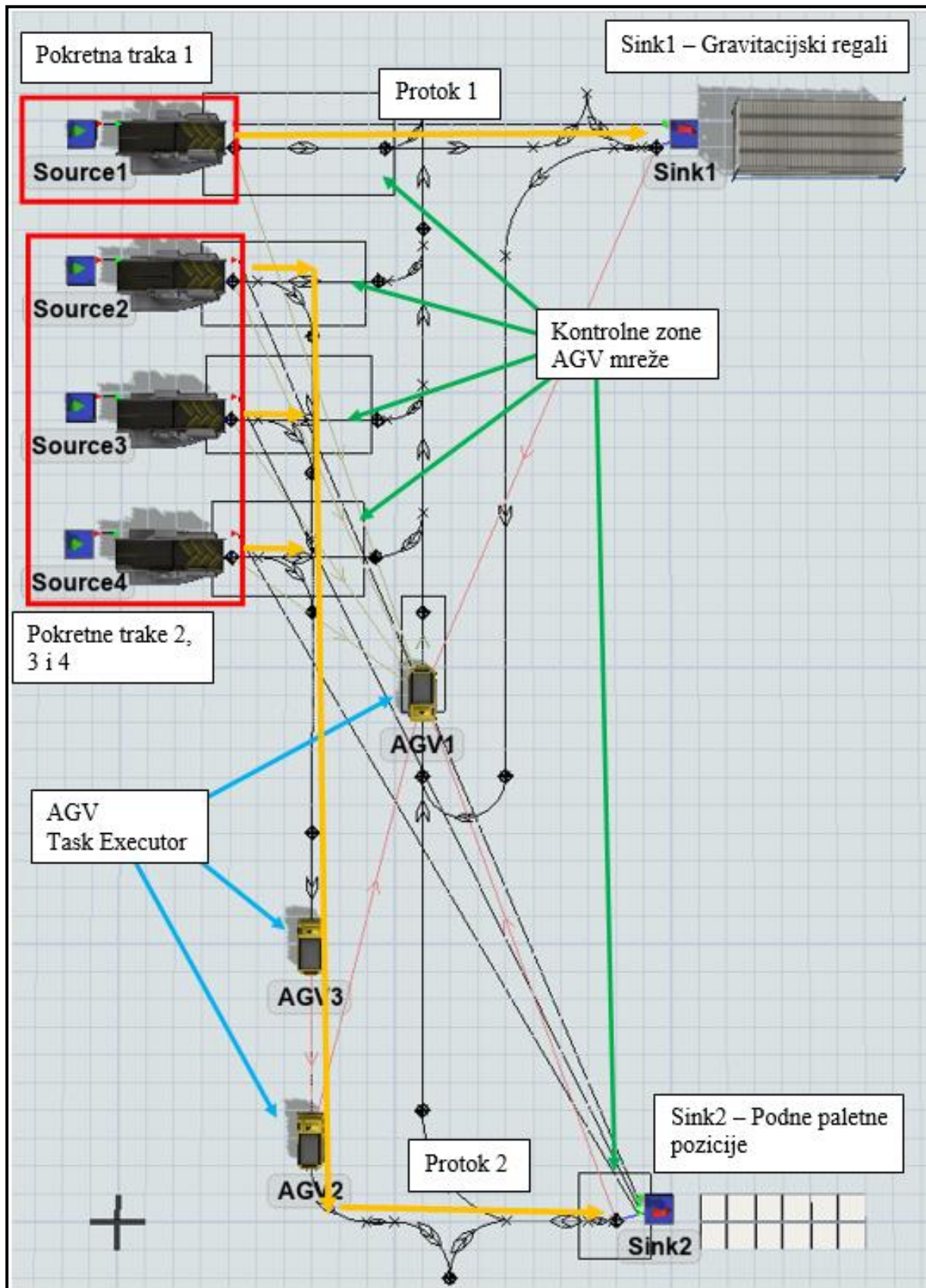
Kontrolne točke su dodijeljene svakom od objekata unutar simulacije i povezane su sa njihovom funkcijom, to znači da kada AGV dolazi preuzeti paletu na pokretnu traku 1, zapravo dolazi do kontrolne točke koja je dodijeljena toj pokretnoj traci. Kontrolne točke također su taktički raspoređene po cijeloj AGV mreži, na primjer kod zavoja, na spojevima Curve i Straight Path puteva, prije kontrolnih zoni tako da je maksimalno smanjeno vrijeme čekanja AGV na ulazak u zonu kada drugi AGV izađe.

Svakoj pokretnoj traci i svakom Sink objektu dodijeljena je kontrolna zona, to znači da se u toj zoni u svakom trenutku može nalaziti samo jedan AGV. Kada se AGV nalazi u zoni ta zona je njemu dodijeljena i tek kada prvi AGV izađe iz kontrolne zone, drugi može ući u nju. Kontrolne zone sprječavaju nastajanje deadlock situacija (zastoja) u AGV mreži i rješavaju neke probleme prometa u AGV mreži. Kontrolne zone se mogu prepoznati kao pravokutni objekti u modelu simulacije.

Zatim se dodaju AGV Task Executor objekti koji će pomoću kontrolne petlje i kontrolnih točaka izvršavati zadatke preuzimanja i odlaganja paleta. Unutar postavki objekta zadaje se maksimalna brzina od 2 m/s i maksimalna akceleracija od 1 m/s<sup>2</sup>. Unutar postavki također je određeno vrijeme preuzimanja i odlaganja paleta od 20 sekundi. Ovo vrijeme simulira podizanje vilica na pravu visinu i preuzimanje/odlaganje palete. Na kraju svakom AGV Task Executoru dodjeljujemo kontrolnu petlju koja će upravljati njime.

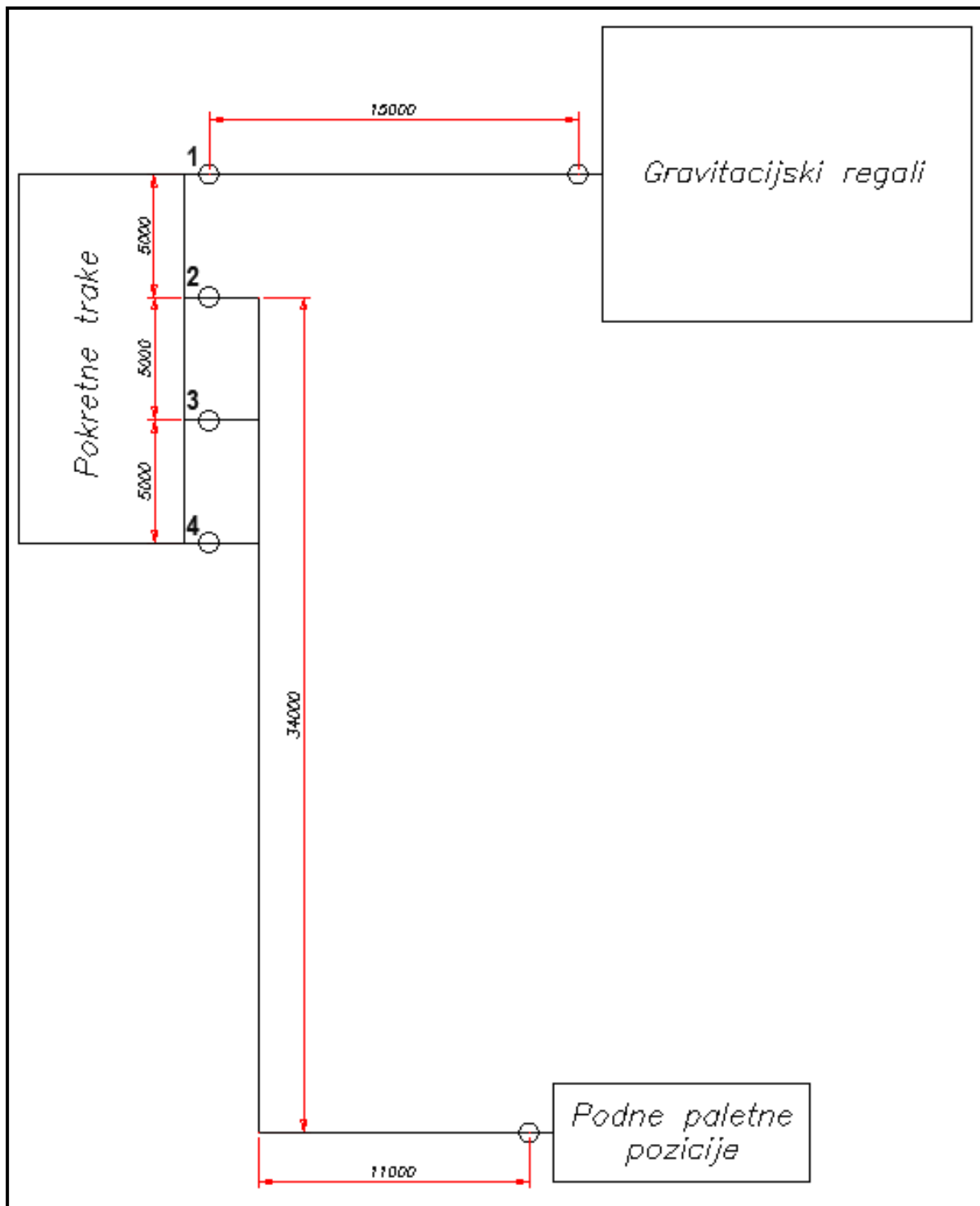
Na kraju se dodaje glavna kontrolna točka koja služi kao točka dodjeljivanja zadataka kako je opisano u kontrolnoj petlji. Ova kontrolna točka se nalazi na slici 37. ispod AGV1 Task Executora. Možemo vidjeti da iz te točke postoje konektori koji su spojeni sa pokretnim trakama i Sink objektima (crvene i blijedožute linije), ti konektori služe da kontrolna točka i kontrolna petlja prepoznaju s kojih objekata se zadaci dodjeljuju, tj. na kojoj pokretnoj traci postoji paleta za transport. U trenutku kada AGV dođe do te točke, ako postoji zadatak na AGV Work Listu, taj zadatak se dodjeljuje tom AGV-u.

Na slici 37. prikazan je dizajn cjelokupnog sustava.



Slika 37. Dizajn sustava unutar softvera Flexsim s prikazanim protocima

Na sljedećoj slici kotirane su udaljenosti između objekata unutar skladišta:



Slika 38. Udaljenosti između relevantnih stanica

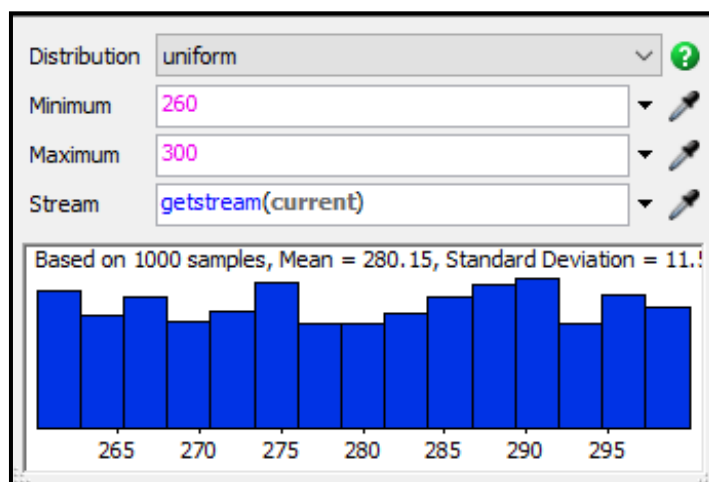
### 3.3.2. Protoci robe i distribucija protoka

Iz proizvodnje pomoću pokretnih traka stiže u prosjeku 36 paleta/satu na poziciju broj 1, dok pomoću ostale tri pokretne trake stiže u prosjeku 13 paleta/satu na svaku od pozicija 2, 3 i 4. Protok 1 ide od pozicije 1 prema primopredajnoj poziciji za gravitacijske regale, dok protok 2 ide sa pozicija 2, 3 i 4 do podnih primopredajnih paletnih pozicija.

Nedovoljno je pretpostaviti i simulirati dolazak paleta na pokretnu traku u jednakim vremenskim intervalima (~13 paleta/satu = 1 paleta svakih 280 sekundi). Stoga je dolazak paleta simuliran prvo sa uniformnom, zatim sa logaritamskom-normalnom distribucijom (*log-normal*). Vrsta distribucije se postavlja unutar postavka elementa *Source*.

#### Uniformna distribucija

Kod uniformne distribucije svi ishodi nekog događaja su jednako vjerojatni unutar određenog raspona. [12] To znači da vrijeme između dolaska svake palete može ravnomjerno varirati između 260 sekundi (minimum) i 300 sekundi (maksimum) za pozicije 2, 3 i 4. Prosječno vrijeme između dolazaka paleta je srednja vrijednost između minimalnog i maksimalnog vremena, u ovom slučaju 280 sekundi. Standardna devijacija je 11,55 sekundi, a prosječan protok 12,86 paleta/satu. Ovom distribucijom simuliramo sustav u kojem se pretpostavlja izostanak problema i zastoja u proizvodnji, gdje paleta može stići 20 sekundi prije ili kasnije od prosječne vrijednosti.

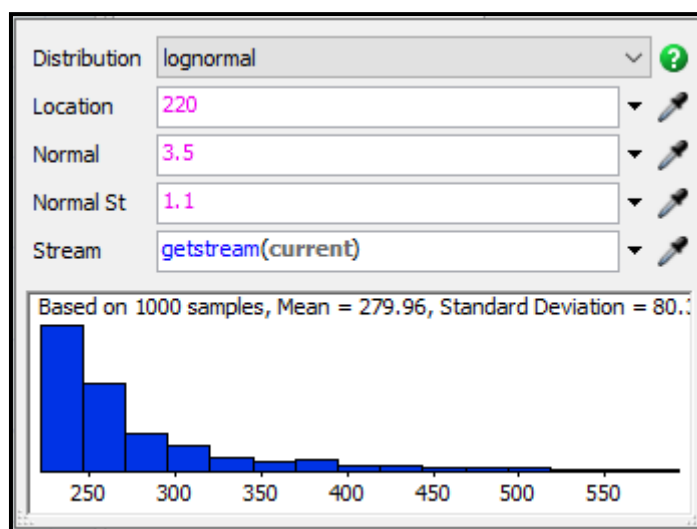


Slika 39. Postavljanje uniformne distribucije dolazaka paleta na pokretnu traku

#### Log-normal distribucija

Ova vrsta distribucije često se koristi kada je varijabla (vrijeme između dolazaka paleta) pozitivno asimetrična, što znači da ima dugačak rep prema višim vrijednostima. [13] U ovom slučaju, vremena dolazaka paleta slijede logaritamsku normalnu distribuciju, što znači da se

većina dolazaka paleta događa oko središnje vrijednosti (280 sekundi), ali postoje povremena duža kašnjenja (oko 350 sekundi), s manjim brojem ekstremno dugih kašnjenja (oko 550 sekundi). Ovo se može vidjeti iz standardne devijacije koja iznosi 80,39 sekundi. Ovom distribucijom simuliramo sustav u kojem se pretpostavlja pojava problema i zastoja u proizvodnji. Paleta može doći za najmanje 220 sekundi što je dosta prije prosječne vrijednosti od 280 sekundi, međutim pojava zastoja može uzrokovati da paleta značajno kasni.



Slika 40. Postavljanje log-normal distribucije dolazaka paleta na pokretnu traku

### 3.3.3. Parametri simulacije

U sljedećoj tablici nalazi se rezime svih parametara koji su varijabilni i promjenjivi, te njihove vrijednosti unutar konačnih simulacija.

Tablica 3. Parametri simulacije

Naziv parametra	Vrijednost
Broj AGV vozila	4 (pretpostavlja se da je jedno vozilo uvijek na punjenju)
Brzina AGV vozila	2 m/s
Akceleracija AGV vozila	1 m/s <sup>2</sup>
Vrijeme podizanja/spužtanja vilica AGV vozila	20 s
Propusnost pokretne trake 1	~36 paleta/h
Propusnost pokretne trake 2, 3 i 4	~13 paleta/h/pokretnoj traci
Trajanje simulacije (broj smjena)	8 h - (1 smjena)

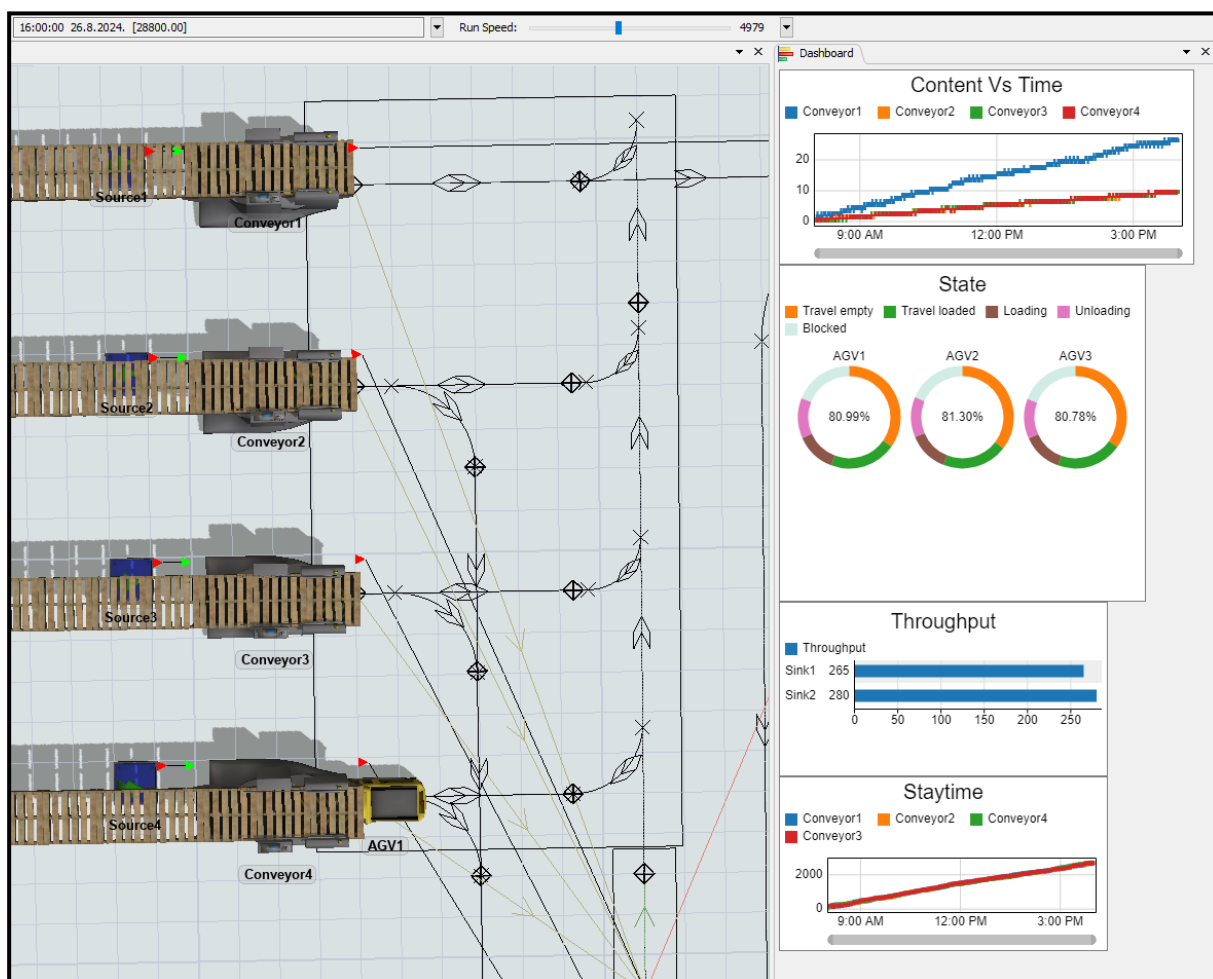


### 3.4. Pokretanje simulacije

Simulirati će se dva slučaja kao što je i prije spomenuto, dolazak paleta uniformnom i log-normal distribucijom, te će se iz njih očitati analitički grafovi. Prije konačnog rješenja napraviti će se optimizacija AGV mreže i pronaći maksimalni mogući protok iterativnom metodom.

#### 3.4.1. Optimizacija AGV mreže

Prva verzija simulacije koristila je jednu kontrolnu zonu za cijelo područje pokretnih traka, ovo je bilo neoptimalno jer bi AGV-ovi dugo čekali dostupnost zone. Ovo je rezultiralo nastajanjem začepjenja na pokretnim trakama kao što je prikazano na slici 41. Uz navedeno, na analitičkim grafovima također možemo očitati da su AGV-ovi skoro 20% vremena blokirani izvan kontrolne zone ili zbog prometa i neoptimiziranosti mreže.

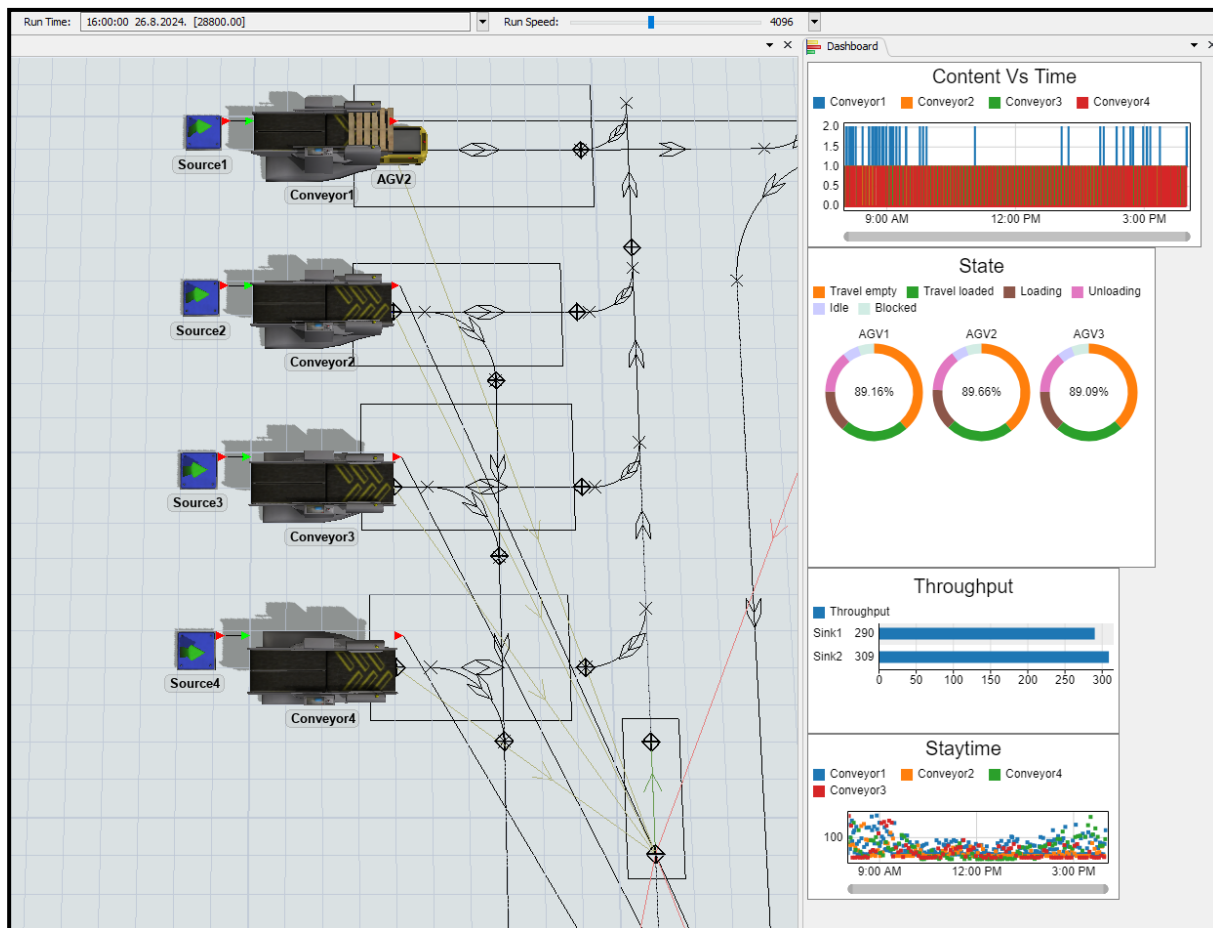


Slika 41. Prva verzija simulacije prije optimiziranja mreže

Ovo je popravljeno na način da se svakoj pokretnoj traci dodijelila posebna kontrolna zona kako bi AGV-ovi mogli istovremeno podizati palete sa više pokretnih traka. Ovo je rezultiralo



povećanjem produktivnosti, te više nije dolazilo da začepljenja na pokretnim trakama. Također su lagano podešeni putevi AGV mreže iterativnom metodom. Nakon optimizacije stanje blokiranosti svedeno je na malih 5%, te je dobiveno vrijeme praznog hoda (vrijeme gdje AGV-ovi čekaju zadatak) također od 5%. Ovo znači da AGV sustav može podnijeti veći protok što se ispituje u sljedećem poglavlju.



Slika 42. Optimizirana simulacija

### 3.4.2. *Maksimalni mogući protok*

Maksimalni mogući protok predstavlja količinu paleta koju sustav može podnijeti u jednom vremenskom intervalu (1 smjena). Konačne simulacije će biti simulirane sa protokom 36 paleta/satu za pokretnu traku 1, te 13 paleta/satu za svaku od pokretnih traka 2, 3 i 4. Međutim uvijek je dobro znati koliki maksimalni protok sustav može podnijeti u slučaju da se u budućnosti planira proširenje proizvodnje. Iterativnom metodom postepenog povećavanja protoka su dobiveni maksimalni mogući protoci za 2, 3 i 4 AGV vozila u sustavu kao što je prikazano u Tablici 4.

Tablica 4. Maksimalni mogući protok sustava

Broj AGV vozila	Maksimalni protok (paleta/satu)
Dva	~55
Tri	~80
Četiri	~109

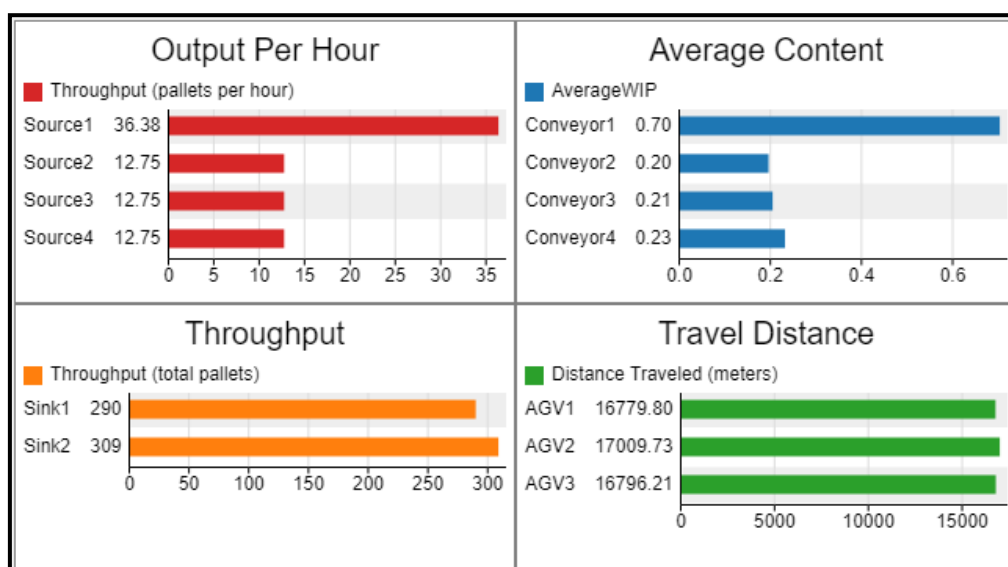
Iz očitanih vrijednosti vidimo da unutar optimizirane simulacije postoji proporcionalnost između broja vozila i maksimalnog protoka. Postoje manje fluktuacije koje se mogu objasniti varijabilnostima kod simulacije kao što su performanse, tajming, te ishodi koji se javljaju zbog nepredvidivih čimbenika unutar sustava poput prometa.

### 3.4.3. Rezultati simulacije

Nakon pokretanja simulacija sakupljeni su slijedeći podaci u obliku analitičkih grafova.

#### Osnovne značajke

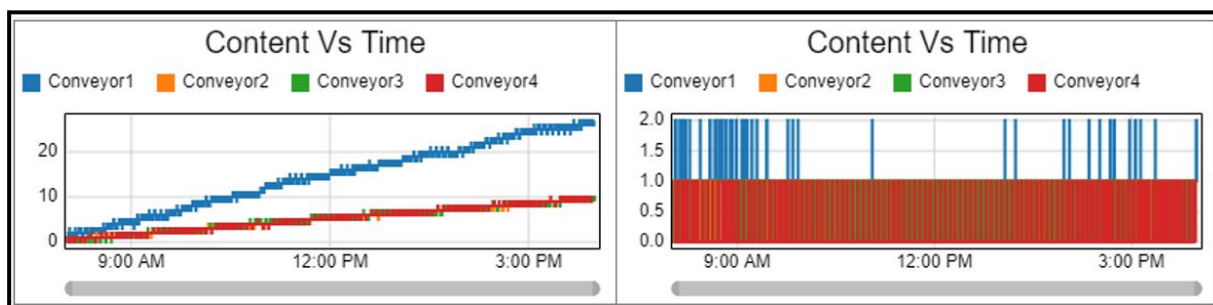
*Output Per Hour* predstavlja protok paleta po satu koji je i prije naveden, te potvrđen kroz analitički graf. *Average Content* predstavlja koliko prosječno paleta pokretne trake sadrže kroz tijek simulacije. Iz ovog se da zaključiti da gotovo nikad nema više od jedna paleta na pokretnoj traci u optimiziranoj simulaciji i da ne dolazi do začepjenja. *Throughput* predstavlja ukupnu propusnost u jednoj smjeni koja je jednaka 599 paleta na lokacije gravitacijskih regala i podnih primopredajnih paletnih pozicija zajedno. *Travel Distance* predstavlja koliko je koji AGV prešao metara u toku jedne smjene. Vidimo da je prijeđena udaljenost po pojedinom AGV-u vrlo slična jer se kreću po istim putevima i obavljaju iste operacije.



Slika 43. Grafovi osnovnih značajki

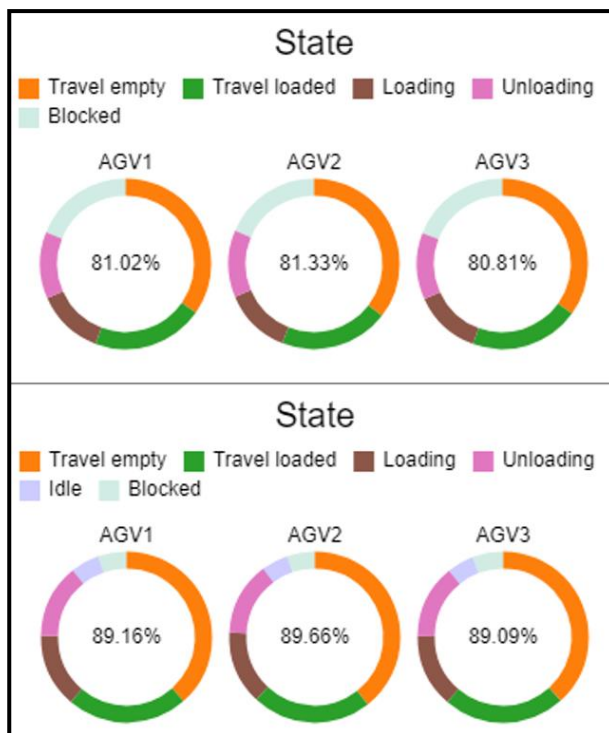
## Usporedba neoptimizirane i optimizirane simulacije

Iz sljedeće slike vidimo stvaranje začepjenja, tj. nagomilavanje nepodignutih paleta sa pokretnih traka u neoptimiziranoj simulaciji. Veće začepljenje događa se na pokretnoj traci 1 zbog većeg protoka što vidimo po većem uzlaznom trendu plave linije od ostalih. Nakon optimiziranja broj paleta na pokretnoj traci po vremenu ne prelazi dvije palete. Iz ovoga zaključujemo da promet i otklanjanje zastoja u AGV mreži može uvelike utjecati na efikasnost sustava.



**Slika 44. Usporedba broja paleta kroz vrijeme u neoptimiziranoj i optimiziranoj simulaciji**

Na sljedećoj slici prikazano je stanje vozila kroz tijek simulacije u postotcima. Vidimo da AGV-ovi većinu vremena provedu vozeći se prazni do pokretnih traka (38%) i vozeći se sa teretom do pozicija za primopredaju (22%). Značajni postotak vremena AGV-ovi provedu u operaciji dizanja i spuštanja vilica, čak 14% za svaku operaciju (ukupno 28% vremena).



**Slika 45. Usporedba stanja AGV vozila u neoptimiziranoj i optimiziranoj simulaciji**

U neoptimiziranoj simulaciji značajnih 19% vremena AGV-ovi su blokirani ispred kontrolnih zona ili zbog prometa. Nakon optimizacije to vrijeme je svedeno na malih 5%, dok također dobivamo 5% provedenog vremena u vremenu praznog hoda (Idle time). Stopa iskoristivosti raste sa 81% u neoptimiziranoj, do 89% u optimiziranoj simulaciji, ali ovaj postotak se može dodatno povećati na način da maksimalno iskoristimo vrijeme praznog hoda povećavanjem propusnosti paleta sa pokretnih traka.

Optimalna veličina flote AGV vozila za ovaj slučaj je 3. Tri AGV vozila komotno rješavaju zadanu propusnost, ali moramo pretpostaviti da se u svakom trenutku jedno vozilo mora puniti, tada nam treba 4 vozila u sustavu. Ovo se može riješiti tako da vrijeme praznog hoda AGV vozila iskoristimo na automatsko punjenje na parkirnoj poziciji gdje AGV-ovi čekaju novi zadatak, ako je 5% vremena punjenja dovoljno da AGV-ovi napune bateriju.

Sustav lako svladava oba slučaja distribucije protoka što je i očekivano jer se ukupna propusnost u vremenskom periodu ne mijenja. Zaključujemo da AGV sustav može raditi u proizvodnji gdje dolazi do zastoja ili varijacijskih povećanja i smanjenja propusnosti.

## 4. ANALIZA AGV SUSTAVA

U ovom poglavlju analiziraju se i uspoređuju AGV sustavi i sustavi manualnih viličara, te se istražuju studije slučaja iz stvarnog života kako bi se prepoznali rizici uvođenja AGV sustava. Svi podaci analize prikupljeni su uz pomoć Skladišne Logistike (Toyota Material Handling).

### 4.1. Komparativna analiza: AGV sustav – Manualno skladište

Cilj ove analize je pružiti sveobuhvatnu usporedbu između skladišta kojima upravlja AGV sustav i onih koja se oslanjaju na ručno upravljanje viličarima. Razumijevanje prednosti i kompromisa između ova dva sustava ključno je za donošenje informiranih poslovnih odluka. Analizirati će se ključni pokazatelji učinka (Key Performance Indicators - KPI) koji pružaju mjerljiv uvid u izvedbu i koristi svakog sustava. Sljedeći KPI-jevi će biti uključeni u analizu: efikasnost, produktivnost, iskoristivost prostora, optimizacija prometa, sigurnost, skalabilnost i fleksibilnost.

#### 4.1.1. Efikasnost i produktivnost

##### Propusnost

Propusnost se odnosi na količinu robe koju skladište može obraditi unutar određenog vremena. AGV-ovi općenito rade sporijom brzinom od viličara, u prosjeku 1-2 m/s zbog sigurnosnih ograničenja sustava. Međutim, AGV-ovi rade neprekidno s minimalnim zastojima u tri smjene, što ih čini učinkovitijima u duljem vremenskom periodu. Skladište koje ima 4 AGV vozila gdje se pretpostavlja da se jedno vozilo uvijek puni može upravljati s procijenjenih 500-600 paleta po smjeni kao što je prikazano u simulaciji. AGV-ovi imaju prednost konzistencije, budući da na njih ne utječe umor ili ljudska pogreška, te mogu raditi 24/7. Viličari kojima upravljaju radnici su brži, u prosjeku 3-5 m/s ovisno o težini tereta i širini prolaza. S vještim operaterima, manualni sustav može upravljati s oko 600-700 paleta po smjeni u ekvivalentnom skladištu. Međutim, produktivnost može pasti tokom duljeg vremenskog razdoblja zbog umora radnika i pauza, što rezultira ukupnim protokom koji može varirati.

KPI-jevi:

- Prosječna propusnost po smjeni: AGV (500-600 paleta), manualno (600-700 paleta, s varijabilnošću).
- Prosječna brzina: AGV (1-2 m/s), ručno (3-5 m/s).

### **Točnost i stopa iskoristivosti**

Točnost pri preuzimanju/odlaganju paleta ključna je za smanjenje grešaka kod tih operacija. Stopa iskoristivosti predstavlja postotak vremena u kojem su vozila (AGV-ovi ili manualni viličari) aktivno uključeni u zadatke u odnosu na vrijeme mirovanja.

AGV-ovi koriste precizne senzore i navođenje tijekom preuzimanja/odlaganja paleta, sa stopom pogreške od samo 0,1-0,5%. Manualni ručni viličari obično imaju stopu pogreške od oko 1-3% zbog čimbenika kao što su umor, nepažnja i različita vještina radnika. Pogreške su češće tijekom razdoblja velike potražnje ili produženih smjena, što dovodi do potencijalnih kašnjenja i povećanih troškova.

AGV-ovi imaju visoku stopu iskoristivosti, obično 90-95% jer ne zahtijevaju pauze i rade kontinuirano, što je prikazano i potvrđeno u simulaciji. Stopa iskoristivosti ručnih viličara općenito se kreće između 65-75% zbog potreba operatera za odmorima, promjenama smjena i drugim oblicima prekida rada.

KPI-jevi:

- Točnost preuzimanja/odlaganja: AGV (0,1-0,5%), manualno (1-3%).
- Stopa iskoristivosti: AGV (90-95%), manualno (65-75%).

### **Vrijeme izvršavanja zadataka**

Vrijeme izvršavanja zadataka predstavlja procjenu koliko brzo sustav može izvršiti standardnu aktivnost kao što je preuzimanje i odlaganje palete.

AGV-ovi imaju sporije brzine, no to kompenziraju radeći 24 sata dnevno, 7 dana u tjednu, što rezultira dosljednim vremenom izvršavanja zadataka. Na primjer, uobičajeni zadatak preuzimanja/odlaganja može trajati 1-1,5 minuta po operaciji, pri čemu se uzima u obzir preuzimanje/odlaganje sa visokih razina regala.

Ručni viličari zadatke obavljaju u prosjeku brže, dovršavajući standardni zadatak za oko 30 sekundi do 1 minute. Međutim, učinkovitost se smanjuje tijekom dugih smjena zbog umora radnika.

KPI-jevi:

- Prosječno vrijeme dovršetka zadatka (preuzimanje/odlaganje): AGV (1-1,5 minuta), manualno (30 sekundi do 1 minute).

### **Zastoji i radni sati**

Zastoji i radni sati značajni su faktori u analizi kontinuirane produktivnosti skladišta. Sposobnost rada tijekom duljeg razdoblja bez prekida ključna je prednost automatizacije.

AGV-ovi imaju zastoje uglavnom zbog planiranog održavanja ili punjenja baterije, što rezultira predvidljivim i minimalnim prekidima rada. AGV-ovi mogu imati oko 5-10% vrijeme zastoja po smjeni. Taj postotak ponekad može biti i niži, ako se stanice za punjenje nalaze u području gdje AGV-ovi čekaju na izvršenje naloga. Na taj se način vrijeme mirovanja AGV sustava pretvara u vrijeme punjenja. Viličari kojima upravljaju ljudi imaju zastoje zbog pauza, promjena smjena i povremenog neplaniranog održavanja. Procijenjeno vrijeme zastoja ručnih viličara je oko 20-30% po smjeni, uzimajući u obzir sve prekide uzrokovane ljudskim djelovanjem.

KPI-jevi:

- Zastoj po smjeni: AGV (5-10%), manualno (20-30%).
- Radni sati: AGV (24/7, 3 smjene), manualno (u većini slučajeva 2 smjene od 8 sati)

**Tablica 5. KPI-jevi efikasnosti i produktivnosti**

KPI	AGV sustav	Sustav manualnih viličara
Propusnost po smjeni (3 vozila)	500-600 paleta (3 vozila)	600-700 paleta (3 vozila)
Prosječna brzina	1-2 m/s	3-5 m/s
Točnost preuzimanja/odlaganja	0,1-0,5% stopa greške	1-3% stopa greške
Stopa iskoristivosti	90-95%	65-75%
Vrijeme izvršavanja zadataka	1-1,5 minuta	0,5-1 minuta
Vrijeme zastoja po smjeni	5-10%	20%-30%

#### **4.1.2. Iskoristivost prostora i optimizacija operacija**

Skladišni prostor je vrijedna imovina, a učinkovit raspored skladišnog prostora regala može izravno utjecati na produktivnost i operativne troškove. AGV sustav općenito omogućuje kompaktnije rasporede regala.

##### **Dizajn skladišnog rasporeda**

Razmatranje dizajna za AGV sustav i sustav manualnih viličara razlikuju se prvenstveno zbog navigacijskih i sigurnosnih zahtjeva, te optimizacija putanja kod AGV sustava.

AGV-ovi rade s velikom preciznošću zahvaljujući laserskoj navigaciji, dopuštajući konfiguracije užih radnih hodnika. Raspored regala s AGV sustavom visokopodiznih električnih viličara može koristiti radne hodnike uske od 2,5 do 3 metra. Budući da AGV-ovi mogu raditi uz minimalnu ljudsku intervenciju, skladišta mogu minimizirati radne hodnike između regala, ostavljajući više prostora za regale, pogotovo ako se radi o potpuno

automatiziranom skladištu. Ova optimizacija može dovesti do povećanja gustoće regala za 5-15%.

Ručni visokopodizni električni viličari zahtijevaju šire prolaze, obično 2,5-3,5 metara ovisno o kakvim viličarima se radi. Ovi širi prolazi smanjuju potencijalni prostor za skladištenje.

KPI-jevi:

- Širina prolaza: AGV (2,5-3 metara), ručni (2,5-3,5 metara).
- Povećanje gustoće skladištenja: AGV (5-15%), ručno (osnovna vrijednost, bez povećanja).

### Upravljanje prometom i zagušenja

Učinkovit promet unutar skladišta smanjuje uska grla i zastoje, vrijeme čekanja i rizik od sudara.

AGV-ovi koriste sustave upravljanja prometom za koordinaciju ruta i sprječavanje zastoja. Ovi sustavi mogu predvidjeti potencijalna uska grla i preusmjeriti AGV-ove, poboljšavajući ukupni protok prometa za 10-20% u usporedbi s ručnim viličarima. AGV-ovi također smanjuju vrijeme čekanja između početka izvršavanja zadataka, jer AGV počne izvršavati zadatak čim stigne novi radni nalog zbog integracije sa sustavom izdavanja naloga.

Kod ručnih viličara mogućnost ljudske pogreške i nedostatak koordinacije u upravljanju protokom prometa povećava vjerojatnost kašnjenja i manjih nesreća, što ometa protok prometa i produktivnost.

KPI-jevi:

- Poboljšanje protoka prometa: AGV (10-20%), manualno (osnovna vrijednost, potencijalna gužva).
- Smanjenje vremena čekanja: AGV (značajno smanjenje), manualno (10-20% duže vrijeme čekanja kod zagušenja).

**Tablica 6. KPI-jevi iskoristivosti prostora i optimizacija operacije**

KPI	AGV sustav	Sustav manualnih viličara
Širina radnog hodnika	2,5-3 metara	2,5-3,5 metara
Povećanje gustoće skladištenja	5-15%	Osnovna vrijednost, bez promjena
Poboljšanje protoka prometa	10-20%	Osnovna vrijednost, potencijalna zagušenja
Smanjenje vremena čekanja	Značajno	10-20% duže kod zagušenja



### 4.1.3. Sigurnost i prevencija nesreća

Sigurnost je važan čimbenik u skladišnim operacijama, budući da nesreće i ozljede na radu mogu dovesti do zastoja proizvodnje, povećanih troškova osiguranja radnika i ostalih potencijalnih troškova.

#### Stopa nesreća i izgubljeni radni dani

Stopa nesreća značajan je faktor koji pokazuje koliko se nesreća događa u nekom skladištu ili proizvodnji, te utječe na broj izgubljenih radnih dana godišnje.

AGV-ovi su opremljeni senzorima i laserskim navigacijskim sustavom koji pomažu kod izbjegavanja sudara. Automatski usporavaju ili se zaustavljaju kada otkriju prepreke, čime se smanjuje rizik od nesreća. Zbog ovih značajki, kod AGV sustava događa se procijenjenih 0,5–1 nesreća godišnje za flotu od 4 AGV-a. Ti su incidenti često manji, s malim utjecajem na osoblje i imovinu, pogotovo ako je područje rada AGV-ova odvojeno od ostatka skladišta i nema interakcije između manualnog i AGV dijela skladišta. AGV sustavi doprinose procijenjenom gubitku od 0 do 5 radnih dana godišnje zbog nesreća i održavanja. Također se nadziru pomoću softvera koji može predvidjeti potrebe održavanja, sprječavajući mehaničke i softverske kvarove na vrijeme.

Ručni viličari kojima upravljaju ljudi skloni su nesrećama zbog čimbenika kao što su umor operatera, distrakcije u radu i pogreške u procjeni. Uobičajeni incidenti uključuju sudare s regalima, drugim viličarima ili osobljem. Manualni sustavi imaju višu stopu nesreća koja se procjenjuje na 2-5 nesreća godišnje za flotu od 4 viličara. Stoga, sustavi manualnih viličara mogu rezultirati sa 20-50 izgubljenih radnih dana godišnje zbog nesreća i ozljeda radnika, te ne samo zbog ozljeda već i zbog bolovanja.

KPI-jevi:

- Godišnja stopa nesreća: AGV (0,5-1 godišnje), manualno (2-5 godišnje).
- Izgubljeni radni dani godišnje: AGV (0-5 dana), manualno (20-50 dana).

**Tablica 7. KPI-jevi sigurnosti i prevencije nesreća**

KPI	AGV sustav	Sustav manualnih viličara
Stopa nesreća	0,5-1 godišnje	2-5 godišnje
Izgubljeni radni dani godišnje zbog nesreća	0-5 radnih dana	20-50 radnih dana

#### **4.1.4. Skalabilnost i fleksibilnost**

Fleksibilnost i skalabilnost ključni su faktori za skladišta koja se suočavaju s fluktuirajućom potražnjom i sezonskim promjenama potražnje.

##### **Skalabilnost sustava pri ekspanziji**

Jednostavnost i trošak skaliranja skladišnih operacija igraju ključnu ulogu pri proširenju kapaciteta ili prilagodbi zahtjevima veće propusnosti. AGV-ovi zahtijevaju ulaganja u infrastrukturu i prilagodbe softvera, dok se sustavi manualnih viličara mogu povećati zapošljavanjem dodatnih operatera i nabavkom dodatnih viličara.

Skaliranje AGV sustava uključuje dodavanje novih AGV vozila i ažuriranje upravljačkog softvera i nekih postavki sustava. Svaki dodatni AGV košta otprilike 60.000 - 100.000 €. Nadogradnje infrastrukture, kao što su dodatne stanice za punjenje, dodatni reflektori i ostala periferna oprema mogu koštati oko 5.000 do 15.000 €. Implementacija novih AGV-ova zahtijeva programiranje i testiranje, s procijenjenim vremenom postavljanja od 2-4 tjedna po jedinici, ovisno o složenosti skladišta. Također postoji dugo vrijeme isporuke za AGV vozila, u rasponu od 2-8 mjeseci, što može usporiti proširenje. Za povećanje kapaciteta od 20% (npr. dodavanje 2 AGV-a u flotu od 10 AGV-a), troškovi se kreću od 125.000 € od 215.000 €.

Skaliranje sustava manualnih viličara uključuje kupnju dodatnih viličara i zapošljavanje novih radnika. Svaki viličar košta otprilike 18.000 - 30.000 €, a svaki operater ima godišnju plaću od 18.000 - 26.000 € bruto. Obuka novih rukovatelja viličarima traje otprilike 1-2 tjedna, tijekom kojih je smanjena produktivnost. Za povećanje kapaciteta od 20% (dodavanjem 2 viličara i operatera u flotu od 10 viličara), početni trošak je oko 72.000 - 112.000 € za opremu, obuku i godišnju plaću.

KPI-jevi:

- Trošak proširenja od 20%: AGV (125.000 €-215.000 €), manualno (72.000 €-112.000 €).
- Vrijeme do proširenja kapaciteta: AGV (3-9 mjeseci), manualno (3-4 tjedna za obuku i kupnju vozila).

##### **Fleksibilnost promjene potražnje**

Skladišta s varijabilnim proizvodima koji dolaze iz proizvodnje ili fluktuirajućim vrstama potražnje prema sezoni trebaju sustave koji se učinkovito prilagođavaju novoj potražnji. Ova fleksibilnost utječe na operativnu učinkovitost sustava, posebno kao odgovor na sezonska opterećenja ili nove proizvode.

AGV-ovi zahtijevaju reprogramiranje za rukovanje novim protocima rada ili vrstama proizvoda (paleta), što može uključivati ponovno mapiranje skladišta i ažuriranje AGV mreže puteva. Ovaj proces općenito traje 2-4 tjedna, ovisno o složenosti promjena. Prilagodba AGV sustava za nove protoke rada košta otprilike 5.000 - 10.000 € što uglavnom uključuje usluge aplikacijskog inženjera za AGV sustave i razne dodatne troškove.

Ručno upravljani viličari s operaterima brzo se prilagođavaju novim ili izmijenjenim zadacima, uz minimalno vrijeme zastoja ili potreba za ponovnom konfiguracijom. Operateri mogu dobiti briefing i odmah implementirati nove protoke rada, nudeći fleksibilnost u kratkom vremenu. Prilagodbe tijekom rada u ručnim sustavima uključuju malo ili nimalo troškova, osim kratke obuke operatera.

KPI-jevi:

- Vrijeme promjene tokova rada: AGV (2-4 tjedna), manualno (1-2 dana ili manje).
- Trošak prilagodbe: AGV (5.000 €-10.000 €), manualno (minimalno).

**Tablica 8. KPI-jevi skalabilnosti i fleksibilnosti**

KPI	AGV sustav	Sustav manualnih viličara
Trošak proširenja od 20%	130.000-220.000 €	82.000-154.000 €
Vrijeme proširenja	3-9 mjeseci	3-4 tjedna
Vrijeme promjena tokova rada	2-4 tjedna	1-2 dana
Trošak promjene tokova rada	5.000-10.000 €	Minimalno
Fleksibilnost	Umjerena	Visoka

#### 4.1.5. Zaključak i preporuke

Posljednji odjeljak daje sažetak ključnih nalaza, te preporuke temeljene na poslovnim ciljevima i specifične slučajeve upotrebe u kojima bi pojedini sustav mogao biti optimalan.

**Tablica 9. Sažetak komparativne analize**

Metrika	AGV sustav	Sustav manualnih viličara
Efikasnost i produktivnost	Visoka konzistencija, manja brzina. Idealno za dugotrajne, ponavljajuće operacije.	Brže izvršavanje zadataka, ali značajan utjecaj ljudskih faktora poput umora i pauza.
Prostorna i prometna optimiziranost	Povećanje gustoće skladištenja i bolja optimizacija prometa.	Mogućnost nastajanja zagušenja zbog nedostatka koordinacije.

Sigurnost	Manja stopa nesreća. Opremljen senzorima za sigurnost.	Veći rizik od nesreća zbog ljudskih grešaka i umora.
Skalabilnost	Skalabilan kroz dulje vrijeme s planiranim dodacima, te zahtijeva ažuriranje softvera.	Lakša i brža skalabilnost, zapošljavanjem novih radnika i brzim nabavljanjem novih viličara.
Fleksibilnost	Zahtijevaju reprogramiranje sustava i moguću prilagodbu putanja.	Veća fleksibilnost i brža prilagodba na nove zadatke i različita opterećenja.

### **Preporuke s obzirom na poslovne ciljeve**

Izbor između AGV i manualnog sustava uvelike ovisi o specifičnim operativnim ciljevima, veličini i potrebama skladišta.

- **Okruženja s velikim brojem zadataka koji se ponavljaju**

Preporuka je implementacija AGV sustava. AGV-ovi se ističu u standardiziranim okruženjima gdje mogu samostalno operirati i izvršavati velik broj zadataka koji se ponavljaju. Ovo je ujedno i glavna značajka i razlog za implementaciju AGV sustava.

- **Fleksibilnost i brza skalabilnost**

Preporuka je implementacija sustava manualnih viličara. Ručni viličari vrlo su fleksibilni za dinamičke protoke rada, te su lako skalabilni dodatnim unajmljivanjem ili kupnjom viličara. Brza skalabilnost odgovara skladištima s fluktuirajućom potražnjom ili raznolikim proizvodima.

- **Okruženje gdje je sigurnost na prvom mjestu**

Preporuka je implementacija AGV sustava. AGV sustavi uvelike smanjuju stopu nesreća, što ih čini idealnim za tvrtke kojima je sigurnost radnika prioritet. Važno je naznačiti da AGV sustavi mogu raditi i u kombinaciji sa ručnim viličarima.

- **Hibridni model**

U nekim slučajevima, hibridni model koji kombinira AGV-ove i ručne viličare nudi optimalnu ravnotežu između učinkovitosti, fleksibilnosti i isplativosti. Implementacija AGV-ova u području s ponavljajućim zadacima, te upotreba ručnih viličara za fleksibilne, promjenjive zone opterećenja. Ovaj hibridni pristup pruža operativnu fleksibilnost dok ima koristi od učinkovitosti AGV-ova u određenim zonama, balansirajući kapitalna ulaganja s funkcionalnim prednostima.

## 4.2. ROI analiza

U ovom poglavlju provodi se analiza povrata investicija (Return of Investment – ROI) za flotu od 4 AGV visokopodiznih električnih viličara kao sa slike 46. koji rade u dvije smjene. U obzir se uzimaju početna ulaganja, troškovi održavanja, tekući operativni troškovi i potencijalne dugoročne uštede. Sve cijene će biti procijenjene i egzaktne.

### 4.2.1. Početna ulaganja

U vidu početnih ulaganja, trošak za flotu od 4 AGV vozila je 320.000 €. Zatim se uključuje trošak upravljačkog softvera koji se procjenjuje na 25.000 €. Trošak perifernih dijelova (reflektori), dodatne infrastrukture (Wi-Fi), te raznih hardverskih dodataka procjenjujemo na 75.000 €. Na posljertku se uključuje trošak usluge dizajna sustava, projektnog menadžmenta, obuke radnika i puštanja u rad od strane aplikacijskih inženjera koja se procjenjuje na 120.000 €. Sveukupna početna ulaganja iznose 540.000 €.

Trošak po ručnom viličaru ovisi o vrsti i kapacitetu, a cijenu jednog visokopodiznog ručnog viličara procjenjuje se na 20.000 €, što ukupno iznosi 80.000 € za flotu od 4 vozila. Ovdje možemo uračunati početne troškove postavljanja i obuke operatera u iznosu od 10.000 €. Sveukupna početna ulaganja za manualni sustav iznose 90.000 €.

### 4.2.2. Troškovi održavanja

S obzirom da se u pravilu radi o istom viličaru u oba slučaja, gdje jedan na sebi ima instaliran dodatan hardver i softver (AGV), možemo pretpostaviti skoro iste troškove održavanja. Međutim, zbog veće stope nesreća kod manualnih sustava može se pretpostaviti malo veći trošak održavanja za manualni sustav od 3.000 € po vozilu, ukupno 12.000 € godišnje. Za AGV sustav trošak se procjenjuje na 2.000 € po vozilu gdje je uključen i trošak reprogramiranja u slučaju potrebe, što ukupno iznosi 8.000 € godišnje.

### 4.2.3. Troškovi rada i operativni troškovi

Kod AGV sustava pretpostavlja se potreba za barem jednom stručnom osobom koja će pobliže nadzirati i upravljati AGV sustavom unutar skladišta klijenta. Stručna osoba je plaćena 1.500 € neto, što iznosi 2.240 € bruto, ukupno 26.880 € godišnje troška za tvrtku.

Kod sustava manualnih viličara sa 4 vozila potrebno je imati zaposleno minimalno 3 osobe po smjeni, pretpostavlja se da 1 operater manualnog viličara može podnijeti opterećenja kao 1,5 AGV vozila, ovdje zadnji manualni viličar predstavlja rezervu. Ukupno 6 operatera, koji su plaćeni 1100 € neto, što iznosi 1580 € bruto, predstavljaju godišnji trošak od 113.760 € za tvrtku, u što nije uključen trošak ozljeda na radu i sličnog.

#### 4.2.4. Energetski troškovi

U vidu energetskih troškova također se pretpostavljaju slični troškovi s obzirom da se radi o električnim viličarima, međutim s obzirom na to da je rad 4 AGV viličara ekvivalentan radu 3 manualna viličara, te potreba za Wi-Fi mrežom u slučaju AGV sustava, manualni viličari imaju manje godišnje troškove energije od 8.000 €, dok kod AGV sustava troškovi iznose 12.000 €.

#### 4.2.5. Povrat investicije

U sljedeće dvije tablice zbrojeni su početni troškovi i kumulativni godišnji troškovi po sustavu. U tablici kumulativnih troškova vidimo da je manualni sustav značajno skuplji godišnje.

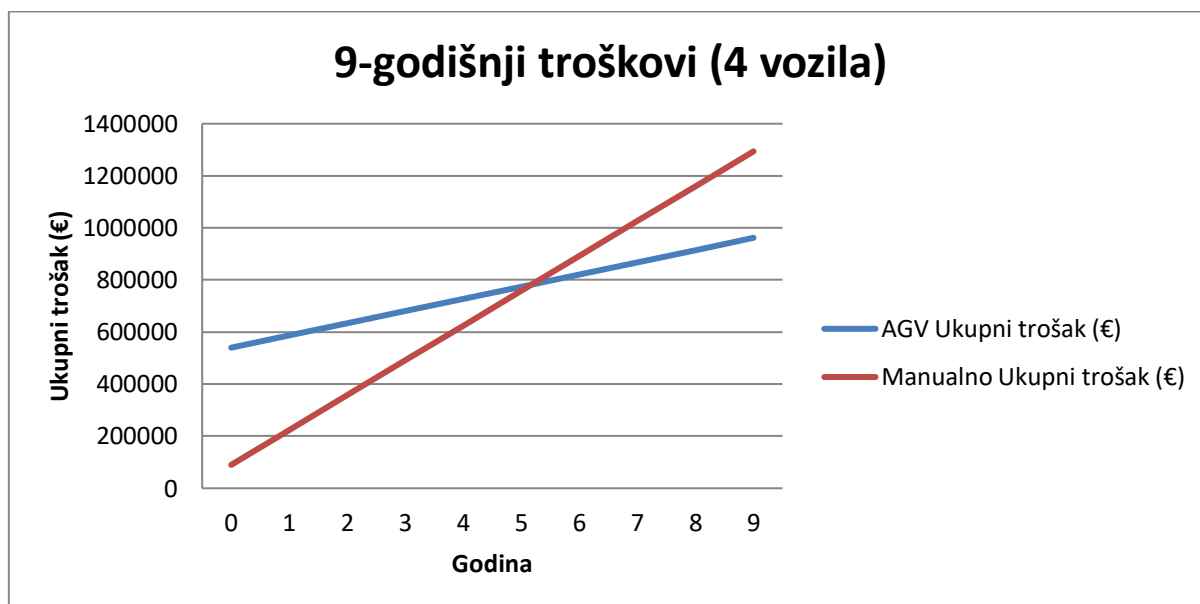
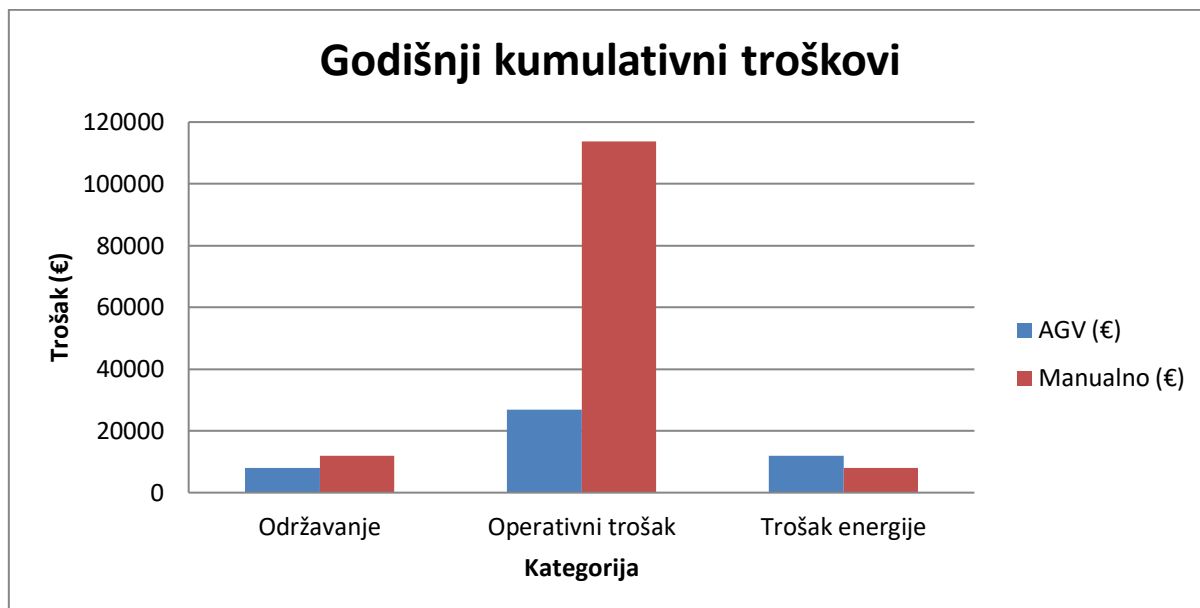
**Tablica 10. Početni troškovi sustava**

Početni trošak	AGV sustav (€)	Sustav manualnih viličara (€)
Vozila	320.000	80.000
Softver	25.000	-
Dodatno	75.000	-
Usluga dizajna sustava	110.000	-
Obuka radnika	10.000	10.000
<b>UKUPNO</b>	<b>540.000</b>	<b>90.000</b>

**Tablica 11. Kumulativni godišnji troškovi**

Godišnji trošak	AGV sustav (€)	Sustav manualnih viličara (€)
Održavanje	8.000	12.000
Operativni troškovi	26.880	113.760
Energija	12.000	8.000
<b>UKUPNO</b>	<b>46.880</b>	<b>133.760</b>

Na sljedećim grafovima vidimo usporedni prikaz kumulativnih troškova oba sustava, kao i graf 9-godišnjih troškova iz kojeg možemo iščitati povrat investicije. Iz grafa godišnjih troškova vidimo da je većina troška sadržano u plaćama radnika. Iz grafa 9-godišnjih troškova vidimo da će do povrata investicije AGV sustava doći kroz 5-6 godina.



Ova analiza troškova naglašava da iako AGV-ovi zahtijevaju veća početna ulaganja, nude značajne dugoročne uštede zbog nižih operativnih troškova i troškova održavanja. Manualni sustavi viličara, iako su u početku jeftiniji, s vremenom stvaraju veće operativne troškove, prvenstveno zbog plaća radnika.

Ova analiza dokazuje održivost prijelaza na AGV sustav gdje se povrat investicije vidi već nakon 5-6 godina. Valja napomenuti da je ova projekcija napravljena za hrvatsko tržište. U bogatijim zapadnim europskim zemljama, zbog većih plaća radnika, možemo pretpostaviti nešto kraće vrijeme povrata investicije od 2-3 godine.

### 4.3. Studije slučaja i primjena u stvarnom svijetu

Sljedeće studije slučaja potvrđuju održivost i stratešku vrijednost implementacije AGV sustava u različitim skladišnim okruženjima sa različitim zahtjevima.

#### 4.3.1. *TORO – automatizacija skladišta uz prisustvo manualnih operacija [16]*

##### **Pregled problema**

TORO, norveški proizvođač hrane sa sjedištem u Bergenu, vodeći je u prehrambenoj industriji od 1946. godine i poznat po raznolikoj ponudi proizvoda od preko 450 različitih proizvoda. TORO je želio poboljšati brzinu i ekonomičnost svojih logističkih operacija uz održavanje visokog standarda sigurnosti u okruženju u kojem automatizirani i ručni viličari rade jedni uz druge.

##### **Rješenje**

Implementacija 5 visokopodiznih AGV-ova imala je za cilj izvršiti više od 30.000 transportnih zadataka godišnje, uključujući transport otpada, dostavu materijala do stanica za pakiranja i transport gotovih proizvoda sa pokretnih traka u proizvodnji do skladišta. AGV-ovi su testirani 10 mjeseci prije potpune implementacije. TORO je također ugradio dodatne sigurnosne senzore na AGV-ove i na mezanine gdje rade manualni viličari, te stoga nije bilo problema oko zajedničkog rada AGV-ova i manualnih viličara. Također je bila bitna funkcionalnost ručnog upravljanja za hitne slučajeve, gdje se AGV-ovima može upravljati ručno u određenim slučajevima da ne dođe do zastoja proizvodnje.

##### **Zaključak**

Integracija AGV-ova poboljšala je TORO-ove logističke operacije povećanjem brzine, smanjenjem troškova i održavanjem sigurnog radnog okruženja, te u budućnosti planira proširenje automatizacije logističkih operacija.

#### 4.3.2. *Optimizacija prometa implementacijom AGV sustava u češkoj tvornici za automobilsku industriju [17]*

##### **Pregled problema**

Češka tvornica za automobilsku industriju imala je za cilj automatizirati transport finalnih proizvoda od montažnih traka do skladišta za otpremu. Cilj je bio zamijeniti manualni sustav s AGV-ovima kako bi se poboljšala učinkovitost optimizacijom prometa u skladištu, te povećala sigurnost. Tvornica je trebala optimiziranu rutu AGV-ova koja izbjegava raskrižja s velikim prometom i uske prolaze. To je zahtijevalo analizu skladišnih ruta i odabir AGV-ova koji zadovoljavaju specifične kriterije.



## Rješenje

Pomoću heatmapa identificirale su se optimalne rute za AGV-ove koje izbjegavaju zastoje u prometu. Odabrana su AGV vozila s odgovarajućim kapacitetom utovara (četiri palete) i brzinama. Dva AGV vozila radila su u dvije odvojene putanje (A i B), a svaki je pokrивao šest zaustavljanja s planiranim rasporedom kako bi se izbjegla kašnjenja, te je implementiran postupak za smanjenje vremena po operaciji preuzimanja/odlaganja paleta. Rute su osmišljene tako da osiguraju minimalno čekanje i postavljanje područja za preuzimanje/odlaganje paleta u blizini montažnih traka. Omogućena je funkcionalnost ručnog upravljanja za hitne slučajeve,

## Zaključak

Uspješna implementacija AGV sustava poboljšala je učinkovitost operacija, smanjila troškove rada i povećala sigurnost. Predviđa se da će povrat ulaganja u projekt biti manji od jedne godine.

### 4.3.3. Haval – jedno AGV vozilo za više skladišnih operacija [16]

## Pregled problema

Tvrtka Haval, sa sjedištem u Gemertu, Nizozemska, vodeći je proizvođač potrošnog materijala i ambalaže za prehrambenu industriju. Godišnje se iz njegovih proizvodnih pogona otpremi oko 5 milijardi proizvoda. Nakon proširenja proizvodnog pogona, tvrtka Haval je odlučila povećati operativnu učinkovitost automatiziranjem internog transporta.

## Rješenje

Haval se odlučio za implementaciju visokopodiznog AGV viličara. AGV upravlja transportom između proizvodnje i skladišta i vraća prazne palete u prostor za pakiranje. Također upravlja nisko frekventnim zadacima poput transporta paleta unutar skladišta i transportom sa regalnih paletnih pozicija do deepstack pozicija u otpremi. AGV pokreću senzori koji se nalaze iznad podnih pozicija za palete, te prepoznaju kad paleta stigne na poziciju za preuzimanje. AGV sustav je također integriran s drugom opremom poput vrata i omatalica za palete.

## Zaključak

AGV sustav je minimizirao greške u rukovanju, pridonoseći manjem oštećenju opreme. Predviđeno razdoblje povrata investicije je kraće od predviđenih 20 mjeseci zbog uočenih dobitaka u efikasnosti.

#### **4.4. Rizici i ograničenja AGV sustava**

Prije implementacije AGV sustava moraju se uzeti u obzir rizici i ograničenja sustava kako bi se pravovremeno donijele prave poslovne odluke i predvidjeli mogući problemi, te kako se isti mogu potencijalno riješiti.

##### **1. Skladištenje u hladnjači (Cold Storage)**

AGV-ovi koji rade u hladnjačama suočavaju se s izazovima vezanim uz niske temperature. Na staklu senzora za sigurnost i laserskog skenera može se javiti kondenzacija ili zamagljenje, što smanjuje sposobnost detekcije prepreka. Netočnost senzora povećava rizik od navigacijskih pogrešaka i sudara.

##### **2. Nagib i kvaliteta poda**

AGV-ovi imaju smanjenu stabilnost na padinama i nagibima, pogotovo ako startaju iz tih pozicija. Nagnute površine mogu uzrokovati prekomjernu kompenzaciju ili proklizavanje AGV-ova, osobito kada nose teške terete, povećavajući mogućnost prevrtanja. Zbog toga maksimalni nagib iz kojeg AGV-ovi mogu startati mora biti ispod 6%.

Neravan, oštećen ili prljav pod unutar radne okoline može ometati kretanje i stabilnost AGV-ova zbog kvalitete kočenja, te može dovesti do pomicanja komponenti AGV-a poput skenera radi čega se potencijalno mora raditi ponovna kalibracija. Gladak, dobro održavan pod optimizira performanse AGV-ova.

##### **3. Sigurni radni hodnici**

Kod izrade mreže AGV sustava potrebno je razmišljati o stvaranju sigurnih, jasno označenih radnih puteva za AGV-ove, posebno u područjima s velikim prometom i gdje su prisutni ostali strojevi i ljudi. Putevi se mogu mapirati, označiti pomoću sigurnosnih traka na podu, te se preporuča provedba treninga sa radnicima koji će raditi u prisustvu AGV-ova.

##### **4. Početni trošak i ulaganje**

U procesu nabave AGV sustava treba pažljivo razmišljati o financiranju takvog projekta i što u budućnosti može donijeti. Iako početni troškovi mogu biti značajni, povrat ulaganja (ROI) često se brzo ostvaruje kroz uštedu rada, povećanu produktivnost i manje nesreća. Također treba pripaziti na neočekivani troškove kod integracije zbog tehničkih i raznih drugih poteškoća.

## **5. Kompleksnost integracije**

U mnogim slučajevima modernih skladišta potrebna je integracija AGV sustava sa WMS ili ERP sustavom skladišta. Takva integracija može biti vrlo složena, zahtijevajući specijalizirane stručnjake, opsežna podešavanja i potencijalne prilagodbe kako bi se osigurala nesmetana koordinacija zadataka i upravljanje inventarom. Dugo vrijeme integracije i tehnička složenost može znatno odgoditi implementaciju AGV sustava, što dodatno povećava troškove i smanjuje produktivnost u tom periodu.

## **6. Ograničena fleksibilnost**

Klijentu se mora jasno do znanja objasniti i prikazati da AGV-ovi nisu svemogući. AGV-ovi obično rade na unaprijed definiranim rutama i možda nemaju dovoljno fleksibilnosti da se prilagode naglim promjenama rasporeda u skladištu, promjenama tokova i dinamičkom okruženju. U skladištima s ovim čimbenicima AGV-ovi mogu biti nepraktični bez redovitog reprogramiranja ili prilagodbi, što zahtijeva redovite troškove aplikacijskog inženjera za AGV-ove.

## 5. PROCES PUŠTANJA U RAD AGV SUSTAVA

Puštanje u pogon AGV sustava je strukturiran proces, te uključuje sve korake od naručivanja vozila, dizajna sustava i simulacije, te testiranja, integracije i obuke. Svaki korak osigurava da su AGV-ovi neprimjetno integrirani u klijentovo skladište, te da rade sigurno i optimizirano za jedinstvene potrebe tog skladišta.

### 5.1. Naručivanje vozila i periferne infrastrukture

Proces naručivanja započinje konzultacijama između dobavljača AGV sustava i klijenta kako bi se finalizirale specifikacije i zahtjevi skladišta. To uključuje procjenu vrste artikala kojim se upravlja (palete), rasporeda skladišnih regala i strojeva, operativnih tokova rada i svih uvjeta okoline (npr. hladnjače ili područja s različitim podnim površinama).

Nakon što se dogovore svi detalji, uspostavlja se službeni ugovor koji pokriva specifikacije proizvoda, komercijalne uvjete, rokove isporuke i uvjete podrške. Ovaj ugovor uključuje jamstvo sustava, ugovore o održavanju i obveze podrške nakon instalacije.

Nakon što se finaliziraju zahtjevi i potpiše ugovor, AGV vozila se naručuju iz tvornice dobavljača. Vrijeme isporuke može uvelike varirati, od 2-8 mjeseci ovisno o dobavljaču, vremenu naručivanja, lokaciji tvornice i klijentovog skladišta. Uz vozila se također naručuje i periferna infrastruktura, kao što su reflektori, stanice za punjenje, Wi-Fi infrastruktura, I/O ormarić, te po potrebi sustavi koji imaju interakciju sa AGV sustavom poput pokretnih traka i automatiziranih vrata. Kontrolni softver i licenca potrebni za rad i upravljanje AGV sustavom naručuju se zajedno s ostalim stavkama.

### 5.2. Dizajn rasporeda reflektora, AGV mreže i prometa sustava

U ovoj fazi dobavljač AGV sustava surađuje s klijentom kako bi se izradio detaljan raspored reflektora za navigaciju, definirala AGV mreža puteva i uspostavila prometna pravila unutar upravljačkog softvera AGV sustava.

Prvo se ispituje raspored skladišta i regala kako bi se odredile optimalne pozicije za navigacijske reflektore. Reflektori se postavljaju u strateškim intervalima na zidovima, stupovima ili regalima. Veća koncentracija reflektora potrebna je na ključnim pozicijama poput raskrižja, područja za preuzimanje i odlaganje paleta, te kod stanica za punjenje. Ako bilo kakve prepreke (npr. strojevi, zidovi) blokiraju pogled, razmatraju se alternativni položaji reflektora kako bi se osigurala kontinuirana razina navigacije kroz cijelo skladište.

Zatim se kreće na izradu AGV mreže puteva unutar upravljačkog softvera AGV sustava. Putevi se mapiraju na način da se povezuju kritična područja unutar skladišta, kao što su utovarne i istovarne stanice, područja regala, razne skladišne zone i zone punjenja. Ovo uključuje planiranje učinkovitih ruta koje su usklađene sa tokovima rada i koje smanjuju udaljenost koju AGV mora proći, te s ciljem izbjegavanja nepotrebnih gužvi. Uspostavljaju se jednosmjerni i dvosmjerni koridori u područjima gdje su potrebni, primjerice dvosmjerni koridori u širokim hodnicima gdje se AGV-ovi mogu mimoići. Staze moraju biti u minimalnoj interakciji sa područjima gdje se kreću ostali strojevi i ljudi. Također se trebaju uzeti u obzir područja s različitim vrstama poda, neravnim podovima i nagibima jer mogu utjecati na stabilnost. Kada se napravi inicijalni koncept AGV mreže postupno se optimizira simulacijom iterativnim postupkom.

Na kraju dodajemo prometna pravila koja su potrebna za koordinaciju kretanja AGV-ova, sprječavanje sudara i održavanje učinkovitog protoka robe. Ova pravila reguliraju ponašanje AGV-ova na raskrižjima, prijelazima između prostorija, područjima za utovar i istovar, te zajedničkim prostorima gdje postoji interakcija sa drugim strojevima i ljudima. Na pojedinim segmentima postavljaju se ograničenja brzine, na primjer, AGV-ovi mogu raditi maksimalnom brzinom na otvorenim područjima, ali smanjuju brzinu u blizini zidova, kod uskih prolaza ili kod stanica za utovar i istovar. Također se postavljaju pravila prednosti prolaska gdje primjerice AGV-ovi koji izlaze iz stanica za utovar čekaju da prođe AGV koji se kreće koridorom visokog prioriteta u mreži ili kod raskrižja gdje glavni koridor ima prednost nad ostalim. Ako AGV-ovi rade u područjima s ljudskim radnicima, uspostavljaju se pravila za zaustavljanje ili propuštanje na pješačkim prijelazima i u zajedničkim zonama. Kako bi se provjerila učinkovitost ovih pravila, tok prometa se simulira pomoću softverskih alata za prepoznavanje uskih grla ili sigurnosnih rizika, te se sukladno rade prilagodbe.

### **5.3. Postavljanje Wi-Fi mreže**

Postavljanje Wi-Fi mreže je ključni korak kod puštanju u pogon AGV sustava, budući da pruža mogućnost komunikacije između AGV-ova i upravljačkog softvera. AGV-ovi ovise o neprekidnoj i stabilnoj mrežnoj povezanosti u cijelom radnom području AGV-ova. U tu svrhu provodi se istraživanje lokacije kako bi se procijenio izgled i strukturne značajke koje bi mogle utjecati na snagu Wi-Fi signala, poput regala, strojeva, zidova i drugih prepreka. Na temelju istraživanja ili heatmappinga, određuju se optimalne lokacije za Wi-Fi pristupne točke (AP). Provode se preliminarni testovi signala kako bi se osiguralo da nema mrtvih zona. Ako ih se otkrije, prilagodbe se vrše premještanjem pristupnih točaka ili dodavanjem dodatnih AP-

ova. Mreža se zatim testira u simuliranim radnim uvjetima kako bi se osiguralo da može podnijeti opterećenje podataka od svih AGV-ova tijekom rada. To uključuje praćenje vremena odziva, latencije i brzine prijenosa podataka. Testiraju se različita područja skladišta kako bi se identificirale zone slabog signala ili područja s potencijalnim smetnjama signala.

#### **5.4. Instalacija I/O ormarića, stanica za punjenje i reflektora**

I/O (Input/Output) ormarić djeluje kao središnje sučelje između AGV upravljačkog softvera i perifernih uređaja, kao što su pokretne trake, automatizirana vrata, alarmi i senzori. I/O ormarić se instalira na sigurnom, pristupačnom mjestu koje omogućuje jednostavno ožičenje raznih perifernih uređaja. Svaki povezan uređaj programiran je unutar ormarića da odgovara na AGV naredbe ili okidače. Na primjer, kod prilaska AGV vozila pokretnoj traci provodi se conveyor handshake ili automatsko otvaranje vrata kod prilaza AGV-a. Svaki se input/output signal testira kako bi se osiguralo da točno prenosi informacije od povezanog uređaja do AGV-a i obratno. To uključuje potvrdu da su naredbe ispravno primljene i izvršene.

Stanice za punjenje postavljaju se kako bi AGV-ima osigurali stalan pristup napajanju. Ove stanice omogućuju autonomno punjenje AGV-ova tijekom vremena mirovanja ili između zadataka, smanjujući ručnu intervenciju i podržavajući kontinuirani rad. Stanice za punjenje postavljaju se duž AGV staza ili u blizini često pristupačnih zona kako bi se smanjila udaljenost koju AGV prijeđe do punjača. Stanice za punjenje postavljaju se na područjima bez prepreka i za koja je malo vjerojatno da će ometati ostale skladišne aktivnosti. Jasne oznake ili određene trake mogu se dodati oko stanica za punjenje kako bi se osigurao nesmetan pristup i spriječilo blokiranje stanice.

Reflektori se postavljaju za usmjeravanje AGV navigacije, te se postavljaju prema dizajnu rasporeda koji je napravljen unutar softvera AGV sustava. Uglavnom su laki za postavljanje, zahtijevajući minimalno bušenja i vijaka. Treba paziti na odsjaje sa metalnih cijevi i stakla koje mogu prevariti AGV navigacijski sustav da se zapravo radi o reflektoru. Te pozicije se mogu prekriti ljepljivom trakom.

#### **5.5. Postavljanje servera, te instalacija upravljačkog i navigacijskog softvera**

Instalacija softvera za upravljanje i navigaciju, zajedno s postavljanjem namjenskog servera za sustav, sljedeći je korak u procesu puštanja u rad. Softver služi kao mozak AGV sustava, omogućavajući komunikaciju, raspodjelu zadataka, navigaciju i praćenje AGV operacija u stvarnom vremenu. Server osigurava da je izvedba sustava robusna, integritet podataka i

siguran pristup operaterima za praćenje i kontrolu AGV aktivnosti putem upravljačkih sučelja.

Hardverske specifikacije servera (npr. CPU, RAM, pohrana) biraju se na temelju veličine AGV flote, zahtjeva za obradu podataka i operativnih zahtjeva softvera. Veće flote AGV-ova zahtijevaju snažniji server. Server se integrira u Wi-Fi mrežu skladišta. Na server se spajaju računala klijenti koji imaju instalirana upravljačka sučelja za praćenje operacija AGV sustava. Upravljački i navigacijski softver instaliran je na serveru, te se preko njega upravlja sa flotom AGV vozila. Softverske licence se aktiviraju prema veličini flote i potrebnim funkcijama. Komunikacijski protokoli (Wi-Fi postavke, IP adrese) postavljeni su kako bi se omogućila razmjena podataka između servera i svakog AGV-a, gdje su server, AGV-ovi i računala klijenti na istoj mreži. Ako skladište koristi WMS ili ERP sustav, upravljački softver mora se integrirati s tim platformama.

#### **5.6. Kalibracija senzora i parametara vozila, te postavljanje stanica za preuzimanje/odlaganje**

Ovaj korak uključuje kalibraciju AGV senzora koja može biti komprimirana nakon transporta zbog ljuljanja kamiona ili slično. Konfiguriraju se radni parametri po zahtjevima u skladištu klijenta. Također se provjerava da virtualne koordinate u softveru točno odgovaraju fizičkim lokacijama radnih stanica za preuzimanje/odlaganje paleta u skladištu.

Kod laserskog skenera kalibrira se kut snimanja koji mora gledati što više pravocrtno da se maksimizira točnost odbijanja svjetlosti od skenera do reflektora i cjelokupna navigacija. Također se vozi AGV po ravnoj putanji i kalibriraju se X, Y koordinate točke na kraju putanje usporedno sa početnom točkom putanje nakon ravnog pravca.

Kalibrira se pogonski enkoder (Drive encoder) usporedbom stvarnih i izmjerenih udaljenosti putovanja, i podešava se sve dok kretanje AGV-a ne odgovara postavljenim referentnim točkama. Ova kalibracija osigurava precizno praćenje udaljenosti kod ravnog kretanja i u zavojima.

Operativni parametri, poput brzine, ubrzanja, usporavanja i tolerancijske udaljenosti zaustavljanja postavljaju se prema zahtjevima skladišta. Ograničenja brzine AGV-ova prilagođavaju se na temelju vrste staze (npr. otvorena područja, raskrižja, uski prolazi). Zaustavne udaljenosti kalibrirane su u skladu s težinom tereta, brzinom i uvjetima poda, te se konfigurira tolerancija zaustavljanja za senzor sigurnosti kako bi se AGV što preciznije zaustavljao u blizini prepreka.

Zatim se provjerava jesu li stanice za preuzimanje i odlaganje ispravno konfigurirane u AGV upravljačkom softveru i usklađene s položajima u stvarnom životu. Svaka virtualna stanica u navigacijskom sustavu AGV-a mora točno odgovarati fizičkoj lokaciji kako ne bi došlo do padanja tereta sa regala ili netočnog preuzimanja palete. Koordinate za svaku stanicu za preuzimanje i odlaganje mapirane su u softveru AGV sustava. AGV-ovi se vode do svake stanice pomoću softverskog upravljanja i testiraju se koordinate koje se fizički mjere i mijenjaju u slučaju nesukladnosti.

### **5.7. Test sigurnosnog sustava i kočenja**

Test kočenja osigurava da AGV zadovoljava unaprijed određene udaljenosti kočenja ispred prepreka. Testira se prazno vozilo i vozilo s maksimalnom masom tereta kojim AGV upravlja u pojedinom skladištu. Sigurna udaljenost zaustavljanja izračunava se na temelju brzine AGV-ova, težine (sa i bez tereta) i uvjeta poda skladišta (npr. glatke, nagnute ili neravne površine). Ova udaljenost ovisi o radnom okruženju AGV-ova i trebala bi osigurati sigurnu marginu kako bi se izbjegao bilo kakav udar.

Prvo se testiraju sigurnosni senzori AGV-ova kako bi se osiguralo da detektiraju prepreke na ispravnoj udaljenosti i odmah pokreću sustav kočenja. AGV se zatim vozi prema ispitnoj prepreci različitim brzinama kako bi se provjerilo zaustavlja li se unutar postavljenih sigurnosnih udaljenosti. Također se radi test zaustavljanja u nuždi gdje se AGV-u izdaje naredba za zaustavljanje u nuždi kako bi se potvrdilo da se trenutno zaustavlja, bez obzira na trenutni zadatak ili brzinu. Na temelju rezultata ispitivanja, zaustavne udaljenosti se podešavaju ako je potrebno, te se ponovno rade isti testovi sa novim parametrima sve dok zaustavne udaljenosti nisu zadovoljene.

### **5.8. Test tehničke ispravnosti na lokaciji (Site Acceptance Testing - SAT)**

Site Acceptance Test (SAT) je završna faza testiranja u procesu puštanja u rad, gdje se AGV sustav ocjenjuje u stvarnom radnom okruženju skladišta. Ova faza osigurava da AGV sustav radi prema očekivanjima u stvarnim uvjetima, ispunjavajući sve operativne, sigurnosne i radne zahtjeve. SAT potvrđuje da je AGV sustav u potpunosti integriran s drugim skladišnim sustavima, kao što su transportne trake, automatizirana vrata ili WMS, te da može bez problema upravljati predviđenim tokovima rada. Uspješan SAT potvrđuje da je sustav spreman za primopredaju i potpunu implementaciju.



Izrađuje se popis za provjeru svih SAT zahtjeva, koji pokriva performanse sustava, sigurnosne protokole, točnost zadataka, integraciju sustava i usklađenost s očekivanjima kupaca. AGV-ovi se puštaju u rad i obavljaju svakodnevne tokove rada u skladištu.

Svaki AGV se testira duž putanja AGV mreže unutar skladišta. Provjerava se točnost putanja i navigacija AGV-ova kroz raskrižja, oko prepreka te duž ravnih i zakrivljenih staza. AGV-ovi obavljaju zadatke na svim stanicama za preuzimanje i odlaganje, potvrđujući da se točno zaustavljaju, pravilno usmjeravaju i da učinkovito rukuju teretom. Ako je AGV sustav integriran s WMS-om, SAT provjerava jesu li dodjele zadataka, ažuriranja inventara i podaci o izvršenju zadataka točno priopćeni. AGV sustav trebao bi reagirati na promjene zadataka u stvarnom vremenu i ispravno ih prikazivati unutar WMS-a. AGV-ovi se testiraju u interakciji s pokretnim trakama, automatskim vratima i drugom perifernom opremom. Testira se komunikacija i točnost signala između I/O ormarića i AGV sustava. Testira se sposobnost sigurnosnog sustava da otkriva prepreke kako bi se potvrdilo da točno reagiraju na neočekivane objekte ili osobe. Prati se potrošnja baterije, te funkcionalnost procesa automatskog punjenja. Simulira se scenarij visoke potražnje i vršnih sati (peak hours) kako bi se procijenila sposobnost sustava u tim uvjetima. Ovaj test potvrđuje da sustav ostaje stabilan čak i pod teškim radnim opterećenjima. Nadzire se stabilnost Wi-Fi mreže da se potvrdi da AGV-ovi održavaju stalnu komunikaciju sa upravljačkim softverom.

Rezultati SAT testa se dokumentiraju i pregledavaju s klijentom kako bi se osiguralo da su sva očekivanja ispunjena. Provode se sve konačne prilagodbe koje zahtijeva kupac, nakon čega slijedi primopredaja sustava.

### **5.9. Primopredaja sustava i obuka osoblja**

Dobavljač AGV sustava isporučuje kompletan set dokumenata, uključujući specifikacije sustava, konfiguracije postavki, postavke kalibracije, sigurnosne protokole i smjernice za rješavanje problema. Ova dokumentacija služi kao referenca za klijentov tim i neophodna je za pravilno održavanje sustava. Predaju se detaljni priručnici za rad i održavanje koji pokrivaju sve postupke za rutinsko održavanje, zamjenu komponenti, kalibraciju i ažuriranje softvera. Predaju se crteži AGV mreže, dijagrami ožičenja i konfiguracija I/O ormarića. Nakon pregleda cjelokupne dokumentacije i potvrde performansi sustava, korisnik formalno potpisuje prihvaćanje sustava, označavajući službeni prijelaz vlasništva i odgovornosti.

Kreće obuka osoblja koja pokriva osnove rada AGV-ova, uključujući pokretanje i zaustavljanje vozila, postupke punjenja i izvršavanje rutinskih zadataka. Operateri uče kako

pokrenuti hitno zaustavljanje, pokazuje se princip rada sigurnosnog sustava i uče se kako ponovno pokrenuti vozilo u slučaju greške. Tehničko osoblje prolazi obuku o nadzoru AGV sustava putem upravljačkog softvera i korisničkog sučelja. To uključuje praćenje lokacije AGV vozila u stvarnom vremenu, pregled narudžbi, razine baterije i upozorenja. Također su obučeni tumačiti kodove grešaka i dijagnostičke poruke iz dijagnostičkog dijela softvera AGV sustava. To im omogućuje rješavanje manjih problema bez potrebe za vanjskom podrškom, održavajući sustav operativnim. Ako je AGV sustav integriran s WMS-om, administratori su obučeni za upravljanje ovom integracijom, uključujući rješavanje problema sinkronizacije podataka, praćenje zadataka i narudžbi, te općenito osiguravanje glatke interakcije između AGV sustava i WMS-a.

Nakon ovog koraka sustav je uspješno pušten u rad i ostaje korisnička podrška, održavanje, te potencijalno širenje sustava u budućnosti.

## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad istražio je kompleksnost AGV sustava, uključujući njihove vrste, komponente, metode navigacije, softversku podršku i sigurnosne sustave.

Praktična demonstracija AGV sustava putem FlexSim simulacija pružila je uvid u način dizajna i optimizaciju AGV sustava, te interpretaciju rezultata pomoću analitičkih grafova. FlexSim simulacije otkrile su da 4 AGV vozila mogu podnijeti protok od 75 paleta/satu u opisanom skladištu, da se iterativnim postupkom optimizacije AGV sustava može povećati produktivnost, da je moguće dobiti podatak maksimalnog protoka za relevantno skladište, te da se iskoristivost AGV sustava kreće od 90-95%. Zaključuje se da FlexSim omogućuje istraživačima i profesionalcima u industriji da dizajniraju, testiraju i optimiziraju AGV i druge oblike automatiziranih sustava u virtualnom okruženju prije fizičke implementacije.

Komparativna analiza između AGV sustava i manualnih skladišnih operacija dokazuje da su AGV sustavi savršeni za povećanje efikasnosti ponavljajućih i dugotrajnih operacija, oslobađajući ljudske operatere za druge važnije zadatke. Također je dokazano da AGV sustavi značajno povećavaju sigurnost i preciznost u rukovanju materijalima, te prometnu i prostornu optimiziranost skladišnog okruženja.

Unatoč ovim prednostima, implementacija AGV sustava zahtijeva pažljivo planiranje, te značajna početna ulaganja koja mogu dosezati do 540.000 €. Analiza povrata investicija predstavljena u ovom radu istaknula je ekonomsku izvedivost ovih sustava, s dugoročnim uštedama u radu i operativnim troškovima koji nadmašuju početna ulaganja već kroz 5-6 godina. Studije slučaja dodatno su pokazale stvarne primjene AGV-ova u različitim industrijama, pokazujući njihovu sposobnost poboljšanja različitih logističkih operacija.

Praktične primjene ovog istraživanja uključuju poboljšanje logističkih operacija u industrijama s ponavljajućim operacijama rukovanja materijalom, kao što su proizvodni i distribucijski centri. Analize naglašavaju potencijal AGV sustava u rješavanju problema s nedostatkom radne snage, te povećanju sigurnosti na radnom mjestu. U vidu potencijalnog budućeg istraživanja, valja naglasiti važnost razvoja simulacijskih modela integriranih sa umjetnom inteligencijom i strojnim učenjem kako bi se dodatno optimizirao promet i donošenje odluka, te istraživanje prirodnih tehnika navigacije, poput LiDAR-a i SLAM-a.

## LITERATURA

- [1] Murphy RR, A Survey on Automated Guided Vehicle Systems; 1999.
- [2] Dematic Material Handling: <https://www.dematic.com/en-us/products/agv/>,  
Pristupljeno: 10.7.2024.
- [3] The History of Automated Guided Vehicles: <https://www.solving.com/agv-dictionary/the-history-of-automated-guided-vehicles/>,  
Pristupljeno: 15.7.2024.
- [4] Ullrich G, Albrecht T. Automated Guided Vehicle Systems: A Guide; 2022.
- [5] Zhan M, Yu K. Wireless Communication Technologies in Automated Guided Vehicles: Survey and Analysis; 2018.
- [6] Manly Battery Company: <https://manlybattery.com/best-3-agv-battery-manufacturers-2024/>,  
Pristupljeno: 29.7.2024.
- [7] AGV Network: <https://www.agvnetwork.com/>
- [8] Kubasakova I, Kubanova J, Benco D, Kadlecova D. Implementation of Automated Guided Vehicles for the Automation of Selected Processes and Elimination of Collisions between Handling Equipment and Humans in the Warehouse; 2024.
- [9] Pedan M, Gregor M, Plinta Dariusz. Implementation of Automated Guided Vehicle system in healthcare facility; 2017.
- [10] Đukić G, Tehnička Logistika – FSB Predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022.
- [11] Flexsim User Manual: <https://docs.flexsim.com/en/24.2/Introduction/Welcome/>
- [12] Uniformna distribucija: [https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous\\_uniform\\_distribution/](https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_uniform_distribution/),  
Pristupljeno: 2.9.2024.
- [13] Log-normal distribucija: [https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal\\_distribution/](https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution/),  
Pristupljeno: 2.9.2024.
- [14] Otten T, Implementation of Automated Guided Vehicles in a Logistical Setting; 2020.
- [15] Health and Safety Executive, Warehousing and storage: A guide to health and safety; 2007.
- [16] Toyota Automated Solutions: <https://toyota-forklifts.eu/automated-solutions/>
- [17] JBT Corporation Automated Systems: <https://www.jbtc.com/automated-systems/>

**IZVORI SLIKA**

- [18] <https://www.prolifttoyota.com/equipment-cat/automated-guided-vehicles/>
- [19] <https://www.jbtc.com/automated-systems/>
- [20] <https://toyota-forklifts.eu/automated-solutions/>
- [21] <https://www.gideon.ai/solutions/trey/>
- [22] <https://interline.pl/Information-and-Tips/Plan-And-Design/>
- [23] <https://www.alderholt-technology.co.uk/technology/wifi-installation/>
- [24] <https://ndcsolutions.com/cvc700/>
- [25] <https://bluebotics.com/agv-navigation-methods-virtual-path-following/>
- [26] <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=249/>
- [27] <https://www.agvnetwork.com/automatic-forklift-agv/>
- [28] <https://www.solving.com/products/automated-guided-vehicles-agv-for-heavy-loads/>
- [29] <https://www.sick.com/de/en/catalog/products/safety/safety-laser-scanners/s3000-standard/c/g187231/>
- [30] <https://www.ameol.it/en/geofencing-a-revolutionary-solution-for-the-areas-most-at-risk/>