

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Davor Kolar

ZAGREB, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD
OBLIKOVANJE SUSTAVA KOMISIONIRANJA S VERTIKALNIM
PODIZNIM MODULIMA

Mentor:

doc.dr.sc. Goran Đukić

Davor Kolar

ZAGREB, 2011.

IZJAVA

Izjavljujem pod moralnom, materijalnom i krivičnom odgovornošću da sam završni rad radio samostalno koristeći literaturu koju mi je dao mentor te koristeći literaturu koju sam i sam pronašao.

Prilikom izrade završnog rada koristio sam znanja i iskustva stečena tijekom studija.

(Davor Kolar)

ZAHVALA

Posebno zahvaljujem cijenjenom mentoru doc.dr.sc. Goranu Đukiću, koji mi je svojim savjetima puno pomogao tijekom izrade ovog rada.

SAŽETAK:

U početku ovog rada bit će dan opis, definicija i podjela vertikalnih podiznih modula, njihov razvoj kroz povijest, glavne značajke i osnovni načini primjene. U nastavku slijedi pregled glavnih dijelova VLM-a, način izvršavanja funkcije, te okvirni dimenzijski i ostali tehnički podaci. Zatim će se definirati benefiti i mane vertikalnih podiznih modula, kao i osnovni podaci o održavanju i instalaciji. Navest će se primjene vertikalnih podiznih modula u sustavima rukovanja materijalom, a kraj prvog dijela rada opisuje primjenu vertikalnih podiznih modula u sustavima skladištenja u Republici Hrvatskoj.

U drugom dijelu rada bit će prezentirani razvijeni modeli protoka za sustave komisioniranja vertikalnim podiznim modulima i dostupan programski paket za oblikovanje sustava komisioniranja s vertikalnim podiznim modulima.

U završnom dijelu rada dani su rezultati testiranja programa na različitim slučajevima uz variranje ulaznih parametara.

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA:	i
POPIS TABLICA:.....	ii
POPIS GRAFIKONA:.....	iii
1. UVOD	1
2. VERTIKALNI PODIZNI MODUL.....	2
2.1. KOMPONENTE SUSTAVA	6
2.1.1. <i>Upravljački sustav</i>	7
2.1.2. <i>Pogonski sustav i dizalo</i>	9
2.1.3. <i>Konstrukcija i oblici skladišnih lokacija</i>	11
2.2. PREDNOSTI I OGRANIČENJA PRIMJENE VLM-A	15
2.2.1. <i>Povećanje razine produktivnosti</i>	16
2.2.2. <i>Ergonomija i sigurnost</i>	17
2.2.3. <i>Nedostaci VLM-a</i>	18
2.3. INSTALACIJA I ODRŽAVANJE VLM-A	18
2.4. PRIMJENA VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA.....	19
2.4.1. <i>Samostalni vertikalni podizni moduli</i>	19
2.4.2. <i>Sustavi vertikalnih podiznih modula</i>	21
2.4.3. <i>Specijalne izvedbe</i>	23
2.5. PRIMJERI PRIMJENE SUSTAVA S VERTIKALNIM PODIZNIM MODULIMA U HRVATSKOJ	25
3. OBLIKOVANJE SUSTAVA KOMISIONIRANJA S VERTIKALNIM PODIZNIM MODULIMA	30
3.1. MODELI PROTOKA	33
3.2. MODEL PROTOKA ZA SAMOSTALNI VLM.....	34
3.2.1. <i>Model protoka za samostalni VLM s komisionerom</i>	37
3.2.2. <i>Primjer određivanja protoka VLM-a s komisionerom</i>	39
3.3. MODEL PROTOKA ZA SUSTAV VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA.....	41
3.3.1. <i>Zatvoreni ciklički model reda čekanja za dinamičke sustave</i>	42
3.4. PROGRAMSKO SUČELJE ZA OBLIKOVANJE SUSTAVA KOMISIONIRANJA S VERTIKALNIM PODIZNIM MODULIMA	45
3.4.1. <i>Primjer određivanja protoka VLM-a pomoću programskog paketa</i>	49
4. TESTIRANJE PROGRAMSKOG PAKETA	53
5. ZAKLJUČAK	58
6. LITERATURA.....	59

POPIS SLIKA:

SLIKA 1.	VERTIKALNI PODIZNI MODUL [7]	2
SLIKA 2.	SAMOSTALNI VERTIKALNI PODIZNI MODUL [1].....	3
SLIKA 3.	RADNA STANICA S DVA NEOVISNA VERTIKALNA PODIZNA MODULA [1].....	4
SLIKA 4.	RADNA STANICA S VIŠE MODULA I JEDNIM DIZALOM S MOGUĆNOŠĆU UZDUŽNOG POMICANJA [1]	4
SLIKA 5.	RADNA STANICA S VIŠE MODULA I JEDNIM DIZALOM S MOGUĆNOŠĆU UZDUŽNOG POMICANJA	5
SLIKA 6.	RADNA STANICA S VIŠE MODULA I JEDNIM DIZALOM S MOGUĆNOŠĆU UZDUŽNOG POMICANJA	5
SLIKA 7.	ILUSTRACIJA TIPIČNOG RADNOG SUČELJA NA TERMINALU [1]	7
SLIKA 8.	VRSTE POGONA, SLIJEVA NA DESNO: UŽE, ZUPČASTI REMEN, ZUBNA LETVA I ZUPČANIK, LANAC [1].....	10
SLIKA 9.	PRIKAZ POGONSKOG SUSTAVA I DIZALA	10
SLIKA 10.	PRIMJER IZGLEDA KONSTRUKCIJE VLM-A S VARIJABILNOM VISINOM LOKACIJA [8]	11
SLIKA 11.	SPREMNIK SA PREGRADAMA [1].....	12
SLIKA 12.	ILUSTRACIJA MODULA S VIŠE OTVORA I KORIŠTENJA KAO PROLAZNOG UREĐAJA [1]	12
SLIKA 13.	ILUSTRACIJA SMANJENJA POTREBNE PODNE POVRŠINE PRIMJENOM JEDNOG VLM-A [1]	15
SLIKA 14.	ILUSTRACIJE NEKIH SIGURNOSNIH DODATAKA	17
SLIKA 15.	SAMOSTALNI VERTIKALNI PODIZNI MODUL [8].....	20
SLIKA 16.	SUSTAV VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA [8]	22
SLIKA 17.	DVOSTRUKI VERTIKALNI PODIZNI MODUL.....	23
SLIKA 18.	DIJELOVI DVOSTRUKOG VERTIKALNOG PODIZNOG MODULA	24
SLIKA 19.	PRIKAZ UNIVERZALNE RADNE STANICE [8]	25
SLIKA 20.	RADNI OTVOR VLM-A S MJERNIM ALATIMA TEH-CUT-A [9].....	26
SLIKA 21.	PODRAVKA – INSTALIRANI VLM SA DVA OTVORA [9].....	27
SLIKA 22.	VLM KARDEX SHUTTLE INSTALIRAN U SKLADIŠNOM SUSTAVU BELUPA D.D.	27
SLIKA 23.	INSTALIRANI VERTIKALNI PODIZNI MODUL	29
SLIKA 24.	USPOREDBA MINI-LOAD AS/RS SUSTAVA I VLM-A [7], [8].....	34
SLIKA 25.	SKICA POPREČNOG PRESJEKA VERTIKALNOG PODIZNOG MODULA.....	35
SLIKA 26.	ZATVORENI CIKLIČKI MODEL REDA ČEKANJA S DVA SERVERA: (A) OPĆENITO, (B) SUSTAV VLM-OVA	43
SLIKA 27.	PRIBLIŽNO TOČNA APROKSIMACIJA ZATVORENOG CIKLIČKOG MODELA REDA ČEKANJA S DVA SERVERA	44
SLIKA 28.	POČETNI PRIKAZ PRILIKOM OTVARANJA RAČUNALNOG PAKETA ZA OBLIKOVANJE SUSTAVA	46
SLIKA 29.	SUČELJE ALATA ZA OBLIKOVANJE SUSTAVA S VERTIKALNIM PODIZNIM MODULIMA	47
SLIKA 30.	KARAKTERISTIKE VLM-A U SOFTWAREU	50
SLIKA 31.	VRIJEME IZUZIMANJA KOMISIONERA U SOFTWAREU	50
SLIKA 32.	PODACI O NARUDŽBAMA U SOFTWAREU	51
SLIKA 33.	ODABIR NAČINA SKLADIŠTENJA U SOFTWAREU.....	51
SLIKA 34.	REZULTATI OBLIKOVANJA U SOFTWAREU	52

POPIS TABLICA:

TABLICA 1.	REZULTATI ANALITIČKE PROCJENE TRAJANJA DVOSTRUKIH CIKLUSA.....	39
TABLICA 2.	VRIJEDNOSTI γ_c U OBLIKOVANJU SUSTAVA KOMISIONIRANJA S VLM-OVIMA.....	45
TABLICA 3.	PRETVARANJE POTREBNIH JEDINICA U SI SUSTAV.....	48
TABLICA 4.	REZULTATI TESTIRANJA PROGRAMSKOG PAKETA.....	53

POPIS GRAFIKONA:

GRAFIKON 1.	PRIKAZ TROŠKOVA UNUTAR REGALNIH SKLADIŠTA.....	30
GRAFIKON 2.	PRIKAZ UDJELA AKTIVNOSTI KOMISIONIRANJA U REGALNOM SKLADIŠTU	31
GRAFIKON 3.	UTJECAJ PROMJENE VISINE REGALA I BROJA STAVKI NA PROTOK.....	55
GRAFIKON 4.	UTJECAJ VISINE SPREMNIKA I BRZINE IZUZIMANJA KOMISIONERA NA PROTOK	56

1. UVOD

Vertikalni podizni moduli jedna su od najnovijih tehnologija među računalom upravljanim automatiziranim sustavima odlaganja i izuzimanja iz skladišnih lokacija. Njihova upotreba i stalan razvoj vođeni su sve većim zahtjevima za povećanjem protoka, fleksibilnosti i gustoće skladištenja. Danas se primjenjuju u širokom spektru područja rukovanja materijalom, od niskoprotočnih, ergonomski podobnih i veoma sigurnih skladišta preko ekonomičnih proizvodnih radnih ćelija pa sve do komisionih zona unutar distribucijskih centara.

Kroz ovaj rad pokušao se u što je moguće širem obliku, a opet što razumljivije prikazati vertikalni podizni modul kao dio sustava komisioniranja, njegova primjena u proizvodnom i distribucijskom okruženju te prednosti i nedostatke koje valja uzeti u obzir prilikom odabira VLM-a kao dijela sustava komisioniranja.

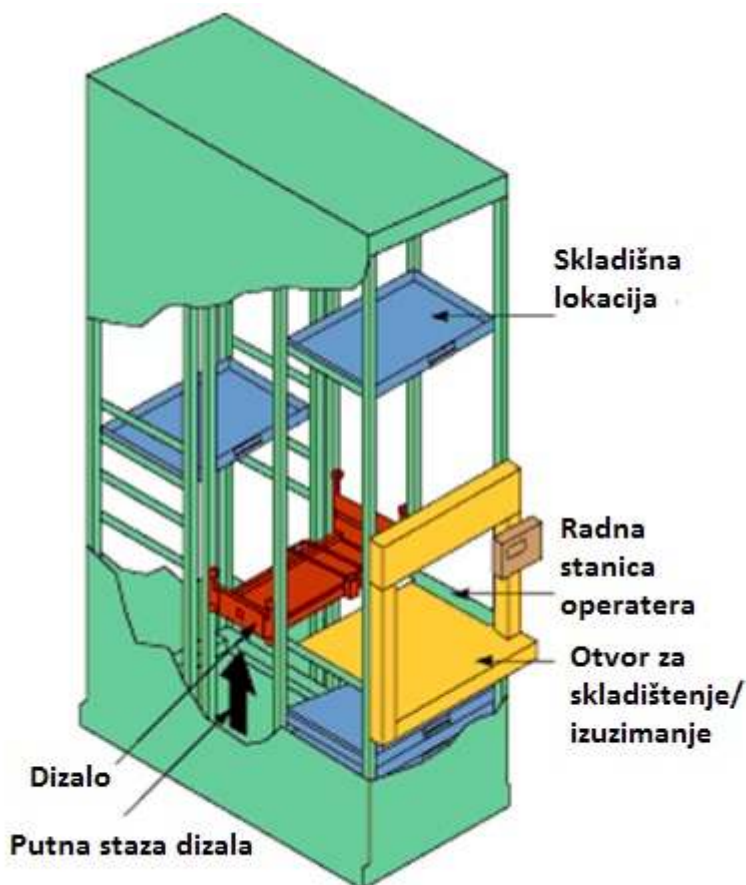
Oblikovanje sustava za komisioniranje s vertikalnim podiznim modulima tema je koja je zahtijevala definiranje modela protoka za takve sustave, te opis i primjenu dostupnog programskog paketa.

U završnom dijelu rada dani su rezultati testiranja programa na različitim slučajevima uz variranje ulaznih parametara.

Nakon pročitano i usvojenog gradiva obrađenog u ovom radu, čitatelj bi trebao moći detaljno opisati izgled, osnovne dijelove i princip rada vertikalnog podiznog modula, njegove prednosti i područja primjene, kao i načela korištenja modela protoka u sustavima komisioniranja s vertikalnim podiznim modulima.

2. VERTIKALNI PODIZNI MODUL

Vertikalni podizni moduli (eng. *VLM* ili *Vertical Lift Module*), u praksi često nazvani jednostavno „*shuttleovi*“, su automatizirani skladišni sustavi koji se sastoje od dvije paralelne kolone s fiksnim policama, u kojima su uskladišteni spremnici (kutije ili ladice), te središnjeg prolaza za dizalo (*shuttle/extractor*) koje vrši odlaganje, izuzimanje i transport (vertikalni) spremnika.

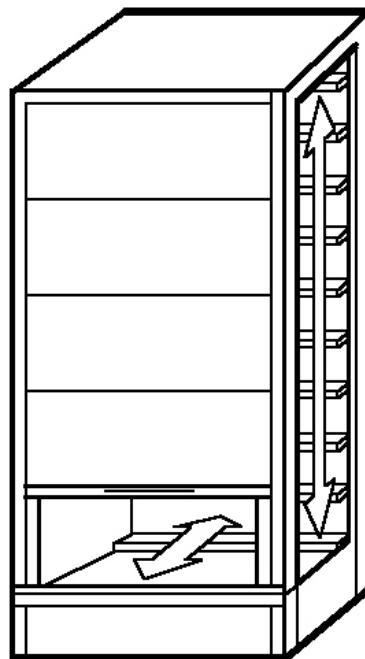


Slika 1. Vertikalni podizni modul [7]

Vertikalni podizni moduli kao dijelovi sustava rukovanja materijalom, te za industrijsku primjenu uvedeni su u ranim 70-tim godinama 20. stoljeća. Prve verzije takvih uređaja bile su prilično spore, s niskim kapacitetom što je uvelike ograničavalo njihovu primjenu. Kako su rasle mogućnosti primjene vertikalnih podiznih modula, rasli su i zahtjevi za razvoj novih generacija VLM-ova koji su omogućavali značajno veće protoke i kapacitete, kao i inteligentna korisnička sučelja, što je dovelo do povećanja radnih brzina i smanjivanja

mogućnosti pogrešaka. Vertikalne podizne module svrstavamo u dinamičke sustave skladištenja po principu „roba čovjeku“ (eng. *part-to-picker*).

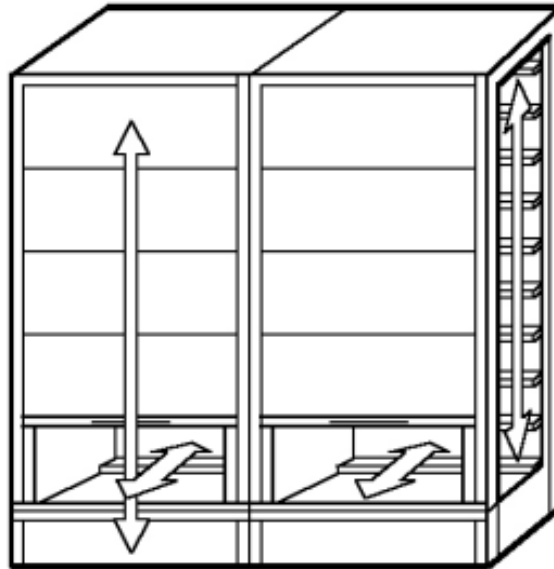
Današnji, računalom upravljani vertikalni podizni moduli rade na principu korištenja tri osnovne paralelne kolone. Prednja i stražnja kolona se koriste za skladištenje i opremljene su pregradama koje funkcioniraju kao police koje prihvaćaju skladišne artikle na pojedinu skladišnu lokaciju. Središnja kolona, koja je najčešće otvorena, koristi se kao radna staza za dizalo za skladištenje/izuzimanje koje se vertikalno kreće između prednje i stražnje kolone. Kada operater preda računalu (preko sučelja na terminalu) zahtjev za izuzimanje sa određene skladišne lokacije, artikl mu se dostavlja na otvor za skladištenje/izuzimanje na radnoj stanici. Prema slici 2., vertikalna strelica prikazuje vertikalnu radnu stazu dizala, prema i od skladišne lokacije. Horizontalna strelica ilustrira gibanje dizala u trenutku kad ono polaže, odnosno kupi teret; u ovom slučaju polaganje i prikupljanje na radnoj stanici operatera.



Slika 2. Samostalni vertikalni podizni modul [1]

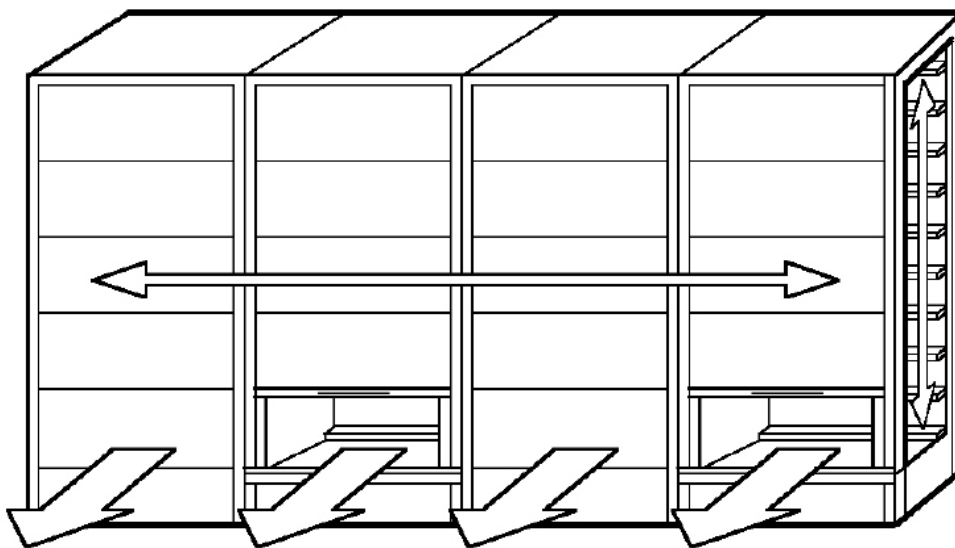
Funkcionalno gledano, skladišni artikli u VLM-u ostaju u stacionarnom položaju na lokacijama u prednjem i stražnjem stupcu. Nakon što se da zahtjev i nakon što se skladišna jedinica dostavi na terminal, operater sortira zalihe i potom se tako sortirana skladišna jedinica dizalom vraća na svoju skladišnu lokaciju.

Moderni vertikalni podizni moduli se konstruiraju kao fleksibilni sustavi te su u mogućnosti rukovati materijalom malih težina i dimenzija, kao i velikih dijelova, sirovaca, kutija, alata i kalupa, ovisno o izvedbi samog pogonskog sustava i obliku skladišnih lokacija. Dostupni su kao neovisni moduli (sa jednim dizalom po ulazu – vidi sliku 3.) ili kao konfiguracije s više ulaza (vidi sliku 4.).



Slika 3. Radna stanica s dva neovisna vertikalna podizna modula [1]

Konfiguracije s više povezanih ulaza pružaju dodatne mogućnosti pristupa skladišnim lokacijama i obično su dostupne sa do 4 ulaza.



Slika 4. Radna stanica s više modula i jednim dizalom s mogućnošću uzdužnog pomicanja [1]



Slika 5. Radna stanica s više modula i jednim dizalom s mogućnošću uzdužnog pomicanja



Slika 6. Radna stanica s više modula i jednim dizalom s mogućnošću uzdužnog pomicanja

Posebno se razmatraju i radne stanice s više povezanih modula i jednim dizalom s mogućnošću uzdužnog pomicanja unutar stanice. To je rješenje koje nudi proizvođač Kardex Remstar, a koje se uvodi kod skladištenja robe manjeg protoka sa svrhom većeg iskorištenja

rada dizala, u kojem jedno dizalo ima sposobnost obskrbiti više otvora za izuzimanje. Naime, dizalo u sustavu ostavlja sadržaj jedne lokacije na jednom otvoru za izuzimanje, a za vrijeme izuzimanja dostavlja slijedeći artikl prema narudžbi. Samim uvođenjem uzdužnog pomicanja dizala povećavaju se troškovi ugradnje dodatne osi (upravljanje, motor, pogonski sustav), no ti se troškovi opravdavaju povećanjem kapaciteta i do nekoliko puta.

Za razliku od velikih automatskih sustava za skladištenje i izuzimanje, koji zahtijevaju remont skladišta ili proizvodne linije za integraciju, sustavi skladištenja s vertikalnim podiznim modulima mogu biti integrirani unutar postojećeg skladišta ili proizvodnog pogona. Isto tako, mogu biti pripojeni u postojeći sustav upravljanja skladištem (eng. *WMS – Warehouse Management System*) ili proizvodnje preko svog kontrolnog sustava i računalnog programa.

Primjena vertikalnih podiznih modula nalazi se u skladišnim procesima komisioniranja i pripreme narudžbi, kao i povratnim logističkim procesima kao podrška procesu vraćanja robe. U proizvodnji primjena se kreće od osiguravanja skladišnih kapaciteta za alate u proizvodnim halama, pa do osiguravanja kapaciteta za dijelove i sklopove koji se nalaze između pojedinih faza u proizvodnji. Povrh toga, postoje i mnoge specijalizirane izvedbe VLM-ova u preciznijim i strogo kontroliranim situacijama kao što su sterilni uvjeti (eng. *Clean rooms*) ili u hladionicima.

2.1. Komponente sustava

Ako se promatra proces rada vertikalnog podiznog modula, isti se može podijeliti u nekoliko faza. U prvoj fazi, koja se najčešće sastoji od operaterovog unošenja željene skladišne lokacije ili šifre artikla preko tipkovnice na terminalu, događa se povezivanje operaterovog naloga sa upravljanjem vertikalnog podiznog modula preko sučelja na radnoj stanici (terminalu). U drugoj fazi računalo daje nalog pogonskom sustavu dizala da izvrši putanju u zadanom smjeru (prema skladišnoj lokaciji) i izvrši skladištenje/izuzimanje. Ukoliko se vrši izuzimanje, tada se u trećoj fazi dizalo s teretom vraća na baznu radnu stanicu, gdje operater sortira određeni artikl prema narudžbi. Kad završi, pritišće tipku kojom potvrđuje izvršenje i dizalo se vraća na prethodnu lokaciju da ponovno uskladišti artikl, nakon čega se vraća u početnu (radnu stanicu) ili alternativnu poziciju. Opisom ciklusa dolazi se do osnovnih komponenata sustava, kojeg čine:

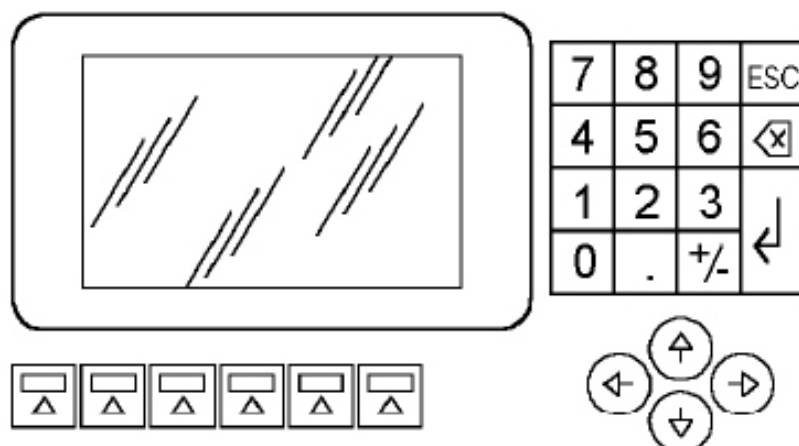
- upravljački sustav

- pogonski sustav i dizalo
- konstrukcija i oblici skladišnih lokacija.
- otvori za izuzimanje

2.1.1. Upravljački sustav

Suvremeni vertikalni podizni moduli mogu se opremiti raznim upravljačkim sustavim i softverskim paketima upravljanja preko standardnih operativnih sustava (MS Windows, Linux) na osobnim računalima. U svojoj osnovnoj formi, VLM može dohvatiti željeni artikl sa skladišne lokacije jednostavnim unošenjem zahtjeva za određeni spremnik preko tipkovnice na terminalu.

Vertikalni podizni moduli dostupni su sa vrlo sposobnim, samostalnim mikroprocesorskim jedinicama sa kontrolom preko programabilnih logičkih kontrolera koji su dopunjeni ekranima osjetljivima na dodir i alfanumeričkim tipkovnicama (vidi sliku 5.) Ovi sustavi upravljanja imaju mogućnost kontrole koja obuhvaća od osnovne provjere slobodnih skladišnih lokacija, preko mogućnosti upravljanja slobodnim lokacijama, određivanja skladišnih mjesta pojedinih artikala prema kriterijima (protok, dimenzije, potreban kapacitet), pa sve do mogućnosti naprednog izvješćivanja. Takva fleksibilnost sustava daje korisnicima sposobnost da zatraže artikl po njegovoj šifri, kao i po lokaciji na kojoj se nalazi. Ovakvim inteligentnim sustavima može se direktno upravljati radnim nalogima (kreiranje skupnih narudžbi, određivanje koji će nalog dobiti prednost za komisioniranje), kao i kreirati liste materijala na skladištu .



Slika 7. Ilustracija tipičnog radnog sučelja na terminalu [1]

Svi elementi kontrolnog sustava, od tipkovnice i integriranih kontrola do PC kontrola i kontrola na ekranu osjetljivom na dodir, kao i cijela jedinica za upravljanje mogu se koristiti neovisno kao dio izolirane radne stanice, ali i kao dio sustava upravljanja skladištem (*WMS-a*).

Razvojno gledano, najznačajniji utjecaj na razvoj i poboljšavanje sustava upravljanja VLM-a imala je upravo integracija računalnog sustava upravljanja i komunikacije. Sve dok osobno računalo nije postalo standard u proizvodnom okruženju i okruženju područja rukovanja materijalom, vertikalni podizni moduli bili su tek primitivne jedinice za skladištenje, u kojima je skladištenje/izuzimanje uključivalo ručnu potragu za artiklom i skladišnom lokacijom na kojoj se nalazi. Može se reći kako je trend integracije računala započeo ranih 1980.-tih u SAD-u, dok je do kraja 1980.-tih postao šire poznat i prihvaćen.

U današnjem stadiju razvoja, VLM-ovi su povezani sa programom koji održava stanje zaliha u centralnoj bazi podataka u realnom vremenu. Takvo se povezivanje obično uspostavlja korištenjem RS-232 serijskog međusklopa ili RS-485 Ethernet međusklopa, kojeg odlikuje veća brzina prijenosa (i do 25Mbps) i mogućnost prijenosa na veće udaljenosti (do 1200m), dok je RS-232 ograničen na manje udaljenosti (<15m) i manje brzine (20kbps). Funkcije izuzimanja i skladištenja mogu biti pokrenute preko osobnog računala ili na baznoj stanici modula. To omogućuje simultano izvođenje više operacija, eliminirajući pritom uska grla koja su se prije stvarala zbog jednosmjerne komunikacije.

Prateći uvođenje programa baziranih na MS Windows operativnim sustavima, primjećuje se da je omogućeno lako uspostavljanje završnog spajanja, odnosno sučelja direktno na glavni sustav upravljanja korisnika (*ERP, WMS, SAP*). Naime, bilo da je VLM instaliran direktno na mjestu gdje se koristi ili izvan njega, korisnici sve više zahtijevaju, da svi artikli dostupni na skladištu budu vidljivi na glavnom sustavu upravljanja. To je sada moguće na način da se vertikalnim podiznim modulima zadaje posebna adresa (preko TCP/IP protokola) na korisnikovoj lokalnoj mreži ili Internetu, čime se ostvaruje komunikacija između glavnog sustava upravljanja i VLM-a.

Postoje dvije vrste komunikacijskih sučelja sa glavnim sustavom:

- integrirano sučelje
- jednosmjerno sučelje (eng. *hostile interface*)

Integrirano sučelje podrazumijeva komunikaciju u dva smjera. Najprije glavni sustav upravljanja prebaci potrebne podatke na sustav za upravljanje VLM-a, a zatim novo stanje

zaliha prebaci u svoju bazu podataka. Sustavi kao ERP i WMS rijetko su dizajnirani za upravljanje VLM-ima i optimiziranje njihovih performansi. U tom slučaju koristi se poseban VLM-ov međusoftver ili radna stanica, tzv. *Middleware*¹.

Jednosmjerno sučelje se razlikuje od integriranog po tome što u takvom načinu komunikacije nema povratne veze, odnosno glavni sustav upravljanja se ne osvježava automatski novim stanjem zaliha, već to zahtijeva dodatne akcije. Obično se nalozi sa glavnog sustava upravljanja dobivaju isprintani na papiru ili digitalnom obliku te je potreban dodatan program kako bi se oni pretvorili u naloge vertikalnom podiznom modulu. U jednosmjernom sučelju glavni sustav upravljanja nema kontrolu na VLM-om, te je potrebno rekonfigurirati stanje zaliha kada se nadogradi ili promijeni glavni sustav upravljanja.

Sposobnost istovremenog izvođenja više operacija na današnjim platformama omogućuje značajno povećanje sposobnosti primjene i razvoj „inteligentnih“ sustava vertikalnih podiznih modula.

2.1.2. Pogonski sustav i dizalo

Vertikalni podizni moduli mogu se na tržištu pronaći s nekoliko različitih varijanti pogonskog sustava s AC ili DC motorima sa zatvorenom ili otvorenom petljom. Svi pogonski sustavi su sposobni obavljati zadaće s kontroliranim, linearnim ubrzanjem i usporenjem i na taj način osiguravaju zaštitu i sigurnost osjetljivih tereta tijekom procesa skladištenja/izuzimanja. Pogonski sustav sa zatvorenom petljom pruža povratne informacije o trenutnom položaju te omogućuje točno trenutno određivanje položaja tijekom gibanja dizala. Potpuno opterećen VLM za teške terete (eng. *heavy-duty*) sposoban je raditi s težinama do 900 kilograma, a neki proizvođači nude module s tako preciznim pogonskim sustavima da prilikom testiranja kretanja ne proliju vodu iz pune čaše. Takva preciznost omogućuje rukovanje lomljivim materijalima bez oštećenja.

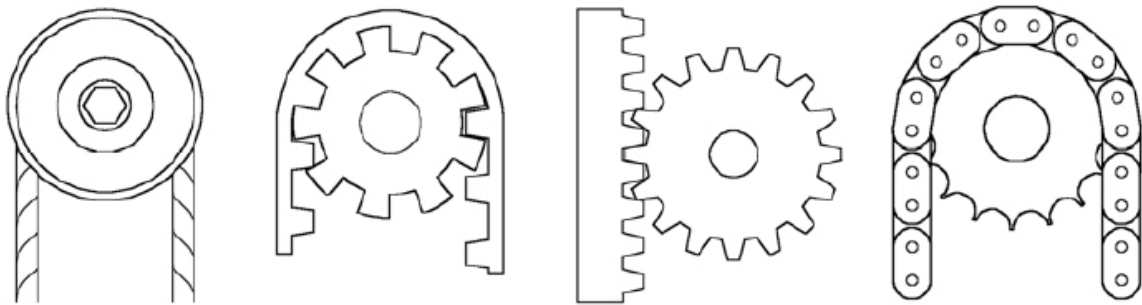
Sustav motora vertikalnog podiznog modula može biti smješten ili na platformu dizala ili na postolje, odnosno samu konstrukciju modula. Stvarni položaj motora nema utjecaja na karakteristike pri svakodnevnoj primjeni. Veći utjecaj na karakteristike ima kapacitet samog modula i sposobnost lakog korištenja.

¹ Detaljnije vidi u poglavlju 2.4.2.

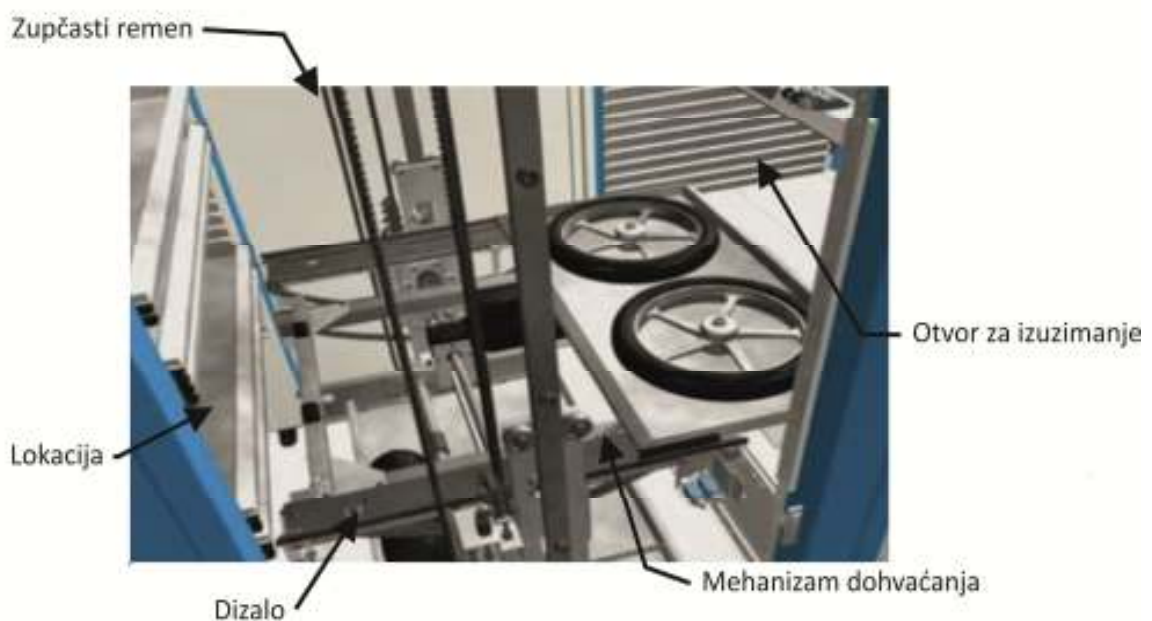
Srcce svakog VLM-a jest dizalo, odnosno platforma elevatora. Vertikalno gibanje dizala postiže se pomoću prijenosa snage i momenta od motora do dizala. Prijenos se vrši pomoću:

- užeta
- zupčastog remena
- zupčanika i zubne letve
- lanca (vidi sliku 6.)

Svaki od sustava prijenosa ima svoje nedostatke i prednosti, a na korisniku, odnosno projektantu je da odluči kakav će pogon koristiti, ovisno o željenoj pouzdanosti, uvjetima upotrebe i potrebnom održavanju i sigurnosti djelatnika, kao i o količini buke koju određeni pogonski sustav proizvodi.



Slika 8. Vrste pogona, slijeva na desno: uže, zupčasti remen, zubna letva i zupčanik, lanac [1]



Slika 9. Prikaz pogonskog sustava i dizala

Brzine s kojima se susrećemo kod vertikalnog podiznog modula su vertikalna brzina dizala ($0,4 \leq v_z \leq 1,5$; m/s), te brzina izvlačenja spremnika iz lokacije ($0,25 \leq v_x \leq 0,75$; m/s).

2.1.3. Konstrukcija i oblici skladišnih lokacija

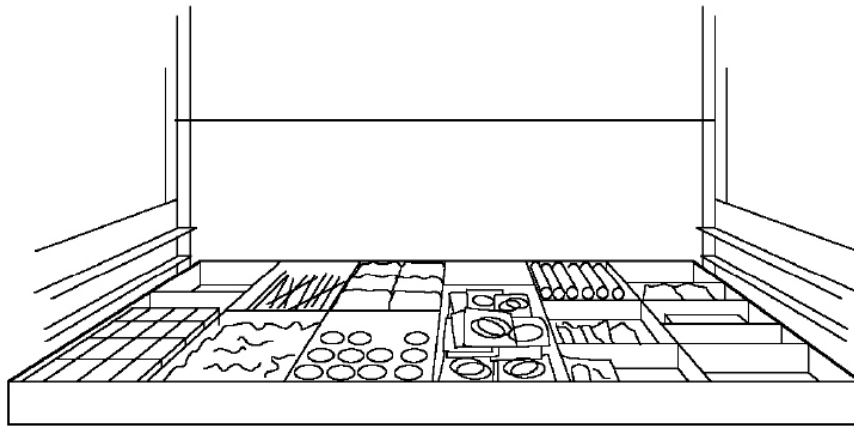
Konstrukcija vertikalnog podiznog modula ili konfiguracije više vertikalnih podiznih modula definira se kapacitetom, odnosno oblikom skladišnih lokacija. Skladišne lokacije su prostori u kojima se omogućuje skladištenje proizvoda, odnosno sirovina i poluproizvoda. Standardne veličine skladišnih lokacija variraju od 600mm do 860mm u dubinu te od 600mm do 3000mm u širinu. Standardni kapacitet opterećenja kreće se od 220kg do 1000kg. Naravno, neki proizvođači nude dodatne oblike skladišnih lokacija, različitih dimenzija i kapaciteta kao opciju pri gradnji. Varijacije oblika skladišnih lokacija za VLM-ove su vrlo velike.



Slika 10. Primjer izgleda konstrukcije VLM-a s varijabilnom visinom lokacija [8]

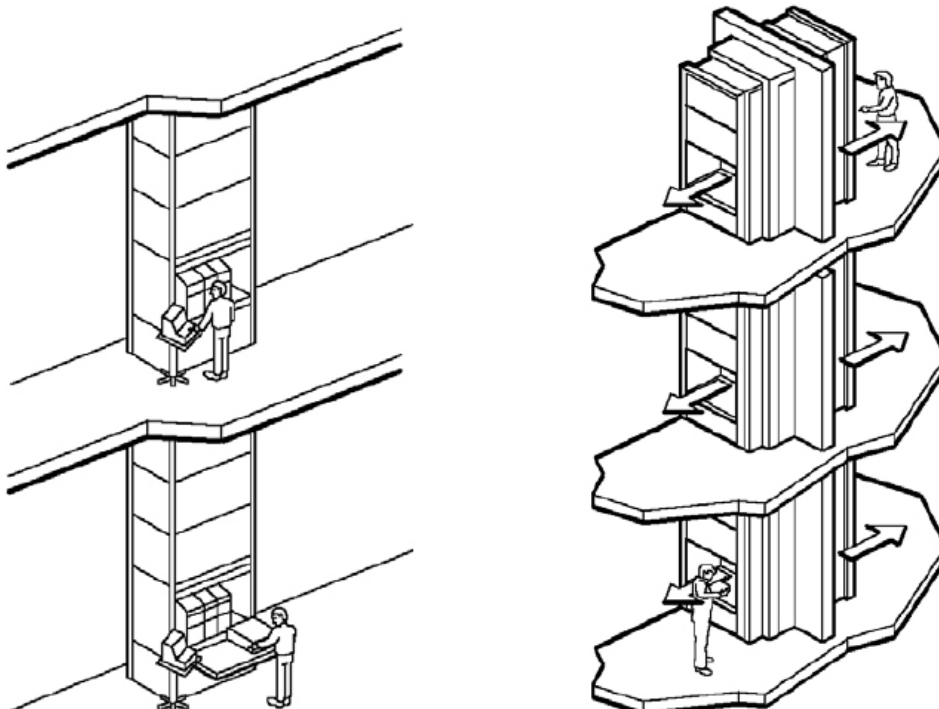
Mnogi proizvođači mogu optimirati oblik modula i skladišnih lokacija specifičnim potrebama ugradnjom jednostavnih pregrada i manjih spremnika na pojedinim lokacijama (vidi sliku

11.). Daljnja se optimizacija postiže ugradnjom držača za kolutove ili ostalih specijalnih dodataka kako bi se zadovoljilo potrebe korisnika.



Slika 11. Spremnik sa pregradama [1]

Vertikalni podizni moduli mogu imati više od jednog otvora za pristup dizalu, odnosno radnih stanica. Pristup VLM-u može biti omogućen s prednje i stražnje strane jedinice ugrađene u zid, tako da ona služi kao prolazni uređaj za pohranu (vidi sliku 12.) . Time je omogućeno da različiti odjeli ili radne zone imaju stalni pristup jednom skupu uskladištenih jedinica. Na isti način korisnici mogu iskoristiti visinu modula i povezati više katova u objektu i posluživati više odjela jednim vertikalnim podiznim modulom.



Slika 12. Ilustracija modula s više otvora i korištenja kao prolaznog uređaja [1]

Postoje četiri metode dodjele skladišnih lokacija spremnicima u vertikalnim podiznim modulima. Svaka metoda je važeća i zahtijeva planiranje unaprijed kako bi se odredilo koja će od njih donijeti najveću korist. Naravno, korisnik može u nekom trenutku promijeniti metodu. Te četiri metode su:

- **metoda fiksne visine lokacije (eng. *Fixed height storage*)** – pojavljuje se kada je oblik modula konfiguriran na način da je visina svake lokacije točno određena i fiksna, te kao takva unešena u sustav upravljanja. Takva metodologija omogućuje korisniku da izračuna i maksimizira gustoću popunjavanja. Ovakvo rješenje spominje se kao najbolje pri objektima sa stalnim skupom uskladištenih artikala i stalnom veličinom spremnika koji se skladište.
- **metoda optimizirane lokacije (eng. *Optimized storage*)** – omogućuje podsustavu VLM-a za detekciju visine da snimi dimenzije spremnika i sam odredi najbolju lokaciju unutar modula, pritom koristeći najmanji mogući prostor i najmanji broj blokiranih lokacija. Pojednostavljeno, sustav senzora ima mogućnost određivanja visine spremnika i prema tome bira lokaciju na koju će uskladištiti. Ova je metoda namijenjena korištenju u VLM-ovima u kojima se brzo i kontinuirano mijenja profil uskladištenih spremnika.
- **metoda različitih visina lokacija (eng. *Mixed height storage*)** – koristi se u slučajevima kada korisnik želi povećati protok kroz skladišni sustav, na način da se svakoj lokaciji odrede visine za određene spremnike. Ova metoda omogućuje korisnicima da spremnike kojima se češće rukuje približe otvoru na radnoj stanici, a da se pritom ne utječe na gustoću skladištenja, odnosno iskoristivost prostora.
- **metoda maksimalne visine (eng. *Fixed height, mixed storage*)** – ova je metoda slična metodi različitih visina lokacija, osim što se unaprijed odredi koliko maksimalna visina neka lokacije može iznositi. Sustav senzora u ovom slučaju ima mogućnost mjerenja visine spremnika, no korisnik mora odlučiti gdje će uskladištiti sprenik. Idealna je u slučajevima kada se rukuje spremnicima sličnih dimenzija, a korisnik želi spriječiti da se uskladišti krivi artikl u spremnik. Isto tako pogodna je u situacijama kada se radi sa kutijama s labavim poklopcima. U slučaju kad bi se s kutijama s labavim poklopcima rabila metoda optimizirane lokacije umjesto metode maksimalne visine, ukoliko bi se poklopac na gornjoj strani kutije otvorio u tijeku skladištenja, sensor bi izmjerio veću visinu od one u kojoj je

poklopac zatvoren i kutija bi bila uskladištena na lokaciju koja ima potrebnu visinu, što bi rezultiralo povećanim neiskorištenim prostorom unutar VLM-a.

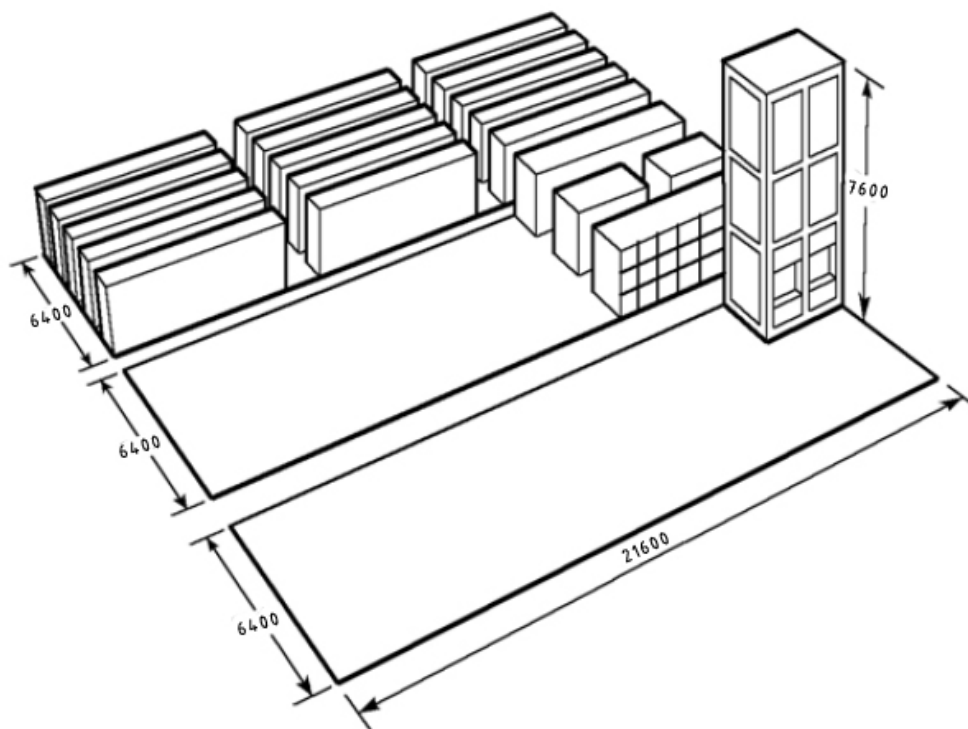
Kao što se može vidjeti, svaka od metoda primjenjuje se u određenom slučaju. Kako je današnje tržište, a samim time i sustavi nabave i potrebe za određenim proizvodima sklono promjenama, važna je mogućnost da se u određenom trenutku promijeni metoda, odnosno način dodjeljivanja lokacija u vertikalnom podiznom modulu.

2.2. Prednosti i ograničenja primjene VLM-a

Premda VLM sustavi pružaju brojne prednosti i pokazuju se isplativima, korisnike ponajprije privlači njihova velika gustoća skladištenja i malo zauzeće površine. Ako se spomene podatak da se radi o smanjenju potrebne površine do 80%, lako je razumjeti zašto su vertikalni podizni sustavi zanimljiv proizvod. Na ovaj se podatak nadovezuje i činjenica kako se takvim skladišnim sustavom povećava iskoristivost smanjenjem ljudskog napora na način da se smanjuje potreba za dugotrajnim hodanjem, kao i sposobnost smanjenja zaliha. Potonje se u dva koraka:

- kontroliranjem protoka pojedinih artikala (omogućava korisniku da se informira o protoku pojedinih artikala i kontrolira stvarnu potrebnu zalihu istih)
- ažuriranjem podataka o stanju zaliha u realnom vremenu preko upravljačkog sustava

Većina objekata u proizvodnim i distribucijskim sustavima građena je s visokim stropovima. VLM sustav nudi mogućnost popunjavanja i iskorištenja visinskog prostora sve do stropa, koji bi u suprotnom ostao neiskorišten. Tako se smanjuje potreba za zauzećem podne površine (vidi sliku 13.) .



Slika 13. Ilustracija smanjenja potrebne podne površine primjenom jednog VLM-a [1]

Objekti koji nemaju izuzetno visoki strop mogu iskoristiti sposobnost VLM-a da spoji i obuhvati više katova. Često se može vidjeti kako modul počinje na jednom katu i tada se visinski prostire do visine od 30 pa i više metara, pružajući pristup onome što je uskladišteno na pojedinim katovima. Također, VLM sustav nudi mogućnost modularne gradnje s visinskim korakom od samo nekoliko desetaka milimetara koja pruža mogućnost mnogo veće gustoće uskladištenog materijala u odnosu na standardne police ili stalke. Modularni manualni sustavi s ladicama često su krišom promatrani kao sustavi visoke gustoće skladištenja što oni i jesu u nekim slučajevima u usporedbi sa poličnim skladištem. No, praktično su limitirani mogućnostima rukovatelja (visina i dubinski doseg) i zasigurno ne mogu iskoristiti visinu bez upotrebe međukata, stepeništa ili ljestava.

2.2.1. Povećanje razine produktivnosti

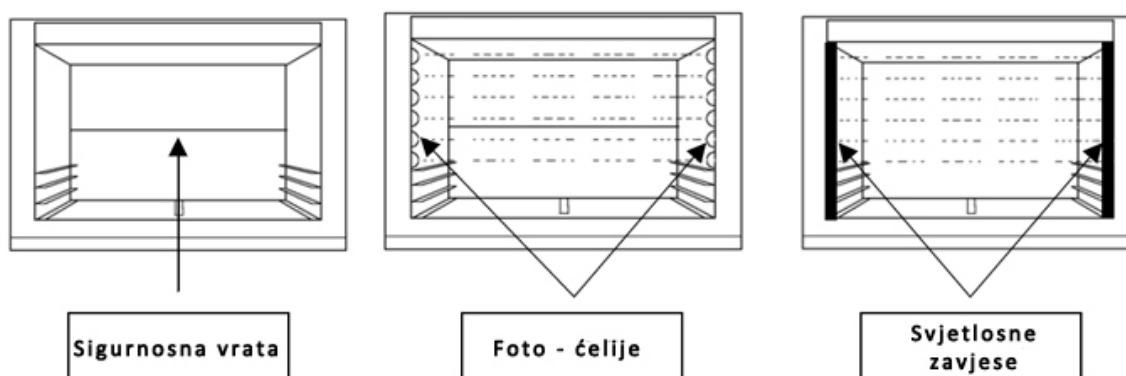
Povećanje produktivnosti osoblja, reduciranje potrebne ljudske radne snage za poslove skladištenja i izuzimanja i njihovo preusmjeravanje na druge operacije u procesima u skladišnim sustavima tipične su nuspojave u razvoju i integraciji sustava s vertikalnim podiznim modulima. Povećana produktivnost povezana s manjom potrebom ljudskog rada ostvarena je zbog:

- bržeg odziva i kraćeg vremena komisioniranja (potreban artikl je uvijek spreman na točnoj lokaciji)
- eliminacije hodanja i traženja u prolazima
- manjeg zamora operatera, koji zbog smanjenja hoda, saginjanja, dohvaćanja s visokih polica radi povećanim kapacitetom uz manje opterećenje
- povećane kontrole rada operatera od strane uprave
- upotrebe grupnog komisioniranja i sortiranja narudžbi, koje značajno povećavaju brzinu komisioniranja
- mogućnosti da sustav upravljanja VLM-om osigurava potrebnu količinu artikala na skladištu (pomoću analize prethodnih narudžbi)
- veće dostupnosti operatera, koji zbog manje opasnosti od ozljeda na radu, manjih fizičkih zahtjeva i ergonomske radnog okruženja manje vremena provode na bolovanju.

2.2.2. Ergonomija i sigurnost

Budući da djelatnost rukovanja materijalom nosi sa sobom rizik od mogućih povreda prilikom rada, podrazumijeva se da proizvođači vertikalnih podiznih modula prilagođavaju njihove karakteristike i konstrukciju kako bi se osiguralo poštivanje normi o zaštiti i sigurnosti u radu i smanjili rizici od ozljeda zaposlenika i smanjilo vezane troškove. Sustavi vertikalnih podiznih modula praktički eliminiraju potrebu za saginjanjem i dohvaćanjem jer su vrata izvedena u visini struka, kao i penjanje stepenicama, uz pomoć ljestava ili nekim priručnim sredstvom. Korisnici su prepoznali prednosti pružanja poboljšane ergonomije, a može se zaključiti kako ergonomska učinkovitost također donosi i dugoročni profit zbog smanjenih daljnjih ulaganja u operatera, kao i smanjenja ulaganja u obuku privremene radne snage te smanjenja troškova pogrešnih isporuka (eng. *miss-picks*). Općenito može se reći kako poboljšana ergonomija donosi poboljšani moral zaposlenika i smanjenje troškova po zaposlenom.

Svi proizvođači vertikalnih podiznih modula pružaju nekolicinu sigurnosnih dodataka kako bi se u što većoj mjeri zaštitili operateri i pohranjena roba. Na slici 14. mogu se vidjeti neki od dodataka kao što su: sigurnosna vrata (dizalo ne počinje svoju operaciju dok nisu zatvorena kako bi se izbjegla moguća ozljeda operatera ili oštećenje materijala), foto ćelije i svjetlosne zavjese (rade kao senzori koji blokiraju rad modula ukoliko se prekine njihov snop). Neki uz to pružaju i interne podsustave koji kontinuirano prate rad sustava i osiguravaju zaštitu elektro-mehaničkih komponenti.



Slika 14. Ilustracije nekih sigurnosnih dodataka

Svaki vertikalni podizni modul može se gledati kao sef ograđen sa 6 stranica koji pruža vrlo efektivnu zaštitu za potencijalno vrlo vrijedne uskladištene jedinice, a isto tako i čisto sigurno skladišno mjesto. Sigurnost se dodatno može povećati mehaničkim i električnim uređajima,

npr. upotrebom lozinki kojima se limitira pristup osoblju na pojedine skladišne lokacije ili na VLM u cijelosti.

2.2.3. Nedostaci VLM-a

Prvi nedostaci VLM sustava vezani su na sve sustave „roba čovjeku“ (eng. *part-to-picker*), odnosno na sve automatizirane sustave skladištenja, a mogu se opisati u vidu većih investicijskih troškova. Također su mnogo teži za rekonfiguriranje od tradicionalnih sustava skladištenja (regalna skladišta), a troškovi održavanja su veći od troškova održavanja klasičnih skladišta. Smanjena fleksibilnost uvjetovana je samom konfiguracijom uređaja, koja ne ostavlja mnogo mjesta za naknadna prepravljavanja. Kad govorimo o održavanju, mnogi korisnici smatraju kako nije potrebno trošiti dodatno vrijeme, kao i novac za održavanje, popravak ili remont na uređaje koji se koriste za pohranu dijelova. Poznato je kako je i samo skladištenje nepoželjan trošak koji se nastoji minimirati, tako da svaki daljnji trošak korisnici uzimaju kao nedostatak. Može se reći da, bez obzira na nedostatke u smanjenoj konfigurabilnosti, većim troškovima održavanja, glavni razlog relativno male potražnje za vertikalnim podiznim modulima leži upravo u visokim investicijskim troškovima.

Ukoliko se vertikalne podizne module usporedi sa vertikalnim karuselima (sličan princip rada, samo što u vertikalnoj ravnini rotiraju lokacije), dolazi se do zaključka kako su oni nešto brži u radu od VLM-ova, no nedostatak im je što su skuplji i potencijalno opasniji za terete (svaka lokacija konstantno rotira).

2.3. Instalacija i održavanje VLM-a

Instalacija vertikalnog podiznog modula za primjenu u rukovanju materijalom traje otprilike 3-4 dana. U većini slučajeva provodi se od strane izučenih stručnjaka koje angažira sam proizvođač modula, a koji mogu postavljati niže module, kao i one više od 10 metara. Obično sam korisnik mora pripremiti lokaciju za ugradnju, kao i sve potrebne priključke (el.energija), no to ovisi o prethodno ugovorenem poslu za proizvođačem modula. Instalacija gotovo svakog modula zahtijevat će primjenu opreme za podizanje (viličar, vitlo, dizalica). Takvi se dodatni zahtjevi trebaju prije definirati kako ne bi došlo do nepredviđenih zastoja tijekom procesa instalacije. Način sklapanja VLM-a ovisi ponajprije o proizvođaču. Kako je cijela

konstrukcija osmišljena kako bi se mogla sklapati modularno, potrebno je prije definirati visinu lokacija, kao i ukupne dimenzije.

Održavanje vertikalnih podiznih modula uvelike ovisi o proizvođaču kao i o radnim uvjetima. Gotovo isključivo radi se o preventivnom održavanju s točno određenim rasporedom zahvata u pojedinim vremenskim periodima, a takve zahvate izvode tehničari obučeni od strane proizvođača, odnosno oni s potrebnom licencom za rad. Prekid rada samog modula kako bi se izveli preventivni zahvati održavanja su svedeni na minimum te se obično radi o nekoliko sati rada na polugodišnjoj razini. Ipak, valja napomenuti kako promjenjivi uvjeti uporabe i zahtjevi proizvođača mogu promijeniti vremensku skalu zahvata.

2.4. Primjena vertikalnih podiznih modula

Kao što je već bilo rečeno u uvodnim rečenicama, primjena vertikalnih podiznih modula nalazi se u skladišnim procesima komisioniranja i pripreme narudžbi, kao i povratnim logističkim procesima kao podrška procesu vraćanja robe. U proizvodnji primjena se kreće od osiguravanja skladišnih kapaciteta za alate u proizvodnim halama, pa do osiguravanja kapaciteta za dijelove i sklopove koji se nalaze između pojedinih faza u proizvodnji. Povrh toga, postoje i mnoge specijalizirane izvedbe VLM-ova u preciznijim i strogo kontroliranim situacijama kao što su sterilni uvjeti (eng. *Clean rooms*) ili u hladionicima.

U praksi ovi se uređaji mogu naći kao samostalni uređaji (eng. *stand alone*) ili kao dio sustava vertikalnih podiznih modula.

2.4.1. Samostalni vertikalni podizni moduli

U početku, VLM-i su dizajnirani za pohranjivanje laganih stvari kao što su elektroničke komponente, dijelovi i alat u odjelima za održavanje te dokumenti potrebni za proizvodni proces. I danas imaju sličnu ulogu u radnim ćelijama ili u sustavima skladištenja poluproizvoda kao dio proizvodnog sustava ili montažnog sustava. Isto tako, mogu se naći u samostalnoj primjeni kao:

- Međuspremnik, gdje se u vertikalni podizni modul privremeno odlažu predmeti koji se trebaju osušiti, ohladiti ili jednostavno pospremiti sve dok ne će ponovno zatrebati, npr. u finalnoj montaži ili u kasnijoj fazi proizvodnje, u distribuciji ili otpremanju.

- Spremnik za konektore, sklopke i ostali sitni alat i ostale alate za održavanje.
- Lokalni spremnik za matrice, svrdla, prihvate i alate za obradne strojeve te pribora za stezanje.
- Spremnik alata i pločica u neposrednoj blizini obradnih centara.
- Privremeni spremnik dijelova s greškom ili reklamiranih dijelova.
- Sustavi distribucije u maloprodaji.
- Okruženja kontrolirane temperature i klimatskih uvjeta.
- Međuspremnik u višekatnoj radnoj zoni i protočnim sustavima.



Slika 15. Samostalni vertikalni podizni modul [8]

Primjene vertikalnih podiznih modula su široke i raznolike koliko i industrije u kojima se koriste. Tako se primjena može naći u skladištenju zatvarača, pričvršćivača i dijelova u sustavima oplemenjenim ekonomičnom proizvodnjom (eng. *Lean Manufacturing*), *Six Sigma* protokolom ili *just-in-time*-om. Jedna potpuno suprotna primjena može biti skladištenje

poštanskih marki u maloprodaji, skladištenje vina u restoranima ili pak skladištenje sastojaka neugodnih mirisa ili ljudskog tkiva.

Vertikalni podizni moduli također mogu biti opremljeni tako da zadovoljavaju standarde sterilnih uvjeta što ih čini vrlo pogodnim za skladištenje lijekova i kemijskih supstanci. Isto tako, moduli se mogu opremiti na način da funkcioniraju u hladionicama, grijanim ili u nekim strogo kontroliranim okolinama.

2.4.2. Sustavi vertikalnih podiznih modula

Vertikalni podizni moduli koji ne komuniciraju s vanjskim bazama podataka (samostojeći) oduvijek su bili u primjeni. Međutim, zahtjevi za boljim praćenjem zaliha i kontrolom procesa stvorili su potrebu povezivanja VLM-a s nadređenim softverskim sustavom. Sustavi kao ERP i WMS rijetko su dizajnirani za upravljanje VLM-ima i optimiziranje njihovih performansi. U tom slučaju koristi se poseban VLM-ov softver ili radna stanica. Uvriježeni naziv za program koji se koristi kao sučelje sa glavnim sustavom (eng. *host*) jest „middleware“ ili aplikacija za praćenje zaliha. Pojednostavljeno, „Middleware“ se može objasniti kao međusoftver koji omogućuje međusobnu suradnju i kompatibilnost vertikalnog podiznog modula i sustava upravljanja skladištem.

„Middleware“ aplikacija se koristi u slučaju kad se baza podataka glavnog sustava dinamički prati i osvježava novim stanjem u realnom vremenu. Middleware je skup upravljačkih naredbi (eng. *drivera*) koje su ubačene u upravljanje glavnog sustava tako da on ima mogućnost micati i pozicionirati vertikalne podizne module. Često su middleware-i podaci sa „dll“ (eng. *Dynamic Link Library*) ekstenzijom kojom se lako rukuje. Načini izdavanja middleware-ova mogu biti različiti i ovisе o proizvođaču, od jednostavnog objavljivanja koda, preko osiguravanja upravljačkih naredbi do pružanja gotovog middleware programa.

Ukoliko WMS sustav nije opremljen funkcijama praćenja i pozicioniranja VLM-a, program za praćenje zaliha samog modula koristi se na razini radne stanice i šalje stanje zaliha glavnom programu za upravljanje zalihama. Pritom se koristi jedan od dva tipa programskih sustava praćenja zaliha – TXP (eng. *Transaction Processor*) ili sustav s vlastitim bazama podataka. TXP programski sustav koristi bazu artikala, zaliha i lokacija glavnog sustava za upravljanje zalihama, ali je zamišljen tako da optimizira gibanja dizala vertikalnog podiznog modula i na taj način povećava produktivnost i maksimizira gustoću skladištenja. Značajke TXP-a također uključuju i grupno komisioniranje, upravljanje izvješćima, algoritme za maksimizaciju gustoće

i dr. Sustav s vlastitim bazama podataka o zalihama koristi svoju internu bazu kako bi pohranio količine uskladištenih artikala (također i neke ostale podatke, npr. okvirne dimenzije artikala, dimenzije skladišnih lokacija i sl.). Takav se sustav kasnije mora ažurirati s glavnim sustavom, što se obično događa po završetku smjene, na kraju mjeseca ili u nekom dužem razdoblju ukoliko se radi o sustavu malog protoka. Baze podataka su obično vrlo homogene i robusne datoteke tipa SQL, .Net, Oracle i dr.



Slika 16. Sustav vertikalnih podiznih modula [8]

Dok su sustavi horizontalnih karusela često povezani s velikim obujmom i podnim zauzećem prostora te primjenom grupnog komisioniranja, sustavi vertikalnih podiznih modula visoki protok ostvaruju na drugačiji način.

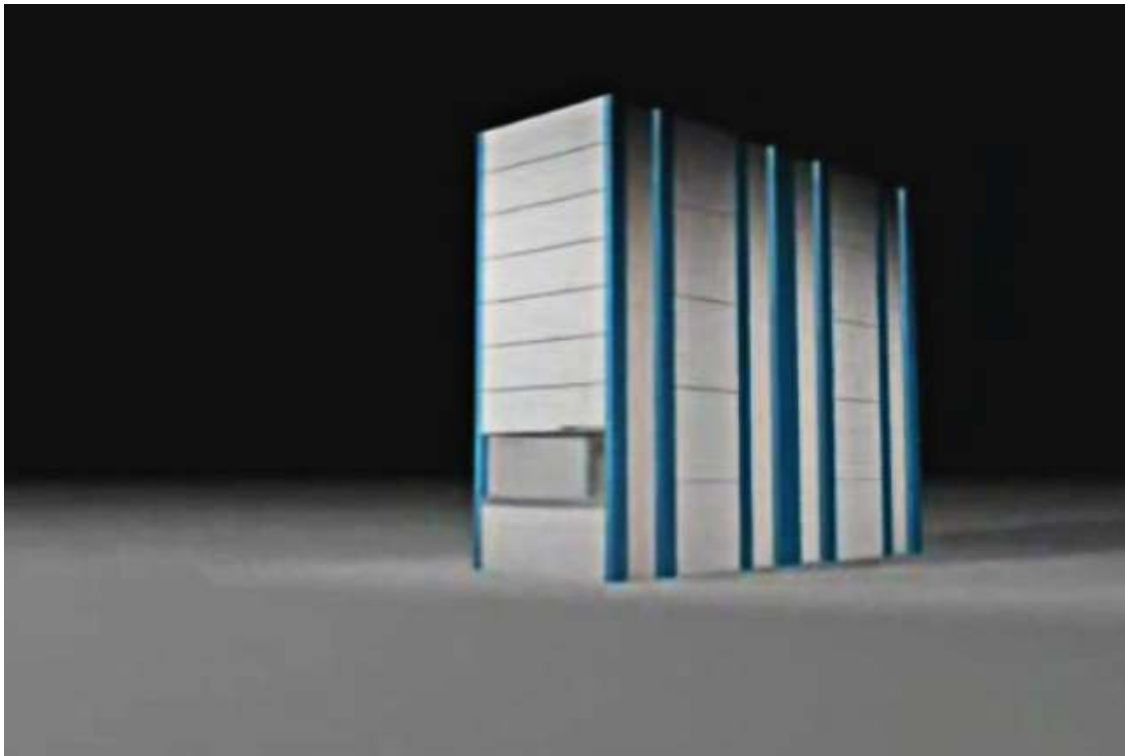
Implementiranjem pravilne visine lokacija, optimiranjem brzine i primjenom algoritama za upravljanjem količinama zaliha, sustavi vertikalnih podiznih modula u stanju su pružiti kombinaciju velikog protoka i velike gustoće skladištenja. Ovaj se sustav skladištenja protokom može usporediti sa sustavom protočnih regala potpomognutim *pick-to-light*² sustavom. Umjesto komisionera koji traže pravilan artikl u prolazima protočnih regala, sustavi vertikalnih podiznih modula su u mogućnosti skladištiti artikle u prostorno

² pick-to-light, tehničko rješenje sa svjetlom usmjerenim komisioniranjem, integrirano s WMS-om

učinkovitom sustavu sa malim zauzećem površine te ih prema potrebi dostaviti na komisioniranje.

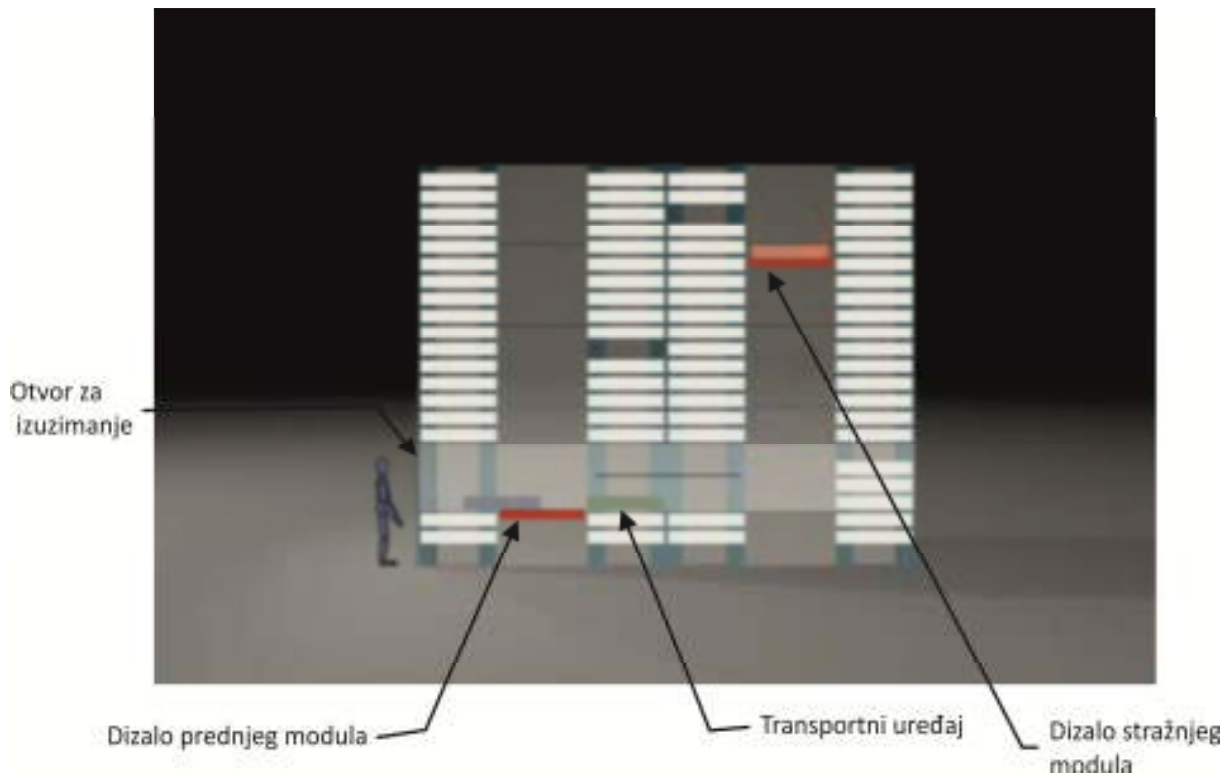
2.4.3. Specijalne izvedbe

Jedna od specijalnih izvedbi vertikalnih podiznih modula sastoji se od dva neovisna modula raspoređena jedan iza drugog, na način da su zadnja strana prednjeg i prednja strana zadnjeg modula spojene. Spremnici se transportiraju između modula pomoću dodatnog transportnog uređaja.



Slika 17. Dvostruki vertikalni podizni modul

Takva izvedba pronalazi svoju upotrebu u prostorima gdje je fizički nemoguće ugraditi dva neovisna sustava. Duboki, nespretni, uski prostori mogu se na ovaj način popuniti do njihovog punog kapaciteta. U ovakvom sustavu dizalo uvijek priprema slijedeći spremnik za komisioniranje, dok se obrađuje trenutni, tako da je operater više opterećen jer ne mora čekati sve dok dizalo ne uskladišti prethodno izuzeti spremnik da bi dohvatio novi.



Slika 18. Dijelovi dvostrukog vertikalnog podiznog modula

Prije utvrđivanja konačnog oblika skladišnog sustava, provodi se analiza u kojoj se određuje najbolja kombinacija elemenata sustava na temelju odnosa dostupnog i potrebnog skladišnog prostora, potrebnog protoka, broja skladišnih lokacija i dostupne visine skladišnog prostora. Ponekad se kao potencijalno rješenje projekta oblikovanja skladišnog sustava nudi integrirani sustav vertikalnih podiznih modula zajedno s ostalom automatiziranom ili manualnom opremom za skladištenje/izuzimanje. Tada se govori o tzv. univerzalnoj radnoj stanici (eng. *Universal Workstation*). Takva radna stanica omogućuje jednom operateru nadziranje rada sustava i posluživanje sa sustava horizontalnih karusela, vertikalnih podiznih modula i protočnih regala s pick-to-light sustavom na način da svi ti podsustavi rade kao jedinstveni sustav u kojem je moguće svaki od podsustava povezati međusobno pri komisioniranju narudžbe. Također je moguće sustave povezati sustavom konvejera.



Slika 19. Prikaz univerzalne radne stanice [8]

Svaki podsustav radne stanice je neovisno o stanici integriran sa centralnim sustavom upravljanja zalihama. Programski sustav univerzalne radne stanice također je često vezan na WMS ili neki drugi sustav upravljanja skladištem putem direktne veze ili middleware programa.

2.5. Primjeri primjene sustava s vertikalnim podiznim modulima u Hrvatskoj

Unazad nekoliko godina više se je renomiranih tvrtaka na području Republike Hrvatske odlučilo koristiti upravo vertikalni podizni modul kao dio sustava skladištenja. Gotovi svi instalirani uređaji su proizvod njemačkog proizvođača Kardexa, a većinu je instalirala tvrtka Primat – RD, odnosno njena tvrtka-kćer Primat Logistika. Na sljedećim stranicama dan je kratki pregled i opis ugrađenih uređaja u pojedinim poduzećima.

1. **TEH-CUT** – u proizvodnom pogonu tvrtke sa sjedištem u Velikoj Gorici, a koja proizvodi alate, naprave, specijalne strojne elemente i glodala, instaliran je Kardex Shuttle uređaj visine približno 7500mm (ograničen je visinom hale). U modulu su uskladišteni vrijedni mjerni i rezni alati za potrebe proizvodnje TEH-CUT-a. Ovaj nam primjer može samo potvrditi kako su vertikalni podizni moduli uređaji visoke

sigurnosti. U ovom slučaju nije riječ o uređaju sa zahtjevanim visokim protokom, već se primarni zahtjev odnosi na sigurnost tijekom skladištenja i u samom procesu rukovanja materijalom.



Slika 20. Radni otvor VLM-a s mjernim alatima TEH-CUT-a [9]

2. **Podravka d.d.** , prehrambena industrija, Koprivnica – u dijelu expedita, između stepeništa koje spaja prizemlje i prvi kat, integriran je automatizirani skladišni uređaj s dva radna otvora (po jedan na svakom katu). Uređaj je namijenjen za skladištenje koluta s naljepnicama za proizvode Podravke. Kapacitet uređaja je oko 23m^3 ili oko 45t. Prosječno vrijeme dohvata iznosi približno 33 sekunde, a dizalom je omogućen direktni pristup do svakog koluta.



Slika 21. Podravka – instalirani VLM sa dva otvora [9]

3. **Belupo d.d.** , lijekovi i kozmetika, Koprivnica – u skladišnom sustavu hrvatskog proizvođača lijekova i kozmetike Belupa instaliran je Kardexov model Shuttle visine 6 metara, dubine 4 metra i širine 2 metra. U ovom se uređaju skladišti prvenstveno roba slabog protoka (tzv. „C roba“) koju čine upute, kutije i specijalna pakiranja. Sastoji se od 33 skladišne lokacije, a unutar radnog otvora u koji je ugrađena operatorska konzola OP Graphic-Color instalirana je rasvjeta.



Slika 22. VLM Kardex Shuttle instaliran u skladišnom sustavu Belupa d.d.

4. **D.B.T. d.o.o.** , okovi i pribor za građevinsku stolariju i namještaj, Zaprešić – sustav sa sa tri vertikalna podizna modula dio je automatiziranog skladišta, koji se osim sustava vertikalnih podiznih modula sastoji i od računalom upravljano automatiziranog skladišnog sustava sa male dijelove (eng. *mini-load AS/RS*). Potonji sustav koristi se za većinu artikala, no s obzirom da su spremnici koje koristi malih dimenzija, a nosivost dizalice samo 100kg, duži i teži artikli uskladištuju se u vertikalne podizne module. U nastavku su dane osnovne karakteristike vertikalnih podiznih modula instaliranih u D.B.T.-u.

Tehnički podaci:

Dimenzije uređaja (širina x dubina x visina) [mm]: 2780 x 2921 x 9550

Baza [m²]: 8.12

Kontaktna površina [cm²]: 1120

Masa praznog uređaja [kg]: 3525

Korisno opterećenje neto [kg]: 52 965

Korisno opterećenje bruto [kg]: 58 850

Ukupna masa uređaja [kg]: 62 375

Pritisak na podlogu, max [N/mm²]: 6.18

Vrijeme dohvata robe [s]: prosječno: 37 maksimalno: 48

Sigurnosni razmak [mm]: 20

Instalirana snaga [kW]: 8.6

Spremnici:

- 107 x tip *strong*, širina 2450 mm, dubina 812.8 mm

- masa praznog tablara [kg]: 55

- max. nosivost [kg]: 495

Radni otvor:

- s prednje strane, na visini H=833 mm (max. visina skladišne jedinice 730 mm)

- operatorska konzola OP Graphic-Color, ugrađena u kućište uređaja s prednje strane

- unutar radnog otvora instalirana rasvjeta.

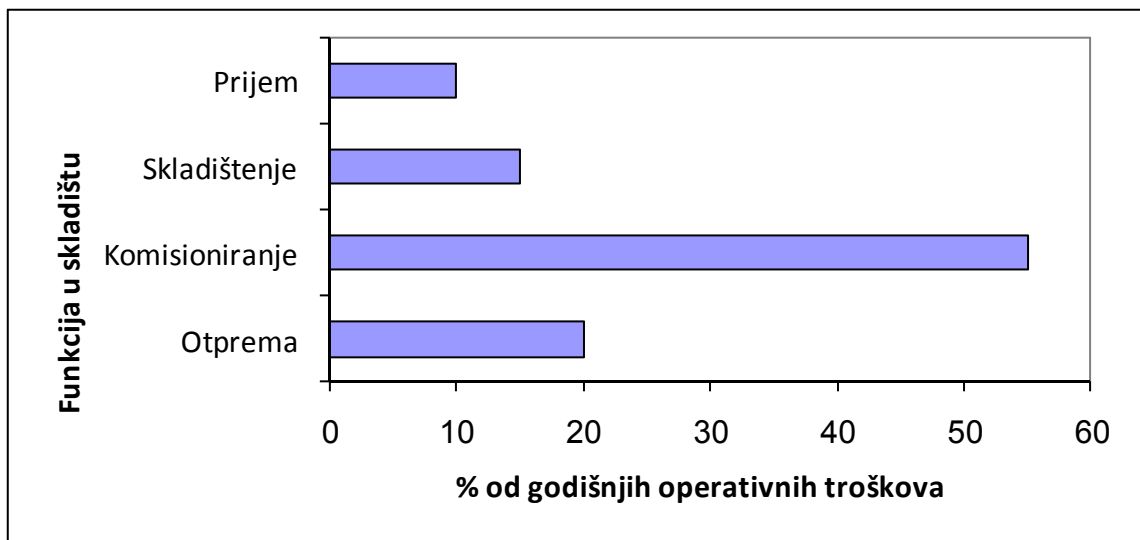


Slika 23. Instalirani vertikalni podizni modul

3. OBLIKOVANJE SUSTAVA KOMISIONIRANJA S VERTIKALNIM PODIZNIM MODULIMA

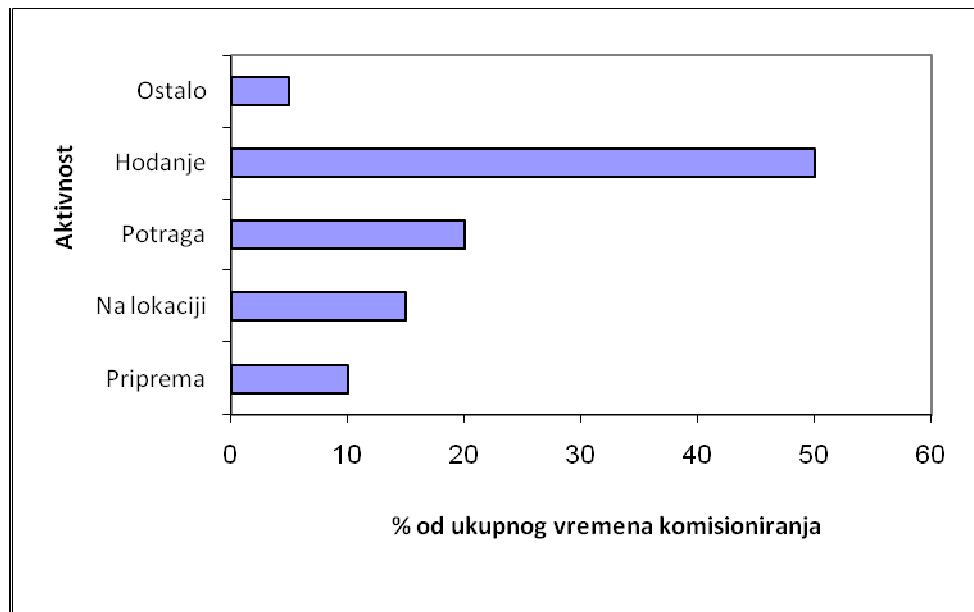
Priprema materijala za izdavanje najvažnija je aktivnost u skladištu, napose zbog vremena trajanja, a samim time i troškova koje nosi.

Komisioniranje je proces koji se može opisati kao izuzimanje robe iz skladišnih lokacija na temelju zahtjeva korisnika. Upravo na komisioniranje otpada najveći udio vremena trajanja svih aktivnosti u regalnom skladištu (i do 90%). Također, na komisioniranje otpada i najveći udio ljudskog rada u skladištu, što zbrojeno stvara oko 55% od ukupnih troškova skladištenja u regalnim skladištima.



Grafikon 1. Prikaz troškova unutar regalnih skladišta

Kako se u ovom radu opisuje sustav sa vertikalnim podiznim modulima, situacija na grafikonu se mijenja. Ako se uzme u obzir grafikon 2., na kojem se mogu vidjeti udio vremena pojedinačnih aktivnosti pri procesu komisioniranja u regalnim skladištima, može se zaključiti kako će vremena za traženje i hodanje, a koja čine 70% vremena komisioniranja u regalnim skladištima, nestati. Samim time smanjuje se i udio komisioniranja u postotku godišnjih troškova, te on čini približno 27% troškova od svih funkcija skladištenja.



Grafikon 2. Prikaz udjela aktivnosti komisioniranja u regalnom skladištu

U većini literaturnih izvora autori gotovo jednako definiraju komisioniranje, dok se definicija sustava za komisioniranje ne nalazi tako često. Razlozi mogu biti u svezi činjenica da je komisioniranje kao podproces zastupljen u svakom skladišnom procesu, a da se pri tome posebice ne osniva podsustav komisioniranja. Naime, iste komponente (sredstva) obavljaju aktivnosti u različitim podprocesima. U većini radova opis sustava za komisioniranje temeljen je na vrsti kretanja materijala i komisionera, pa tako poznajemo sustave komisioniranja „čovjek robi“ i „roba čovjeku“. U komisioniranju prema principu "čovjek robi" (eng. picker-to-part) komisioner se kreće, hodajući ili vozeći se na transportnom sredstvu, do lokacije(a) sa koje treba izuzeti materijal. Kako se aktivnost izuzimanja najčešće obavlja u prolazima između regala, ova grupa sustava vrlo se često naziva i sustavi "u prolazima" (eng. in-the-aisle). U sustavima komisioniranja prema principu "roba-čovjeku" (eng. part-to picker) materijal koji treba izuzeti kreće se do komisionera. Mjesto izuzimanja nalazi se na kraju prolaza, pa se ovi sustavi još nazivaju i sustavi "na kraju prolaza" (eng. end-of-aisle).

Kako je navedeno da na komisioniranje otpada više od 50% troškova pri skladištenju, jasno je da se oblikovanju sustava komisioniranja treba pristupiti na način da se pokušaju smanjiti ti troškovi.

Oblikovanje sustava komisioniranja provodi se u skladu s ciljevima i zadacima definiranim pri oblikovanju skladišta s naglaskom na produktivnosti, brzini (vrijeme ciklusa) i točnosti. Produktivnost se u komisioniranju mjeri pomoću stope (norme) komisioniranja (eng. *pick*

rate). U komisioniranju pojedinačnih dijelova s kakvim se susrećemo kod vertikalnih podiznih modula, obično se stopa komisioniranja izražava s količinom izuzetih stavki po satu. Vrijeme ciklusa (eng. cycle time) je vrijeme koje je potrebno od zaprimanja narudžbe u skladištu do izlaza naručene robe iz skladišta. Ipak, neovisno o svrsi skladišta, može se reći kako je točnost ključni element u svakom od potprocesa u skladištenju. Točnost se najčešće izražava putem stope točnosti, odnosno omjera ukupnog broja točno obavljenih aktivnosti komisioniranja i ukupnog broja obavljenih komisioniranja.

Kada su definirani osnovni pojmovi vezani uz komisioniranje, može se reći kako je efikasnost komisioniranja funkcija produktivnosti, vremena trajanja ciklusa i točnosti. Kako je trend u skladištenju povećanje efikasnosti povećanje efikasnosti, jasno je da se to može postići utjecajem na jedan ili više faktora koji je obilježavaju.

Dinamički sustavi skladištenja kao što su karuseli ili vertikalni podizni moduli koriste se već 40-tak godina u procesima komisioniranja. Glavna prednost korištenja takvih sustava je uklonjena potreba za hodanjem. Operater vertikalnog podiznog modula ostaje na jednom mjestu, a dizalo vertikalnog podiznog modula dostavlja artikle do zone njegovog dohvata (eng. *part-to-picker* ili *Stock-to-Operator*). Uklonjanje potrebe za hodanjem smanjuje vrijeme potrebno za komisioniranje i do 50 %. Kako bi se što više iskoristila ova prednost, vertikalni podizni moduli su često korišteni u sustavima s više vertikalnih podiznih modula³ ili u sustavima s univerzalnom radnom stanicom⁴. Način na koji funkcioniraju takvi sustavi temelji se na smanjenju čekanja operatera na namještanje uređaja. Obično se grupa narudžbi (5-15 narudžbi sa do 3 različita artikla po narudžbi) dodjeljuje sustavu koji sadrži uskladištene artikle. Upravljački sustav navodi svaku jedinicu vertikalnog podiznog modula na izuzimanje stavki iz lokacija, na način da je slijedeća stavka (ili stavke) spremna na slijedećoj jedinici kako operater ne bi morao čekati. Kako bi se olakšalo rad operateru, obično se na ekranu svake jedinice naznačava broj stavki koje treba komisionirati, a operater nakon izuzimanja potvrđuje računalu da je izuzeo potrebnu količinu u posebnu kutiju ili spremnik za pojedinu narudžbu. Funkcija potvrđivanja ide u prilog povećanju točnosti komisioniranja. Kad je završio, kreće na slijedeću jedinicu. Najčešće se to izvodi po principu da operater obilazi

³ Detaljnije vidi u 2.4.2.

⁴ Detaljnije vidi u 2.4.3.

svaku jedinicu sustava na kojoj treba izuzeti stavke, bez prioriteta (tzv. *RR* algoritam⁵). Ovakav tip komisioniranja je tipičan primjer komisioniranja „prema protoku“ (suprotno bi bilo „prema skladištenju“) u kojem se pretpostavlja da se popunjavanje skladišnog sustava ne zbiva u toku komisioniranja, već nakon završetka komisioniranja (u drugoj smjeni). U sustavima s vertikalnim podiznim modulima obično se kao operateri koriste ljudi, iako su kao takvi skuplji od automatiziranih sakupljača (robotskih ruka i robota), a iz razloga što su značajno brži i lakše se adaptiraju prikupljanju artikala različitih oblika i veličina.

3.1. Modeli protoka

Iako se često primjenjuju u sustavima za komisioniranje, vertikalnim podiznim modulima nije pruženo mnogo prostora u znanstvenim i istraživačkim radovima. Uspoređujući vertikalne podizne module s drugim automatiziranim sustavima skladištenja kao što su visokoregalna skladišta ili skladištima za male dijelove, može se zaključiti kako postoji vrlo malo modela za oblikovanje ili analizu takvih sustava. Iako svaki proizvođač ima svoj osnovni model protoka kao i simulacijske modele za oblikovanje sustava s vertikalne podizne module, ti modeli nisu dostupni studentima, inženjerima u praksi, kao ni istraživačima. Sam taj nedostatak dostupnih modela vodi ka manjoj pokrivenosti vertikalnih podiznih modula u nastavnim kolegijima na kojima se obrađuju teme tehničke logistike. Upravo iz ovih razloga odjel za industrijsko inženjerstvo na sveučilištu u Virginiji, SAD razvio je trenutno jedini dostupan model protoka za vertikalne podizne module. Kako na hrvatskom jeziku još ne postoji literatura koja obrađuje vertikalne podizne module i oblikovanje sustava komisioniranja sa vertikalnim podiznim modulima, u sklopu ovog završnog rada provest će se analiza i testiranje modela protoka za vertikalne podizne module i sustave s vertikalnim podiznim modulima. Prvo će biti objašnjen model protoka za samostalni vertikalni podizni modul sa komisionerom, a zatim za sustav vertikalnih podiznih modula.

⁵ Round-robin algoritam – jedan od najjednostavnijih oblika sastavljanja rasporeda koji se sastoji od podjele na jednake dijelove, od kojih je svaki iste važnosti.

3.2. Model protoka za samostalni VLM

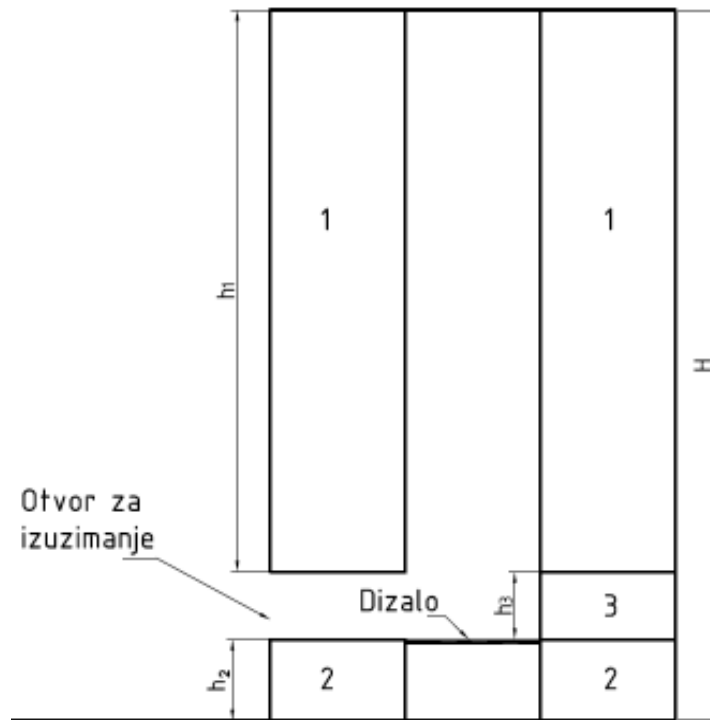
Kako je već napomenuto, vertikalni podizni moduli svrstavaju se u sustave komisioniranja „roba čovjeku“, odnosno „na kraju prolaza“, što ih svrstava u klasu sličnosti sa vertikalnim karuselima i automatiziranim skladištima za male dijelove. Sličnost sa automatiziranim skladištima za male dijelove može se primjetiti u korištenju dizala, što je princip kojeg koristi i automatizirano skladište za male dijelove (eng. *mini-load AS-RS*) u vidu dizalice za skladištenje/izuzimanje. Ta se dva sustava razlikuju po tome što se kod vertikalnog podiznog modula dizalo kreće samo u vertikalnom smjeru (osim u primjeru VLM-a s dodatnom osi), odnosno postoji samo jedan stupac naslagivanja. Također valja zamijetiti kako kod vertikalnog podiznog modula postoji samo jedna stanica za izuzimanje, dok se kod automatiziranog skladišta za male dijelove radi o dvije komisione lokacije. Po tom je obilježju vertikalni podizni modul sličan vertikalnom karuselu. Kod oblikovanja sustava za komisioniranje s vertikalnim podiznim modulom i komisionerom, mora se pretpostaviti da VLM radi stalno sa dvostrukim ciklusima (osim prvog izuzimanja i zadnjeg uskladištenja).



Slika 24. Usporedba mini-load AS/RS sustava i VLM-a [7], [8]

Zbog manjih dimenzija vertikalnog podiznog modula, u model protoka mora se uračunati postojanje otvora za izuzimanje. Prema slici 22., svaki se vertikalni podizni modul dijeli na tri dijela, koje možemo proizvoljno označiti sa i . Može se vidjeti kako dio označen s brojem 3 sa prednje strane vertikalnog podiznog modula služi kao otvor i taj se dio mora oduzeti od

ukupnog mjesta za pohranu. Uobičajene visine $h_2 = 914\text{mm}$ (36") i $h_3 = 762\text{mm}$ (30"), pa će te dimenzije biti korištene kao pretpostavke u modelu protoka. Svaki dio za pohranu u vertikalnom podiznom module pretpostavlja se kao kontinuirana površina sa više uskladištenih spremnika, s time da je broj spremnika i u svakom dijelu proporcionalan sa visinom h_i . U konstrukcijskim rješenjima smanjena je visina $h_2 = 914\text{mm}$ kako bi se omogućilo upravljanje uređajem.



Slika 25. Skica poprečnog presjeka vertikalnog podiznog modula

Model protoka:

- H - visina vertikalnog podiznog modula
- v - brzina dizala vertikalnog podiznog modula
- $t_{a/d}$ - vrijeme kašnjenja zbog ubrzavanja/usporavanja VLM-a
- $t_{p/d}$ - vrijeme kašnjenja nastalo uslijed izuzimanja/skladištenja spremnika na skladišnu lokaciju

Sa t_i se može označiti očekivano trajanje vožnje prema dijelu VLM-a i , odnosno vrijeme vožnje od dijela VLM-a i do otvora za izuzimanje. Pod pretpostavkom slučajnog rasporeda odlaganja, mogu se napisati slijedeće jednadžbe:

$$t_1 = (h_3 + h_1 / 2) / v$$

$$t_2 = (h_3 / 2) / v$$

$$t_3 = (h_2 / 2) / v$$

Na isti način sa tb_{ij} označava se očekivano trajanje vožnje od dijela i do dijela j , odnosno od dijela j do dijela i vertikalnog podiznog modula. Pod pretpostavkom nasumičnog rasporeda odlaganja slijede jednačbe:

$$tb_{11} = (h_1 / 3) / v$$

$$tb_{12} = (h_1 / 2 + h_3 + h_2 / 2) / v$$

$$tb_{13} = (h_1 / 2 + h_2 / 2) / v.$$

$$tb_{21} = tb_{12}$$

$$tb_{22} = (h_2 / 3) / v$$

$$tb_{23} = (h_2 / 2 + h_3 / 2) / v$$

$$tb_{31} = tb_{13}$$

$$tb_{32} = tb_{23}$$

$$tb_{33} = (h_3 / 3) / v$$

Kada se opisuju gibanja pod pretpostavkom nasumičnog rasporeda odlaganja treba primjetiti da je vjerojatnost da će vertikalni podizni modula skladištiti spremnik u dio i , a nakon toga izuzimati sa dijela j jednaka $q_{ij} = p_i p_j$, pri čemu je:

$$p_1 = 2h_1 / (2H - h_3)$$

$$p_2 = 2h_2 / (2H - h_3)$$

$$p_3 = h_3 / (2H - h_3)$$

Sada se mogu odrediti očekivana prosječna vremena vožnje vertikalnog podiznog modula:

$$E[SC] = \sum_{i=1}^3 2t_i p_i \quad (1)$$

$$E[DC] = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (t_i + tb_{ij} + t_j) q_{ij} \quad (2)$$

gdje je $q_{ij} = p_i p_j$.

Konačno se određuju očekivana trajanja ciklusa, prema jednačbama:

$$T[SC] = E[SC] + 2t_{a/d} + 2t_{p/d} \quad (3)$$

$$T[DC] = E[DC] + 3t_{a/d} + 4t_{p/d} \quad (4)$$

3.2.1. Model protoka za samostalni VLM s komisionerom

U ovom modelu protoka pretpostavlja se da se samostalni vertikalni podizni modul koristi u sklopu za komisioniranje narudžbe koji se sastoji od čovjeka i stroja. Za početak se može uzeti pretpostavka kako je jedan komisioner dodijeljen jednom stroju. Kako bi se modelirao ovakav sustav, ne će se koristiti pretpostavka kako postoji velik broj lokacija u svakom od dijelova vertikalnog podiznog modula, već će modul predstavljati točan broj spremnika, odnosno lokacija m iz kojih treba izuzeti artikle u određenoj narudžbi, a koji ovisi o vrijednostima H i h_3 , kao i o h (npr. $m = (2H - h_3) / h$). Pretpostavit će se i da :

- Komisioner može izuzeti artikle iz svakog spremnika na otvoru za izuzimanje bez gubitaka u produktivnosti
- Svako vrijeme između zaustavljanja i ponovnog pokretanja kako bi se omogućilo komisioneru da izuzme stavke traje određeno vrijeme t
- Svaki artikl zahtjeva određeno vrijeme p da bi ga se izuzelo iz spremnika.

Analogno promatrano, prvo se određuje m , odnosno ukupni broj uskladištenih spremnika. Označava se predviđeno vrijeme da bi se obradilo n artikala iz modula sa m uskladištenih spremnika kao $E^V[T(n,m)]$. To se vrijeme može rastaviti na dvije komponente koje valja promotriti razdvojeno:

1. $V_R = [E^V[R(n,m)] \cdot (0,21504 - 0,00505n + 0,0024)]$ - vrijeme potrebno VLM-u za rukovanje spremnicima
2. $E^V[P(n,m)]$ - vrijeme potrebno komisioneru za izuzimanje iz spremnika.

Vrijeme potrebno za rukovanje spremnicima može se izraziti iz jednadžbe:

$$E^V[R(n,m)] = T[SC] + (E[S(n,m)] - 1) \cdot T[DC] + T[SC] \quad (5)$$

Vrijeme $T[SC]$ koje se nalazi krajnje desno u jednadžbi nije uvijek relevantno za određivanje protoka jer tu radnju modul može izvršiti samostalno, dok komisioner priprema slijedeću narudžbu ili grupu narudžbi. U jednadžbi (5) pojavljuje se i član $E[S(n,m)]$, kojim se označava broj pokretanja/zaustavljanja VLM-a. Da bi se odredilo to vrijeme, potrebno je pronaći metodu s kojom se može približno odrediti koliko puta će dizalo modula morati raditi dvostruki ciklus skladištenja/izuzimanja da bi se izuzelo n artikala. Naime, postoji mogućnost

da na jednoj lokaciji m_i imamo uskladišteno više različitih artikala ili da trebamo izuzeti više jednakih artikala. U tom slučaju treba se izračunati vjerojatnost $p_k(m, n)$ da se modul ne će zaustaviti na k -tom od ukupno m lokacija u procesu izuzimanja n artikala, kako slijedi:

$$p_k(m, n) = \frac{m!}{k!(m-k)!} \sum_{j=0}^{m-k} (-1)^j \cdot \frac{(m-k)!}{j!(m-k-j)!} \cdot \left(1 - \frac{j+k}{m}\right)^n \quad (6)$$

Korištenjem izraza (6) i dodatnog zapažanja da slijedeće izuzimanje iz spremnika može isto tako biti iz trenutne lokacije, što znači da dizalo ne će morati raditi ciklus, dolazi se do slijedećeg izraza za očekivani broj spremnika u sustavu s m spremnika koji moraju biti dostavljeni da se izuzme n proizvoda:

$$E[S(n, m)] = \sum_{k=0}^{m-1} (m-k) \cdot p_k(m, n) \quad (7)$$

Kod modeliranja vremena potrebnog komisioneru za izuzimanje iz spremnika, $E^V[P(n, m)]$, pretpostavlja se da je vrijeme izuzimanja neovisno o samoj konfiguraciji vertikalnog podiznog modula i ovisi samo o broju artikala koje treba izuzeti n . Tada se može postaviti jednadžba:

$$E^V[P(n, m)] = np \quad (8)$$

Konačno, za vertikalni podizni modul u kojem se skadišti ukupno m spremnika, očekivano vrijeme za prikupljanje n artikala jest:

$$E^V[T(n, m)] = E^V[R(n, m)] + E^V[P(n, m)] \quad (9)$$

ili:

$$E^V[R(n, m)] = 2T[SC] + (E[S(n, m)] - 1) \cdot T[DC] + np \quad (10)$$

U tablici su prikazani primjeri rezultata analize za model protoka vertikalnog podiznog modula za dva tipična primjera. VLM (1) je primjer s brzim dizalom ($v = 0,5\text{m/s}$, $t_{a/d} = 1,5\text{s}$, $t_{p/d} = 2\text{s}$, $p = 6\text{s}$), a VLM (2) je primjer sa sporim dizalom ali manjim vremenom izuzimanja ($v = 0,4\text{m/s}$, $t_{a/d} = 2\text{s}$, $t_{p/d} = 4\text{s}$, $p = 2\text{s}$). Za oba primjera pretpostavljen je broj artikala $n = 45$, te tri moguće visine modula ($H_1 = 4,5\text{m}$, $H_2 = 6\text{m}$, $H_3 = 9\text{m}$).

Tablica 1. Rezultati analitičke procjene trajanja dvostrukih ciklusa

Primjer	Visina,[m]	$T[DC]$, [s]	$T[DC]$, [s]	greška
		analitički	simulacija	
1	4,5	22,08	21,22	4,1%
	6	25,92	25,2	2,9%
	9	33,75	33,01	2,2%
2	4,5	33,98	32,77	3,7%
	6	38,77	37,68	2,9%
	9	48,56	47,59	2,0%

Greška analitičkog modela iznosi do približno 5%, koja se može tumačiti uvođenjem procjena u model protoka (vidi poglavlje 3.2.1.).

3.2.2. Primjer određivanja protoka VLM-a s komisionerom

U slijedećem primjeru bit će dan opis i redoslijed proračuna za određivanje protoka samostalnog vertikalnog podiznog modula s komisionerom. Kao ulazni podaci iskoristit će se stvarni vertikalni podizni modul instaliran u skladištu tvrtke D.B.T. d.o.o :

$$h_2 = 833\text{mm}$$

$$h_3 = 710\text{mm}$$

$$H = 9550\text{mm}$$

$$h_1 = H - h_2 - h_3 = 8007\text{mm}$$

$$v_z = 1,2\text{m/s}$$

$$\bar{h} = 190\text{mm (prosječna visina spremnika)}$$

$$t_{a/d} = t_{d/a} = 2\text{s}$$

$$p = 3\text{s}$$

n - broj artikala koji će se izuzimati ($n = 15$)

m - broj spremnika koje sadrži modul ($m = (2H - h_3) / \bar{h} = 96$)

1. Vrijeme izuzimanja VLM-a

$$E^V [R(n, m)] = T[SC] + (E[S(n, m)] - 1) \cdot T[DC] + T[SC]$$

a) Vrijeme jednostrukog ciklusa VLM-a

$$T[SC] = E[SC] + 2t_{a/d} + 2t_{p/d} = 6,91 + 4 + 4 = 14,91s$$

$$E[SC] = \sum_{i=1}^3 2t_i p_i = 2 \cdot (3,92 \cdot 0,871 + 0,296 \cdot 0,091 + 0,347 \cdot 0,039) = 6,91s$$

$$t_1 = (h_3 + h_1 / 2) / v = 3,92s$$

$$t_2 = (h_3 / 2) / v = 0,296s$$

$$t_3 = (h_2 / 2) / v = 0,347s$$

$$p_1 = 2h_1 / (2H - h_3) = 0,871$$

$$p_2 = 2h_2 / (2H - h_3) = 0,091$$

$$p_3 = h_3 / (2H - h_3) = 0,039$$

b) Vrijeme dvostrukog ciklusa VLM-a

$$T[DC] = E[DC] + 3t_{a/d} + 4t_{p/d} = 23,532s,$$

što odgovara protoku od 152,9 spremnika po satu.

$$E[DC] = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (t_i + tb_{ij} + t_j) q_{ij} = 7,633 + 2 \cdot 0,673 + 2 \cdot 0,27 + 0,0043 + 2 \cdot 0,0045 + 0,00042 = 9,532s$$

$$tb_{11} = (h_1 / 3) / v = 2,222s$$

$$tb_{12} = (h_1 / 2 + h_3 + h_2 / 2) / v = 4,275s$$

$$tb_{13} = (h_1 / 2 + h_2 / 2) / v = 3,681s$$

$$tb_{21} = tb_{12}$$

$$tb_{22} = (h_2 / 3) / v = 0,231s$$

$$tb_{23} = (h_2 / 2 + h_3 / 2) / v = 0,643s$$

$$tb_{31} = tb_{13}$$

$$tb_{32} = tb_{23}$$

$$tb_{33} = (h_3 / 3) / v = 0,197s$$

$$q_{11} = p_1 p_1 = 0,75864$$

$$q_{12} = p_1 p_2 = 0,07926$$

$$q_{13} = p_1 p_3 = 0,03396$$

$$q_{22} = p_2 p_2 = 0,00828$$

$$q_{23} = p_2 p_3 = 0,00355$$

$$q_{33} = p_3 p_3 = 0,00152$$

- c) Očekivani broj spremnika u sustavu s m spremnika koji moraju biti dostavljeni da se izuzme n proizvoda, $E[S(n, m)]$

$$E[S(n, m)] = \sum_{k=0}^{m-1} (m-k) \cdot p_k(m, n) = 9,681$$

$$p_k(m, n) = \frac{m!}{k!(m-k)!} \sum_{j=0}^{m-k} (-1)^j \cdot \frac{(m-k)!}{j!(m-k-j)!} \cdot \left(1 - \frac{j+k}{m}\right)^n$$

2. Vrijeme komisioniranja

$$E^V[P(n, m)] = np = 15 \cdot 3 = 45s$$

3. Očekivano vrijeme komisioniranja n proizvoda iz VLM-a sa m spremnika:

$$E^V[R(n, m)] = 2T[SC] + (E[S(n, m)] - 1) \cdot T[DC] + np = 279,1s$$

3.3. Model protoka za sustav vertikalnih podiznih modula

Model protoka za sustav vertikalnih podiznih modula u određenoj mjeri se razlikuje od modela za samostalnih vertikalni podizni modul. U slučaju sustava vertikalnog podiznog modula koji se sastoji od više jedinica, moguća je situacija da i operater/komisioner i modul rade u isto vrijeme – za razliku od samostalnog VLM-a gdje samo jedan dio sustava čovjek-stroj može raditi u nekom trenutku. Već se u ovom trenutku može pretpostaviti značajna ušteda u vremenu, a na slijedećim stranicama bit će objašnjen model protoka kojim će se prikazati upotreba komisionera u sustavu vertikalnih podiznih modula. Tada će se prikazati upotreba tog modela kako bi se predvidjelo vrijeme potrebno za komisioniranje grupe artikala. Temeljni model, tzv. model zatvorene mreže s čekanjem, preuzet je od Gelenbe-a [12], a koji je ideju za model razvio na temelju istraživanja, odnosno modela koji su prezentirali Bozer i White [3].

Osnovni model koji se koristi za modeliranje sustava i određivanje protoka sustava vertikalnih podiznih modula jednak je modelu za vertikalne i horizontalne karusele, ali se koriste različiti podaci da bi se prilagodila rješenja. Razvoj modela prikazan je u nastavku. Označit će se očekivano vrijeme korištenja komisionera sa $E[PU]$ i pretpostavit će se daje to vrijeme određeno (u slijedećem poglavlju bit će objašnjen model za izračunavanje $E[PU]$).

Oznake za prosječno vrijeme izuzimanja spremnika sa lokacije $E^V[R(n,m)]$ i prosječno vrijeme izuzimanja iz spremnika od strane komisionera $E^V[P(n,m)]$ koristit će se i pri modeliranju sustava vertikalnih podiznih modula, te se njihove vrijednosti poklapaju sa izrazima (5) i (8) iz prethodnog poglavlja. Vrijeme pokretanja/zaustavljanja modula da bi se omogućilo izuzimanje iz spremnika $E[S(n,m)]$ prema izrazu (7) također će se iskoristiti u ovom modelu. Na kraju, mora se dodati i vrijeme potrebno za kretanje komisionera od trenutnog do slijedećeg otvora za izuzimanje, odnosno od jednog do drugog vertikalnog podiznog modula u sustavu. To se vrijeme mora uračunati u model protoka, a označit će se sa w i pretpostavit će se da je konstantno i traje određeni broj vremenskih jedinica.

Ono što se želi izračunati ovim modelom je očekivano trajanje ciklusa da se komisionira n artikala iz sustava koji se sastoji od c vertikalnih podiznih modula sa m skladišnih lokacija po spremniku. To se očekivano vrijeme označava sa $E^V[T(c,n,m)]$. Prema proračunu tada slijedi:

$$E^V[T(c,n,m)] = \frac{c}{E[PU]} [E[S(n,m)] \cdot (E^V[P(n,m)] + w)] \quad (11)$$

Ovaj se izraz tada može iskoristiti da se izračuna približno vrijeme upotrebe vertikalnih podiznih modula kao:

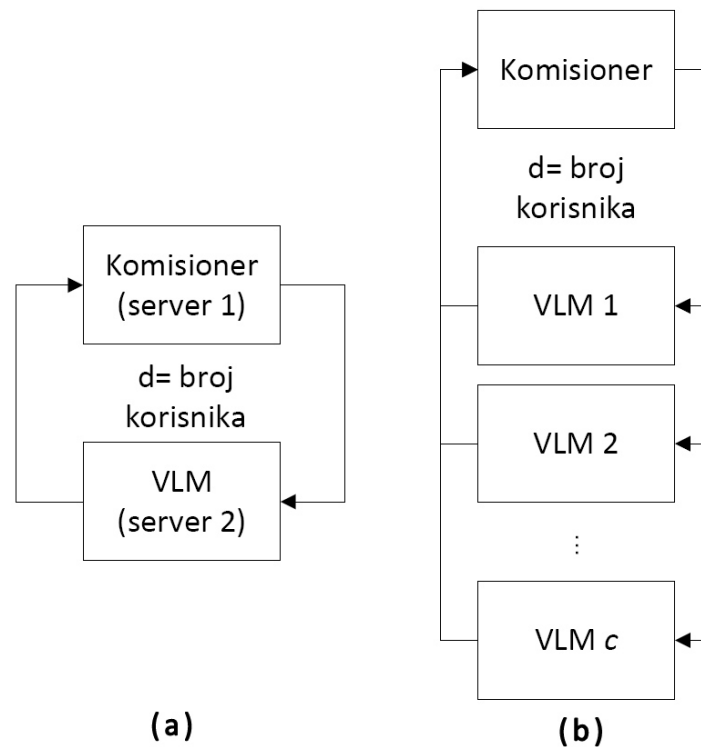
$$E[VU] = \frac{(E[S(n,m)] \cdot E^V[R(n,m)])}{E^V[T(c,n,m)]} \quad (12)$$

Kada je poznat model po kojem se izračunava protok, može se odrediti vrijeme ciklusa, odnosno protok sustava vertikalnih podiznih modula. No, u ovom je modelu pretpostavljeno da je vrijeme korištenja komisionera određeno. U slijedećem poglavlju bit će objašnjen model određivanja vremena korištenja komisionera.

3.3.1. Zatvoreni ciklički model reda čekanja za dinamičke sustave

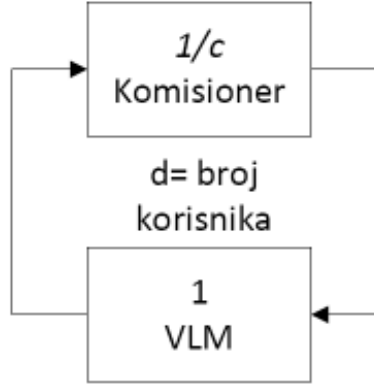
U dinamičkim sustavima komisioniranja u koje se svrstava i sustav vertikalnih podiznih modula, komisioner je server koji se kreće od jednog prema drugom vertikalnom podiznom modulu izuzimajući artikle kako bi ispunio zadane narudžbe ili grupe narudžbi. U globalu, redoslijed obilaska se odvija prema već spomenutom RR algoritmu, odnosno bez prioriteta, no u nekim slučajevima krši se takav redoslijed obilaska. Treba primjetiti da su vertikalni podizni moduli također serveri u sustavu, a zahtjevi koje slijedeći modul mora izvršiti se

generiraju kad komisioner završi izuzimanje na trenutnom modulu. Upravo zbog ove činjenice može se iskoristiti zatvoreni ciklički model reda čekanja s dva servera za modeliranje sustava vertikalnih podiznih modula. Shema takvog sustava može se vidjeti na slici 23. .



Slika 26. Zatvoreni ciklički model reda čekanja s dva servera: (a) općenito, (b) sustav VLM-ova

Sustav na slici 23.(b) je onaj za kojeg se razvija ovaj model, a sastoji se od jednog komisionera i c vertikalnih podiznih modula. Nažalost, zatvoreni ciklički model reda čekanja s dva servera koji je razvio Gelenbe ne može se iskoristiti pri modeliranju takvih sustava, a prema dostupnim podacima općenito ne postoji ni jedan drugi model koji bi mogao direktno predvidjeti ponašanje ovakvog sustava. Kako bi se ipak omogućilo modeliranje ovakvih sustava, aproksimirat će se sustav na slici 23.(b) kao sustav s jednim vertikalnim podiznim modulom kojeg opslužuje komisioner sa kapacitetom $\frac{1}{c}$. Shema ovakvog sustava može se vidjeti na slici 24. .



Slika 27. Približno točna aproksimacija zatvorenog cikličkog modela reda čekanja s dva servera

Slijedeći parametri bit će potrebni za određivanje vremena korištenja komisionera $E[PU]$ u sustavu sa c brojem vertikalnih podiznih modula, a koji nam je potreban da bi se izračunao model protoka objašnjen u prethodnom poglavlju:

$$\lambda = 1 / E^V [R(n, m)] \quad (13)$$

$$\mu = 1 / [c((E^V [P(n, m)] + w) + W)] \quad (14)$$

$$\rho = \lambda / \mu \quad (15)$$

$$\alpha = \lambda^3 V_R + c \mu^3 V_p \quad (16)$$

$$\beta = 2(\lambda - \mu) / \alpha \quad (17)$$

$$\Omega = \rho / (1 - \rho^2 e^{\beta(d(c)-1)}) \quad (18)$$

gdje W predstavlja prosječno vrijeme čekanja komisionera nakon što stigne do modula da izuzme potrebne artikle. Da bi se odredila vrijednost W , iskoristit će se podaci dobiveni u istraživanju Bozera i Whitea, prema kojem je:

$$W = (1 - E(PU))E[t'] \quad (19)$$

gdje je $E[t'] = E^V [R_s(n, m)]^2 / (2E^V [R(n, m)])$, a $E^V [R_s(n, m)]^2 = V_R + E^V [R(n, m)]^2$. Nadalje, prema jednadžbi (16), potrebni su podaci o varijanci prosječnog vremena trajanja rukovanja spremnicima V_R , odnosno o varijanci prosječnog vremena potrebnog komisioneru za izuzimanje V_p . Prema literaturi [x]:

$$V_R = [E^V [R(n, m)] \cdot (0,21504 - 0,00505n + 0,0024E^V [T(n, m)])]^2 \quad (20)$$

$$V_p = (0,4324E^V [P(n,m)])^2 \quad (21)$$

Potrebno je još odrediti vrijednost $d(c)$, odnosno broj korisnika u mreži sa zatvorenim redom čekanja. Može se zaključiti da je u mreži jedan korisnik zato što na svakom vertikalnom podiznom modulu radi ili modul ili komisioner (tj. određeni vertikalni podizni modul se ne može kretati u isto vrijeme kad komisioner izuzima na njegovom otvoru za izuzimanje). Vrijednost $d(c)$ može se odrediti preko slijedećeg linearnog modela:

$$d(c) = 1 + \gamma_c \left(\frac{P + w}{E^V [R(n,m)] / c - 1} \right) \quad (22)$$

Vrijednosti γ_c dane su u tablici:

Tablica 2. Vrijednosti γ_c u oblikovanju sustava komisioniranja s VLM-ovima

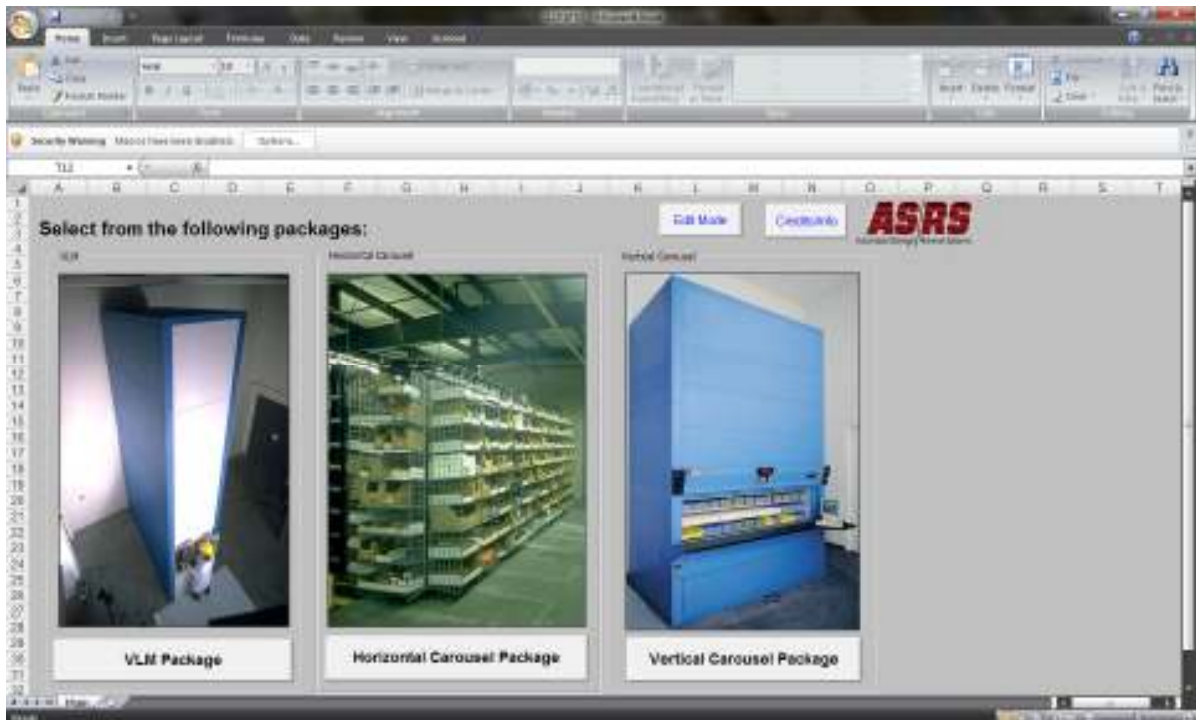
c	γ_c
2	0,0799
3	0,0661
4	0,0656

3.4. Programsko sučelje za oblikovanje sustava komisioniranja s vertikalnim podiznim modulima

Kako je već spomenuto, svaki od proizvođača vertikalnih podiznih modula nudi osnovni model prema kojem se oblikuje sustav s vertikalnim podiznim modulima, kao i simulacijske modele za oblikovanje sustava, ti modeli nisu dostupni studentima, inženjerima u praksi, kao ni istraživačima. Trenutno jedini dostupan računalni alat za oblikovanje sustava komisioniranja s VLM-ovima razvijen je na Tehničkom sveučilištu u Virginiji, SAD, za potrebe radne grupe koja djeluje u sklopu najveće svjetske organizacije za rukovanje materijalom, MHIA-e⁶. Alat za oblikovanje sustava s vertikalnim podiznim modulima jedan je u skupu od tri alata u programskom sučelju. Preostala dva čine alati za oblikovanje sustava komisioniranja iz vertikalnih i horizontalnih karusela. Svrha je alata da omogući brzo određivanje potrebnog prostora i mogućnosti protoka za razne konfiguracije sustava, ovisno o potražnji budućih korisnika. Ovaj se alat temelji na modelima protoka koji su opisani u

⁶ Material Handling Industry of America

prethodnim poglavljima, te se može reći da oni čine osnovni algoritam po kojem alat računa nakon zadavanja osnovnih parametara. Cijeli je paket napisan u bazi Microsoftova Excela (pomoću makro editora), a u slijedećim će odlomcima biti pobliže opisan njegov dio za oblikovanje sustava komisioniranja s vertikalnim podiznim modulima.



Slika 28. Početni prikaz prilikom otvaranja računalnog paketa za oblikovanje sustava

Nakon otvaranja programa pomoću Microsoft Excela, odabire se podpaket za oblikovanje sustava komisioniranja s vertikalnim podiznim modulima. Potrebno je uključiti makronaredbe, jer je program za oblikovanje napisan u Excelovu makro editoru. Nakon otvaranja VLM paketa, potrebni su ulazni podaci kako bi se za njih generirao izlaz. Najprije valja odrediti maksimalnu moguću visinu modula. Obično se tu uzima vrijednost visine stropa prostorije u koju želimo ugraditi sustav vertikalnih podiznih modula umanjena za vrijednost potrebnog razmaka između jedinice i stropa. Nakon određivanja maksimalne visine, mora se također znati i potrebna veličina spremnika, odnosno veličina (dužina, širina, visina) skladišnih lokacija. Također se moraju odrediti i sva obilježja dizala (vertikalna brzina v_z , vrijeme ubrzanja/usporenja, brzina izuzimanja spremnika iz lokacije), kao i vrijeme hodanja između jedinica. Program isto tako zahtijeva i definiranje načina odlaganja – slučajnim rasporedom ili unaprijed dodijeljenim lokacijama. Općenito, ukoliko se odabere skladištenje unaprijed dodijeljenim lokacijama algoritam računa tako da pretpostavlja da se artikli

visokog protoka skladište bliže otvoru za izuzimanje i takav će odabir rezultirati povećanim protokom. Međutim, u nekim slučajevima ovakav odabir će iziskivati veći potreban skladišni prostor. Paket koji se opisuje nema mogućnost takve prilagodbe, te korisnik mora računati s određenom greškom prilikom izračuna. Naravno, to nije jedino ograničenje na koje se mora ukazati. Kako je ovo u prvom redu alat koji će na brz način odrediti protok i potreban prostor za smještaj sustava vertikalnih podiznih modula, ukoliko se želi raditi proračun unatrag, odnosno određivanje ostalih parametara na temelju zahtijevanog protoka mora se uzeti u obzir da će izračun trajati duže i teško će se dobiti optimalno rješenje.

The screenshot shows the 'VLM Input' software interface within a Microsoft Excel spreadsheet. The interface is organized into several distinct panels, each with a red header:

- VLM Characteristics:** Contains input fields for Dimensions (VLM Height: 20.0, Tray Spacing: 28, Tray Width: 36, Tray Depth: 28), Operational Characteristics (Speed: 175, Acc./Deceleration: 2.0, Extraction Speed: 30, Walking Time: 2.0), and buttons for 'Back to Main' and 'Terminology'.
- Misc. Info:** Contains input fields for Order Info (Orders/Batch: 10, Lines/Order: 3.00, Items/Line: 1.00, Setup Time: 2) and Pod Info (VLMs/Pod: 4, Total # of Pods: 2).
- Random Storage?:** A section with a question about item storage and a 'Random' dropdown menu, with a 'Calculate Results' button.
- Pick Time:** Contains a question about pick time equality and input fields for Equal Pick Time (3) and Unequal Pick Time (3 and 5), with an 'Average Pick Time' of 3.4 seconds.
- VLM System Results:** A table comparing 'Each VLM' (Height: 20, Storage Volume: 245, Throughput: 93.0, Floorspace: 16.0) with '8 Total VLMs' (Storage Volume: 1,960, Throughput: 743.7, Floorspace: 128.0).
- Comparison Results (VLM System vs. Shelving System):** Shows 'Pickers: 33% Reduction' and 'Floorspace: 90% Reduction'.
- Comparable Shelving Picking System Results:** A table for '3 Total Pickers' (7 feet tall) with assumptions like 'Time per trip: 5.7 min', 'Picker tput: 317.6 lines/hr', and 'Throughput: 952.9 lines/hr'.

Slika 29. Sučelje alata za oblikovanje sustava s vertikalnim podiznim modulima

Nadalje, kod odabira pojedinih ulaznih parametara, nije moguće unošenje željenih vrijednosti, već se mora odabirati između ponuđenih vrijednosti u padajućem izborniku. Kako je sustav razvijen u Sjedinjenim Američkim Državama, potrebno je također pretvoriti jedinice prema SI sustavu, prema slijedećoj tablici:

Tablica 3. Pretvaranje potrebnih jedinica u SI sustav

Američki sustav mjera	SI sustav mjera
1 ft	0,3048 m
1 in	0,0254 m
1 fpm	0,00508 m/s
1 in/sec	0,0254 m/s

Za dobivanja izlaznih podataka također je potrebno definirati veličinu grupe narudžbi koja će se u jednom trenutku obrađivati u sustavu. Također je potrebno za svaku narudžbu definirati broj različitih artikala koji će se skladištiti, kao i broj prosječan broj jednakih artikala u svakoj narudžbi. Slijedeći potreban podatak je moguće vrijeme između grupa narudžbi. Izbor ove vrijednosti mogao bi se nazvati svojevrsnom sigurnošću pri oblikovanju ovakvog sustava i smislenim povećavanjem ove vrijednosti smanjivat će se ukupan protok kroz sustav. Posljednji ulazni podatak jest vrijeme potrebno komisioneru za izuzimanje. Ukoliko se u sustavu pojavljuju značajne razlike u dimenzijama uskladištenih artikala, gotovo je sigurno da će postojati razlika u vremenu izuzimanja između malih predmeta i nekih većih, nezgrapnih materijala. Ukoliko se modelira takav sustav, treba se odrediti raspon vremena potrebnih za izuzimanje.

Kada se definiraju potrebne karakteristike sustava s vertikalnim podiznim modulima (najčešće su to dimenzije i potreban protok), metodom pokušaja i simuliranjem raznih ulaznih podataka odabire se najbolje rješenje.

Program također ima mogućnost usporedbe korištenja odabranog sustava i komisioniranja iz sustava regala, te uz zadane parametre može približno izračunati i stopu prinosa uloženog kapitala (eng. ROI – return of investment), odnosno dobit po jedinici uloženog kapitala u odnosu na komisioniranje u regalnim sustavima.

3.4.1. Primjer određivanja protoka VLM-a pomoću programskog paketa

Ovim primjerom prikazat će se kako se pomoću programskog paketa može odrediti protok i potrebna površina za vertikalni podizni modul s jednim operaterom. Za primjer su iskorišteni podaci o vertikalnom podiznom modulu ugrađenom u tvrtci D.B.T.:

$$h_2 = 833\text{mm}$$

$$h_3 = 710\text{mm}$$

$$H = 9550\text{mm} \approx 32\text{ft}$$

$$h_1 = H - h_2 - h_3 = 8007\text{mm}$$

$$\bar{h} = 190\text{mm} \text{ (prosječna visina spremnika)} \approx 8\text{in}$$

$$t_{a/d} = t_{d/a} = 2\text{s}$$

$$p = 3\text{s}$$

$$\checkmark_{\text{spremnik}} = 2450\text{mm} \approx 95\text{in}$$

$$d_{\text{spremnik}} = 812,8\text{mm} \approx 32\text{in}$$

$$v_z = 1,2\text{m/s} \approx 225\text{fpm}$$

$$t_{a/d} = 2\text{s}$$

$$v_{x,\text{pretpostavljeno}} = 0,635\text{m/s} \approx 25\text{in/sec}$$

n - broj artikala koji će se izuzimati ($n = 15$)

Slika 30. Karakteristike VLM-a u softveru

Kako se u ovom primjeru radi o samostalnom uređaju, vrijeme hodanja između modula je nula sekundi. Program ima ograničenje prilikom izračunavanja, tako da je potrebno stvarne vrijednosti prilagoditi onim koje je moguće izabrati u padajućim izbornicima. Kako bi se dostigla veća sigurnost u računu, sve vremenske dimenzije i dimenzije su zaokružene na prvu veću dostupnu brojku, dok su brzine zaokružene na manji broj.

Slika 31. Vrijeme izuzimanja komisionera u softveru

Pretpostavljeno je da su vremena izuzimanja za sve lokacije približno jednaka i iznose 2 sekunde. Ukoliko bi se radilo o dimenzijski izrazito različitim artiklima koji bi se izuzimali s

različitim vremenima trajanja, bilo bi potrebno odabrati „No“ u izborniku i dodatno odrediti vrijednosti u desnom izborniku „Unequal Pick Time“.



Slika 32. Podaci o narudžbama u softveru

Određuje se broj, te prosječna veličina narudžbi, kao i broj artikala po retku narudžbi. Broj VLM-ova i operatera koji s njima rade može se odrediti u dijelu „Pod Info“. U ovom slučaju postoji 1 VLM i 1 komisioner.

Na kraju treba odrediti je li spremanje u VLM-u nasumično ili su artikli s većim protokom. Ukoliko nije, treba odrediti koji postotak izuzimanja dolazi s 20% najbližih lokacija. Nakon zadavanja parametara, može se pritisnuti tipka „Calculate Results“ da bi se vidjeli rezultati.



Slika 33. Odabir načina skladištenja u softveru

VLM System Results			
1 Total Pickers		1 Total VLMs	
Each VLM			
Height (ft)	32		
Storage Volume (ft ³)	1.295	Storage Volume (ft ³)	1.295
Throughput (lines/hr)	115,1	Throughput (lines/hr)	115,1
Floorspace (ft ²)	44,9	Floorspace (ft ²)	44,9

Slika 34. Rezultati oblikovanja u softwaeu

Ako dobiveni rezultat o protoku od 115,1 jedinica po satu usporedimo sa protokom izračunatim sa točnim podacima analitički u poglavlju 3.2.2 (152,9 jedinica/h), možemo zaključiti kako je zaokruživanje vrijednosti zbog ograničenja softwarea uzrokovalo znatnu pogrešku od 37,8 jedinica po satu. Također se iz rezultata može vidjeti da je zaokruživanje smanjilo procijenjeni protok.

4. TESTIRANJE PROGRAMSKOG PAKETA

U ovom će se dijelu rada predstaviti rezultati testiranja programskog paketa za oblikovanje sustava komisioniranja. Proučavat će se ponašanje protoka uz varijaciju ulaznih parametara na 30 različitih slučajeva. Mijenjat će se visina VLM-a, brzina dizala, visina spremnika, vrijeme izuzimanja, te broj artikala za komisioniranje. Slijedi popis slučajeva koji su se razmatrali i rezultata do kojih se došlo.

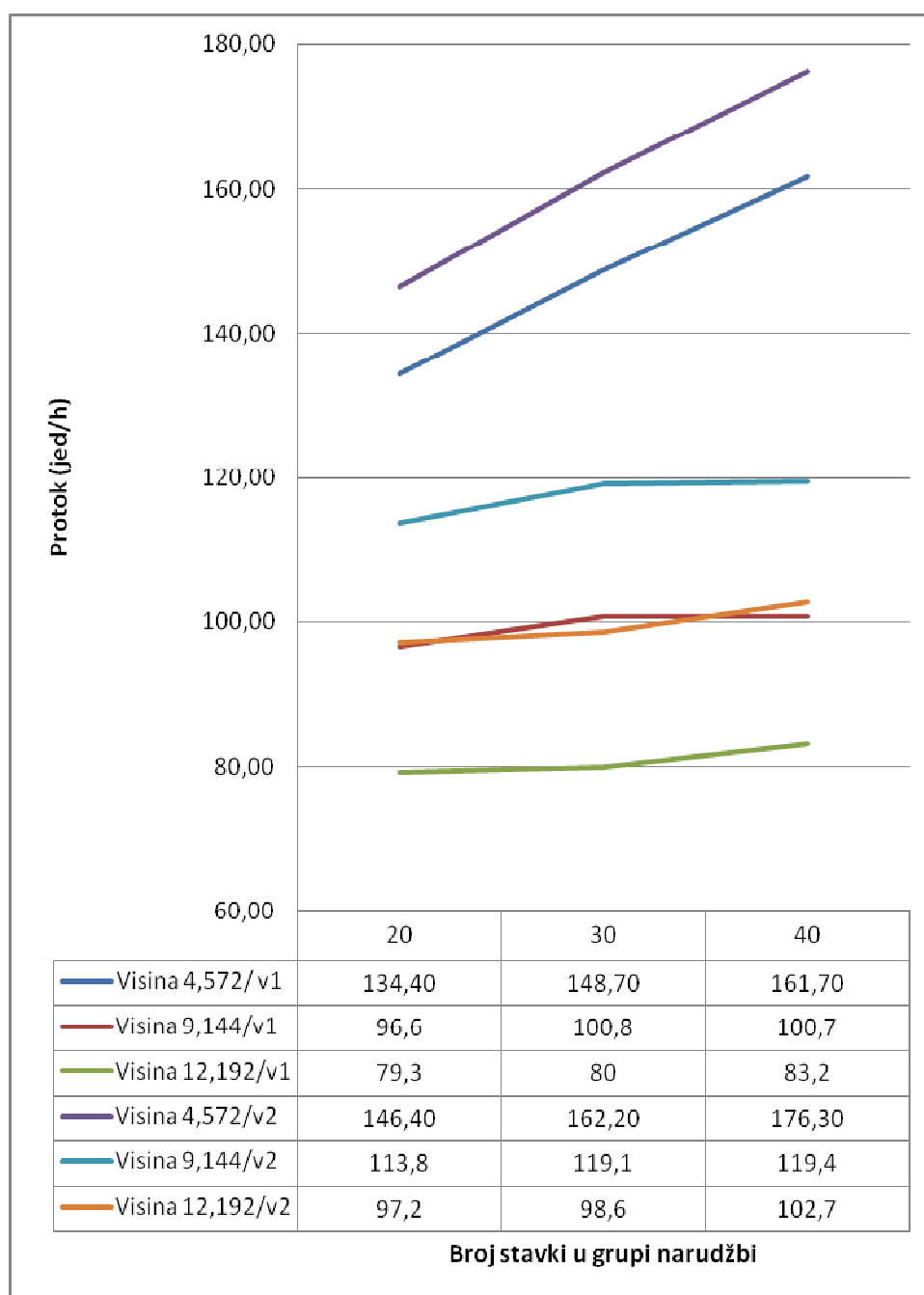
Tablica 4. Rezultati testiranja programskog paketa

	Visina VLM (ft)	Visina (m)	Visina spremnika (in)	Visina spremnika (m)	Brzina (fpm)	Brzina (m/s)	Vrijeme izuzimanja (s)	Broj artikala za izuzimanje	Protok (jed/h)	T (R), (s)
1	15	4,572	6	0,1524	150	0,762	5	20	134,4	535,71
2	15	4,572	6	0,1524	150	0,762	5	30	148,7	726,29
3	15	4,572	6	0,1524	150	0,762	5	40	161,7	890,54
4	15	4,572	6	0,1524	150	0,762	10	20	113,2	636,04
5	15	4,572	6	0,1524	150	0,762	10	30	123,3	875,91
6	15	4,572	6	0,1524	150	0,762	10	40	132,1	1090,08
7	15	4,572	6	0,1524	250	1,27	5	20	146,4	491,80
8	15	4,572	6	0,1524	250	1,27	5	30	162,2	665,84
9	15	4,572	6	0,1524	250	1,27	5	40	176,3	816,79
10	15	4,572	6	0,1524	250	1,27	10	20	121,7	591,62
11	15	4,572	6	0,1524	250	1,27	10	30	132,4	815,71
12	15	4,572	6	0,1524	250	1,27	10	40	141,6	1016,95
13	30	9,144	6	0,1524	150	0,762	5	20	96,6	745,34
14	30	9,144	6	0,1524	150	0,762	5	30	100,8	1071,43
15	30	9,144	6	0,1524	150	0,762	5	40	100,7	1429,99
16	30	9,144	6	0,1524	150	0,762	10	20	88,4	814,48
17	30	9,144	6	0,1524	150	0,762	10	30	88,4	1221,72
18	30	9,144	6	0,1524	150	0,762	10	40	88,4	1628,96
19	30	9,144	6	0,1524	250	1,27	5	20	113,8	632,69
20	30	9,144	6	0,1524	250	1,27	5	30	119,1	906,80
21	30	9,144	6	0,1524	250	1,27	5	40	119,4	1206,03
22	30	9,144	6	0,1524	250	1,27	10	20	98,2	733,20
23	30	9,144	6	0,1524	250	1,27	10	30	102,2	1056,75
24	30	9,144	6	0,1524	250	1,27	10	40	102,4	1406,25
25	40	12,192	6	0,1524	150	0,762	5	20	79,3	907,94
26	40	12,192	6	0,1524	150	0,762	5	30	80	1350,00
27	40	12,192	6	0,1524	150	0,762	5	40	83,2	1730,77

28	40	12,192	6	0,1524	150	0,762	10	20	71,4	1008,40
29	40	12,192	6	0,1524	150	0,762	10	30	72	1500,00
30	40	12,192	6	0,1524	150	0,762	10	40	74,6	1930,29
31	40	12,192	6	0,1524	250	1,27	5	20	97,2	740,74
32	40	12,192	6	0,1524	250	1,27	5	30	98,6	1095,33
33	40	12,192	6	0,1524	250	1,27	5	40	102,7	1402,14
34	40	12,192	6	0,1524	250	1,27	10	20	85,6	841,12
35	40	12,192	6	0,1524	250	1,27	10	30	86,7	1245,67
36	40	12,192	6	0,1524	250	1,27	10	40	89,9	1601,78
37	15	4,572	12	0,3048	150	0,762	5	20	150,3	479,04
38	15	4,572	12	0,3048	150	0,762	5	30	175,1	616,79
39	15	4,572	12	0,3048	150	0,762	5	40	198,1	726,91
40	15	4,572	12	0,3048	150	0,762	10	20	124,4	578,78
41	15	4,572	12	0,3048	150	0,762	10	30	140,9	766,50
42	15	4,572	12	0,3048	150	0,762	10	40	155,4	926,64
43	15	4,572	12	0,3048	250	1,27	5	20	163,1	441,45
44	15	4,572	12	0,3048	250	1,27	5	30	189,8	569,02
45	15	4,572	12	0,3048	250	1,27	5	40	214,2	672,27
46	15	4,572	12	0,3048	250	1,27	10	20	133	541,35
47	15	4,572	12	0,3048	250	1,27	10	30	150,2	719,04
48	15	4,572	12	0,3048	250	1,27	10	40	165,1	872,20
49	30	9,144	12	0,3048	150	0,762	5	20	106,8	674,16
50	30	9,144	12	0,3048	150	0,762	5	30	117,8	916,81
51	30	9,144	12	0,3048	150	0,762	5	40	127,4	1130,30
52	30	9,144	12	0,3048	150	0,762	10	20	93	774,19
53	30	9,144	12	0,3048	150	0,762	10	30	101,2	1067,19
54	30	9,144	12	0,3048	150	0,762	10	40	108,2	1330,87
55	30	9,144	12	0,3048	250	1,27	5	20	125,2	575,08
56	30	9,144	12	0,3048	250	1,27	5	30	138,2	781,48
57	30	9,144	12	0,3048	250	1,27	5	40	149,4	963,86
58	30	9,144	12	0,3048	250	1,27	10	20	106,6	675,42
59	30	9,144	12	0,3048	250	1,27	10	30	116	931,03
60	30	9,144	12	0,3048	250	1,27	10	40	123,7	1164,11
61	40	12,192	12	0,3048	150	0,762	5	20	90,5	795,58
62	40	12,192	12	0,3048	150	0,762	5	30	97,5	1107,69
63	40	12,192	12	0,3048	150	0,762	5	40	92,8	1551,72
64	40	12,192	12	0,3048	150	0,762	10	20	80,4	895,52
65	40	12,192	12	0,3048	150	0,762	10	30	85,9	1257,28
66	40	12,192	12	0,3048	150	0,762	10	40	82,2	1751,82
67	40	12,192	12	0,3048	250	1,27	5	20	110,2	653,36

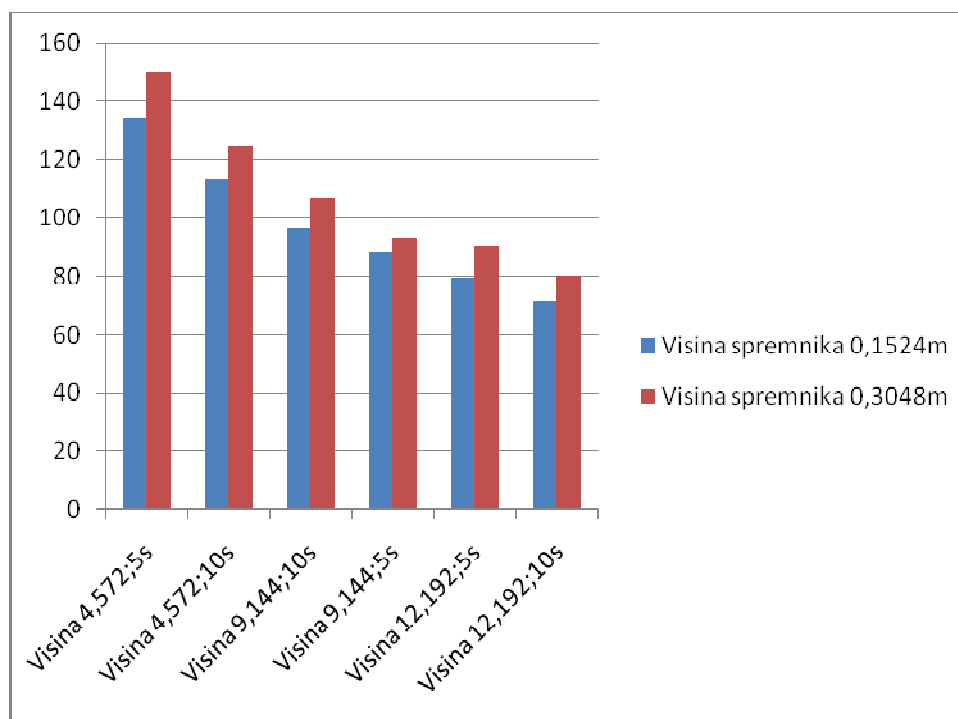
68	40	12,192	12	0,3048	250	1,27	5	30	119	907,56
69	40	12,192	12	0,3048	250	1,27	5	40	114	1263,16
70	40	12,192	12	0,3048	250	1,27	10	20	95,6	753,14
71	40	12,192	12	0,3048	250	1,27	10	30	102,1	1057,79
72	40	12,192	12	0,3048	250	1,27	10	40	98,4	1463,41

U nastavku je dana grafička analiza rezultata testiranja. Promatran je utjecaj varijabli visine modula, visine spremnika, brzine, vremena izuzimanja i veličine narudžbi na ponašanje protoka.



Grafikon 3. Utjecaj promjene visine regala i broja stavki na protok

Na prethodnom grafikonu prikazano je ponašanje protoka pri povećanju brzine ($v_{z1} = 0,762\text{m/s}$; $v_{z2} = 1,27\text{m/s}$). Vrijeme izuzimanja je konstantno i iznosi 5s, kao i visina spremnika ($h_s = 0,1524\text{m}$). Vidljivo je povećanje protoka povećanjem brzine dizala, pri čemu je to povećanje linearno, te su linije protoka koje se razlikuju samo po brzinama paralelne. Zanimljivo je promotriti nagibe krivulja ukoliko pratimo povećanje broja stavki u grupi narudžbi (*eng. batch*) i povećanje visine spremnika. Kod VLM-a visine 4,572m može se primjetiti znatan porast protoka uslijed povećanja broja stavki u grupi narudžbi. Razlog takvom rastu jest upravo vrijednost $E[S(n,m)]^7$, odnosno očekivani broj spremnika u sustavu s m spremnika koji moraju biti dostavljeni da se izuzme n proizvoda. Kako je broj spremnika u sustavu ovisan o visini samog modula i visini lokacije (koja je konstantna pri ovom razmatranju), jasno je da u sustavu manje visine postoji manji broj spremnika. Kako povećavamo broj stavki u grupi narudžbi, veća je vjerojatnost da će se više artikala moći komisionirati iz jednog spremnika, te će modul raditi prosječno manji broj ciklusa – što će dakako povećavati protok. Također se može vidjeti da se u sustavima dane visine i brzina može očekivati protok u približnom rasponu 80-180 jedinica na sat.



Grafikon 4. Utjecaj visine spremnika i brzine izuzimanja komisionera na protok

⁷ vidi jednadžbu (7)

U grafikonu 4. grafički je prikazana ovisnost protoka o povećanju visine spremnika i povećanju vremena izuzimanja komisionera, uz zadržavanje stalne veličine narudžbi (20 artikala). Može se zaključiti da povećanjem visine spremnika raste protok (raste vjerojatnost da se veći broj artikala izuzima jednim ciklusom dizala), a smanjuje se povećanjem vremena izuzimanja komisionera.

Ukoliko želimo sustav visokog protoka, potrebno je u projektiranju sustava iskoristiti mogućnost korištenja ekstraktora s većom vertikalnom brzinom, kao i sa većom brzinom izvlačenja iz skladišne lokacije. Grupiranje narudžbi također povećava maksimalni protok, a mogućnost sustava da kreira optimalni režim izuzimanja donosi dodatno skraćenje dvostrukih ciklusa.

Kako je već navedeno u samom početku, pri detaljnom projektiranju sustava komisioniranja s vertikalnim podiznim modulima biti će potrebno razviti simulacijski model koji će uzeti u obzir promjena stohastičkih varijabli. Naime, rijetko će se u skladišnom sustavu pojavljivati narudžbe iste veličine, kao i ista veličina grupiranih narudžbi. Kreiranje simulacijskog modela omogućilo bi nasumično generiranje pojedinih varijabli i izračunavanje rezultata, što nije moguće ovim programskim paketom. On nije u mogućnosti izračunavati prosječne vrijednosti varijabli (sa njihovim standardnim devijacijama). Upravo razvojem simulacijskog modela mogla bi se postići veća sigurnost proračuna sustava komisioniranja vertikalnim podiznim modulima. Sve vrijednosti varijabli korištene u testiranju su pretpostavljene, te bi se njihovim mjerenjem u stvarnom okruženju u skladišnom sustavu također povećala točnost izračuna.

5. ZAKLJUČAK

U suvremenim tvrtkama kojima su minimalni troškovi poslovanja uz zadovoljavanje potreba kupaca primarni ciljevi, skladištenje se nameće kao izuzetno bitan i složen proces. Uz trendove komisioniranja sve manjih narudžbi i smanjivanja skladišnih zaliha u proizvodnji i distribuciji, može se reći kako klasična skladišna rješenja često više nisu u stanju biti konkurentna računalom upravljanim skladišnim sustavima.

Dostupnost sofisticiranog, a ipak sustava lakog za korištenje i upravljanje glavni je razlog za prihvaćanje i sve veću primjenu vertikalnih podiznih modula kao dinamičkih sustava skladištenja. Valja napomenuti da su se vertikalni podizni moduli u 30-tak godina njihova postojanja od jednostavnih skladišnih uređaja razvili u suvremene računalom upravljane modularne uređaje za skladištenje i komisioniranje. Korisnici vertikalnih podiznih modula i dalje pronalaze nove potrebe za primjenom takvih sustava koji su se pokazali kvalitetnom i ekonomičnom solucijom sustava za skladištenje i komisioniranje.

U ovom radu prikazan je aktualan stadij razvoja i primjene vertikalnih podiznih modula, koji će u budućnosti zasigurno dosegnuti neke sasvim nove razmjere zahvaljujući njihovoj ergonomiji, značajnoj uštedi prostora, velikoj sigurnosti skladištenja i komisioniranja, kao i povećanoj produktivnosti.

Može se reći kako će u budućnosti najvažniju ulogu u odabiru i implementiranju vertikalnih podiznih modula imati sposobnost zadovoljenja zahtjeva na skladišni kapacitet i protok. Predstavljen je model koji omogućava korisniku da odredi protok kroz vertikalni podizni modul ili sustav vertikalnih podiznih modula, a kako je taj isti model ugrađen u predstavljeni programski paket korisnik na relativno jednostavan način može odrediti osnovne parametre pri projektiranju sustava.

Daljnji razvoj ovog rada može uključiti izradu simulacijskih modela za pojedine sustave skladištenja s vertikalnim podiznim modulima, a ako se gleda šire, mogući razvoj svojevrsnog ekspertnog sustava koji će korisniku moći predložiti koja će izvedba sustava za skladištenje biti najpogodnija uz njegove uvjete.

6. LITERATURA

- [1] Romaine, E., „Dynamic Storage Systems“, *The Essentials of Material Handling: part 2 –The Basic Product Knowledge Program*, Material Handling Industry of America, Charlotte, North Carolina (2004)
- [2] Meller, R.D., and Klote, J.F., „A Throughput Model for Carousel/VLM Pods“, Virginia, (2003)
- [3] Bozer, Y. A., and White, J. A., „Design and Performance Models for End-of-Aisle Order Picking Systems“, *Management Science*, 36, 852-866 (1990)
- [4] Bozer, Y. A., and White, J. A., „A Generalized Design and Performance Analysis Model for End-of-Aisle Order-Picking Systems“, *IIE Transactions*, 28, 4, 271-280 (1996)
- [5] Meller, R. D., and Klote, J. F., „Carousel Pod Throughput Model: Pod Size of Two Carousels“, In *Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference 2002*. Institute of Industrial Engineers (2002)
- [6] Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., Frazelle, E. H., and Tanchoco, J. M. A., *Facilities Planning*, Wiley, New York, 4th edition (2010)
- [7] Đukić, G., Predavanja iz kolegija „Tehnička logistika“ i „Posebna poglavlja tehničke logistike“, Zagreb, (2010)
- [8] <http://www.kardex-remstar.com> – internetska stranica proizvođača opreme za skladišne sustave; datum pristupa 27.12.2010.
- [9] www.primatlogistika.hr – internetska stranica bivšeg hrvatskog zastupnika za Kardex vertikalne podizne module; datum pristupa 03.01.2011.
- [10] www.logomatika.hr – internetska stranica hrvatskog zastupnika za Kardex vertikalne podizne module; datum pristupa 03.01.2011.
- [11] www.mhia.org – internetska stranica udruge Material Handling Industry of America
- [12] Gelenbe, E., „On Approximate Computer System Models“, *Journal of ACM*, 22, 2, 261- 269 (1975).