

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Pašalić

Zagreb, 2015. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Ivan Pašalić

Zagreb, 2015. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru, profesoru Goranu Đukiću na korisnim savjetima pri izradi rada.

Ivan Pašalić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Pašalić**

Mat. br.: 0035188489

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza protoka vertikalnih podiznih modula**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Throughput analysis of Vertical Lift Modules**

Opis zadatka:

Jedna od izvedbi automatiziranih skladišnih sustava danas u primjeni su i vertikalni podizni moduli (eng. Vertical Lift Module, VLM). To su uređaji koji za odlaganje i izuzimanje uskladištene robe u spremnicima koriste lift, te robu dovode do čovjeka operatera odnosno komisionera. Osim izvedbi sa jednim prozorom za komisioniranje, u novije vrijeme proizvođači nude izvedbe i sa dva prozora za komisioniranje.

U radu je potrebno:

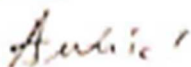
- Opisati izgled, osnovne dijelove i princip rada vertikalnih podiznih modula.
- Pojasniti prednosti primjene u odnosu na druge izvedbe skladišno-komisionih sustava.
- Prikupiti iz dostupnih digitalnih i tiskanih izvora te prikazati više primjera primjene spomenutih sustava.
- Prikazati razvijene modele oblikovanja – određivanja protoka VLM-ova za uređaje s jednim i dva prozora za komisioniranje.
- Usporediti protok te dvije izvedbe za različite vrijednosti parametara (brzina lifta, visina uređaja, vrijeme komisioniranja po spremniku) te komentirati dobijene rezultate.

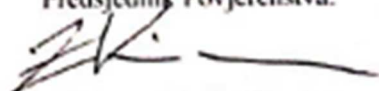
Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:


Izv.prof. dr.sc. Goran Đukić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI I LOGISTIKA.....	2
3. VERTIKALNI PODIZNI MODULI	3
3.1. Izvedbe vertikalnih podiznih modula.....	4
3.2. Dijelovi VLM-a.....	5
3.2.1. Spremnici	5
3.2.2. Otvori za izuzimanje	7
3.2.3. Pogonski sustavi.....	8
3.2.4. Upravljački sustavi.....	9
3.2.5. Dodatna oprema	10
3.3. Prednosti primjene	11
3.3.1. Ušteda podne površine	11
3.3.2. Povećanje produktivnosti	12
3.3.3. Ergonomičnost	13
3.3.5. Sigurnost robe	13
4. PODRUČJA PRIMJENE VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA	14
4.1. Inozemni primjeri.....	14
4.2. Primjeri u Hrvatskoj.....	17
5. MODELI OBLIKOVANJA VLM-ova.....	21
5.1. VLM sa jednim prozorom.....	21
5.2. VLM sa dva prozora	25
6. ANALIZA PROTOKA VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA	30
7. ZAKLJUČAK.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1.	Vertikalni podizni modul [2].....	3
Slika 2.	VLM-ovi sa jednim i sa dva ulaza [3].....	4
Slika 3.	Četvero-ulazni sustav s liftom koji može prelaziti između ulaza [3].....	4
Slika 4.	Ulaz sa dva prozora [4]	5
Slika 5.	Spremnik sa odjeljcima [3].....	6
Slika 6.	VLM sa običnim i sa izvučenim otvorom za izuzimanje [6]	7
Slika 7.	VLM-ovi sa više otvora za izuzimanje [3].....	8
Slika 8.	Varijante prijenosa: uže, zupčasti remen, zupčanik i lanac [3].....	9
Slika 9.	Ilustracija tipičnog kontrolnog sučelja [3].....	9
Slika 10.	Ilustracija uštede podnog prostora korištenjem VLM-a [3]	11
Slika 11.	VLM-ovi u Airbusu.....	14
Slika 12.	VLM-ovi u Baldi AG	15
Slika 13.	VLM-ovi u Mediatronicu	16
Slika 14.	Prozor VLM-a s mjernim alatima Teh-cuta	17
Slika 15.	VLM instaliran u Belupu d.d.....	18
Slika 16.	VLM u Podravci d.d. sa dva otvora.....	19
Slika 17.	VLM u skladištu D.B.T. d.o.o.....	20
Slika 18.	Bokocrt VLM-a- sa tipičnim odjeljcima	22
Slika 19.	Bokocrt <i>dual tray</i> VLM-a sa tipičnim odjeljcima	25
Slika 20.	Usporedba protoka u ovisnosti o visini (H), $v = 100$ cm/s ; $p_T = p_{T2}$	34
Slika 21.	Usporedba protoka u ovisnosti o brzini lifta (v); $H = 6000$ mm, $p_T = p_{T2}$	34
Slika 22.	Usporedba protoka u ovisnosti o prosječnom vremenu komisioniranja (p_T); $H = 6000$ mm, $v = 100$ cm/s	35
Slika 23.	Proširena usporedba protoka u ovisnosti o prosječnom vremenu komisioniranja (p_T); $H = 6000$ mm, $v = 100$ cm/s	37

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Usporedba neiskorištenog prostora tehnologija skladištenja [8].....	12
Tablica 2.	Standardna devijacija vremena vožnje dvostrukog ciklusa.....	27
Tablica 3.	Prosječna vremena vožnje, $E(DC)$, VLM-a sa jednim prozorom	30
Tablica 4.	Prosječna vremena vožnje, $E(DC)$, VLM-a sa dva prozora	31
Tablica 5.	Prosječno vrijeme dvostrukog ciklusa lifta VLM-a sa dva prozora $T(DC)$	31
Tablica 6.	Prosječno vrijeme izuzimanja po spremniku p_T , u ovisnosti o visini i brzini VLM-a	31
Tablica 7.	Vremena ciklusa sustava sa jednim prozorom $E(CT)$ (u sekundama).....	32
Tablica 8.	Vremena ciklusa sustava sa dva prozora $E(CT)$ (u sekundama)	32
Tablica 9.	Protok VLM-a sa jednim prozorom (u spremnicima po satu).....	33
Tablica 10.	Protok VLM-a sa dva prozora (u spremnicima po satu)	33
Tablica 11.	Povećanje protoka VLM-a sa dva prozora u odnosu na VLM sa jednim prozorom	33
Tablica 12.	Protok VLM-a sa jednim prozorom, s obzirom na 5 različitih p_T (u spremnicima po satu)	36
Tablica 13.	Protok VLM-a sa dva prozora, s obzirom na 5 različitih p_T (u spremnicima po satu)	36
Tablica 14.	Povećanje protoka VLM-a sa dva prozora u odnosu na VLM sa jednim prozorom (%).....	36

SAŽETAK

U ovom radu opisani su vertikalni podizni moduli. Nakon opisa područja tehničke logistike kojemu ovi uređaji pripadaju, prikazuju se detaljnije različite izvedbe, dijelovi, prednosti i nedostaci, te područja primjene. Glavni dio rada posvećen je modelima oblikovanja VLM-ova te se u radu analizira protok između dva različita tipa ovih sustava iz čega je na kraju donesen zaključak u kojim je to situacijama poželjno nabaviti VLM sa dva prozora za izuzimanje, a u kojim to i nema nekog smisla.

Ključne riječi: Vertikalni podizni moduli, Automatizirani skladišni sustavi, Tehnička logistika, Modeli oblikovanja vertikalnih podiznih modula

SUMMARY

This paper describes the vertical lift modules. After describing the areas of technical logistics which these devices belongs to, more detailed are shown: versions, components, advantages and disadvantages, and applications. The main part of the paper presents throughput models for VLM. Then, throughputs are analyzed between two different types of these systems from which it was eventually adopted conclusions in which situations it is desirable to acquire VLM with two pick windows, and in which situations it does not make sense.

Key words: Vertical lift module, AS / RS, Tehnical logistics, Throughput models of vertical lift modules

1. UVOD

Skladišta se pojavljuju u svakom proizvodnom sustavu, i bez obzira što predstavljaju trošak, a ne dodaju vrijednost proizvodu, ona su neophodna. Skladišta se ne pojavljuju samo u proizvodnim sustavima već i u neproizvodnim kao što je prodaja. S ciljem postizanja što veće produktivnosti i efikasnosti poduzeća, svi njegovi dijelovi, pa tako i skladišta, se nastoje modernizirati i unaprijediti. Glavni korak prema povećanju produktivnosti svakako je automatizacija. Danas postoji nekoliko različitih automatiziranih skladišnih sustava koji se mogu pronaći u uporabi a među njima su i vertikalni podizni moduli. Tema ovog rada su upravo vertikalni podizni moduli, te će u nastavku biti više riječi o njima.

Na samom početku rada definiran je smještaj VLM-ova unutar tehničke logistike, zatim su opisani VLM-ovi, njegovi dijelovi i izvedbe te su navedene glavne prednosti primjene ovih sustava. Nakon toga definirano je područje primjene ovih sustava te je prikazano nekoliko primjera primjene iz inozemstva ali i iz Republike Hrvatske. U glavnom dijelu rada prikazana su dva modela oblikovanja VLM-ova, za sustave sa jednim i sa dva prozora za izuzimanje. Primjenom tih modela napravljena je analiza i usporedba protoka ovih dviju vrsta VLM-ova, te su iz toga izvedeni zaključci o korisnosti nabavljanja VLM-ova sa dva prozora u odnosu na onaj sa jednim.

2. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI I LOGISTIKA

Logistika je funkcija odgovorna za kretanje materijala od dobavljača u organizaciju, kroz operacije unutar organizacije, te od organizacije prema kupcu. To je znanost i vještina pripreme, nabave, prijevoza, smještaja, održavanja, distribucije i upravljanja svim resursima i njihovim tokovima za uspješno vođenje poslovnih procesa i ostvarivanje poslovnih ciljeva [1]. Jedna od osnovnih zadaća je smještaj, tj. skladištenje materijala. Cilj skladištenja je vremensko i prostorno uravnoteženje tokova materijala. Postoje različiti tipovi skladišta kao što su: proizvodna skladišta, distribucijski centri maloprodaje, distribucijski centri rezervnih dijelova, distribucijski centri kataloške i web prodaje, skladišta logističkih operatera, skladišta robe kratkog vijeka. Iako su sa stajališta troškova skladišta izrazito nepovoljna, jer u njima materijal miruje i ne dobiva na vrijednosti, ona su u stvarnosti ipak neizbježna te su prisutna u gotovo svakoj organizaciji. Skladišta se ne mogu eliminirati iz logističkog lanca ali se zato mogu unaprijediti kako bi bila što produktivnija i kako bi se minimizirali troškovi skladištenja. S tim ciljem kroz povijest su se razvijale različite vrste skladišta i skladištenja, od podnog odlaganja, preko različitih vrsta regalnih skladišta pa sve do visoko-regalnih automatiziranih skladišnih sustava. Automatizirani skladišni sustavi (eng. *automated storage / retrieval systems*, AS/RS), u najopćenitijem smislu, obuhvaćaju razne izvedbe računalom upravljano odlaganja i izuzimanja iz skladišnih lokacija. Imaju tri primarne funkcije: skladištenje, ulaz/izlaz i komisioniranje. Pojavljuju se sredinom prošlog stoljeća sa ciljem smanjenja skladišne površine i skraćivanja potrebnog vremena za izuzimanje. Jedna od vrsta automatiziranih skladišnih sustava su i vertikalni podizni moduli (eng. *vertical lift modules*, VLM). Uvedeni su 1970-ih godina za skladišne i industrijske primjene. Prve verzije bile su prilično spore, namijenjene za lakša opterećenja čime je njihova primjena bila prilično ograničena. Kako su se mogućnosti primjene širile, tako si rasli i zahtjevi za novu generaciju vertikalnih podiznih modula koja je osigurala znatno veće kapacitete, inteligentna korisnička sučelja i povećanu radnu brzinu. Danas su vertikalni podizni moduli dosta razvijeni, imaju nekoliko prednosti koje ih čine boljima od drugih skladišnih sustava, te se poradi toga mogu naći jako različite vrste primjene.

3. VERTIKALNI PODIZNI MODULI

Vertikalni podizni moduli, ili prema nekim prijevodima vertikalni lift uređaji, su automatizirani skladišni sustavi koji služe za skladištenje i komisioniranje različitih dijelova, od malih i laganih pa do velikih i teških. Izvana imaju oblik kvadra koji je iznutra podijeljen u tri kolone (stupce).



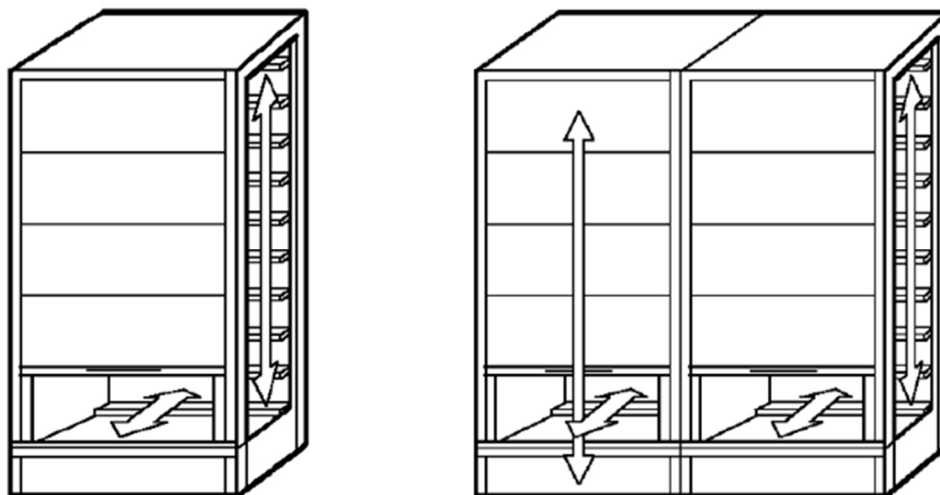
Slika 1. Vertikalni podizni modul [2]

Dvije vanjske kolone opremljene su držačima koji funkcioniraju kao police za spremnike u kojima se skladište predmeti, dok se srednjom kolonom vertikalno kreće elevator opremljen napravom za odlaganje i izuzimanje spremnika (inserter / ekstraktor). Kada operater naredi izuzimanje određene police, ona mu bude dostavljena za nekoliko sekundi u otvoru koji je optimalne visine za prihvat dijelova.

Iako se samo dva od tri stupca unutar VLM-a koriste za skladištenje, jedna od najvećih prednosti njihove upotrebe je ušteda prostora koja se kreće od 50% do 80% u odnosu na klasične police [3]. Osim uštede prostora prednosti VLM-a su i ergonomičnost, brzina izuzimanja te sigurnost skladištenja.

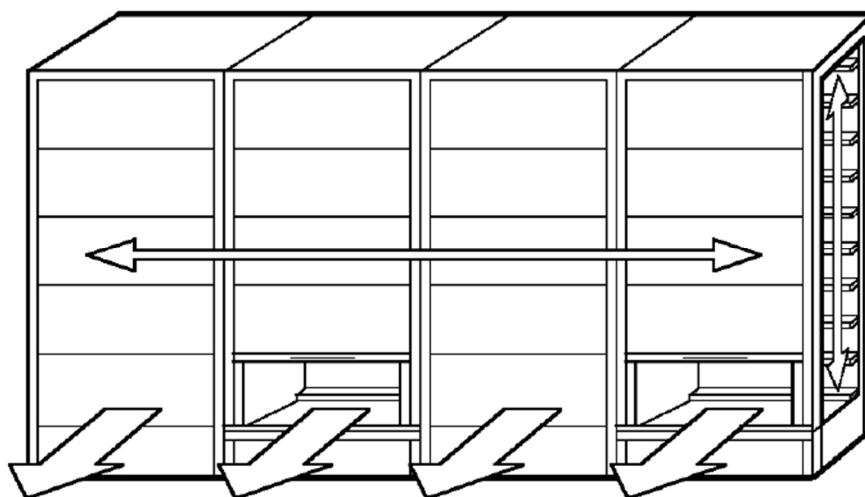
3.1. Izvedbe vertikalnih podiznih modula

Vertikalni podizni moduli su dostupni kao neovisni moduli (jedan lift po modulu) ili kao konfiguracija sa više ulaza. Na sljedećoj skici prikazan je neovisni modul, i dvo-ulazni sustav sa liftom u svakom ulazu.



Slika 2. VLM-ovi sa jednim i sa dva ulaza [3]

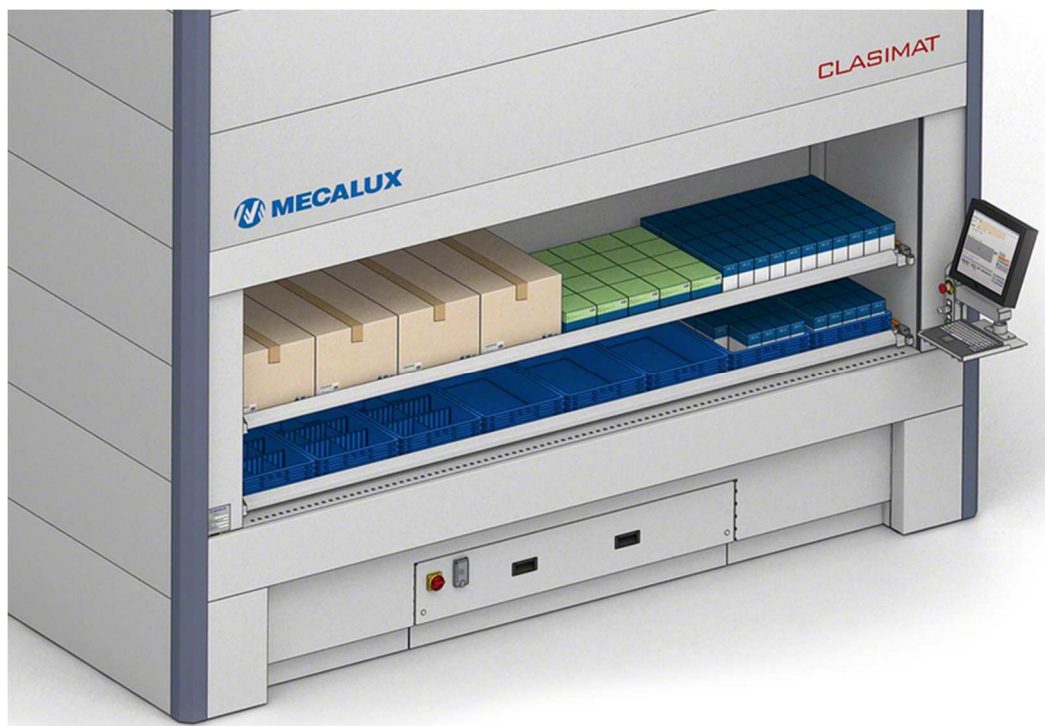
Ako zahtijevani protok nije prevelik a traži se veći kapacitet skladišta, tada se koristi varijanta sa više ulaza ali sa samo jednim liftom. Na sljedećoj skici je prikazan jedan takav uređaj sa četiri ulaza.



Slika 3. Četvero-ulazni sustav s liftom koji može prelaziti između ulaza [3]

U ovakvim sustavima lift se kreće između ulaza i poslužuje ih. Ova varijanta je jeftinija nego što bi bila da sva četiri ulaza imaju vlastiti lift ali zato joj je i protok znatno niži.

Osim u broju ulaza VLM-ovi se mogu razlikovati i u samim prozorima za komisioniranje. U novije vrijeme pojavile su se izvedbe sa dva prozora na jednom ulazu.



Slika 4. Ulaz sa dva prozora [4]

Ovakav uređaj dostavlja dva spremnika odjednom povećavajući na taj način protok.

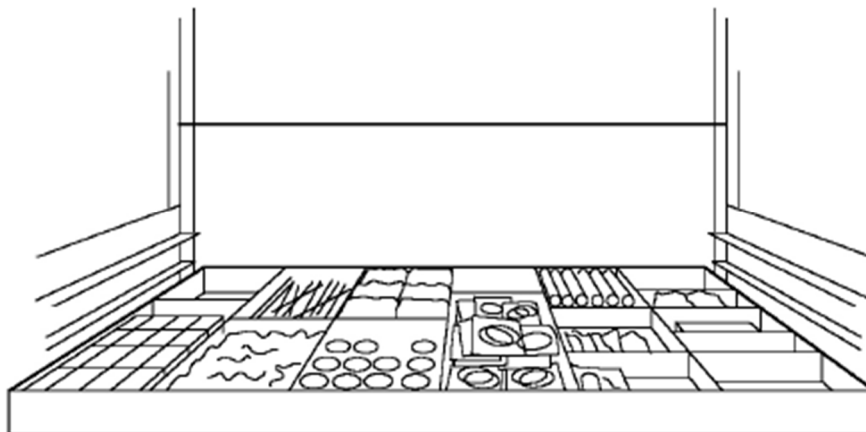
3.2. Dijelovi VLM-a

Kako je ranije napisano, vertikalni podizni moduli sastoje se od 3 paralelna vertikalna stupca, dva služe za skladištenje dijelova, dok srednji služi za kretanje lifta prilikom uskladištenja i izuzimanja tih dijelova. Kako bi se sve to moglo odvijati postoje još neki dijelovi i sustavi koji će biti u nastavku opisani.

3.2.1. Spremnici

Spremnici služe za skladištenje robe. Standardne veličine spremnika su: dubina od 610 mm do 860 mm, širina 610 mm do 3050 mm [3], dok visina raspoloživog prostora ovisi o razmaku spremnika te praktički nema ograničenja. Međutim neki proizvođači nude i VLM-ove sa većim

spremnica pa tako talijanska Modula nudi spremnike širine 4100 mm [5]. Nosivost spremnika je obično od 200 kg za male, pa do 800 kg za velike modele [3]. Što se tiče samog izgleda i konfiguracije spremnika, mogućnosti su praktički neograničene.



Slika 5. Spremnik sa odjeljcima [3]

Na slici 5 prikazan je jedan spremnik sa odjeljcima za skladištenje sitnih predmeta. Proizvođači nude neke standardne varijante spremnika ali također i mogućnost prilagodbe svakom individualnom slučaju.

Kada se govori o rasporedu spremnika unutar VLM-a, postoje 4 metodologije koje se mogu upotrijebiti kako bi se zadovoljili traženi zahtjevi i radni protoci [3]. Svaka metoda zahtjeva planiranje unaprijed kako bi se utvrdilo koja će pružiti najbolje rezultate. Međutim korisnik može lako promijeniti metodologiju u bilo koje vrijeme. Te 4 metodologije su:

- **Fiksna visina** – kod ove metodologije visina svakog spremnika je fiksna i programirana u upravljačko računalo. To omogućuje operateru da izračuna gdje će spremiti koji spremnik te tako maksimizira gustoću skladištenja. Ova je metoda pogodna za ustanove koje imaju uvijek jednake ili slične dijelove.
- **Optimalno skladištenje** – VLM pomoću senzora detektira visinu spremnika te sam odredi najbolju lokaciju. Ova metoda je idealna za ustanove koje često mijenjaju inventar.
- **Mješovita visina skladišta** – omogućuje operateru da izabere fiksnu ili optimalnu metodu. To omogućuje da se najčešće korišteni spremnici spremaju bliže otvoru za izuzimanje omogućujući veću propusnost bez ugrožavanja gustoće skladištenja.

- **Fiksna visina, slučajno skladištenje** – ova metoda je slična metodi mješovita visina skladišta, samo što svaki spremnik može imati određenu maksimalnu visinu. Metoda idealna ako su veličine dijelova slične pa se želi smanjiti mogućnost spremanja na krivu lokaciju.

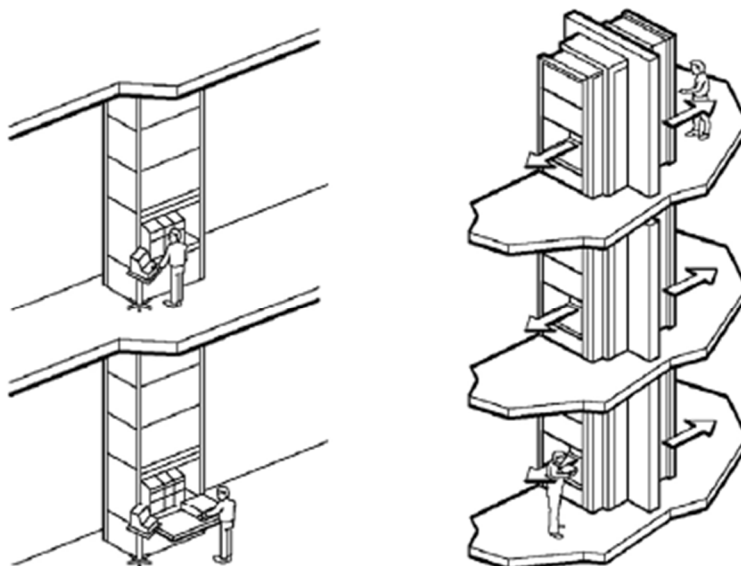
3.2.2. Otvori za izuzimanje

Otvor za izuzimanje je mjesto gdje operater preuzima ili ostavlja dijelove u spremnike. Ponekad se ta mjesta za preuzimanje izvuku van strukture VLM-a kako bi se dobila još bolja ergonomija i veća sigurnost za operatera jer se spremnik izvlači potpuno van strukture VLM-a. Nedostatak izvučenog otvora za izuzimanje je povećanje potrebne površine.



Slika 6. VLM sa običnim i sa izvučenim otvorom za izuzimanje [6]

Vertikalni podizni modul ne mora imati samo jedan otvor za izuzimanje nego ih može imati i više. Postoji mogućnost da se VLM proteže kroz nekoliko katova zgrade pa se otvori za izuzimanje mogu postaviti na svim katovima. Također postoje varijante sa dva otvora sa obje strane VLM-a gdje onda VLM preuzima ulogu „zida“ između dvije prostorije koje su sa njim povezane.

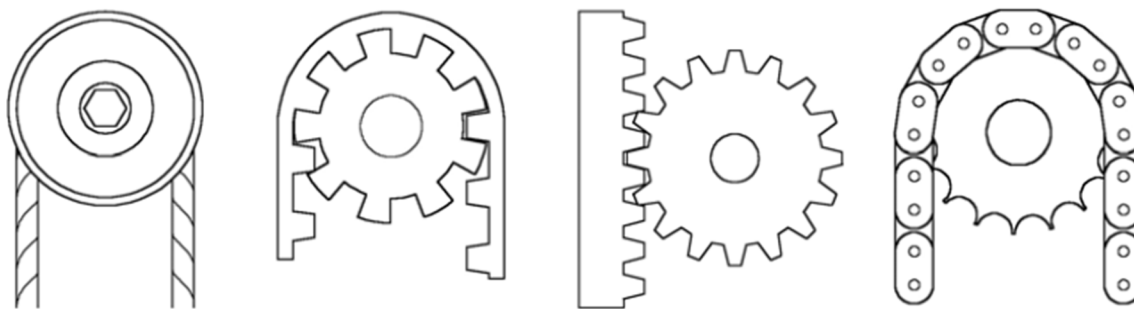


Slika 7. VLM-ovi sa više otvora za izuzimanje [3]

3.2.3. Pogonski sustavi

Vertikalni podizni moduli su pogonjeni AC ili DC elektromotorima. Obje varijante su sposobne za kontrolirano, postupno, ubrzavanje i usporavanje radi sigurnosti prilikom pohranjivanja i izuzimanja osjetljive robe. Potpuno opterećeni veliki industrijski VLM-ovi sposobni su nositi terete preko 900 kg istovremeno osiguravajući kontrolirano i precizno kretanje koje jamči da krhak i osjetljiv teret neće biti oštećen. Motor je obično smješten na jedno od dva mjesta: na platformi insertera / ekstraktora ili u podnožju uređaja. Sama pozicija sustava motornog pogona nema utjecaja na performanse uređaja. Brzina kojom se kreće prazan lift je do 2,3 m/s a opterećen 1 m/s [7]. Kao dodatnu opremu moguće je na VLM ugraditi i tkz. EcoDrive sustav koji kinetičku energiju pri spuštanju lifta pretvara u električnu energiju. Na taj se način može uštedjeti i do 40% električne energije [7].

Vertikalno gibanje platforme motorni sustav ostvaruje preko užeta, zupčastog remena, zupčanika ili lanca. Na slici 8 su prikazane ove četiri varijante prijenosa.

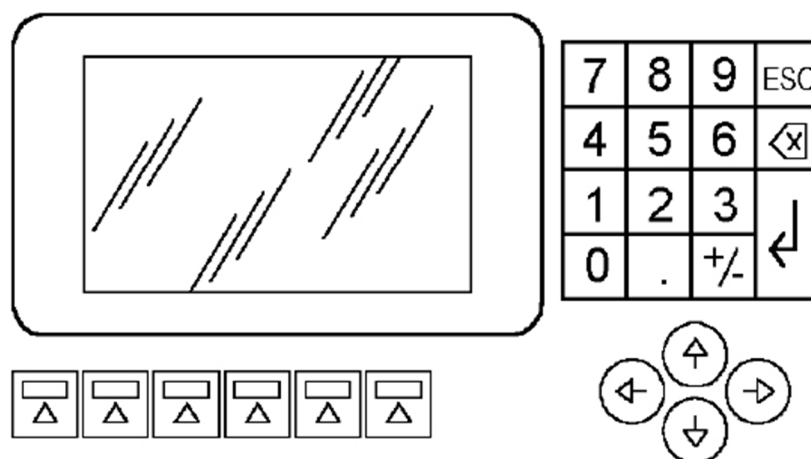


Slika 8. Varijante prijenosa: uže, zupčasti remen, zupčanik i lanac [3]

Svaka od ovih varijanti ima određene prednosti i nedostatke u primjeni. Odabire se varijanta ovisno o zahtijevanim parametrima kao što su: pouzdanost, zahtjevi za održavanjem, sigurnost i razina buke.

3.2.4. Upravljački sustavi

VLM-ovi su dostupni sa različitim kontrolnim sustavima i softverskim paketima za upravljanje skladištenim sadržajem. U svojem najosnovnijem obliku, VLM može izuzeti određeni artikl pritiskom željenog broja spremnika na upravljačkoj tipkovnici. Sofisticiraniji oblici su dostupni sa potpuno samostalnim mikroprocesorima ili PC upravljanjem sa zaslonom na dodir ili alfanumeričkom tipkovnicom.



Slika 9. Ilustracija tipičnog kontrolnog sučelja [3]

Uporaba računala u VLM-ovima osigurava ne samo lakše i elegantnije uskladištenje i izuzimanje robe nego i mogućnost praćenja i kontrole zaliha koje se nalaze u uređaju i koje prolaze kroz uređaj. Radi toga VLM uređaj može biti implementiran kao samostalna, diskretna

i izolirana radna stanica, ali i integriran kao dio sveobuhvatnog skladišnog upravljačkog sustava.

3.2.5. *Dodatna oprema*

Uz svoje osnovne komponente vertikalni podizni moduli mogu sadržavati i niz drugih komponenti s ciljem što kvalitetnije i potpunije eksploatacije. S tim ciljem pojavljuju se razne dodatne kontrole, više razina softvera za upravljanje skladištenim sadržajem koji se mogu povezati sa WMS-om (eng. *warehouse management system*) poduzeća i ERP (eng. *enterprise resource planning*) sustavom. Druge tehnologije koje mogu biti integrirane su:

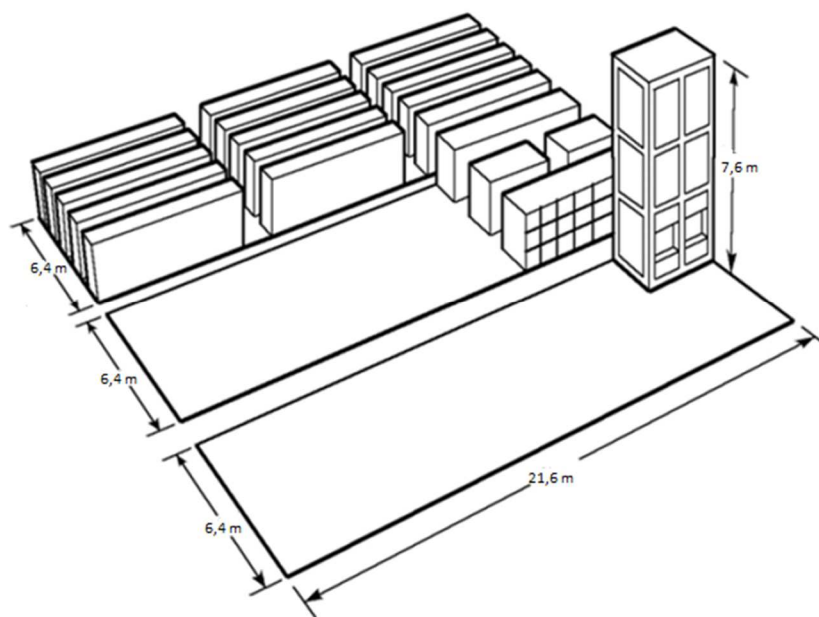
- Čitači bar koda
- Vitla
- Vakuumski podizači
- „pick to light“ sustavi
- Sustav automatski vođenih vozila
- Sustav konvejera
- Robotsko sučelje
- Glasovno upravljanje
- EcoDrive sustav

3.3. Prednosti primjene

Uporaba vertikalnih podiznih modula osigurava brojne prednosti u odnosu na klasično skladištenje, ali i u odnosu na neke druge vrste automatiziranih skladišnih sustava. Neke od prednosti su: ušteda podne površine, povećanje produktivnosti, praktičnost, ergonomičnost, sigurnost, jednostavno upravljanje, jednostavna instalacija i održavanje, jednostavno premještanje, modularna izrada, mogućnost hlađenja ili grijanja unutrašnjosti, itd. U nastavku su podrobnije objašnjene neke važnije prednosti.

3.3.1. Ušteda podne površine

Većina skladišnih hala su izgrađene sa visokim stropom, pa je korištenjem klasičnih poličnih regala prostor iznad cca 2 metra neiskorišten. Uporabom VLM-a taj se inače neiskorišteni prostor brzo i jednostavno daje iskoristiti.



Slika 10. Ilustracija uštede podnog prostora korištenjem VLM-a [3]

Prostori koji nemaju tako visoki strop mogu iskoristiti sposobnost VLM-a da povezuje katove. Prema dostupnim izvorima uporabom VLM moguće je uštedjeti od 80% [8] do 90% [5] podnog prostora, ovisno o izvoru, proizvođaču i modelu uređaja.

Uz iskorištavanje inače neiskorištenog prostora u visini, glavni razlog velike uštede prostora je sposobnost skladištenja spremnika sa robom uz samo 25 mm razmaka, omogućujući tako znatno veću gustoću skladištenja u odnosu na klasične polične regale. Sljedeća tablica pokazuje

usporedbu neiskorištenog prostora unutar samog uređaja, VLM-a i ostalih tehnologija skladištenja.

Tehnologija skladištenja	neiskorišteni prostor unutar jedinice
Klasične police	50 - 70 %
Horizontalni karusel	25%
Vertikalni karusel	20%
VLM	10%

Tablica 1. Usporedba neiskorištenog prostora tehnologija skladištenja [8]

Iz tablice 1 je evidentno da VLM ima najmanje neiskorištenog prostora, tj. da ima najveću gustoću skladištenja u odnosu na ostale tehnologije automatiziranog skladištenja i skladištenja na klasične policične regale.

3.3.2. Povećanje produktivnosti

Iako nije tako očita kao ušteda prostora, ova prednost VLM-a nad ostalim tehnologijama skladištenja je jako izražena i jako bitna. Nakon uvođenja VLM-a u poduzeću dolazi do povećanja produktivnosti postojećeg osoblja što za posljedicu ima smanjenje broja radnika ili njihova preorijentacija na druge poslove. Razlozi povećanja produktivnosti su sljedeći:

- Uvijek se izuzima točna stavka pa su kraća protočna vremena
- Eliminirano je hodanje
- Eliminirano je traženje po policama
- Radnik obavlja posao sa manje umora i stresa zbog eliminacije saginjanja, penjanja i hodanja
- Voditelji odjela lakše nadziru operatere i radne stanice radi bolje preglednosti
- Povećana je efikasnost izuzimanja korištenjem grupa narudžbi (eng. *batch*) s pred sortiranom listom
- Korištenjem softvera za upravljanje i kontrolu osigurana je dostupnost određene vrste i količine robe u svako vrijeme

3.3.3. Ergonomičnost

S obzirom da se materijali odlažu i izuzimaju na optimalnoj visini, u visini struka, mogućnost ozljeda i s ozljedama povezanih troškova je minimalna. Osim toga, VLM eliminira potrebu za opasnim radnjama kao što je penjanje po ljestvama. U takvim uvjetima radnicima je poboljšan moral, trening novih radnika je lakši, a i protok radnika je snižen.

3.3.5. Sigurnost robe

Svaki VLM je u potpunosti zatvoren sa svih šest strana osiguravajući na taj način izuzetnu sigurnost i čisto odlaganje. Sam uređaj zbog svoje velike težine i velikih gabarita ne treba posebno osiguravati, ali se sigurnost skladištene robe dodatno može povećati različitim mehaničkim i elektroničkim metodama. Na zahtjev kupca mogu se ugraditi blindirana vrata, ograničavanje pristupa lozinkama, različiti alarmni sustavi, itd.

4. PODRUČJA PRIMJENE VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA

Područja primjene VLM-ova su dosta raznolika. Koriste se za različite namjene kao što su: sustavi za komisioniranje i pripremu narudžbi, buffer zalihe, skladištenje dijelova i alata za održavanje, skladištenje teških dijelova, skladištenje alata, skladištenje dijelova za montažu, skladištenje materijala u posebnom okolišu i mnoge druge. U nastavku je, radi ilustracije, navedeno nekoliko primjera primjene, kako u inozemstvu tako i u Republici Hrvatskoj.

4.1. Inozemni primjeri

1. Airbus, Bremen, Njemačka



Slika 11. VLM-ovi u Airbusu

U Airbusovom pogonu u Bremenu proizvode se dijelovi krila aviona. Visoko tehnološko sklapanje podržano je sa 11 VLM uređaja koji osiguravaju sve potrebne dijelove. Zaštita od prašine i oštećenja je iznimno bitna u zrakoplovnoj industriji pa tu VLM-ovi dolaze do izražaja. Ti jako osjetljivi dijelovi uskladišteni su u VLM-ovima gdje čekaju spremni za trenutačno izuzimanje dodirom tipke.

2. Balda AG, Bad Oeynhausen, Njemačka



Slika 12. VLM-ovi u Baldi AG

Balda AG je jedna od najvećih ljevaonica plastičnih dijelova u Njemačkoj. Kalupi za lijevanje su uskladišteni u VLM uređaje gdje im je osigurana potrebna zaštita. Neki od uskladištenih kalupa teže i 900 kg pa se nakon što ih ekstraktor doveze do prozora za izuzimanje oni dalje prenose kranom.

3. Medtronic, Minneapolis, SAD



Slika 13. VLM-ovi u Mediatronicu

Mediatronic je jedan od najvećih dobavljača medicinske tehničke opreme u SAD-u. Osigurava dostavu uređaja visoke tehnologije kao što su pacemakeri u cijeli svijet u roku od 24 sata. Kako bi se osigurao gladak proces, instalirani su VLM uređaji. Medicinska oprema se prima u prizemlju gdje se nakon skeniranja bar koda uskladištuje u VLM-ove. Na katu se primaju narudžbe i od tamo tražena oprema ide u distribucijske centre i dalje na svoje odredište.

4.2. Primjeri u Hrvatskoj

1. Teh-cut, Velika Gorica [9]



Slika 14. Prozor VLM-a s mjernim alatima Teh-cuta

Teh-cut u svom proizvodnom pogonu proizvodi alate, naprave, specijalizirane strojne elemente i glodala. Za skladištenje vrijednih mjernih alata potrebnih za proizvodnju Teh-cuta instaliran je VLM tipa *Kardex Shuttle* visine 7,5 metara. U ovom slučaju nije zahtijevan visoki protok već se primarni zahtjev odnosi na sigurnost tijekom skladištenja i u samom procesu rukovanja materijalom.

2. Belupo d.d., Koprivnica [9]



Slika 15. VLM instaliran u Belupu d.d.

Belupo d.d. je tvrtka koja se bavi proizvodnjom kozmetike i lijekova, a u svom skladišnom sustavu ima instaliran VLM visine 6 metara, dubine 4 metra i širine 2 metra sa 33 skladišne lokacije. U ovom se uređaju skladišti prvenstveno roba slabog protoka koju čine upute, kutije i specijalna pakiranja.

3. Podravka d.d., Koprivnica [9]



Slika 16. VLM u Podravci d.d. sa dva otvora

U dijelu expedita, između stepeništa koje spaja prizemlje i prvi kat instaliran je VLM sa dva radna otvora, po jedan na svakom katu. Uređaj je kapaciteta oko 23 m³ ili oko 45 tona i namijenjen je za skladištenje koluta sa naljepnicama. Prosječno vrijeme dohvata iznosi 33 sekunde.

4. D.B.T. d.o.o., Zaprešić [9]



Slika 17. VLM u skladištu D.B.T. d.o.o.

D.B.T. d.o.o., proizvodnja okova i pribora za građevinsku stolariju i namještaj. Sustav sa tri vertikalna podizna modula dio je automatiziranog skladišta, koji se osim sustava vertikalnih podiznih modula sastoji i od računalom upravljanoj 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 uskladištavaju se u vertikalne podizne module.

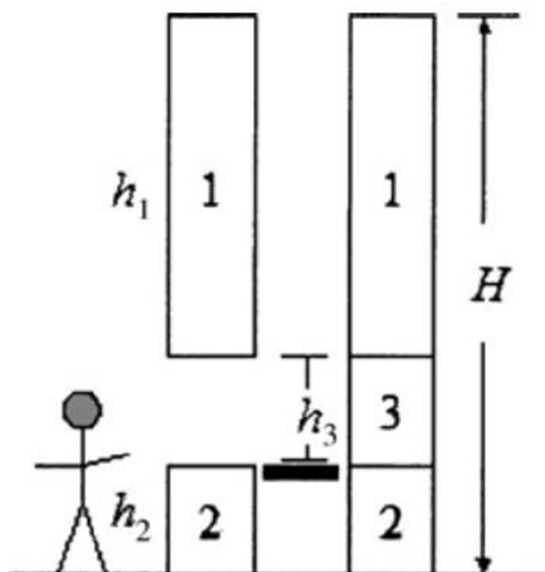
5. MODELI OBLIKOVANJA VLM-ova

Vertikalni podizni moduli spadaju u kategoriju „roba čovjeku“ jer se odabirom željenog artikla on automatski dovozi do čovjeka za razliku od klasičnog poličnog skladišta gdje čovjek hoda i traži artikle. Uporabom VLM-ova potreba za hodanjem je eliminirana, ali se pojavilo čekanje dok VLM dovede traženi artikl. U slučajevima kada jedan čovjek posluhuje jedan VLM, oni ne mogu raditi paralelno. Dok VLM dovozi tražene artikle, čovjek čeka, a dok čovjek izuzima artikle, VLM čeka i ne može dovoziti sljedeću narudžu. Kako bi se smanjilo vrijeme čekanja, VLM-ovi se grupiraju u grupe od dva, tri ili četiri VLM-a koje posluhuje jedan čovjek. Te grupe (eng. *pods*) funkcioniraju tako da dok čovjek izuzima sa jednog VLM-a, drugi dovoze sljedeće artikle. Međutim ukoliko iz bilo kojeg razloga nije moguće instalirati više od jednog VLM-a a potreban je veći protok, tada proizvođači nude VLM-ove sa dva prozora za izuzimanje. U ovom slučaju uređaj može raditi istovremeno sa radnikom, dovoziti sljedeći spremnik dok radnik izuzima iz već dovezenog spremnika. Na ovaj način se smanjuje prosječno vrijeme potrebno VLM-u da dostavi spremnike tj. povećava se protok uređaja. Za potrebe određivanja protoka VLM-ova razvijeni su neki modeli, a u nastavku su prikazani modeli oblikovanja za VLM sa jednim prozorom (eng. *single-tray*) i za VLM sa dva prozora (eng. *dual-tray*).

5.1. VLM sa jednim prozorom

Model VLM-a sa jednim prozorom za izuzimanje predstavljen u [10] pretpostavlja sustav sa jednim VLM-om, sa jednim prozorom za izuzimanje i sa jednim čovjekom – radnikom. Vrijeme potrebno da se izvrši skupina narudžbi sa ukupno n artikala je suma očekivanog vremena potrebnog da uređaj dostavi određeni spremnik i očekivanog vremena potrebnog da čovjek izuzme artikle. VLM uvijek obavlja dvostruke cikluse, osim prvog i zadnjeg ciklusa. Očekivano vrijeme dostave ovisi o očekivanom jednostrukom i dvostrukom ciklusu lifta i očekivanom broju spremnika koji se trebaju dostaviti da bi se izuzelo n artikala, pretpostavljajući da je moguće da se više artikala nađe u istom spremniku u VLM-u sa ukupno m spremnika.

Prvo su razvijeni modeli za jednostruki i dvostruki ciklus VLM-a prikazanog na sljedećoj slici.



Slika 18. Bokocrt VLM-a- sa tipičnim odjeljcima

Korištene su sljedeće oznake:

H – visina uređaja

h_1, h_2, h_3 – visina pojedinih odjeljaka

$t_{a/d}$ – zadržska zbog ubrzavanja i usporavanja

$t_{p/d}$ – zadržska zbog uzimanja ili ostavljanja spremnika

t_{0i} – očekivano vrijeme vožnje od/do prozora za izuzimanje do/od odjeljka i

t_{ij} – očekivano vrijeme vožnje od/do odjeljka i do/od odjeljka j

p_1, p_2, p_3 – vjerojatnost pohrane / izuzimanja spremnika iz određenog odjeljka

p_{ij} – vjerojatnost u dvostrukom ciklusu da se dogodi pohrana u odjeljak i a izuzimanje iz odjeljka j

$E(SC)$ – očekivano vrijeme vožnje za jednostruki ciklus

$E(DC)$ – očekivano vrijeme vožnje za dvostruki ciklus

Uz pretpostavku slučajnog odlaganja unutar VLM-a, očekivana vremena vožnje od/do prozora za izuzimanje do/od odjeljka 1, 2 i 3 iznose:

$$\begin{aligned}
 t_{01} &= (h_3 + h_1/2)/v \\
 t_{02} &= (h_2/2)/v \\
 t_{03} &= (h_3/2)/v
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Na isti način, očekivana vremena vožnje između lokacija u odjeljcima, također uz pretpostavku slučajnog odlaganja, iznose:

$$\begin{aligned}
 t_{11} &= (h_1/3)/v \\
 t_{12} = t_{21} &= (h_1/2 + h_3 + h_2/2)/v \\
 t_{13} = t_{31} &= (h_1/2 + h_2/2)/v \\
 t_{22} &= (h_2/3)/v \\
 t_{23} = t_{32} &= (h_2/2 + h_3/2)/v \\
 t_{33} &= (h_3/3)/v
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Vjerojatnost da se u dvostrukom ciklusu uskladištuje u jedan odjeljak, a izuzima iz drugog odjeljka jednaka je $p_i p_j$, gdje su:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 2h_1/(2H - h_3) \\
 p_2 &= 2h_2/(2H - h_3) \\
 p_3 &= h_3/(2H - h_3)
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Očekivana vremena vožnje dizalice VLM-a za jednostruki i za dvostruki ciklus su:

$$E(SC) = \sum_{i=1}^3 2t_{0i} p_i \tag{5.4}$$

$$E(DC) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (t_{0i} + t_{ij} + t_{0j}) * p_i p_j \tag{5.5}$$

Zatim, očekivana vremena ciklusa su:

$$T[SC] = E[SC] + 2t_{a/d} + 2t_{p/d} \tag{5.6}$$

$$T[DC] = E[DC] + 3t_{a/d} + 4t_{p/d} \tag{5.7}$$

Za model dostavnog vremena sustava sa jednim VLM-om i jednim čovjekom, koriste se sljedeće oznake:

$E^V[T(n,m)]$ – vrijeme da se izuzme n artikala iz VLM-a sa m spremnika, gdje su:

$$m = [H/h] + [(H-h_3)/h] - \text{broj spremnika u VLM-u}$$

h – visina spremnika

$E^V[R(n,m)]$ – očekivano vrijeme dostave (eng. *retrieval time*)

$E^V[P(n,m)]$ – očekivano vrijeme izuzimanja (eng. *picking time*)

$E[S(n,m)]$ – očekivani broj zaustavljanja

p – vrijeme potrebno za izuzimanja, pretpostavka determinističko

Vrijeme potrebno za dostavu i izuzimanje n artikala iz VLM-a sa m spremnika jednaka je sumi dviju komponenti modeliranih zasebno:

$$E^v[T(n, m)] = E^v[R(n, m)] + E^v[P(n, m)] \quad (5.7)$$

Vrijeme dostave n artikala iz VLM-a sa m spremnika može se izraziti kao:

$$E^v[R(n, m)] = T[SC] + (E[S(n, m)] - 1) * T[DC] + T[SC] \quad (5.8)$$

Očekivani broj zaustavljanja, tj. očekivani broj spremnika koji sadrže barem jedan artikl za izuzimanje u grupi od n artikala u VLM-u sa m spremnika je baziran na problemu zauzetosti i izražen je kao:

$$E[S(n, m)] = \sum_{k=0}^{m-1} (m - k) * p_k(m, n) \quad (5.9)$$

gdje je $p_k(m,n)$ vjerojatnost da nema zaustavljanja na k od m spremnika u dostavi n artikala:

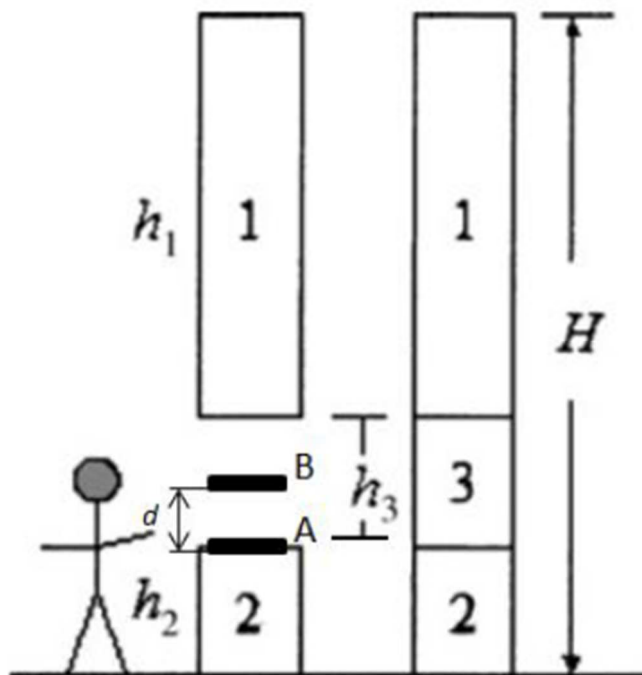
$$p_k(m, n) = \binom{m}{k} \sum_{j=0}^{m-k} (-1)^j \binom{m-k}{j} \left(1 - \frac{j+k}{m}\right)^n \quad (5.9)$$

Druga komponenta, očekivano vrijeme za izuzimanje n artikala, je jednostavna i linearna po n :

$$E^v[P(n, m)] = np \quad (5.10)$$

5.2. VLM sa dva prozora

Model VLM-a sa dva prozora za izuzimanje, predstavljen u [11], pretpostavlja sustav sa jednim VLM-om, sa dva prozora za izuzimanje jedan iznad drugog i sa jednim čovjekom – radnikom. Dok radnik izuzima iz jednog spremnika, lift može uskladištiti prethodni spremnik i dovesti sljedeći. Uskladištenje i izuzimanje izvršava lift radeći dvostruki ciklus sa gornjeg i sa donjeg prozora (nadalje ove dvije pozicije su označene sa A i B). Ovaj model temelji se na sličnom modelu za *mini-load AS/RS* i modelu VLM-a sa jednim prozorom objašnjenim u poglavlju 5.1. Za ovaj je model prvo pretpostavljeno da je vrijeme izuzimanja iz već dostavljenog spremnika poznato i definirano kao p_T , i da VLM uvijek radi dvostruke cikluse. Kasnije se umjesto p_T pojavljuje prosječno vrijeme izuzimanja po artiklu p_n . Na sljedećoj slici prikazan je bokocrt VLM-a sa dva prozora za izuzimanje.



Slika 19. Bokocrt *dual tray* VLM-a sa tipičnim odjeljcima

Korištene su sljedeće oznake:

$E(DC)$ – očekivano vrijeme vožnje dvostrukog ciklusa *dual tray* VLM-a

$S(DC)$ – standardna devijacija vremena vožnje dvostrukog ciklusa

$E(CT)$ – očekivano vrijeme ciklusa

$E(PU)$ – očekivana iskoristivost radnika

C – ukupno vrijeme rukovanja spremnikom u dvostrukom ciklusu ($4 t_{p/d} + 4 t_{a/d}$)

$t_{p/d}$ - zadržka zbog uzimanja ili ostavljanja spremnika

$t_{a/d}$ - zadržka zbog ubrzavanja i usporavanja

p_T – prosječno vrijeme izuzimanja po dostavljenom spremniku

p_n – prosječno vrijeme izuzimanja po artiklu

k_1 i k_2 – granice ravnomjerno raspoređenog vremena vožnje u dvostrukom ciklusu

t_1 i t_2 – granice ravnomjerno raspoređenog vremena dvostrukog ciklusa

v – vertikalna brzina lifta

R_T - protok sustava (spremnika po satu)

R_n – protok sustava (artikala po satu)

Očekivano vrijeme vožnje lifta u dvostrukom ciklusu može se izračunati kao prosjek dvaju očekivanih vremena, pozicije A i pozicije B, uz dodatak potrebnog vremena za vožnju između njih:

$$E(DC) = \frac{E(DC)_A + E(DC)_B}{2} + d/v \quad (5.11)$$

Očekivana vremena vožnje od pozicija A i B mogu se izračunati slično kao i za VLM sa jednim prozorom:

$$E(DC)_A = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (t_{Ai} + t_{ij} + t_{Aj}) * p_i p_j \quad (5.12)$$

$$E(DC)_B = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (t_{Bi} + t_{ij} + t_{Bj}) * p_i p_j \quad (5.13)$$

Budući da pozicija prozora A odgovara poziciji prozora VLM-a sa jednim prozorom, t_{Aj} se računa isto kao i za VLM sa jednim prozorom prema jednadžbi (5.1). S druge strane, pri računanju t_{Bj} treba uzeti u obzir pomjeranje pozicije B:

$$\begin{aligned} t_{B1} &= (h_3 - d + h_1/2)/v \\ t_{B2} &= (d + h_2/2)/v \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$t_{B3} = \left(\frac{h_3 - d}{2} * \frac{h_3 - d}{h_3} + \frac{d}{2} * \frac{d}{h_3} \right) / v = \left(\frac{(h_3 - d)^2 + d^2}{2h_3} \right) / v$$

Očekivana vremena vožnje između lokacija u odjeljku t_{ij} , te vjerojatnost da se spremnik pohrani u odjeljak i i izuzme iz odjeljka j , se računaju kao i za VLM sa jednim prozorom prema jednadžbama (5.2) i (5.3):

$$\begin{aligned} t_{11} &= (h_1/3)/v \\ t_{12} = t_{21} &= (h_1/2 + h_3 + h_2/2)/v \\ t_{13} = t_{31} &= (h_1/2 + h_2/2)/v \\ t_{22} &= (h_2/3)/v \\ t_{23} = t_{32} &= (h_2/2 + h_3/2)/v \\ t_{33} &= (h_3/3)/v \end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned} p_1 &= 2h_1/(2H - h_3) \\ p_2 &= 2h_2/(2H - h_3) \\ p_3 &= h_3/(2H - h_3) \end{aligned} \tag{5.5}$$

Standardna devijacija vremena vožnje dvostrukog ciklusa je izračunata i analizirana za različite konfiguracije VLM-a pomoću simulacija (različita visina i brzina), te prikazana u sljedećoj tablici. Ovisno o visini VLM-a očitava se iz tablice ili se jednostavno aproksimira $S(DC) = 0,383 E(DC)$, dok brzina lifta nema utjecaja.

Visina VLM-a	$S(DC) / E(DC)$
$H = 4500$ mm	0,3865
$H = 6000$ mm	0,3847
$H = 7500$ mm	0,3825
$H = 9000$ mm	0,3701

Tablica 2. Standardna devijacija vremena vožnje dvostrukog ciklusa

Granice uniformne razdiobe aproksimiranog vremena vožnje u dvostrukom ciklusu:

$$k_1 = E(DC) - 1,7321 * S(DC) \tag{5.15}$$

$$k_2 = E(DC) + 1,7321 * S(DC) \tag{5.16}$$

dok su granice uniformne razdiobe vremena dvostrukog ciklusa:

$$t_1 = k_1 + C \quad (5.17)$$

$$t_2 = k_2 + C \quad (5.18)$$

Odnosno prosječno vrijeme trajanja dvostrukog ciklusa lifta iznosi:

$$T(DC) = E(DC) + C \quad (5.19)$$

Ako je vrijeme izuzimanja po spremniku p_T determinističko, očekivano vrijeme ciklusa sustava je:

$$E(CT) = \begin{cases} E(DC) + C & \text{za } 0 < p_T \leq t_1 \\ \frac{p_T^2 - 2p_T t_1 + t_2^2}{2(t_2 - t_1)} & \text{za } t_1 < p_T \leq t_2 \\ p_T & \text{za } t_2 < p_T \end{cases} \quad (5.20)$$

dok u slučaju da je vrijeme izuzimanja eksponencijalno distribuirano:

$$E(CT) = E(DC) + C + \frac{p_T^2}{t_2 - t_1} [\exp(-t_1/p_T) - \exp(-t_2/p_T)] \quad (5.21)$$

Konačno, očekivana iskoristivost radnika je:

$$E(PU) = p_T/E(CT) \quad (5.22)$$

i protok sustava izražen u broju dostavljenih spremnika po satu iznosi:

$$R_T = 3600/E(CT) \quad (5.23)$$

ili

$$R_T = 3600 * E(PU)/p_T \quad (5.24)$$

U slučaju da je zadano vrijeme izuzimanja po artiklu p_n umjesto vremena izuzimanja po spremniku p_T , sa mogućnošću da se dva ili više različitih artikala nađu unutar istog spremnika, broj dostavljenih spremnika bi očitog mogao biti manji od broja artikala n koje treba izuzeti. U tom slučaju može se koristiti jednadžba za očekivani broj dostavljenih spremnika kako bi se modificirao model:

$$E[S(n, m)] = \sum_{k=0}^{m-1} (m - k) * p_k(m, n) \quad (5.25)$$

Očekivano vrijeme izuzimanja po dostavljenom spremniku onda je:

$$p_T = \frac{n}{E[S(n, m)]} * p_n \quad (5.26)$$

Nakon izračunatog E(CT) protok izražen u broju artikala u satu tada je:

$$R_n = 3600/E(CT) \quad (5.27)$$

6. ANALIZA PROTOKA VERTIKALNIH PODIZNIH MODULA

Prema modelima predstavljenim u poglavlju 5 provedena je analiza protoka za VLM-ove sa jednim i sa dva prozora za različite parametre. Odabrani parametri su: visina $H = 4500, 6000, 7500$ i 9000 mm, brzina lifta $v = 50, 100$ i 150 cm/s i vrijeme izuzimanja po spremniku p_T koje je odabrano u tri varijante u odnosu na prosječno vrijeme dostave lifta u dvostrukom ciklusu VLM-a sa dva prozora:

$$p_{T1} \approx t_1;$$

$$p_{T2} \approx E(DC);$$

$$p_{T3} \approx t_2$$

U nastavku su korištene oznake za protok (q_1, q_2 i q_3) i prosječno vrijeme sustava ($E(CT)_1, E(CT)_2, E(CT)_3$) koje odgovaraju pojedinom vremenu dostave lifta (p_{T1}, p_{T2} i p_{T3}).

Ostali ulazni parametri su definirani kao:

$$h_3 = 75 \text{ cm}$$

$$h_2 = 90 \text{ cm}$$

$$d = 30 \text{ cm}$$

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

$$t_{p/d} = 4 \text{ s}$$

S obzirom da model za VLM sa jednim prozorom (prikazan u 5.1.) kao konačni rezultat prikazuje vrijeme dostave određenog broja artikala, a ovdje se analizira protok izražen u broju spremnika po satu, ovaj model potrebno je modificirati da bi modeli bili usporedivi. Korištenjem izvoda modela, može se pojednostavljeno izraziti vrijeme ciklusa sustava kao:

$$E(CT) = E(DC) + p_T + C' \quad (6.1)$$

gdje je C' , slično kao u modelu sa jednim prozorom, ukupno vrijeme rukovanja spremnikom u dvostrukom ciklusu i iznosi: $C' = 3 t_{p/d} + 4 t_{a/d}$

U sljedećim tablicama su prikazana dobivena vremena vožnje za jednu i drugu varijantu VLM-a:

H (mm)	$v = 50$ cm/s	$v = 100$ cm/s	$v = 150$ cm/s
4500	9,60	4,80	3,20
6000	13,43	6,72	4,48
7500	17,33	8,67	5,78
9000	21,26	10,63	7,09

Tablica 3. Prosječna vremena vožnje, $E(DC)$, VLM-a sa jednim prozorom

H (mm)	$v = 50$ cm/s	$v = 100$ cm/s	$v = 150$ cm/s
4500	9,88	4,94	3,29
6000	13,64	6,82	4,55
7500	17,50	8,75	5,83
9000	21,40	10,70	7,13

Tablica 4. **Prosječna vremena vožnje, $E(DC)$, VLM-a sa dva prozora**

Iz gornjih tablica može se uočiti da su prosječna vremena vožnje za ove dvije varijante VLM-ova približno jednake (razlika je uvijek manja od 3%) ali je ipak vrijeme vožnje VLM-a sa dva prozora uvijek nešto veće. Razlog tomu je vrijeme vožnje između dviju pozicija (A i B) za izuzimanje (d/v), koje se dodaje prosječnom vremenu vožnje pozicije A i B.

Sljedeći korak je računanje očekivanog vremena dvostrukog ciklusa lifta VLM-a sa dva prozora koje se dobije zbrajanjem vremena vožnje, $E(DC)$, i ukupnog vremena rukovanja spremnikom u dvostrukom ciklusu, C :

H (mm)	$v = 50$ cm/s	$v = 100$ cm/s	$v = 150$ cm/s
4500	33,88	28,94	27,29
6000	37,64	30,82	28,55
7500	41,50	32,75	29,83
9000	45,40	34,70	31,13

Tablica 5. **Prosječno vrijeme dvostrukog ciklusa lifta VLM-a sa dva prozora $T(DC)$**

Nakon toga mogu se definirati i prosječna vremena izuzimanja po spremniku p_T u ovisnosti o visini i brzini VLM-a:

H (mm)	v (cm/s)								
	50			100			150		
	p_{T1}	p_{T2}	p_{T3}	p_{T1}	p_{T2}	p_{T3}	p_{T1}	p_{T2}	p_{T3}
4500	27	34	41	25	29	33	25	27,5	30
6000	28	37,5	47	26	31	36	25	28,5	32
7500	29	41,5	54	26	32,5	39	25	29,5	34
9000	31	45,5	60	27	34,5	42	26	31	36

Tablica 6. **Prosječno vrijeme izuzimanja po spremniku p_T , u ovisnosti o visini i brzini VLM-a**

Nakon što su definirana prosječna vremena izuzimanja po spremniku, vrijeme ciklusa VLM-a sa jednim prozorom dobije se jednostavnom formulom (6.1):

$$E(CT) = E(DC) + p_T + C'$$

Rezultati su prikazani na sljedećoj tablici.

H (mm)	v (cm/s)								
	50			100			150		
	$E(CT)_1$	$E(CT)_2$	$E(CT)_3$	$E(CT)_1$	$E(CT)_2$	$E(CT)_3$	$E(CT)_1$	$E(CT)_2$	$E(CT)_3$
4500	58,60	65,60	72,60	51,80	55,80	59,80	50,20	52,70	55,20
6000	63,43	72,93	82,43	54,72	59,72	64,72	51,48	54,98	58,48
7500	68,33	80,83	93,33	56,67	63,17	69,67	52,78	57,28	61,78
9000	74,26	88,76	103,26	59,63	67,13	74,63	55,09	60,09	65,09

Tablica 7. Vremena ciklusa sustava sa jednim prozorom $E(CT)$ (u sekundama)

Vremena ciklusa VLM-a sa dva prozora računaju se po formuli

$$E(CT) = \begin{cases} E(DC) + C & \text{za } 0 < p_T \leq t_1 \\ \frac{p_T^2 - 2p_T t_1 + t_2^2}{2(t_2 - t_1)} & \text{za } t_1 < p_T \leq t_2 \\ p_T & \text{za } t_2 < p_T \end{cases}$$

i prikazana su u sljedećoj tablici:

H (mm)	v (cm/s)								
	50			100			150		
	$E(CT)_1$	$E(CT)_2$	$E(CT)_3$	$E(CT)_1$	$E(CT)_2$	$E(CT)_3$	$E(CT)_1$	$E(CT)_2$	$E(CT)_3$
4500	33,88	35,60	41,00	28,94	29,80	33,00	27,29	27,95	31,00
6000	37,64	39,84	47,00	30,82	32,05	36,00	28,55	29,28	32,00
7500	41,50	44,40	45,00	32,75	34,08	39,00	29,83	30,64	34,00
9000	45,40	48,88	60,00	34,70	36,32	42,00	31,13	32,21	36,00

Tablica 8. Vremena ciklusa sustava sa dva prozora $E(CT)$ (u sekundama)

Protok za obje varijante je dan u sljedećim tablicama.

H (mm)	v (cm/s)								
	50			100			150		
	q_1	q_2	q_3	q_1	q_2	q_3	q_1	q_2	q_3
4500	61,43	54,88	49,59	69,50	64,52	60,20	71,71	68,31	65,22
6000	56,76	49,36	43,67	65,79	60,28	55,62	69,93	65,48	61,56
7500	52,69	44,54	38,57	63,53	56,99	51,67	68,21	62,85	58,27
9000	48,48	40,56	34,86	60,37	53,63	48,24	65,35	59,91	55,31

Tablica 9. Protok VLM-a sa jednim prozorom (u spremnicima po satu)

H (mm)	v (cm/s)								
	50			100			150		
	q_1	q_2	q_3	q_1	q_2	q_3	q_1	q_2	q_3
4500	106,26	101,12	87,80	124,40	120,81	109,09	131,92	128,80	116,13
6000	95,64	90,36	76,60	116,81	112,32	100,00	126,09	122,95	112,50
7500	86,75	81,08	80,00	109,92	105,63	92,31	120,68	117,49	105,88
9000	79,30	73,65	60,00	103,75	99,12	85,71	115,64	111,77	100,00

Tablica 10. Protok VLM-a sa dva prozora (u spremnicima po satu)

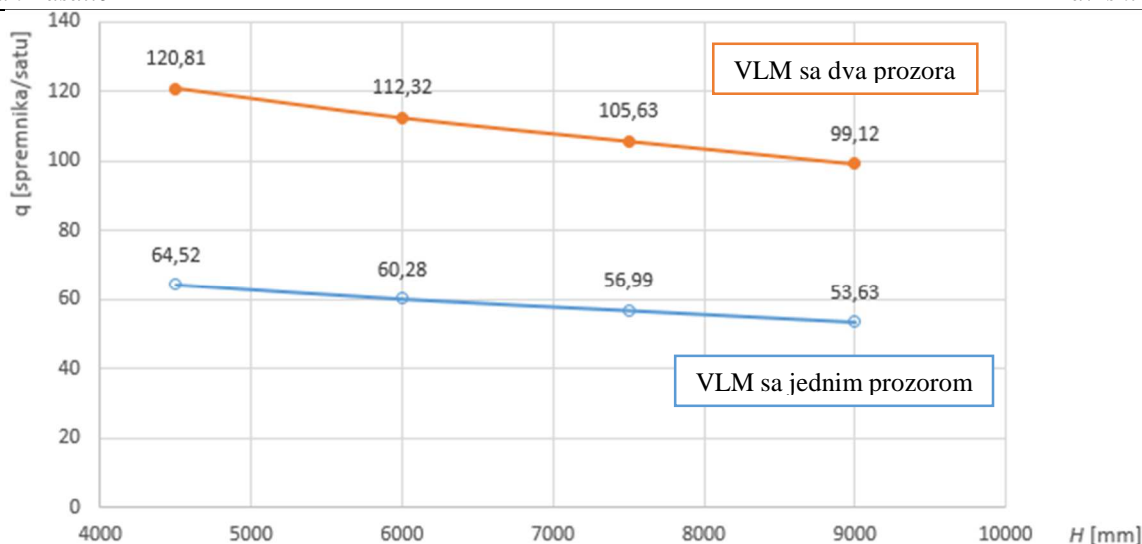
U sljedećoj tablici prikazano je povećanje protoka VLM-a sa dva prozora u odnosu na VLM sa jednim prozorom, izraženo u postocima.

H (mm)	v (cm/s)								
	50			100			150		
	p_{T1}	p_{T2}	p_{T3}	p_{T1}	p_{T2}	p_{T3}	p_{T1}	p_{T2}	p_{T3}
4500	72,96%	84,27%	77,07%	78,99%	87,25%	81,21%	83,95%	88,55%	84,00%
6000	68,52%	83,06%	75,38%	77,55%	86,33%	79,78%	80,32%	87,77%	82,75%
7500	64,65%	82,05%	72,83%	73,04%	85,36%	78,64%	76,94%	86,95%	81,71%
9000	63,57%	81,59%	72,10%	71,84%	84,83%	77,69%	76,97%	86,56%	80,81%

Tablica 11. Povećanje protoka VLM-a sa dva prozora u odnosu na VLM sa jednim prozorom

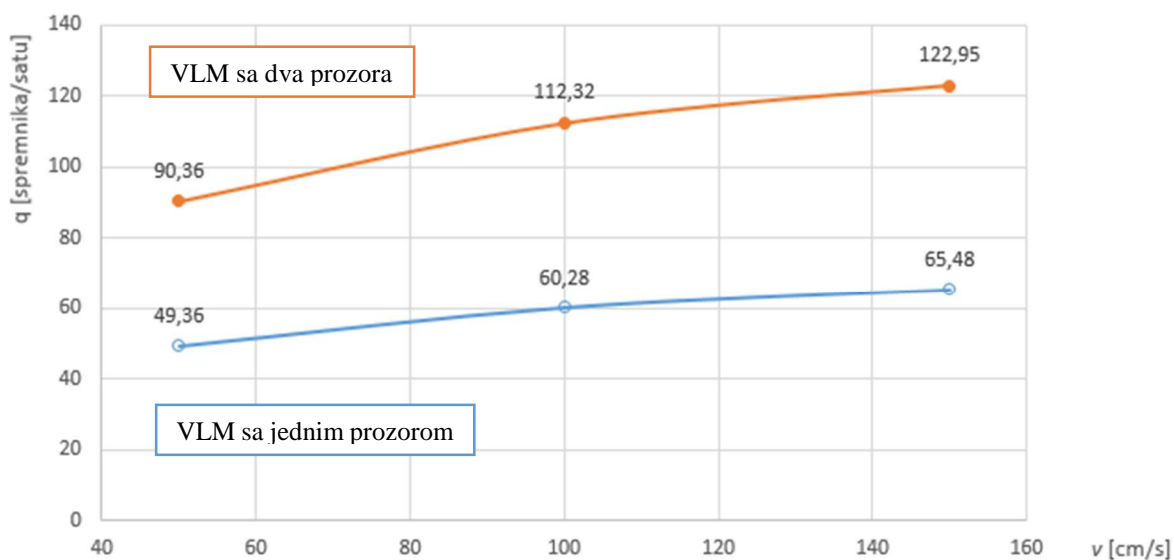
Iz gornje tablice može se vidjeti da je, za odabrane parametre, povećanje protoka u intervalu od 63% do 89%. U nastavku su grafički uspoređeni protoci s obzirom na brzinu lifta, visinu uređaja i vrijeme komisioniranja po spremniku.

U nastavku slijedi grafički prikaz ovisnosti protoka VLM-a o visini, brzini i prosječnom vremenu izuzimanja spremnika.



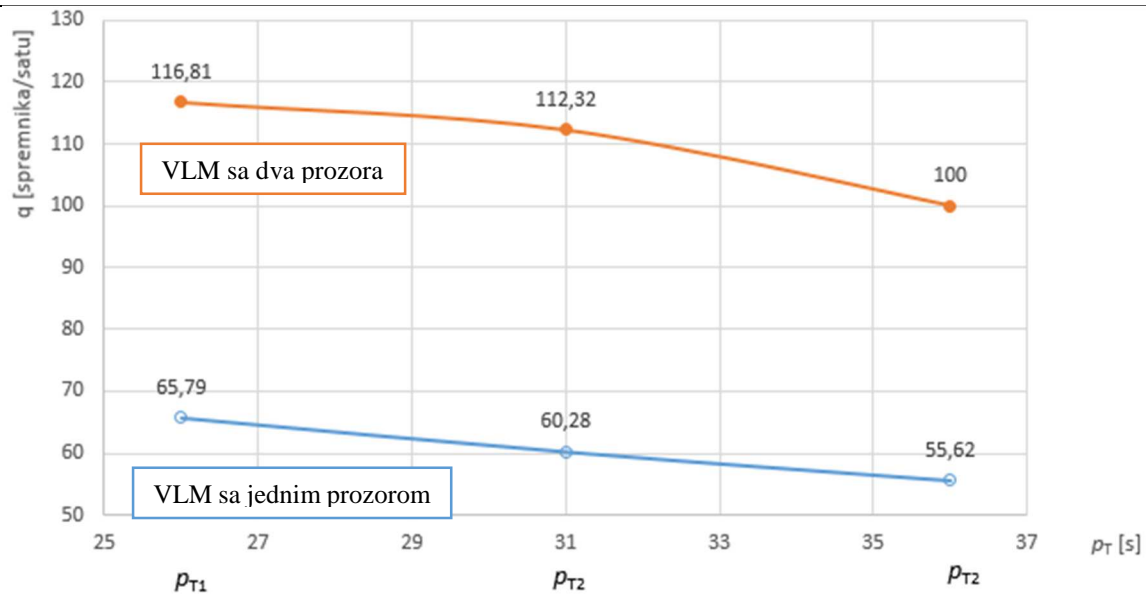
Slika 20. Usporedba protoka u ovisnosti o visini (H), $v = 100 \text{ cm/s}$; $p_T = p_{T2}$

Iz gornjeg grafa može se vidjeti da protok za obje vrste VLM-ova pada podjednako povećavanjem visine uređaja tj. povećanjem kapaciteta uređaja. Povećanje protoka u postocima također je približno jednako, od 84,83 % za $H = 9000 \text{ mm}$ do 87,25 % za $H = 4500 \text{ mm}$.



Slika 21. Usporedba protoka u ovisnosti o brzini lifta (v); $H = 6000 \text{ mm}$, $p_T = p_{T2}$

Porastom brzine lifta, protok za obje varijante VLM-a raste podjednako, u postocima je porast nešto veći za veće brzine.



Slika 22. Usporedba protoka u ovisnosti o prosječnom vremenu komisioniranja (p_T);
 $H = 6000 \text{ mm}$, $v = 100 \text{ cm/s}$

Iz gornjeg dijagrama može se vidjeti da su krivulje različite za pojedinu vrstu VLM-a u intervalu od p_{T1} do p_{T3} . Krivulja VLM-a sa dva prozora je konveksna a ona VLM-a sa jednim prozorom je konkavna. Najveće povećanje protoka je za $p_T = p_{T2}$ tj. kada je prosječno vrijeme komisioniranja približno jednako prosječnom vremenu dostave lifta. Povećavanjem ili smanjivanjem prosječnog vremena komisioniranja postotni porast protoka za VLM sa dva prozora se smanjuje. Kako bi se detaljnije ova pojava ispitala u nastavku će biti izračunati protoci za još dva vremena komisioniranja i to:

$$p_{T0} = p_{T1} / 2$$

$$p_{T4} = p_{T3} * 2$$

te s njima povezani q_0 i q_4 za svaku kombinaciju visine H i brzine v .

U nastavku su prikazani dobiveni protoci kao i povećanje protoka VLM-a sa dva prozora u odnosu na VLM sa jednim prozorom.

H (mm)	v(cm/s)														
	50					100					150				
	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4
4500	79,8	61,4	54,9	49,6	31,7	91,6	69,5	64,5	60,2	38,8	95,5	71,7	68,3	65,2	42,3
6000	72,8	56,8	49,4	43,7	27,8	86,3	65,8	60,3	55,6	35,7	92,4	69,9	65,5	61,6	39,8
7500	66,9	52,7	44,5	38,6	24,4	82,4	63,5	57,0	51,7	33,1	89,4	68,2	62,8	58,3	37,6
9000	61,3	48,5	40,6	34,9	22,1	78,0	60,4	53,6	48,2	30,9	85,5	65,3	59,9	55,3	35,6

Tablica 12. Protok VLM-a sa jednim prozorom, s obzirom na 5 različitih p_T (u spremnicima po satu)

H (mm)	v(cm/s)														
	50					100					150				
	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4
4500	106,3	106,3	101,1	87,8	43,9	124,4	124,4	120,8	109,1	54,5	131,9	131,9	128,8	120,0	60,0
6000	95,6	95,6	90,4	76,6	38,3	116,8	116,8	112,3	100,0	50,0	126,1	126,1	123,0	112,5	56,3
7500	86,7	86,7	81,1	66,7	33,3	109,9	109,9	105,6	92,3	46,2	120,7	120,7	117,5	105,9	52,9
9000	79,3	79,3	73,6	60,0	30,0	103,7	103,7	99,1	85,7	42,9	115,6	115,6	111,8	100,0	50,0

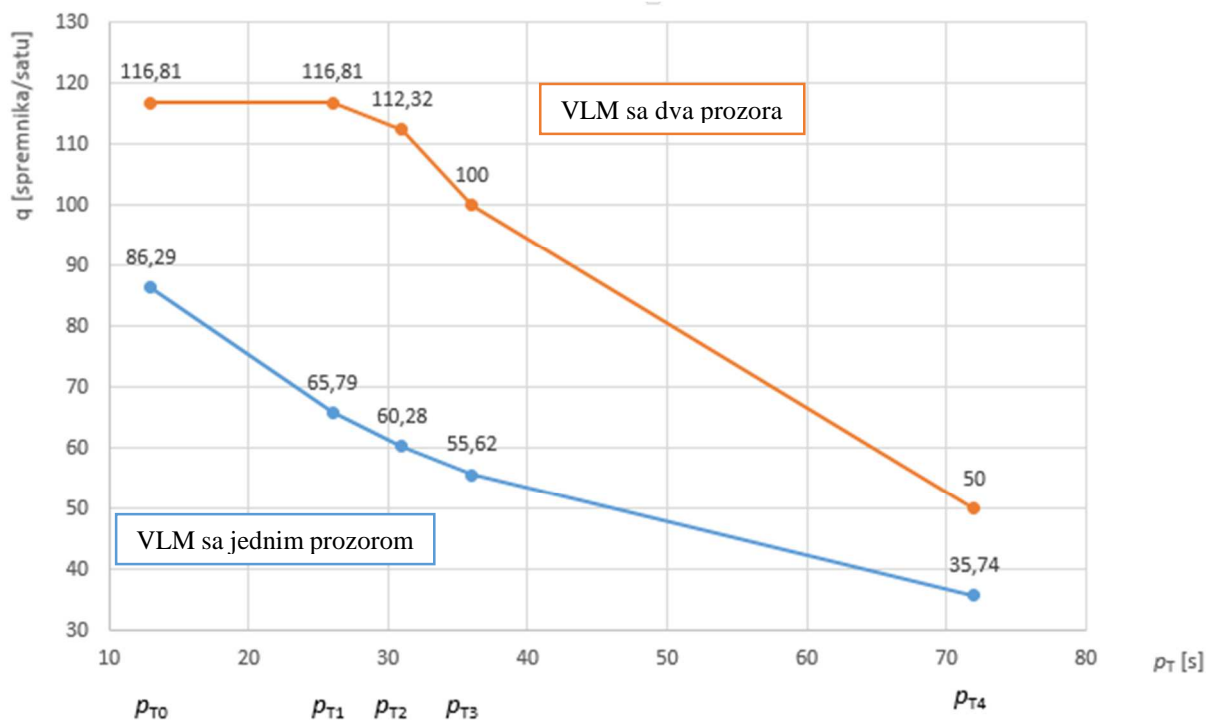
Tablica 13. Protok VLM-a sa dva prozora, s obzirom na 5 različitih p_T (u spremnicima po satu)

H (mm)	v (cm/s)														
	50					100					150				
	P_{T0}	P_{T1}	P_{T2}	P_{T3}	P_{T4}	P_{T0}	P_{T1}	P_{T2}	P_{T3}	P_{T4}	P_{T0}	P_{T1}	P_{T2}	P_{T3}	P_{T4}
4500	33	73	84	77	39	36	79	87	81	41	38	84	89	84	42
6000	31	69	83	75	38	35	78	86	80	40	37	80	88	83	41
7500	30	65	82	73	36	33	73	85	79	39	35	77	87	82	41
9000	29	64	82	72	36	33	72	85	78	39	35	77	87	81	40

Tablica 14. Povećanje protoka VLM-a sa dva prozora u odnosu na VLM sa jednim prozorom (%)

Iz gornje tablice se vidi kako je povećanje protoka (u postocima), za sve kombinacije visine H i brzine v , najveće ukoliko je prosječno vrijeme komisioniranja po spremniku približno jednako prosječnom vremenu dostave lifta ($p_{T2} \approx E(DC)$). Ukoliko vrijeme komisioniranja po spremniku raste ili pada, to povećanje je sve manje. Razlog tomu je što u ostalim slučajevima postoji čekanje kod VLM-a sa dva prozora. Ako je $p_T < E(DC)$ tj ako je vrijeme izuzimanja manje od vremena dostave lifta tada bez obzira što radnik izuzme artikle iz spremnika, ne može početi izuzimati iz drugog jer još nije dovezen. Ako je $p_{T2} > E(DC)$ tj. ako je vrijeme dostave

lifta manje od vremena izuzimanja, tada uređaj čeka jer radnik ne može izuzeti spremnika koliko ih VLM može dovesti, dakle protok sustava je jednak protoku radnika. Na sljedećem grafu prikazan je prošireni slučaj sa slike 21 tj. protok dvaju VLM-ova ovisno o prosječnom vremenu komisioniranja po spremniku.



Slika 23. Proširena usporedba protoka u ovisnosti o prosječnom vremenu komisioniranja (p_T); $H = 6000$ mm, $v = 100$ cm/s

Iz gornjeg dijagrama vidi se kako je pad protoka VLM-a sa jednim prozorom pravilan porastom prosječnog vremena komisioniranja spremnika (p_T) za razliku od pada protoka VLM-a sa dva prozora kojemu protok iz početka ni ne pada (maksimalni protok lifta, radnik uvijek brži od lifta) a zatim počinje padati strmije nego VLM sa jednim prozorom.

Razlog ovako neobičnog oblika krivulje protoka VLM-a sa dva prozora je sljedeći: na početku, do p_{T1} , protok ovisi isključivo o vremenu dostave dizalice, a vrijeme komisioniranja ne igra nikakvu ulogu budući da radnik svakako uvijek čeka da uređaj doveze sljedeći spremnik. U intervalu od p_{T1} do p_{T2} , još uvijek vrijeme dostave ima glavnu ulogu ali i vrijeme komisioniranja p_T ima određeni utjecaj. U intervalu od p_{T2} do p_{T3} , vodeću ulogu „preuzima“ vrijeme komisioniranja p_T dok vrijeme vožnje ima manju ulogu. U situacijama kada je p_T veći od p_{T3} , protok ovisi isključivo o prosječnom vremenu komisioniranja spremnika p_T , dok vrijeme dostave nema utjecaja budući da radniku treba više vremena da izuzme spremnik nego uređaju da doveze sljedeći (uređaj uvijek čeka radnika).

Iz gore navedenog može se zaključiti da se korištenjem VLM-a sa dva prozora uvijek povećava protok u odnosu na VLM sa jednim prozorom. Međutim to povećanje je nešto veće ukoliko prosječno vrijeme komisioniranja spremnika ne odstupa previše od vremena dostave lifta. Ukoliko je prosječno vrijeme izuzimanja spremnika puno manje ili puno veće od prosječnog vremena vožnje lifta pojavljuje se čekanje, bilo lifta bilo radnika, pa je samim tim povećanje protoka manje. Ako u nekom sustavu prosječno vrijeme izuzimanja spremnika ne odstupa previše od prosječnog vremena dostave lifta, tada se može očekivati povećanje protoka i do skoro 90 %, čime će nabavljanje ovakvih uređaja u situacijama gdje se traži veliki protok biti isplativo.

7. ZAKLJUČAK

Vertikalni podizni moduli su iznimno pouzdani, sigurni i svrsishodni uređaji kojih na tržištu ima sve više i koji se pojavljuju u jako različitim područjima industrije, kako je to prikazano u poglavlju 4. Oni su jako dobro rješenje za neke od skladišnih problema sa kojima se danas većina skladišta susreće. Osiguravaju mnoštvo prednosti kao što su ušteda podnog prostora, sigurnost uskladištene robe, visoki protok i ergonomičnost a glavni nedostatak im je iznimno visoka cijena. No ukoliko se odabere pravi model za pravu ulogu, uloženi novac će se brzo vratiti.

U posljednjem poglavlju napravljena je analiza protoka VLM-ova sa jednim i sa dva prozora te su prikazani rezultati koji sugeriraju u kojim bi se to situacijama bilo dobro opredijeliti za VLM sa dva prozora za izuzimanje, a u kojim to neće donijeti veliko povećanje protoka. Prema dobivenim rezultatima u poglavlju 6. vidljivo je da je povećanje protoka najveće (blizu 90 %) u situacijama kada prosječno vrijeme izuzimanja spremnika ne odstupa bitno od prosječnog vremena dostave lifta. U situacijama kada to nije slučaj, povećanje protoka i dalje postoji ali ono nije toliko veliko.

Literatura

- [1] Goran Đukić, Predavanje, Tehnička logistika
- [2] <http://www.wwcannon.com/asrs-vertical-lift-modules.php>
- [3] Ed Romaine, Essentials of Material Handling, section 5, module 5.5
- [4] <http://www.mecalux.com/>
- [5] www.modula.eu
- [6] <http://www.the-cigroup.com/products/automated-storage-retrieval-systems/vertical-lift-modules/>
- [7] <http://www.haenel.de/us/en/Home.html>
- [8] Kardex remstar ASRS Capacity & Floor Space Savings, White paper
- [9] Goran Đukić, Predavanje, Posebna poglavlja tehničke logistike
- [10] Russell D. Meller, A Throughput Model for Carousel / VLM Pods
- [11] Đukić Goran, Troughput model of dual-tray VLM with human order-pick