

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Gašper Stipanič

**Računalniški model in simulacija
avtomatiziranega skladišča**

DIPLOMSKA NALOGA
NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

doc. dr. Iztok Lebar Bajec
MENTOR

dr. Miha Mraz
SOMENTOR

Ljubljana, 2013

© 2013, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljane ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.



Št. naloge: 01927/2013

Datum: 04.04.2013

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **GAŠPER STIPANIČ**

Naslov: **RAČUNALNIŠKI MODEL IN SIMULACIJA AVTOMATIZIRANEGA SKLADIŠČA**

COMPUTER MODEL AND SIMULATION OF AN AUTOMATED WAREHOUSE

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Gradnja novih in prenova obstoječih industrijskih stavb za investitorja (podjetje) predstavlja veliko in včasih rizično investicijo. Pred kakršnim koli nepremišljenim vlaganjem se tako podjetja izčrpno potrudijo pri analizi ustreznosti prenove in smiselnosti naložbe. Odpravljanje kakršnihkoli napak, katerim bi se lahko izognili že v času načrtovanja, šele po izvedbi naložbe lahko pusti velike finančne posledice. Računalniški modeli in simulacije so kot nalašč za preigravanje takšnih scenarijev. Uporabniku, v tem primeru podjetju, dopuščajo preverjanje parametrov, pri katerih je prenova ustrezna in naložba še vedno smiselna. V diplomski nalogi z orodjem SIMPROCESS razvijte model posodobitve avtomatiziranega skladišča. Z uporabo diskretne simulacije nato preučite različne scenarije in preverite ustreznost prenove. Pridobljene izkušnje ustrezno komentirajte.

Mentor:

doc. dr. Iztok Lebar Bajec

Somentor:

prof. dr. Miha Mráz

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic



IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani izjavljam, da sem avtor dela, da slednje ne vsebuje materiala, ki bi ga kdorkoli predhodno že objavil ali oddal v obravnavo za pridobitev naziva na univerzi ali drugem visokošolskem zavodu, razen v primerih kjer so navedeni viri.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Iztoka Lebarja Bajca in somentorstvom dr. Mihe Mraza,
- so elektronska oblika dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko in
- soglašam z javno objavo elektronske oblike dela v zbirki "Dela FRI".

— Gašper Stipanič, Ljubljana, oktober 2013.

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Gašper Stipanič

Računalniški model in simulacija avtomatiziranega skladišča

POVZETEK

Gradnja novih ali obnova industrijskih zgradb predstavlja za vsako podjetje veliko in potencialno tvegano investicijo. Želja investorjev je zmanjšati stroške izgradnje oziroma obnove ter čim prej pričeti z uporabo novih prostorov. Odpravljanje napak na novo zgrajenega ali obnovljenega industrijskega kompleksa je povezano z dodatnimi stroški, zato bi se jim investitorji radi izognili.

V diplomskem delu smo z uporabo modeliranja razvili računalniški model predlaganega posodobljenega avtomatiziranega skladišča. S pomočjo diskretne simulacije smo nato preverili obnašanje sistema ob različnih vhodnih parametrih.

Tako računalniški model kot tudi izvajanje simulacije smo izvedli s programom SIM-PROCESS. Pri razvoju modela smo uporabili osnove teorije vrst in streženja, kjer smo predpostavili, da je čas med dvema zaporednima dogodkoma porazdeljen z eksponentno porazdelitvijo. Za čase strežbe pa smo predpostavili, da so normalno porazdeljeni. V sami simulaciji smo se omejili na proces shranjevanja materiala v skladišče in na proces odpremljanja materiala iz skladišča. Vhod v model predstavljajo zgodovinski podatki o letnem številu prevzemnih in odpremnh transakcij ter povprečna teža obdelanega materiala na transakcijo.

Rezultati simulacij nakazujejo, da bo obnovljeno skladišče sposobno prenesti načrtovano obremenitev. Do takšnih rezultatov pridemo takrat kadar že sami vhodni parametri nakazujejo uravnotežen sistem. Na slabše rezultate delovanja skladišča naletimo takrat, kadar je razlika med obremenjenostjo različnih delov skladišča prevelika.

Ključne besede: model, diskretna simulacija, avtomatizirano skladišče, teorija vrst, strežni sistemi

University of Ljubljana
Faculty of Computer and Information Science

Gašper Stipanič

Computer model and simulation of an automated warehouse

ABSTRACT

Building new or retrofitting existing industrial buildings presents a huge and potentially risky investment for any company. The investors wish to minimize the construction or upgrade costs and begin using the new facilities as soon as possible. A later correction of the flaws in the initial design is related to additional costs that the investors would like to evade.

For this thesis we developed a computer model of a suggested upgrade of an automated warehouse. With the use of discrete-event simulation we observed the behaviour of the modeled system under different input parameters.

The process of creating a warehouse model and the simulation was carried out with the SIMPROCESS software. The basics of queueing and serving theory were used and we assumed that the arrival times are distributed according to a Poisson distribution. For serving times, we assumed a normal distribution. The simulation itself was limited to the processes of receiving and shipping goods. The model's parameters were set based on historical data that represent an annual number of receive or ship transactions and the average amount of processed material per transaction.

Results indicate that the upgraded warehouse will be able to withstand the planned load. These results were obtained when the input parameters showed an adequately balanced system. We came across some bad warehouse performance when the load distribution difference between different parts of the warehouse was too high.

Key words: model, discrete-event simulation, automated warehouse, queueing theory, serving systems

ZAHVALA

*Rad bi se zahvalil svoji družini za vso izkazano podporo, mentorju doc. dr. Iztoku Lebarju
Bajcu ter celotni ekipi Epiloga.*

— Gašper Stipanič, Ljubljana, oktober 2013.

KAZALO

Povzetek	i
Abstract	iii
Zahvala	v
1 Uvod	1
1.1 Opis problema	2
2 Opis skladišča	5
2.1 Predstavitev študijskega primerka	6
2.1.1 Opis procesov znotraj skladišča	9
2.1.2 Predlagana rešitev	12
2.1.3 Materialni tok	13
3 Razvoj modela	17
3.1 Postopek razvoja modela	18
3.1.1 Opis projekta	18
3.1.2 Konceptualni model	20
3.1.3 Simulacijski model	21
3.1.4 Simulacijski program	22
3.1.5 Operativne faze	23
3.1.6 Verifikacija in validacija modela	24
3.2 Izbira časovnega okna	25
3.3 Definicija procesov	26
3.4 Zajem podatkov	26
3.5 Povzemanje podatkov	26

3.6	Sistemske predpostavke	27
3.7	Statistične predpostavke	28
4	Analiza Modela	29
4.1	Osnove strežnega procesa	29
4.2	Notacija in struktura strežnih enot	32
4.3	Rojstno–smrtni strežni sistem	33
4.4	Formalni zapis procesov	34
4.5	Verbalni opis modela	35
4.6	Entitete	39
4.6.1	Generiranje entitet	40
4.7	Resursi	41
4.8	Spremenljivke	42
4.8.1	Izračun intenzitete glede na količino materiala	43
4.8.2	Vhodni podatki	44
4.9	Generiranje naključnih števil	44
5	Simulacija	47
5.1	Časovni mehanizem	48
5.2	Izbor Metrik	49
5.3	Potek simulacije	49
5.4	Komentarji k rezultatom simulacije	49
5.4.1	Prva faza	49
5.4.2	Druga faza	51
5.5	Razprava	52
6	Zaključek	55
6.1	Ideje za nadaljnji razvoj	57
	Literatura	59
A	Priloga	61
A.1	Prva Faza	62
A.1.1	Eksperiment 1	62
A.1.2	Eksperiment 2	63

A.1.3	Eksperiment 3	64
A.1.4	Eksperiment 4	65
A.2	Druga Faza	66
A.2.1	Eksperiment 1	66
A.2.2	Eksperiment 2	67
A.2.3	Eksperiment 3	68
A.2.4	Eksperiment 4	69

1 Uvod

Glavni razlog za obstoj in uporabo modeliranja in simulacije je človekova neusahljiva želja po vedenju in predvidevanju prihodnosti. Njuna zgodovina se prične med 2. svetovno vojno, ko sta matematika Jon Von Neuman in Stanislaw Ulam preučevala obnašanje nevtronov. Ker je bilo izvajanje eksperimentov zelo drago, analiza problema pa precej kompleksna sta se poslužila novih tehnik in metod, ki predstavljajo začetke modeliranja in simulacije. Zaradi velikega uspeha novih metod pri analizi nevtrona so se nova orodja preučevanja in reševanja problemov hitro razširila na druga področja [4].

Z razvojem računalništva je bilo hitrega razvoja deležno tudi področje modeliranja in simulacije. Tako je to področje postalo eno izmed nepogrešljivih orodij pri preučevanju in analizi bolj ali manj kompleksnih sistemov tako v različnih znanstvenih kot industrijskih področjih.

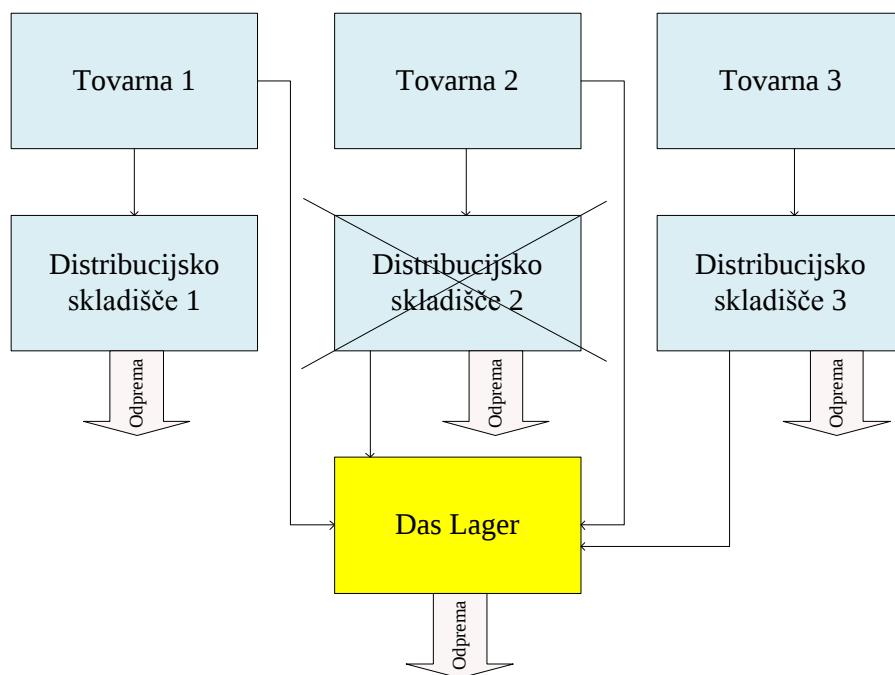
Prednosti modeliranja in simulacij je veliko. Najpogosteje se modelira realne sisteme, kjer so spremembe v dejanskem sistemu težke, nepraktične ali predrage. Z modeliranjem in simulacijo pridobimo boljše razumevanje pojavov in procesov, ki se odvijajo v opazovanem sistemu. Z uporabo simulacije pridobimo tudi edinstven vpogled na sistemske

spremenljivke, ki so bolj pomembne kot druge in v kakšni interakciji so te spremenljivke. Prav tako nam je omogočen vpogled na potencialno problematična področja iz različnih vidikov. Z identifikacijo in razumevanjem problematičnih področij lahko na koncu predlagamo ustrezne ukrepe za razrešitev tako potencialnih kot obstoječih problemov [5].

1.1 Opis problema

Sistem, ki bo predmet razprave tega diplomskega dela je avtomatizirano skladišče *Das Lager* nekega švicarskega podjetja, ki se ukvarja s proizvodnjo in distribucijo specializiranih kovin. V Švici se nahaja industrijsko območje kjer so njihovi proizvodni obrati ter distribucijska skladišča, ki so prikazani na sliki 1.1.

Zaradi akutnega pomanjkanja prostora in širitve proizvodnje si podjetje želi ukiniti distribucijsko skladišče 2 in na njegovem mestu postaviti nov proizvodni obrat. Želja stranke je, da bi z investicijo posodobila skladišče Das Lager, da bi bil sposoben prevzeti funkcijo distribucijskega skladišča za tovarno 2.



Slika 1.1 Shema proizvodnih obratov in skladišč.

Vsakršne konceptualne napake so tukaj potencialno zelo drage. Vsakršna kurativna

odprava napak pa je povezana s še večjimi stroški. Ker bi se naročnik takšnim scenarijem rad izognil se je obrnil na podjetje *Epilog d.o.o.* z željo, da bi zgradili računalniški model in s pomočjo simulacije preverili ali bi bilo novo skladišče sposobno prevzeti dodatno funkcijo in ali se v predlagani posodobitvi skladišča skrivajo kakšne pasti in potencialne nevarnosti.

2 Opis skladišča

Skladišče je komercialna zgradba, katere primarne funkcije so sprejem, hranjenje in odprema dobrin. S skladiščenjem se je človek srečeval že v preteklosti saj je shranjeval višek hrane in živine za nujen presežek. S porastom razvoja civilizacije so se skladišča zaradi visokih cen zemljišč znotraj večjih mest preselila na obrobje mest in v industrijska središča. Osnovna potreba večjih skladišč pa je predvsem dobra logistična povezava z zunanjim svetom. Tako se večja skladišča pogosto nahajajo v bližini večjih pristanišč, železnic in letališč.

Obstaja več različnih vrst skladišč. Lahko jih delimo na skladišča, ki hranijo končne izdelke ali na skladišča, ki hranijo surovine namenjene nadaljnji obdelavi. Poznamo tudi ročna, avtomatizirana, paletna, kasetna, ... Vendar pa bo za nas predvsem zanimiva delitev na ročna in avtomatizirana skladišča.

Za ročna skladišča velja, da transakcije izvaja skladiščnik, ki ga vodi nalog. Skladiščnik blago prevzame in ga odpelje na ustrezno mesto ali pa ga shrani na neko lokacijo v skladišču. Takšnemu tipu skladišč lahko pravimo tudi *človek k blagu* (angl. man-to-goods). Pri takšnih skladiščih se z materialom in dobrinami najpogosteje manipulira z

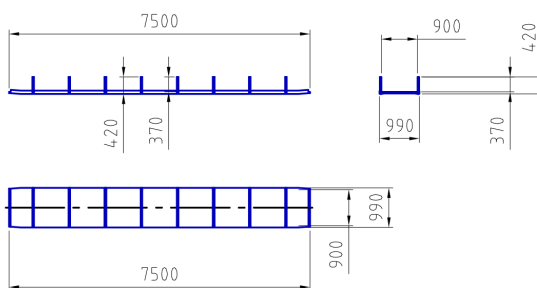
viličarji, ki jih upravlja skladiščnik.

V avtomatiziranih skladiščih se srečamo z računalniško vodenimi AS/RS (angl. Automated Storage and Retrieval Systems) napravami kot so na primer avtomatizirana regalna dvigala, tekoči trakovi, roboti, ... Te naprave željen material pripeljejo do skladiščnika oziroma na ustrezno mesto v skladišču. Obratno kot pri ročnih skladiščih, takšnemu tipu skladišč pravimo tudi skladišče tipa *blago k človeku* (angl. goods-to-man).

2.1 Predstavitev študijskega primerka

Das Lager je avtomatizirano skladišče, ki se nahaja v eni izmed industrijskih con v centralni Švici. Skladišče v dolžino meri približno 75m, okoli 60m v širino ter približno 20m v višino.

Skladišče je namenjeno shranjevanju dolgih predmetov. V našem primeru so ti dolgi predmeti kovinske palice, ki so povezane v snope. Ti snopi kovinskih palic se shranjujejo v *kasete* (slika 2.1), ki so posebni kovinski vsebniki, prilagojeni za shranjevanje dolgih predmetov in nikoli ne zapustijo opazovanega sistema.

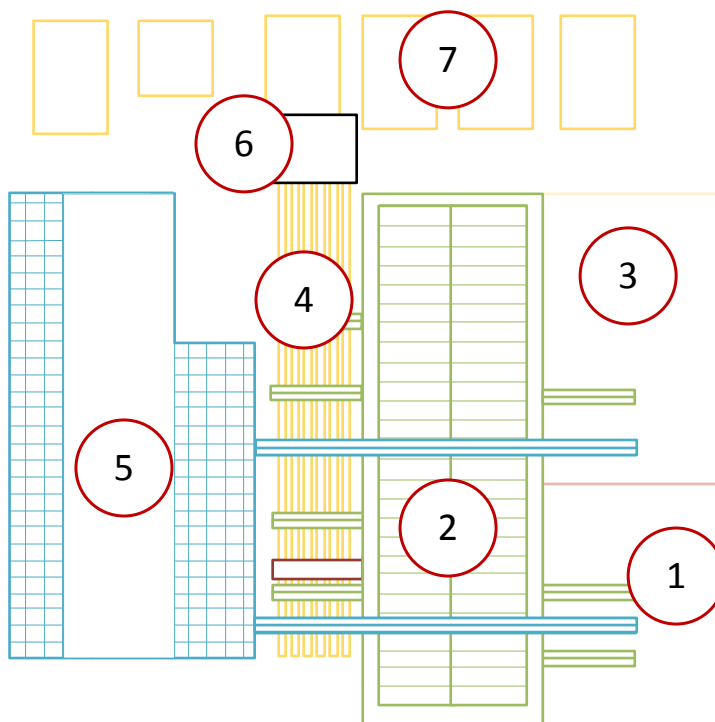


Slika 2.1 Skica kasete iz različnih perspektiv.

Na sliki 2.2 je prikazan trenutni tloris skladišča, kjer so označeni in v nadaljevanju tudi opisani posamezni deli skladišča.

1. *Prezemna cona* – Tukaj se odvija proces prevzema materiala. V skladišče iz bližnjih tovarn na prikolicah pripeljejo snope kovinskih palic. Delavec s pomočjo različnih žerjavov raztovarja material iz prikolice v kasete.

V tej coni se nahaja pet delovnih postaj. Štiri so namenjene prevzemu materiala, ki se shrani v nadvozen regalni sistem, ena delovna postaja pa je namenjena shranjevanju materiala v satast regalni sistem.



Slika 2.2 Tloris trenutnega skladišča Das Lager.

2. *Nadvozen regalni sistem (NRS)* – Je eden izmed dveh regalnih sistemov, ki jih najdemo v skladišču. Regalni sistem je prilagojen shranjevanju snopov kovinskih palic.

Nadvozno skladišče je visoko 16,45m in dolgo 44,8m. Sestavljeno je iz dveh blokov širine 7,1m, torej skupna širina regalnega sistema znaša 14,2m.

Nad vsakim blokom nadvoznega skladišča se nahajata dve *regalni dvigali*, katerih glavna naloga je transport kaset v oziroma iz regalnega sistema. Regalno dvigalo se vozi vzdolž posameznega bloka. Ko pride na ustrezno lokacijo se dvigalo spusti v režo ter iz strani zgrabi kaseto in jo odpelje na zelen cilj.

Regalni sistem ima prostora za 1928 kaset dolžine 7,1m. Kaseta takšne dolžine ima kapaciteto približno 4t. Ob polni zasedenost lahko torej nadvozno skladišče hrani 7928t materiala. Slika 2.3 prikazuje klasičen primer nadvoznega skladišča.

3. *Cona za dodatno obdelavo* – V tej coni potekajo dodatne obdelave materiala kot na

primer žaganje, brušenje, demagnetiziranje, sortiranje snopov, vezava snopov, ...

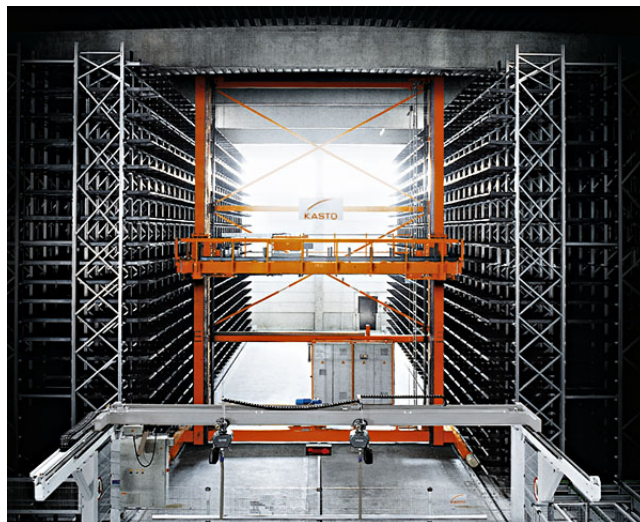
4. *Odpremne delovne postaje NRS* – V tej coni so na privzdignjeni platformi 4 delovne postaje za izskladiščenje materiala iz NRS. Delavec s pomočjo posebne programske opreme obdeluje postavke naročil. Avtomatika nato poskrbi, da se želen material pripelje na ustrezno delovno postajo. Ko material prispe na delovno postajo ga delavec poknjži in ga s pomočjo žerjava vzdigne iz kasete. Material nato spusti skozi bližnjo luknjo na tekoči trak, ki teče pod delovnimi postajami. Nabran material je tako na poti proti odpremni coni.
5. *Satast regalni sistem (SRS)* – Je drugi izmed dveh regalnih sistemov v skladišču. Ta sistem je sestavljen iz dveh blokov različnih dolžin. Levi blok sistema je prilagojen za hrambo 663 krajših kaset s kapaciteto 2t in 443 daljših kaset s kapaciteto 4t. Skupna kapaciteta regalnega sistema je 3098t.

Med blokoma se nahaja regalno dvigalo, ki do posamezne celice dostopa z načinom *naključnega dostopa*. Ko regalno dvigalo prispe do ustrezne celice zgrabi kaseto in jo naloži na svojo mizo. Nato regalno dvigalo odpelje kaseto na ustrezno mesto. Slika 2.4 prikazuje primer satastega regalnega sistema.

6. *Sortirni žerjav* – Na koncu tekočega traku, ki teče pod odpremnimi delovnimi postajami NRS se nahaja *sortirni žerjav* katerega naloga je, da odpremno enoto



Slika 2.3 Primer nadvoznega skladišča. (vir: www.kasto.com)



Slika 2.4 Primer satastega skladišča. (vir: www.kasto.com)

ustrezno razvrsti na eno izmed odpremnih ramp. Žerjav lahko naenkrat prevzame 1, 2 ali 3 snope.

7. *Odpremna cona* – Sortirni žerjav na eno izmed *odpremnih ramp* zlaga snope. Poleg odpremnih ramp je prostor kjer parkira tovorno vozilo na katerega nato s pomočjo portalnih žerjavov naložijo material.

2.1.1 Opis procesov znotraj skladišča

Osnovna dejavnost skladišča je navidez precej trivialna. Pravkar prispelo blago ni takoj porabljeno ampak je shranjeno dokler ga stranka ne potrebuje. Ko stranka naroči blago se pridobi ustrezne artikole, ki se jih nato pripravi na odpremo. Poenostavljeno se torej znotraj skladišča odvijajo štiri funkcije [1, 2]:

- prevzem blaga (angl. receiving),
- skladiščenje blaga (angl. storing),
- pridobivanje blaga (angl. picking),
- odprema blaga (angl. shipping).

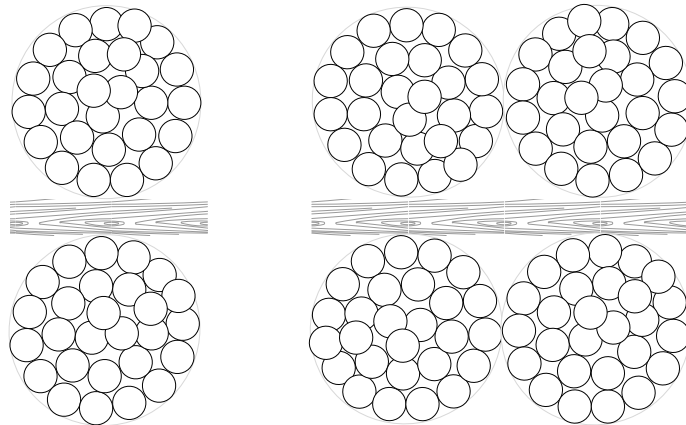
Prevzem blaga

Prevzem blaga je pomemben prvi korak v materialnem toku skladišča. To je proces pri katerem se iz zunanjega izvora v skladišče shrani material [1].

V našem primeru imamo tri različne izvore, in sicer; tovarna 1, tovarna 2 in tovarna 3. Tovorno vozilo na prikolici pripelje material v prevzemno cono. S pomočjo naloga, ki pride zraven materiala skladiščnik preveri, če se vsebina naloga ujema z dejanskim tovorom na prikolici. Nato prične delavec s pomočjo portalnega žerjava z razlaganjem tovara iz prikolice v kasete.

Material na prikolici je lahko zložen na dva različna načina, ki je odvisen od izvora materiala. V primeru, da izvira material iz tovarne 1 ali 3, potem je material zložen tako kot prikazuje leva shema na sliki 2.5. Kot lahko vidimo na sliki, sta dva snopa palic naložena drug nad drugim pri čemer sta ločena s kosom lesa. V primeru, da material izvira iz tovarne 2 pa je material zložen kot prikazuje desna shema na sliki 2.5.

V prvem načinu potrebuje delavec več časa, da napolni kaseto saj lahko naenkrat zgrabi le dva snopa, medtem ko lahko pri drugem načinu naenkrat zgrabi štiri snope in posledično prej napolni kaseto.



Slika 2.5 Stranski pogled na dva načina kako je zložen material na prikolico.

Običajno skladiščnik glede na prispeli material naroči ustrezno število praznih kaset na delovno postajo.

Ko je material položen v kaseto ga delavec preuredi tako, da je omogočen prost dostop v regalni sistem. Ob pritisku na gumb se napolnjena kaseto vskladišči v regalni sistem.

Tabela 2.1 Nekaj najpogostejših kriterijev za določanje hrambene lokacije [1].

Kriterij	Zahteva
Tehnične zahteve	Upoštevanje dovoljene obremenitve lokacije Enakomerna obremenitev regalnega sistema Optimalna izraba prostora
Izvedbena optimizacija	Minimizacija transportnih premikov Maksimalen promet Maksimalna izraba hrambene kapacitete
Varnostne in pravne regulative	Ločena hramba (npr. hrana)

Lahko se zgodi, da delavec material iz prikolice začasno raztovarja na tla in šele kasneje v kaseto. Ko je kaseto napolnjena, delavec primerja stehtano težo, ki jo kaže tehtnica na delovni postaji s težo na priloženem delovnem nalogu. Če se teži ujemata skladiščnik poknjži material in vskladišči napolnjeno kaseto.

Skladiščenje blaga

Pri skladiščenju blaga gre v splošnem za proces prenašanja in shranjevanja blaga v regalni sistem. V ta namen mora biti določena ciljna lokacija blaga. Vlogo določanja lokacije ponavadi prevzame *skladiščno informacijski sistem* (angl. Warehouse Management System – WMS) [1]. Pri določanju lokacije WMS upošteva različne kriterije, kot na primer dimenzije materiala, dimenzije lokacije in varnostne kriterije, včasih pa tudi pravne kriterije. Najpogosteje uporabljene strategije in kriteriji pri dodeljevanju lokacije shrambe materiala so prikazani v tabeli 2.1.

V našem modelu smo zaradi enostavnosti privzeli, da WMS svojo funkcijo opravlja optimalno. Samega dodeljevanja in pomnjenja lokacij ter medsebojnega razločevanja artiklov nismo modelirali. Predpostavili smo, da je material na katerega se nanašajo transakcije vedno na voljo.

Pridobivanje blaga

Pridobivanje blaga je proces izpolnjevanja postavk naročila. Skladiščnik z iskanjem in zbiranjem pridobiva želene artikle, ki se kasneje pripravijo za odpremo [2]. Nabranemu materialu, namenjenemu odpremi pravimo *odpremna enota* [1]. Skladiščno informacijski sistem nadzoruje celoten proces nabiranja in daje povratne informacije o pravilnem izvajanju procesa [1]. Ko skladiščnik zaključi s pridobivanjem blaga se posodobi stanje zaloge v inventarju.

Pridobivanje blaga je eden najbolj delovno intenzivnih procesov v skladišču. Zato mu je med samim načrtovanjem sistema potrebno nameniti posebno pozornost [1].

V našem primeru skladiščnik s pomočjo skladiščno informacijskega sistema izpolnjuje postavke naročila. Regalni sistem oskrbuje delovne postaje z materialom. Skladiščnik nato iz kasete nabere določene artikle. Ko je nabral zelen material se kaseta s preostalim materialom shrani nazaj v regalni sistem.

Odprema blaga

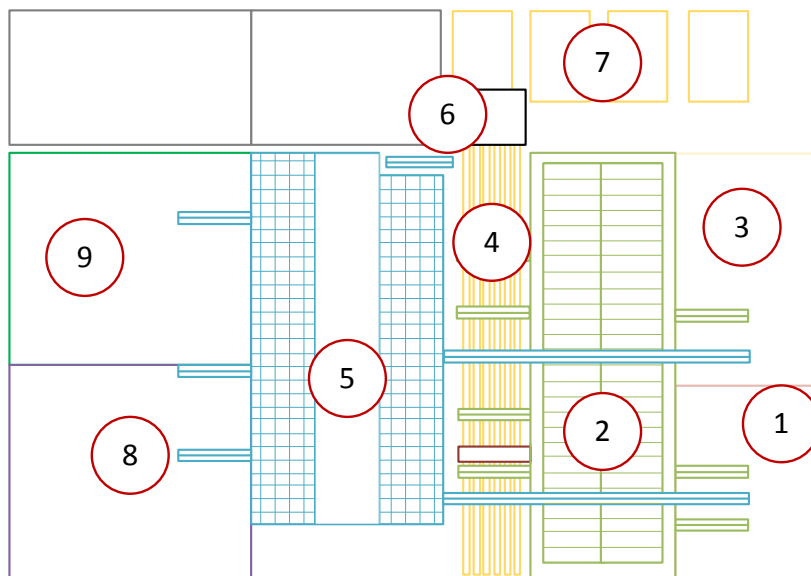
Glavna naloga odpreme cone je konsolidacija odpremnih enot v skladu z naročilom stranke in nalaganjem blaga na transport (tovornjak, vlak, ladja, ...). Odprema je obraten proces kot prevzemni proces [1].

V primeru odpremnih enot iz NRS, skrbi za njihovo konsolidacijo sortirni žerjav, ki nabran material razvrsti na ustrezno odpremno rampo. Iz odpremnih ramp se material naloži na tovorno vozilo.

2.1.2 Predlagana rešitev

Slika 2.6 prikazuje tloris posodobljenega skladišča. V načrtu je vidna razširitev na zahodni strani skladišča ter posodobljen satast regalni sistem z blokoma enake širine. Funkcije con skladišča označenih od 1 do 7 ostanejo iste kot na sliki 2.2. Na zahodni strani pa se dodata dve novi coni.

8. *Odpremna cona za SRS* – V tej coni sta načrtovani dve delovni postaji katerih primarna funkcija je odprema materiala iz novega satastega regalnega sistema. Končni cilj je tudi preurediti organizacijo dela na takšen način, da bosta delovni postaji sposobni naložiti tovornjak (približno 24t) v manj kot eni uri.



Slika 2.6 Koncept posodobljenega skladišča Das Lager.

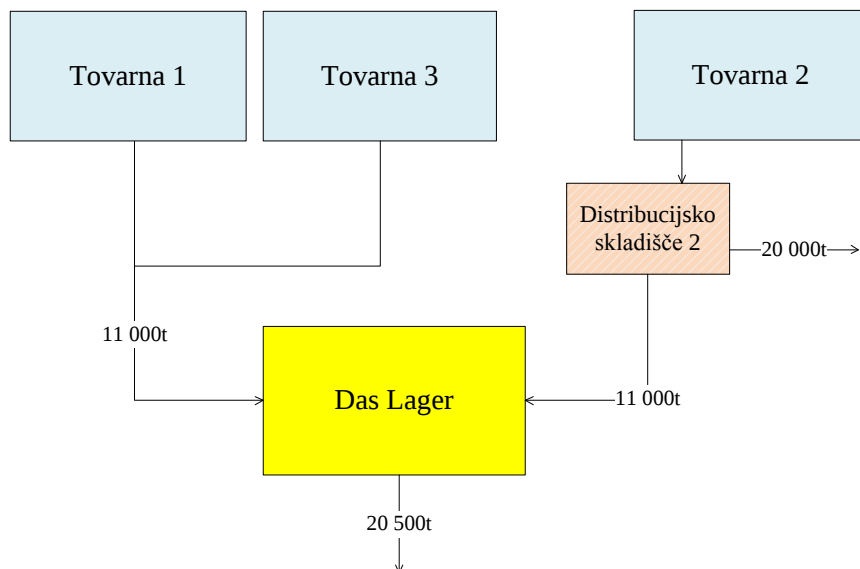
9. *Konfekcionirna cona* – V tej coni je načrtovana ena delovna postaja, ki se lahko obnaša kot prevzemna ali kot izskladiščna delovna postaja. V simulaciji je bila ta cona obravnavana kot prevzemna postaja za satast regalni sistem.

2.1.3 Materialni tok

Slika 2.7 prikazuje materialni tok skladišča za obdobje od junija 2010 do maja 2011. Kot je iz sheme razvidno, se v skladišče steka material iz vseh treh tovarn. Vsota materiala iz tovarn 1 in 3 znaša približno 11 000t, medtem ko količina materiala prevzetega iz tovarne 2 znaša tudi okoli 11 000t. Skupno torej znaša količina prevzetega materiala približno 22 000t. Odpremne materiala je bilo okoli 20 500t, kar nam pove, da se je zaloga v skladišču v danem obdobju dvignila za 1500t.

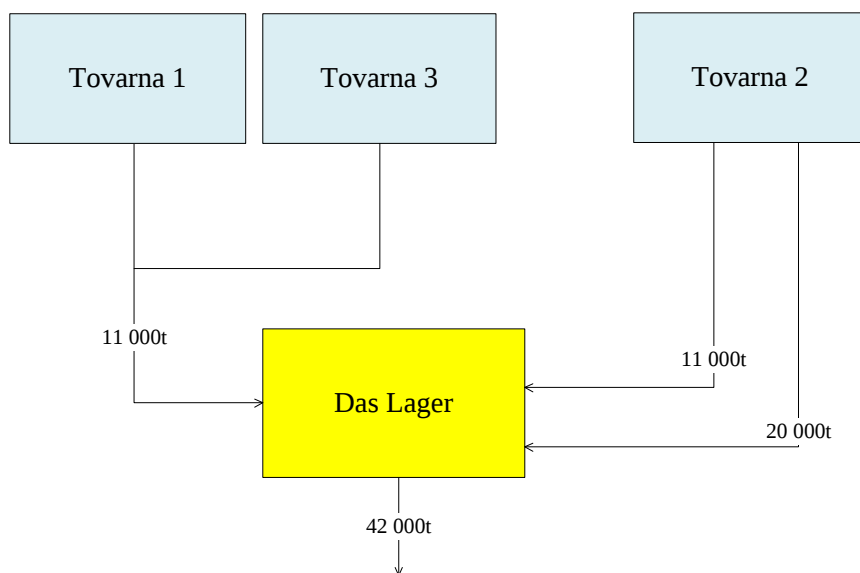
Želeno stanje

Želja naročnika je, da bi z integracijo distribucijskega skladišča v posodobljen satast regalni sistem ves promet iz tovarne 2 preusmeril v Das Lager. Glede na obstoječe podatke o materialnem toku, lahko iz slike 2.8 razberemo znatno povečanje vskladiščenega materiala v skladišče. Prav skupna količina prevzetega materiala je parameter, ki vpliva na



Slika 2.7 Shema trenutnega materialnega toka.

delovanje skladišča in je za naročnika simulacije tudi najbolj zanimiv.



Slika 2.8 Shema zelenega materialnega toka.

Podatki

Podatki katere je priskrbel informacijski oddelek skladišča so navedeni za prej omenjeno obdobje od junija 2010 do konca maja 2011. Podatki prikazujejo število prevzemnih in odpremnh *transakcij*.

Transakcija predstavlja skupek premikov regalnega dvigala za izpolnitev prevzemne ali odpreme transakcije. Realni ekvivalent transakcije v našem modelu predstavlja postavka naročila odpremne ali prevzemne naloga.

Prevzemna transakcija je predstavljena tako, da skladiščnik najprej na delovno postajo pošlje prazno kaseto. Ko kaseto prispe na delovno postajo delavec vanjo naloži material in jo pošlje nazaj v regalni sistem.

Odpremna transakcija izgleda tako, da delavec glede na nalog naroči kaseto z ustreznim materialom na delovno postajo. Ko kaseto prispe na delovno postajo skladiščnik iz nje vzame potreben material in jo pošlje nazaj v regalni sistem.

V tabeli 2.2 je za vsak regalni sistem navedena količina prevzemnih in odpremnh transakcij. Podatki iz tabele 2.2 predstavljajo osnovo za izračun vhodnih podatkov v simulacijo.

Pri prevzemnem procesu delavec naloži material v kaseto in ob pritisku na gumb regalno dvigalo odpelje napolnjeno kaseto na ustrezno mesto. Ko regalno dvigalo prispe na cilj tam tudi počaka dokler ne dobi novih navodil. Pri izskladiščenju se regalno dvigalo iz trenutne točke premakne do celice kjer se nahaja izvorna kaseto z zelenim materialom in naloži material na svojo mizo.

Tabela 2.2 Število transakcij za posamezen regalni sistem junij 2010 – maj 2011.

Mesec	Nadvozno skladišče		Satasto skladišče	
	Prevzem	Odprema	Prevzem	Odprema
Jun 2010	758	1586	76	171
Jul 2010	465	1188	23	128
Aug 2010	205	795	21	70
Sep 2010	731	1297	66	182
Okt 2010	935	1785	94	155
Nov 2010	888	1761	38	88
Dec 2010	605	1036	27	45
Jan 2011	640	1807	29	146
Feb 2011	714	1545	58	137
Mar 2011	688	1632	61	171
Apr 2011	461	1628	35	163
Maj 2011	576	1404	41	87
Skupaj	7711	17464	569	1543

3 Razvoj modela

Pri razvoju modela je v mislih potrebno imeti dva nasprotujoča aspekta – verodostojnost in preprostost. Na žalost so verodostojni modeli zelo redko preprosti in preprosti modeli so redko verodostojni. Model naj bi bil po eni strani ustrezen približek realnega sistema, ki naj bi vključeval pomembnejše vidike obravnavanega sistema. Po drugi strani pa je potrebno skrbeti, da model ni prekompleksen za razumevanje, manipulacijo in analizo [9].

Obstaja več različnih načinov izvajanja simulacijskih projektov. Po Naylorju [9] kažejo izkušnje, da simulacijski eksperimenti vključujejo sledeče korake:

1. formulacija problema,
2. zbiranje in procesiranje podatkov iz realnega sistema,
3. formulacija matematičnega modela,
4. ocenjevanje parametrov in operativnih karakteristik podatkov realnega sistema,
5. vrednotenje modela in ocen parametrov,

6. formulacija računalniškega programa,
7. validacija,
8. načrtovanje simulacijskih eksperimentov,
9. analiza simulacijskih podatkov.

Zelo podoben oris o sestavi procesa modeliranja in simuliranja imata avtorja Birta in Arbez [5]. Posamezen korak njunega procesa modeliranja in simulacije je:

1. opis projekta,
2. izdelava konceptualnega modela,
3. izdelava simulacijskega modela,
4. izbira simulacijskega programa,
5. verifikacija in validacija modela,
6. izvajanje simulacijskega programa in eksperimentiranje,
7. analiza rezultatov.

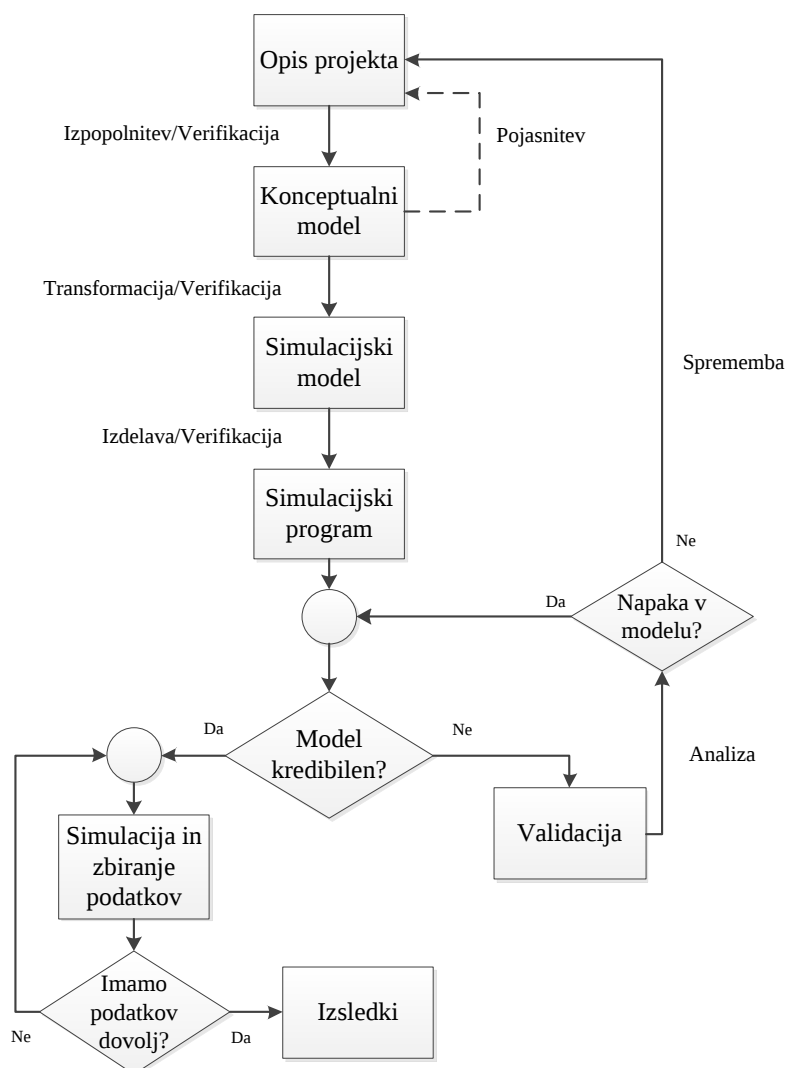
3.1 Postopek razvoja modela

V naslednjem delu bomo predstavili nekaj ključnih faz, ki so po [5] potrebne za razvoj modela in so grafično predstavljene na sliki 3.1.

3.1.1 Opis projekta

Predstavlja začetno fazo katere glavni cilj je izdelava dokumenta *opis projekta*. Dokument z opisom projekta vsebuje cilje projekta, opis lastnosti in obnašanje sistema, ki ga preučujemo. Kot lastnosti sistema se najpogosteje navaja entitete, ki so za sistem relevantne ter interakcije med njimi. Za uspešno umestitev entitet v logičen kontekst se zraven v dokumentu opišejo tudi različne strukturne lastnosti kot je na primer topologija sistema, mreže, ...

Opis projekta je neformalen dokument, katerega cilj je, da razvojna ekipa dobro razume problemsko domeno, zato se v njem uporablja naravni jezik z veliko rabo žargonskih



Slika 3.1 Potek procesa izdelave modela in simulacije [5].

izrazov. Poleg besedila se k dokumentu priložijo tudi neformalne skice sistema oziroma procesov, ki se odvijajo v sistemu.[5].

V našem primeru je opis projekta priskrbel naročnik simulacije. V dokumentu je opisano skladišče, ki se bo simuliralo.

V dokumentu je zabeležena kapaciteta obeh regalnih sistemov kot tudi trenutna za-

sedanost obeh regalnih sistemov v juniju 2010. Navedeni so tudi podatki o številu prevzemnih in odpremnih transakcij za posamezen mesec za vsak regalni sistem. Opisana sta tudi prevzemni in odpremni proces, ki se najpogosteje dogajata v skladišču.

Za samo simulacijo so pomembni podatki o zmogljivostih regalnih sistemov. V dokumentu se nahajata teoretična zmogljivost regalnih dvigal, ki je bila izračunana s pomočjo smernic *FEM 9.851* ter trenutna izraba regalnih dvigal, ki je nakazovala nizko izkoriščenost sistema.

V samem dokumentu je tudi nekaj podatkov, ki za samo simulacijo niso bistveni. Takšni podatki so na primer informacije o dodatni obdelavi materiala (žaganje, brušenje, ...). Dodatna obdelava materiala predstavlja zanemarljiv delež celotnega prometa v skladišču, zato se je naročnik odločil, da funkcij cone za dodatno obdelavo ni potrebno simulirati. V skupino podatkov, ki za potrebe simulacije niso pomembni so tudi podatki o skladiščno informacijskem sistemu.

3.1.2 Konceptualni model

Informacije in podatki v dokumentu z opisom projekta so v veliki večini nestrukturirani in predvsem neformalni. Za prehod v naslednjo fazo mora opis projekta iti čez proces izpopolnitve, kjer se dodajo nujne podrobnosti in uvede določeno stopnjo formalizma. S predstavitevjo na višjo raven abstrakcije kot jo ima opis dokumenta dosežemo večjo natančnost, izpopolnjenost do sedaj zbranih informacij ter odpravimo dvoumnost. Rezultat takšne izpopolnitve modela imenujemo *konceptualni model*. Zgodi se tudi lahko da se sama izdelava konceptualnega modela zaradi pomanjkanja ali dvoumnih informacij prekine in se vrne nazaj v fazo opisovanja projekta [5].

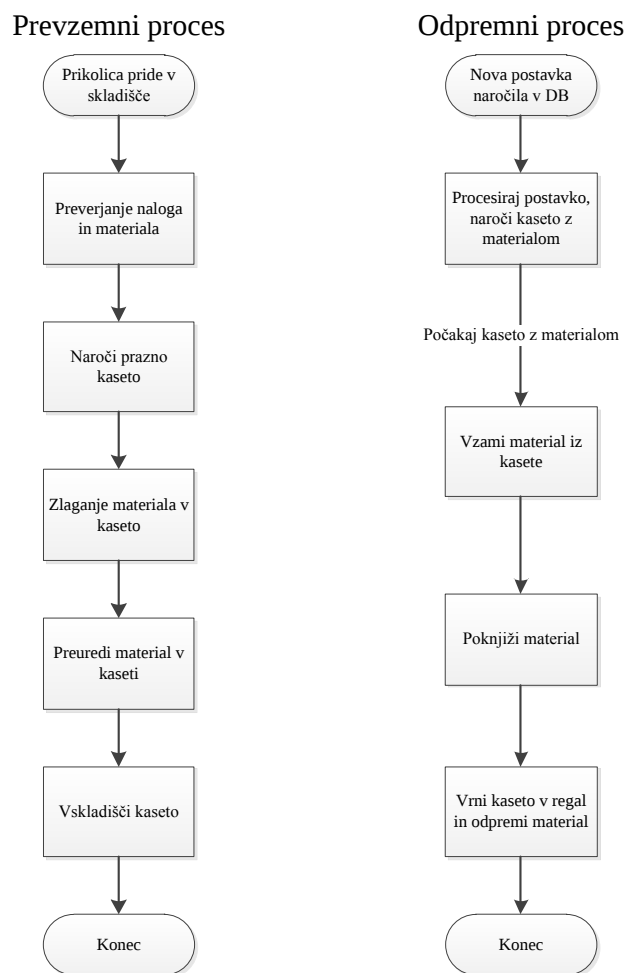
Obstaja več načinov formalizacije modela. Uporabimo lahko matematične enačbe, grafične predstavitve, psevdokodo ali pa kar kombinacijo vsega navedenega [5].

Konceptualni model je tako lahko kombinacija različnih delov modela in ni potrebno, da je vsak del predstavljen z enako tehniko formaliziranja. Pomembno je le, da je konceptualni model kar se da natančen in jedrnat.

Konceptualni model predstavlja tudi most med opisom projekta in simulacijskim modelom in je v veliko pomoč različnim udeležencem projekta. Prav tako pa konceptualni model predstavlja smernice razvojni ekipi pri implementaciji modela [5].

V našem primeru je bil konceptualni model zelo preprost saj sta procesa vskladiščenja in izskladiščenja precej preprosta. Na sliki 3.2 je s tehniko tokovnih diagramov

predstavljen konceptualni model prevzemnega in odpremne procesa.



Slika 3.2 Konceptualni model prevzemnega in odpremne procesa.

3.1.3 Simulacijski model

Glavni pogoj za pričetek izvajanja eksperimentalne faze je izvršljiv računalniški program, ki pooseblja model glede na konceptualni model. Do izvršljivega računalniškega programa pridemo s preoblikovanjem konceptualnega modela pri čemer upoštevamo sintaktična in semantična pravila programskega jezika, ki ga uporabljamo za izdelavo simulacijskega

modela [5].

Izvajanje takšnega računalniškega programa posnema oziroma imitira obnašanje obravnavanega sistema. Odgovori na vprašanja oziroma želeni cilji, ki smo si jih zastavili v fazi opisa projekta so rezultat imitacije obnašanja preučevanega sistema [5].

Simulacijski model je ponavadi spisan v specializiranih programskih jezikih s podporo posebnim zahtevam, ki jih imajo raziskave s simulacijo. Predstavniki takšnih programskih jezikov so: SIMSCRIPT II.5, GPSS, MODSIM, Simula, SIMAN, itd.

Uporabljena programska oprema

Simulacijski model smo razvili s programom *SIMPROCESS*, ki je orodje za hierarhično modeliranje, diskretno simulacijo (angl. discrete-event simulation) ter ocenjevanja stroškov na osnovi aktivnosti (angl. Activity Based Costing). *SIMPROCESS* vsebuje vse potrebne gradnike za gradnjo dinamičnih modelov poslovnih procesov. Zelo uporabna je tudi funkcionalnost pisanja t.i. *izrazov* (angl. expressions), ki omogočajo modeliranje kompleksnejšega obnašanja sistemov.

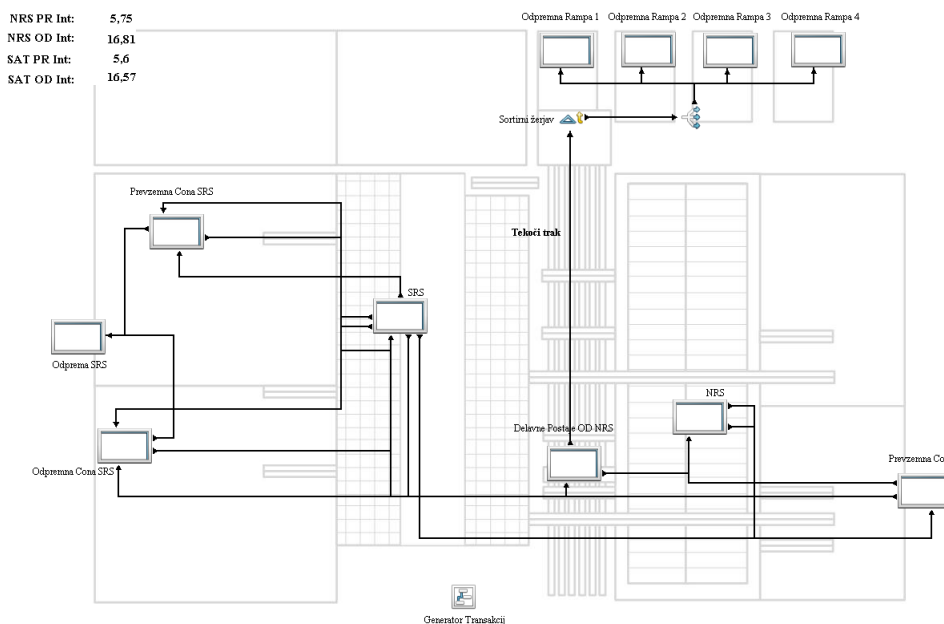
Gradnja modela s programom *SIMPROCESS* poteka tako, da na delovno površino povlečemo ustrezne gradnike, ki jih nato ustrezno povežemo in s tem definiramo tok procesa. Definiramo tudi entitete, resurse in potrebne parametre, ki so za model pomembni in jih ustrezno umestimo v kontekst modela. Rezultat modeliranja je XML datoteka, ki predstavlja model sistema [10].

3.1.4 Simulacijski program

Zgoraj opisani simulacijski model, ki je v bistvu programska koda sama od sebe ni zmožna posnemati obnašanja modeliranega sistema. Za potrebe same simulacije je tako potrebna še dodatna storitev, ki ji rečemo *simulacijski program* [5].

Naloge simulacijskega programa padejo v dve kategoriji. V prvo kategorijo spadajo na primer inicializacija, kontrola časovnih intervalov, upravljanje s stohastičnimi funkcijami, zbiranje podatkov, itd. V drugo kategorijo pa spadajo na primer grafične predstavitve (animacija in vizualizacija), orodja za analizo podatkov, podpora za podatkovne baze, optimizacijska orodja, ipd. [5].

Podpora prej omenjenih storitev se med programskimi rešitvami močno razlikuje. Skoraj vedno je potrebna začetna inicializacija parametrov. Pogosto so potrebni tudi eksplicitni programski koraki [5].



Slika 3.3 Slika razvitega modela skladišča v programu SIMPROCESS.

Poleg same funkcionalnosti razvoja in gradnje modela, SIMPROCESS podpira tudi izvajanje same simulacije. Kot smo povedali že prej, je naš model predstavljen v obliki XML datoteke. Ta datoteka predstavlja tudi vhod v našo simulacijo. Ko simulacijo poženemo se model v XML datoteki prevede v izvajalno kodo. Ta koda predstavlja simulacijski program, ki nato posnema delovanje realnega sistema.

SIMPROCESS podpira tudi animacijo samega izvajanja simulacijskega programa. Ta funkcionalnost je uporabna za validacijo modela s pomočjo katere preverjamo pravilnost obnašanja preučevanega modela. Med izvajanjem simulacijskega programa lahko z uporabo dinamičnih grafov spremljamo tudi vrednosti spremenljivk, ki nas zanimajo.

3.1.5 Operativne faze

Do sedaj se je razvoj modela in simulacije osredotočal na soodvisne predstavitve obravnavanega sistema. Sedaj prehaja projekt v bolj operativne faze. Prva izmed faz je *verifikacija* in *validacija*. Namen te faze je ugotoviti kredibilnost modela z vidika ciljev projekta. Naslednja faza je *eksperimentalna* in je na sliki 3.1 predstavljena kot proces "Simulacija in zbiranje podatkov". V tem procesu se z zaporedjem eksperimentov zbirajo podatki in rezultati, ki se kasneje analizirajo in shranjujejo v bazo podatkov [5].

3.1.6 Verifikacija in validacija modela

Računalniški modeli se uporabljajo za napovedovanje ali primerjavo zmogljivosti novega ali spremenjenega sistema ali enakega sistema pod različnimi pogoji [6]. V vsakem izmed teh primerov želimo vedeti ali je naš model *dovolj natančen*. Zadostna natančnost označuje, da lahko računalniški model uporabimo kot zamenjavo za realni sistem za potrebe eksperimentiranja in analize.

Z *verifikacijo* modela zagotavljamo, da sta računalniški program modela in njegova implementacija pravilni [6]. Z različnimi procesi in tehnikami razvijalec modela zagotavlja pravilnost modela in da se ujema z dogovorjenimi specifikacijami in predpostavkami [8].

Z *validacijo* modela skušamo zagotoviti, da je model, ki ga razvijamo dovolj natančen za potrebe, ki smo jih navedli v opisu projekta [6]. Pri validaciji razvijalci modela skupaj z osebami, ki dobro poznajo delovanje realnega sistema pregledajo in ocenijo delovanje modela. S takšnimi tehnikami in pristopi razvijalci modela, stranka in odgovorni odločevalci zagotovijo ustrezno stopnjo natančnosti [8].

Tehnike verifikacije in validacije

V nadaljevanju so predstavljene nekatere osnovne metode verifikacije in validacije [6]:

Animacija – Obnašanje modela je grafično prikazano s pomočjo animacije, ki se premika v času. Na primer premikanje delov v tovarni, ki so grafično prikazani med izvajanjem simulacije.

Primerjava z drugimi modeli – Različne rezultate simulacij validiranega modela lahko primerjamo z drugimi, že validiranimi modeli. Na primer rezultate preprostega simulacijskega modela lahko primerjamo z znanimi rezultati analitičnega modela. Lahko pa naš simulacijski model primerjamo z drugim simulacijskim modelom, ki je že validiran.

Degenerativni testi – Degenerativno obnašanje modela je testirano z izbiro ustreznih vhodnih vrednosti in začetnih parametrov. Na primer, ali se povprečno število zahtev v čakalni vrsti enega strežnika zvišuje, ko je intenziteta porajanja zahtev višja od intenzitete streženja zahtev.

Dogodkovna validacija – Pri dogodkovni validaciji primerjamo dogodke iz simulacijskega modela z dogodki iz realnega sistema in določimo stopnjo podobnosti.

Testiranje robnih pogojev – S testiranjem robnih pogojev testiramo ali je struktura modela in njegov izhod verjeten v robnih pogojih oziroma za različne malo verjetne kombinacije. Na primer, če v produkciji ni materiala potem mora biti izhod iz produkcije enak nič.

Navidezna validacija – Pri navidezni validaciji skupaj z nekom, ki dobro pozna delovanje in obnašanje realnega sistema preverimo, če je obnašanje modela navzven smiselno. Na primer, preverimo ali so rezultati simulacije ob določenem vhodu smiselni.

Validacija z zgodovinskimi podatki – Če obstajajo zgodovinski podatki lahko del podatkov uporabimo za gradnjo modela, drug del podatkov pa uporabimo oziroma testiramo, če se naš model obnaša kot realni sistem.

Interna validacija – Pri interni validaciji naredimo nekaj ponovitev simulacije stohastičnega sistema, da določimo stopnjo interne variabilnosti modela. Velika variabilnost sistema lahko povzroči vprašljivo ustreznost sistema, ki ga obravnavamo.

Računalniški modeli so pogosto narejeni za izpolnitev zelo specifičnih namenov ali množico ciljev. Čeprav je model validiran za to množico ciljev ni nujno, da je model veljaven tudi za kakšno drugo. Vendar pa avtor članka [6] meni, da temu ni tako. Avtor je mnenja, da ko je enkrat vzpostavljen validiran model za prvoten namen bi moral biti veljaven tudi za druge namene, ki so znotraj istega obsega in nivoja podrobnosti. V takšnem primeru se lahko zgodi, da model ni sposoben rešiti novih ciljev ampak glavni razlog za to bi moral biti nezadosten obseg modela ali premajhen nivo podrobnosti.

3.2 Izbira časovnega okna

V obdobju od junija 2010 do maja 2011 je skladišče delovalo enoizmensko z delavnim časom od 8:00 do 17:00. Ob 12:00 imajo delavci eno uro premora za kosilo oziroma počitek.

V sami simulaciji se premor ni simuliral tako, da smo predpostavili, da en delavni dan traja 8 ur in sicer od 8:00 do 16:00. Ta predpostavka je poenostavila implementacijo urnika v modelu.

3.3 Definicija procesov

Čeprav smo v poglavju 2 omenili, da se v skladišču ponavadi odvijajo štiri funkcije smo se med obiskom skladišča dogovorili, da bomo simulirali le dve najpomembnejši funkciji skladišča:

- prevzemni ali vskladiščni proces,
- odpremni ali izskladiščni proces.

Po dogovoru z naročnikom sta bila procesa preskladiščenja in dodatne obdelave materiala iz simulacije izvzeta saj predstavljata zanemarljiv delež skupnega prometa.

3.4 Zajem podatkov

Podatki, ki predstavljajo vhod v model so vnaprej agregirani podatki surovih podatkov iz skladiščno informacijskega sistema. Na žalost se je izkazalo, da imajo priskrbljeni podatki omejen obseg. Z neobdelanimi podatki bi lahko naredili bolj natančno analizo intenzitete porojevanja transakcij, kjer bi upoštevali mesečne minimume in maksimume. S takšno omejitvijo je bila onemogočena podrobnejša oziroma natančnejša analiza. Zaradi omejenega obsega podatkov smo bili med razvojem modela primorani narediti nekaj predpostavk o katerih smo se predhodno posvetovali z naročnikom projekta.

Podatki o prometu skladišča so bili dovolj za izračun medprihodnih časov med transakcijami. Podatki o časih strežbe in obdelave posamezne zahteve so bili pridobljeni z merjenjem. Meritve je izvajal naročnik.

Čas posameznega procesa je bil izmerjen z opazovanjem dela. Posamezen proces se je razbil na več podprocesov in vsakemu izmed podprocesov je bil izmerjen čas. Meritve so bile opravljene tako, da so večkrat izmerili čas posameznega podprocesa. Na koncu se je izračunala povprečna vrednost izmerjenih vrednosti, ki se je nato v modelu uporabila kot čas strežbe. Tabela 3.1 prikazuje primer meritev, ki so bile priskrbljene s strani naročnika.

3.5 Povzemanje podatkov

Iz podatkov o številu prevzemnih in odpremni transakcij za vsak mesec v opazovanem obdobju smo izračunali tudi povprečno število transakcij na dan ter povprečno število

Tabela 3.1 Primer časovnih meritev pri prevzemnem procesu z dvigom dveh snopov iz prikolice.

Korak	Izmerjeni časi [s]
Začetek: Dvig snopa iz prikolice	67, 50, 48, 52, 51
Konec: Razvezava jermenov v kaseti	
Začetek: Razvezava jermena v kaseti	44, 47, 45, 46
Konec: Dvig snopa iz prikolice	
Začetek delitve snopov v kaseti	67, 97, 90
Konec: Žerjav zapusti kaseto	

transakcij na uro. Zaradi omejene globine podatkov smo tukaj naredili predpostavko, da je intenziteta transakcij preko celega meseca enaka. S takšno predpostavko nismo upoštevali dnevnih, tedenskih oziroma mesečnih vrhov. Na primer, skladišče ima lahko konec meseca večjo intenziteto prevzemnih transakcij. Lahko se tudi zgodi, da ima skladišče proti koncu tedna višjo oziroma nižjo intenziteto določenih transakcij. S podatki o lokalnih minimumih in maksimumih intenzitete transakcij bi lahko natančneje modelirali promet skladišča.

3.6 Sistemske predpostavke

Kot že omenjeno smo iz različnih razlogov pri gradnji modela naredili nekaj predpostavk:

- zaradi enostavnejše gradnje modela smo privzeli strežno strategijo *FIFO* (angl. First In - First out),
- material iz tovarne 2 se shranjuje samo v satast regalni sistem in se ne komisionira,
- material iz tovarne 1 in tovarne 3 se shranjuje samo v nadvozen regalni sistem,
- pakiranje, brušenje in ostale dodatne obdelave se ne simulirajo,
- preskladiščenja se ne simulira,
- vsaki coni je dodeljen en delavec, ki obdeluje transakcije,
- pri prevzemnih transakcijah se vedno zapolni prazna kaseta (ni priskladiščenja),
- realen promet satastega regalnega sistema v obdobju junij 2010 do maja 2011 je tako majhen, da smo ga zanemarili,

- za vsak mesec so medprihodni časi enakomerno porazdeljeni,
- skladišče obratuje z eno 8 urno izmeno,
- prazniki in dela prosti dnevi niso upoštevani v simulaciji.

3.7 Statistične predpostavke

Iz pridobljenih podatkov smo morali določiti medprihodne čase med posameznimi transakcijami. Predpostavili smo, da so transakcije med seboj *neodvisne*. To pomeni, da je medprihodni čas med dvema transakcijama neodvisen od prejšnjih medprihodnih časov ostalih transakcij. S pomočjo te predpostavke smo lahko naredili statistično predpostavko, da so medprihodni časi porazdeljeni v skladu z *eksponentno porazdelitvijo*. Za čase strežbe pa smo predpostavili *normalno porazdelitev*.

4 Analiza Modela

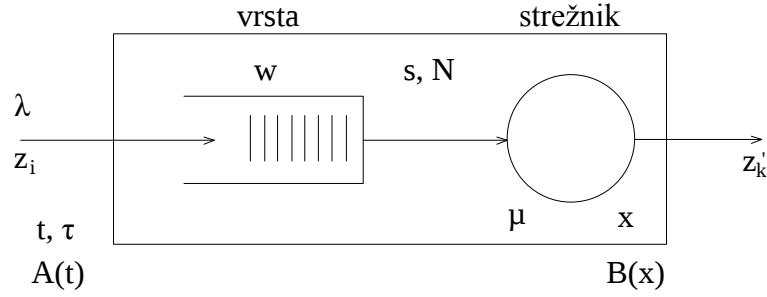
Preden se posvetimo analizi zgrajenega modela, bomo nekaj pozornosti namenili osnovam *strežnih sistemov* in osnovam teorije *čakalnih vrst*.

Teorija vrst je veda, ki se ukvarja s preučevanjem čakalnih vrst (angl. *queues*) in čakalnih sistemov (angl. *queuing systems*). Ko zgradimo model lahko s pomočjo teorije čakalnih vrst predvidimo dolžine čakalnih vrst in čakalne čase. Teorija vrst izvira iz raziskav Agnerja Kraupa Erlanga, ki je v začetku 20. stoletja izdelal model, ki je predstavljal telefonsko centralo v Copenhagenu [11].

4.1 Osnove strežnega procesa

Strežni model je ponavadi sestavljen iz enot, ki vsebujejo lastnosti *strežnega procesa*. Takšni enoti pravimo *strežna enota* (angl. *serving unit*) in obsega čakalno vrsto in en strežnik, kot je prikazano na sliki 4.1 [12].

Na sliki 4.1 so s simbolom z označene zahteve za strežbo, ki vstopajo v čakalno vrsto. Zahteve, ki so že postrežene so označene z z' . Zahteva z_i predstavlja i -to zahtevo, ki vstopa v vrsto in z'_k označuje k -to zahtevo, ki izstopa iz strežne enote po v njej opravljeni



Slika 4.1 Strežna enota.

strežbi [12].

Pogosto nas zanima, koliko zahtev se v času t nahaja v naši strežni enoti. S simbolom $N(t)$ označimo število vseh zahtev, ki nepostrežene čakajo v vrsti ali pa zahteve, ki so v danem času t v strežbi in jih še ni na izhodu strežnika. Strežna enota je prazna, kadar sta tako čakalna vrsta kot tudi strežnik prazna [12].

Nedokončano delo v sistemu v času t označimo s simbolom $U(t)$. Ta veličina nam pove koliko časa je potrebno, da se postrežejo vse zahteve, ki so v času t v sistemu. Tako v primeru, da je $U(t) > 0$, potrebuje strežna enota določen čas, da konča streženje. Ko je streženje končano imamo $U(t) = 0$ in s tem tudi izpolnjen pogoj, da je strežna enota *prosta* (angl. idle). V primeru $U(t) > 0$ pa je strežna enota v stanju *zasedena* (angl. busy) [12].

S τ_i označimo čas vstopa zahteve z_i v strežno enoto. Bolj kot čas vstopa v sistem pa je za nas zanimiv *medprihodni čas* (angl. interarrival time), ki nam pove koliko časa je preteklo od prihoda zahteve z_{i-1} v strežno enoto do prihoda opazovane zahteve z_i . Medprihodni čas se izračuna z enačbo

$$t_i = \tau_i - \tau_{i-1}. \quad (4.1)$$

Predpostavili bomo še, da so medprihodni časi porazdeljeni z verjetnostno porazdelitvijo $A(t) = P[t_i \leq t]$, časi strežbe pa z verjetnostno porazdelitvijo $B(t) = P[x_i \leq x]$ [3, 12].

Če povzamemo imamo opravka z dvema temeljnima procesoma: *vhodni proces*, ki je odvisen od časa t (ali τ) ter *strežni proces*, ki je odvisen od časa strežbe x [12].

Čas čakanja označujemo s simbolom w in označuje čas, katerega je zahteva porabila v čakalni vrsti. Skupen čas zadrževanja zahteve z_i v strežni enoti je tako enak

$$s_i = w_i + x_i \quad (4.2)$$

časovnih enot. Ko preteče čas s_i potem se zahteva z_i pojavi na izhodu strežne enote kot z'_i . Strežnik se pri tem sprosti in je pripravljen, da sprejme novo zahtevo, ki čaka v čakalni vrsti.

Zelo pomemben statističen parameter je λ , s katerim označujemo *povprečno intenzivnost porojevanja zahtev* (angl. arrival rate). Parameter λ je izražen kot obratna vrednost matematičnega upanja vhodnega časa [12].

Trenutno število zahtev v sistemu v času t izračunamo kot razliko

$$N(t) = \alpha(t) - \beta(t), \quad (4.3)$$

kjer $\alpha(t)$ predstavlja število zahtev, ki so vstopile v strežno enoto do časa t in $\beta(t)$ označimo število zahtev, ki so bile do časa t postrežene.

Povprečno število prispelih zahtev je tako

$$\lambda_t = \frac{\alpha(t)}{t}. \quad (4.4)$$

Če dodatno vpeljemo γ_i za povprečno število akumuliranih zahtev na enoto časa t_i potem lahko z izrazom (4.5) izračunamo čas prebivanja zahteve v enoti do časa t

$$T_t = \frac{\gamma(t)}{\alpha(t)}. \quad (4.5)$$

Povprečno število zahtev v strežni enoti v času $(0, t)$ je tako

$$\bar{N}_t = \frac{\gamma_t}{t}. \quad (4.6)$$

Če predpostavimo še $t \rightarrow \infty$ za λ , T in N pridemo do izraza

$$\bar{N} = \lambda T, \quad (4.7)$$

ki (4.7) mu pravimo *Littlovo pravilo* in predstavlja pomembno ugotovitev [12]. Littlovo pravilo nam pove, da je produkt povprečnega števila zahtev v strežni enoti ter povprečje potrošenega časa enako povprečnemu številu zahtev v strežni enoti.

Littlovo pravilo se v teoriji strežb pojavlja zelo pogosto in iz njega izhaja tudi sledeče: če je $\bar{N}_v$ povprečje zahtev, ki čakajo v vrsti in $\bar{N}_s$ povprečno število zahtev v strežbi, potem velja

$$\bar{N}_v = \lambda W \quad \bar{N}_s = \lambda \bar{x}, \quad (4.8)$$

pri tem je W povprečni čas, ki ga zahteva porabi v čakalni vrsti, $\bar{x}$ pa povprečni čas strežbe.

Rezultat izraza (4.9) nam tako predstavlja skupen čas prebivanja zahteve v strežni enoti, ki ga izrazimo kot

$$T = W + \bar{x}. \quad (4.9)$$

Omenimo še količino μ , ki predstavlja *intenzivnost strežbe*, ki je podana v številu postreženih zahtev na časovno enoto.

4.2 Notacija in struktura strežnih enot

Za potrebe opisovanja *čakalnih sistemov* se uporablja *Kendallova* notacija, katere najosnovnejša oblika je deskriptor sestavljen iz treh delov:

$$A/B/m$$

Notacija označuje čakalni sistem z m strežniki, kjer A označuje verjetnostno porazdelitev medprihodnih časov in B označuje verjetnostno porazdelitev časa strežbe [3, 12].

A in B najpogosteje zavzameta vrednosti iz sledeče množice simbolov, kjer vsak simbol predstavlja verjetnostno porazdelitev:

- M (eksponentna),
- E (Erlangova),
- D (deterministična),
- G (splošna).

Včasih je potrebno navesti tudi kapaciteto čakalne vrste (K) ali velikost populacije zahtev (M), ki vstopajo v naš čakalni sistem. Takrat uporabimo *razširjeno Kendallovo*

notacijo. Gre za deskriptor, sestavljen iz petih delov kjer obstoječim trem simbolom dodamo še simbola K in M [3].

Notacija čakalnega sistema v razširjeni Kendallove notaciji zgleda tako

$$A/B/m/K/M.$$

Če katerikoli izmed simbolov K ali M v zapisu manjka, potem privzamemo, da ima izvzeti mnemonik vrednost neskončno.

Tako na primer zapis $M/D/3/30$ predstavlja čakalni sistem s tremi strežniki kjer so medprihodni časi zahtev porazdeljeni eksponentno, determinističnim (konstantnim) časom strežbe ter s kapaciteto velikostjo 30.

Tretji način uporabe Kendallove notacije predstavlja izraz (4.10).

$$(A/B/m) : (X/K/M) \quad (4.10)$$

Novost pri takšni notaciji predstavlja mnemonik X , ki predstavlja *strežno disciplino*. Strežna disciplina nam pove na kakšen način jemlje strežnik zahteve iz čakalne vrste [3]. V nadaljevanju so naštet nekateri načini strežne discipline:

FIFO (first in, first out) – včasih se označi tudi kot *FCFS* (first-come, first-serve). Pri

FIFO strežni disciplini se zahteva, ki pride prej tudi postreže prej.

LIFO (last in, first out) – alternativno tudi *LCFS* (last-come, first-serve). Pri *LIFO*

strežni disciplini se prej postreže zahteva, ki je najkasneje prišla v čakalno vrsto.

SIRO (service in random order) – označuje, da strežnik iz čakalne vrste zahteve jemlje naključno.

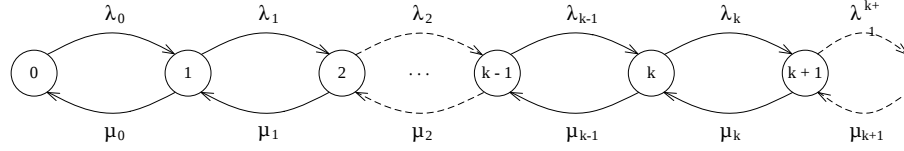
SJF (shortest job first) – naslednja zahteva, ki bo postrežena je najmanjša zahteva v čakalni vrsti.

Tukaj smo omenili le nekaj najpogostejših simbolov, ki se pojavijo pri notaciji strežnih enot. V realnosti se lahko srečamo tudi z drugačnimi verjetnostnimi porazdelitvami, strežnimi disciplinami, ...

4.3 Rojstno–smrti strežni sistem

Proces je *rojstno–smrti* (angl. birth–death) kadar je možen prehod samo med sosednjimi stanji. Če se v nekem trenutku nahajamo v stanju k , potem je iz tega stanja

možen prehod le v stanje $k + 1$ (porojevanje) ali v stanje $k - 1$ (umiranje) [12]. Stopnjo porojevanja zahtev označimo z λ_k , medtem ko intenzivnost umiranja zahtev označimo z μ_k .



Slika 4.2 Diagram prehajanja stanj rojstno-smrtnega sistema.

Porojevanje zahtev v rojstno-smrtnem sistemu ima značilnosti *Poissonove porazdelitve* (4.11). Tako lahko porojevanju zahtev rečemo kar *Poissonov proces*.

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (4.11)$$

Poissonov proces je eden najbolj temeljnih naključnih procesov, ki jih srečamo znotraj preučevanja teorije vrst. Poissonov proces privzame, da so medprihodni časi zahtev, ki prihajajo v sistem med seboj neodvisni in porazdeljeni z eksponentno porazdelitvijo [7, 13].

4.4 Formalni zapis procesov

Pri formalnem zapisu procesov s Kendallov notacijo se bomo omejili na posamezno cono. Uporabljali bomo klasifikacijo con kot je prikazano na shemi skladišča 2.6.

V poglavju 4.1 smo povedali, da je strežni model mreža strežnih enot. Naš model je logično sestavljen iz več con. Vsaka cona vsebuje eno ali več strežnih enot.

Vzemimo za primer cono 1, ki ima funkcijo prevzemne cone. V opisu skladišča 2.1 smo povedali, da se v coni 1 nahajajo štiri prevzemne postaje za nadvozen regalni sistem in ena postaja za satast regalni sistem. Vsaka delovna postaja predstavlja strežno enoto saj obsega eno čakalno vrsto in en strežnik.

Poznamo tudi porazdelitev procesa porojevanja in strežnega procesa. Tako lahko vseh pet strežnih enot v coni 1 zapišemo kot

$$M/N/1, \quad (4.12)$$

kjer M označuje eksponentno porazdelitev porojevanja zahtev, N normalno porazdelitev strežbe, 1 pa v skladu z omenjeno notacijo označuje en strežnik.

Lahko bi uporabili tudi zapis z razširjeno notacijo, kjer bi navedli kapaciteto čakalne vrste K ter velikost vhodne populacije. Kapaciteta čakalnih vrst je v našem modelu neskončna velika. Drugače je z velikostjo populacije zahtev na katero se nanašajo strežne enote. Velikost populacije je odvisna od letne količine prevzetega materiala.

V primeru, da želimo v NRS vskladiščiti 30 000t materiala in na transakcijo naenkrat vskladiščmo 3t materiala, potrebujemo letno 10 000 transakcij, ki se enakomerno porazdelijo na vsako izmed prevzemnih postaj. Tako bi posamezno prevzemno postajo za NRS lahko zapisali kot

$$M/N/1//2500. \quad (4.13)$$

Glede na to, da poznamo tudi strežno disciplino lahko naš zapis strežne enote dodatno razširimo na

$$(M/N/1) : (FIFO//2500). \quad (4.14)$$

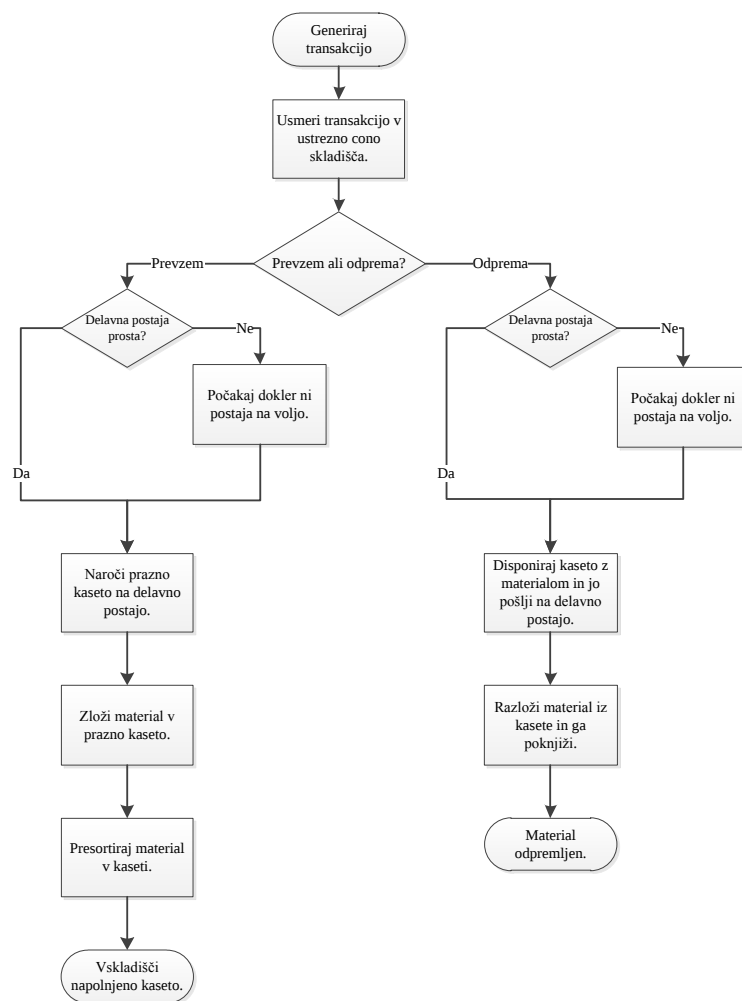
Zaradi variabilnosti velikosti vhodne populacije je zapis (4.12) najbolj splošen in je aplikativen na vse strežne enote, ki se nahajajo v modelu.

4.5 Verbalni opis modela

Splošen tok entitet skozi model med simulacijo prikazuje tokovni diagram 4.3. Simulacija se prične z generiranjem entitet, ki predstavljajo transakcije 4.4. Ob generiranju se transakciji nastavijo še atributi kot na primer tip transakcije, ciljni regalni sistem ter ciljna cona.

Ko transakcija prispe v cono najprej naleti na gradnik **Branch**, ki transakciji s pomočjo izrazov dodeli delovno postajo in jo tja tudi usmeri (slika 4.5). Pri dodeljevanju delovnih postaj smo izbrali enakomerno porazdelitev. Nato transakcija prispe na delovno postajo kjer se v primeru, da je delovna postaja prosta, prične procesirati. Če je delovna postaja v zasedenem stanju počaka transakcija v vrsti.

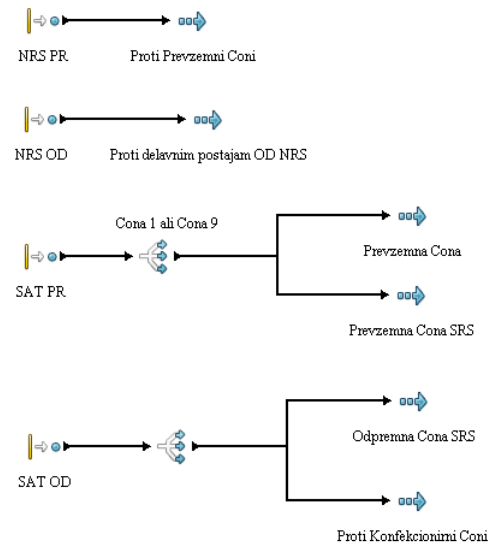
Ko transakcija vstopi v delovno postajo se pričnejo izvajati različni procesi, ki so vidni na sliki 4.6. Pri prevzemni transakciji vstopi entiteta v gradnik **Split**, ki ima en vhod ter dva izhoda. Na en izhod gre originalna transakcija, na drug izhod pa entiteta,



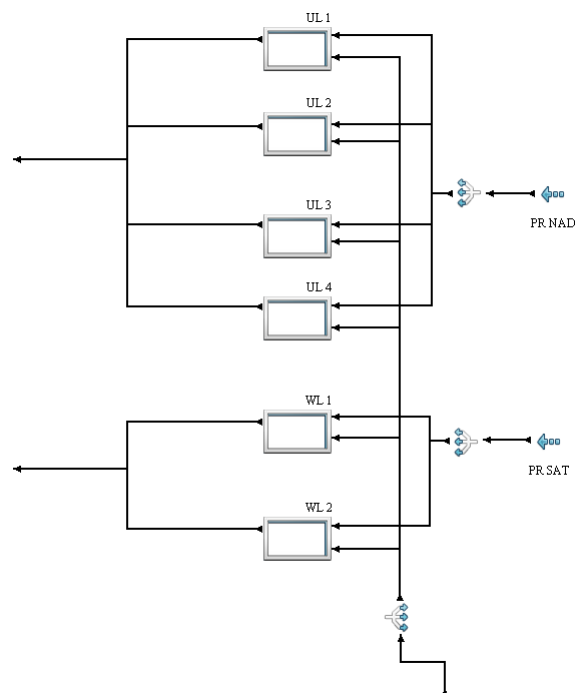
Slika 4.3 Tokovni diagram, ki prikazuje tok transakcije.

ki predstavlja zahtevo za prazno kaseto iz ciljnega regalnega sistema. Originalna entiteta potuje nato v gradnik **Gate**, ki ima dva vhoda **Trigger** in **Hold**. Vhod **Hold** je zadolžen da zadrži entiteto dokler na vhod **Trigger** ne pride nova entiteta. Na slednjega pride entiteta, ki predstavlja prazno kaseto in sprosti entiteto, ki je trenutno v gradniku **Gate**, da nadaljuje pot naprej.

Sledi razlaganje materiala iz priklovice v kaseto ter sortiranje materiala znotraj kasete. Ta procesa sta v našem modelu modelirana kot preprost časovni zamik (gradnik **Delay**)

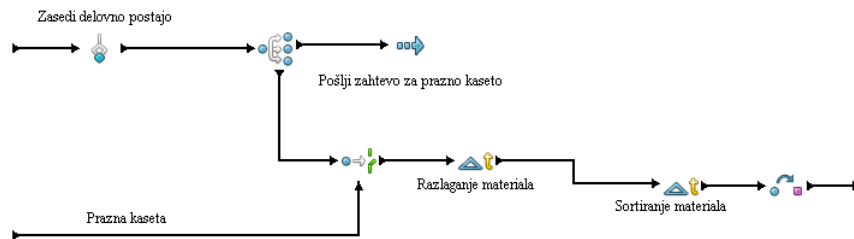


Slika 4.4 Generatorji entitet, ki predstavljajo transakcije. Za vsak tip transakcije imamo en generator.



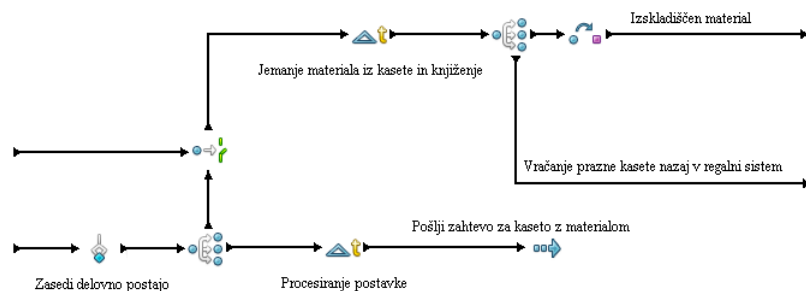
Slika 4.5 Model prevzemne cone na vzhodni strani skladišča. Tok entitet je od desne proti levi strani.

za določeno število sekund. Na koncu prevzemnega procesa še z gradnikom **Transform** transformiramo novo entiteto, ki predstavlja napolnjeno kaseto. Ta entiteta nadaljuje pot proti regalnemu sistemu.



Slika 4.6 Model prevzemnega procesa.

Pot, ki jo opravi odpremna transakcija je podobna. Modeliran proces je prikazan na sliki 4.7. Ko se transakcija usmeri na ustrezno delovno postajo se preveri, če je delovna postaja prosta. Ko je postaja prosta se prične s procesiranjem transakcije. Entiteta vstopi v časovni zamik, ki predstavlja dispozicijo ustreznega materiala. Podobno kot pri vskladiščnem procesu se ustvari nova entiteta, ki se pošlje v regalni sistem in predstavlja zahtevo za kaseto z materialom. Originalna entiteta, podobno kot pri prevzemnem procesu vstopi v gradnik **Gate** kjer počaka na sprožilno entiteto iz regalnega sistema. Ta entiteta predstavlja z materialom napolnjeno kaseto. Originalna entiteta po sprostitvi iz gradnika **Gate** vstopi v gradnik **Delay**, ki predstavlja razlaganje materiala iz kasete. Na koncu procesa se s pomočjo gradnika **Split** ustvarita dve entiteti. Ena predstavlja pravkar izskladiščen material, druga pa prazno kaseto, ki je namenjena nazaj v regalni sistem.



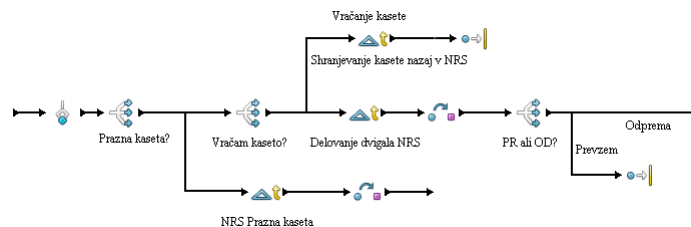
Slika 4.7 Model odpremne procesa.

V primeru izskladiščenega materiala iz satastega regalnega sistema entiteta zapusti model. Entiteta, ki predstavlja izskladiščen material iz nadvoznega skladišča, pa nadaljuje pot proti odpremni coni za nadvozno skladišče. V realnosti se entiteta spusti na tekoči trak, ki material odpelje proti odpremni coni. Čas potovanja izskladiščenega materiala na tekočem traku je v skladu s karakteristikami (hitrost in dolžina) približno 1h.

Model regalnih sistemov, ki predstavljata nekakšno jedro našega modela je relativno enostaven 4.8. Kljub temu, da se dvigali po karakteristikah in delovanju močno razlikujeta je konec koncev njuna funkcija identična. V sam proces vstopajo trije različni tipi entitet. Prvega predstavlja zahteva za prazno kaseto, kjer regalno dvigalo na ustrezno (ponavadi prevzemno) delovno postajo pošlje prazno kaseto.

Drug entitetni tip je predstavljen kot prazna kaseto. S tem entitetnim tipom se ponavadi srečamo pri končanih odpremnih transakcijah, ko je material iz kasete že izskladiščen.

Tretji entitetni tip pa predstavlja polno kaseto. S to entiteto se srečamo pri prevzemnih transakcijah, ko skladiščnik napolni prazno kaseto in jo pošlje nazaj v regalni sistem.



Slika 4.8 Model delovanja regalnega dvigala.

4.6 Entitete

Primarne entitete so v našem primeru tiste, ki predstavljajo transakcijo. Na skladišče lahko gledamo kot, da je sestavljeno iz dveh neodvisnih logičnih enot. Prvo enoto predstavlja nadvozno skladišče, drugo enoto pa satasto skladišče. Takšna poenostavitev je povsem na mestu, saj smo predpostavili, da med nadvoznim in satastim skladiščem ni logističnih povezav.

Transakcije se med seboj delijo na prevzemne in odpremnne. Dodatno jih delimo

še glede na destinacijo oziroma cilj. Tukaj jih delimo na transakcijo, ki je namenjena za nadvozno skladišče ter na transakcijo, ki je namenjena za satasto skladišče. Skupaj imamo tako štiri tipe entitet:

- Prevzem Nadvozno,
- Odprema Nadvozno,
- Prevzem Satasto,
- Odprema Satasto.

Vse entitete imajo attribute, ki povejo tip transakcije, kateremu regalnemu sistemu je entiteta namenjena, teža, izvor, matična delovna postaja, ...

Poleg transakcij se v modelu pojavijo še entitete, ki predstavljajo prazno oziroma napolnjeno kaseto. Prav tako imamo entiteto, ki predstavlja odpremno enoto.

V modelu se nahajajo tudi sekundarne entitete, ki so bolj implicitne narave. Takšne entitete imajo vlogo zahtevka za kaseto in med samim izvajanjem simulacije niso vidne saj so v realnosti ti zahtevki zapisi v podatkovno bazo informacijskega sistema skladišča. Atributi implicitnih oziroma sekundarnih entitet so enaki kot atributi primarnih entitet.

4.6.1 Generiranje entitet

Na podlagi podatkov iz tabele 2.2 je bilo za vsak mesec potrebno izračunati povprečno intenziteto porojevanja zahtev λ_i in iz intenzitete povprečen medprihodni čas.

Za primer vzemimo število prevzemnih transakcij nadvoznega skladišča v juniju 2010, ko je bilo 758 prevzemnih transakcij ($tr.$). Mesec junij ima 22 delavnikov kar z eno osem urno izmeno skupaj znaša 176 ur.

$$\frac{758}{176} \frac{tr.}{h} \approx 4,3 \frac{tr.}{h} \quad (4.15)$$

Povprečna intenziteta porojevanja prevzemnih zahtev znaša $4,3 \frac{tr.}{h}$. Iz te vrednosti lahko sedaj izračunamo povprečen medprihodni čas med posamezno zahtevo.

$$\frac{1}{4,3 \frac{tr.}{h}} = \frac{1}{4,3 \frac{tr.}{60min}} = \frac{60min}{4,3tr.} \approx 13,95 \frac{min}{tr.} \quad (4.16)$$

Zaradi narave priskrbljenih podatkov se v modelu za vsak tip transakcije nahaja en generator entitet. Kot smo že omenili smo pri generiranju entitet privzeli, da so medprihodni časi posameznih zahtev porazdeljeni eksponentno. Tako vsak izmed štirih generatorjev na podlagi povprečnega mesečnega medprihodnega časa izračunanega v (4.16) generira entitete.

Ker se intenziteta porojevanja zahtev iz meseca v mesec spreminja smo v programu SIMPROCESS naredili poseben urnik, ki je prikazan na sliki 4.9. Urnik je narejen tako, da ustreza dejanskemu delavnemu času skladišča.

Day of Week	Start Time	End Time
☐ Sunday	00:00:00	00:00:00
☒ Monday	08:00:00	16:00:00
☒ Tuesday	08:00:00	16:00:00
☒ Wednesday	08:00:00	16:00:00
☒ Thursday	08:00:00	16:00:00
☒ Friday	08:00:00	16:00:00
☐ Saturday	00:00:00	00:00:00

Slika 4.9 Urnik generiranja entitet.

4.7 Resursi

Z besedo *resursi* (angl. resources) označujemo sredstva, ki nad entitetami izvajajo operacije. Na primer, ko prispe material v prevzemno cono potrebujemo več resursov za njegovo obdelavo. Najprej potrebujemo resurs, ki predstavlja delavca ter resurs, ki predstavlja portalni žerjav. Če katerikoli izmed navedenih resursov ni na voljo, se s procesiranjem nove entitete ne more pričeti [14].

V nadaljevanju so našteje nekatere skupine resursov, ki se pojavijo v modelu in na kratko opisana njihova delitev in vloga v simulaciji:

Delavec – Ta resurs je razdeljen v različne skupine. Vsaka cona v skladišču ima deljenega delavca. Delavec je potreben za obdelavo materiala ter za sam proces

knjiženja.

Regalno dvigalo – V skladišču se srečamo s tremi regalnimi dvigali. Dve regalni dvigali sta operativni pri nadvoznem regalnem sistemu, tretje pa je regalno dvigalo v satistem regalnem sistemu.

Žerjav – V skladišču se srečamo s tremi tipi žerjavov. Prvi je portalni žerjav, ki se pri prevzemu uporablja za dvig tovora iz prikolice. Drugi tip žerjava je žerjav, ki se uporablja pri razporejanju materiala znotraj kasete. Tretji pa je sortirni žerjav, ki razporeja izskladiščene snope palic na ustrezno odpremno rampo.

Delovne postaje – V skladu z načrtom skladišča smo definirali tudi delovne postaje, katerih funkcije se med seboj razlikujejo. Nekatere delovne postaje imajo možnost opravljanja prevzemne ali odpremne funkcije.

4.8 Spremenljivke

V splošnem lahko spremenljivke klasificiramo v tri skupine. Klasifikacija je odvisna od namena in ciljev raziskave [9]:

- eksogene spremenljivke,
- endogene spremenljivke,
- statusne spremenljivke.

Eksogene spremenljivke lahko označimo kot neodvisne oziroma vhodne spremenljivke. To so spremenljivke, ki imajo vpliv na samo izvajanje simulacije pa vendar se med samo simulacijo ne spreminjajo. Vrednosti eksogenih spremenljivk so ponavadi tudi glavne točke interesa odločevalcev [9].

V našem primeru sta eksogeni spremenljivki lahko letna količina vskladiščenega in izskladiščenega materiala ter povprečna količina obdelanega materiala na transakcijo. Glede na ti dve vrednosti se nato tudi računa mesečna intenziteta porojevanja vskladiščnih in izskladiščnih zahtev.

Endogene spremenljivke predstavljajo izhodne spremenljivke, ki so odvisne od interakcij eksogenih in statusnih spremenljivk glede na karakteristike modela [9].

Primer endogene spremenljivke je v našem primeru končni podatek o količini obdelanih zahtev na uro posamezne delovne postaje.

Statusne spremenljivke opisujejo stanje sistema oziroma dela sistema v nekem časovnem obdobju. Te spremenljivke so v interakciji z eksogenimi tako kot z endogenimi spremenljivkami [9].

Primer statusnih spremenljivk v našem modelu so lahko čakalni časi zahtev, ki so odvisni od intenzitete porojevanja zahtev.

4.8.1 Izračun intenzitete glede na količino materiala

Kot smo že omenili je za odločevalca najbolj zanimiv podatek o količini prevzetega materiala. Privzeli smo, da je količina odprega materiala enaka količini prevzetega materiala.

Za izračun povprečne mesečne intenzitete porojevanja zahtev na podlagi določene količine prevzetega materiala je bilo potrebno predelati pridobljene podatke.

Podatke o količini prevzetega materiala v tonah smo normalizirali. Z normalizacijo smo dobili uteži, ki predstavljajo delež materiala, ki je bil prevzet v nekem mesecu glede na letno količino prevzetega materiala. Novo vrednost letne količine prevzetega materiala smo tako ustrezno obtežili in dobili novo mesečno količino prevzetega materiala. S tem smo dosegli, da ima nova krivulja prometa enake karakteristike (minimumi in maksimumi) kot originalna krivulja prometa.

Količnik med mesečno količino materiala in povprečno količino izskladiščenega materiala na transakcijo predstavlja potrebno število transakcij, da sprocesiramo želeno količino materiala (4.17).

$$\text{št. transakcij} = \frac{\text{mesečna količina materiala [t]}}{\text{povprečna količina na transakcijo [t]}} \quad (4.17)$$

Z novim podatkom o mesečnem številu transakcij lahko izračunamo povprečno število transakcij na časovno enoto za korespondenčni mesec. V našem primeru smo izbrali število delovnih ur v mesecu.

$$\text{povp. intenziteta transakcij} = \frac{\text{mesečno št. transakcij}}{h} \quad (4.18)$$

Recipročna vrednost enačbe (4.18) predstavlja medprihodni čas med posamezno zahtevo λ , ki predstavlja vhodno vrednost v generator entitet modela.

4.8.2 Vhodni podatki

Vhodni podatki za izvajanje simulacije so shranjeni v XLS datoteki. Na začetku izvajanja programa se iz datoteke preberejo podatki, ki se shranijo v objekte simulacijskega programa. V prvi vrsti so vhodni podatki predstavljeni kot povprečen mesečen medprihodni čas za določen tip zahteve.

Iz datoteke z vhodnimi podatki se prebere tudi povprečna količina izskladiščenega materiala, ki se nato v modelu uporablja kot povprečen čas strežbe pri izskladiščnem procesu.

Graf 4.10 prikazuje realne podatke o prevzemnih in odpremnih transakcijah skladišča v opazovanem obdobju. Kot lahko vidimo je takratni promet v satastem regalnem sistemu v primerjavi s prometom nadvoznega regalnega sistema precej manjši. V skladu z dogovorom z naročnikom smo se odločili, da se podatki satastega sistema v izračunih za bodoči promet ne upoštevajo, saj niso ustrezen indikator fluktuacije prometa v danem obdobju.

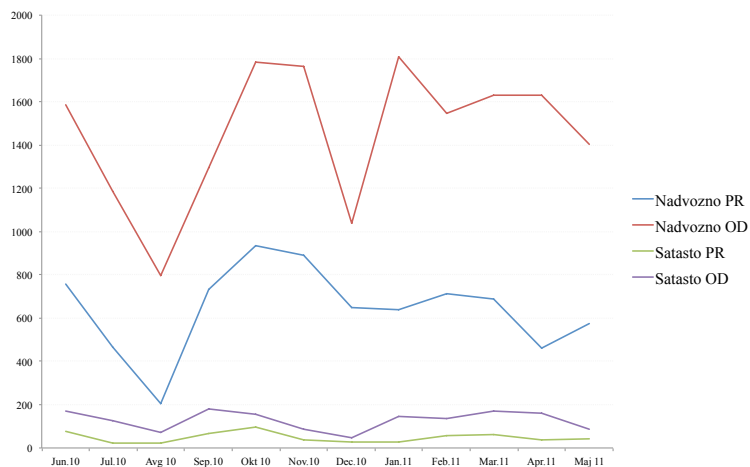
Graf 4.11 prikazuje izračunane krivulje prometa za posamezen regalni sistem. Zaradi nepopolnih podatkov o odpremnih transakcijah smo predpostavili, da je mesečna količina prevzetega materiala za oba regalna sistema enaka mesečni količini odpremnega materiala.

Prav tako smo privzeli, da je fluktuacija prometa satastega regalnega sistema enaka fluktuaciji prometa nadvoznega regalnega sistema. S to predpostavko smo nadomestili neupoštevani obstoječ promet.

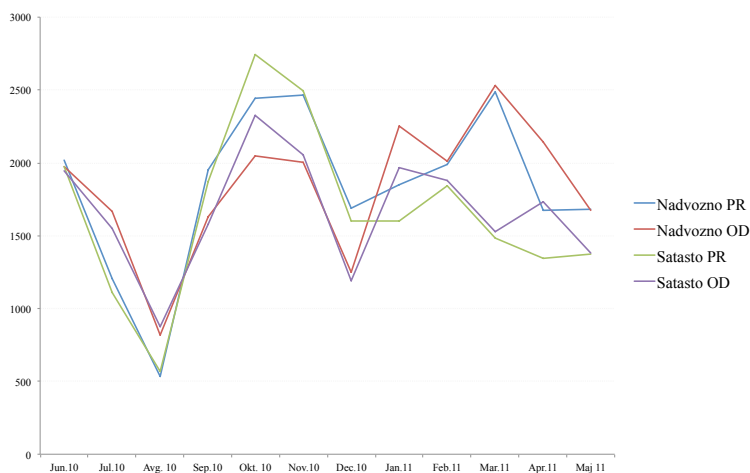
4.9 Generiranje naključnih števil

Generiranje naključnih števil igra v računalništvu zelo veliko vlogo in se veliko uporablja v statističnem vzorčenju, kriptografiji in nenazadnje tudi v računalniški simulaciji. Obstajajo štirje načini generiranja naključnih števil [9]:

1. ročne metode,
2. knjižnične metode,
3. analogne računalniške metode,
4. digitalne računalniške metode.



Slika 4.10 Dejanski podatki o transakcijah skladišča junij 2010 – maj 2011.



Slika 4.11 Izračunani podatki o transakcijah skladišča za nov materialni tok.

Uporabnost računalniških simulacij pri učinkovitem predvidevanju prihodnosti in analizi dogodkov je močno odvisna od *generiranja naključnih števil*. Tako je naključnost in veljavnost podatkov računalniških simulacij v veliki meri odvisna od generatorja naključnih števil [16].

Generiranje pravih naključnih števil na računalniškem sistemu je lahko precej nerodno saj programski jeziki pogosto nimajo dostopa do pravega vira naključnosti. Zato se najpogosteje uporabljajo deterministični algoritmi s trdnimi matematičnimi temelji za

generiranje t.i. *psevdo-naključih števil* [16].

V programu SIMPROCESS za naključnost skrbi 215 vnaprej definiranih semen, ki se uporabljajo med generiranjem naključnih vrednosti. Če bomo simulacijo z enakimi vhodnimi parametri ponovili večkrat z istim semenom bomo venomer dobili enake rezultate. Zato smo vsako ponovitev simulacije naredili z drugim semenom iz množice izbranih semen.

5 Simulacija

V naslednjem poglavju bomo predstavili kako smo zgrajeni model uporabili za simuliranje različnih scenarijev. Rezultati simuliranih scenarijev so predstavljali osnovo za sprejemanje odločitev.

Ključna parametra pri izvajanju simulacij sta letna količina vskladiščenega materiala v nadvoznem ter satistem skladišču in povprečna količina obdelanega materiala na transakcijo.

Izvajanje simulacije je potekalo v dveh fazah oziroma z dvema različnima množicama parametrov. V prvi fazi je naročnik priskrbel prve vrednosti eksogenih parametrov s katerimi smo izvajali simulacije. Na podlagi rezultatov simulacije iz prve faze je nato naročnik priskrbel še drugo množico podatkov.

V tabeli 5.1 so navedeni eksogeni parametri za prvo fazo in v tabeli 5.2 parametri za drugo fazo simulacije.

Tabela 5.1 Vhodni parametri za prvo fazo simulacije.

#	Faktor	PR NAD[t]	OD NAD[t]	$\sum$ NAD [t]	PR SAT[t]	OD SAT[t]	$\sum$ SAT[t]
1	1	3	1	11 000	3	1	31 000
2	1	3	1	11 000	3	3	31 000
3	1,5	3	1	16 000	3	1	46 000
4	1,5	3	1	16 000	3	3	46 000

Tabela 5.2 Vhodni parametri za drugo fazo simulacije.

#	Faktor	PR NAD[t]	OD NAD[t]	$\sum$ NAD [t]	PR SAT[t]	OD SAT[t]	$\sum$ SAT[t]
1	1	3	1	22 000	3	1	20 000
2	1	3	1	22 000	3	3	20 000
3	1,5	3	1	33 000	3	1	30 000
4	1,5	3	1	33 000	3	3	30 000

5.1 Časovni mehanizem

Simulacije lahko glede na način premikanja simulacije skozi čas klasificiramo v dve skupini. V prvo skupino uvrščamo simulacije z *zveznim časom* (angl. continuous simulation), kjer je čas pojmovan kot zvezna spremenljivka. Program za izvajanje simulacije skrbi za posodabljanje ure modela, ki se posodablja z enakomernim diskretnim časovnim intervalom za določeno časovno enoto (sekunda, minuta, ura, ...) [9].

Drugo skupino predstavljajo *diskretne* simulacije (angl. discrete-event simulation – DES). V tem primeru je čas oziroma ura obravnavana kot diskretna spremenljivka, kjer simulacijski program skrbi za posodabljanje ure z variabilnim časovnim intervalom. Dolžina časovnega intervala je določena s časom, ki je potreben, da se zgodi nov dogodek. Ko se zgodi nov dogodek se posodobi ura modela na čas, ko se zgodi naslednji dogodek. Obdobja, ko se v sistemu ne dogajajo nobene spremembe se preprosto preskočijo in tako prihranimo čas izvajanja simulacije [9].

V našem primeru smo uporabili diskretno simulacijo. Razlog za to odločitev je podpora programa SIMPROCESS za izvajanje diskretnih simulacij.

5.2 Izbor Metrik

Preden smo pričeli s samim izvajanjem simulacije je bilo potrebno vzpostaviti metrike, ki so po naročnikovem mnenju ključni indikatorji zmogljivosti sistema.

Prva metrika je sama povprečna zasedenost posameznega resursa v skladišču. Ta podatek nam pove kolikšen odstotek časa je resurs v stanju *zaseden*. Večji kot je ta odstotek, dlje je resurs v zasedenem stanju.

Druga metrika so povprečni čakalni časi zadrževanja posamezne zahteve v čakalni vrsti. Ta podatek nam pove koliko časa je posamezna zahteva preživela v čakalni vrsti posamezne delovne postaje preden se prične s procesiranjem omenjene zahteve.

Kot tretja, pa nas je zanimala povprečna zmogljivost delovnih postaj določenega tipa. Za vsako zahtevo smo beležili čas njenega procesiranja. Na koncu smo izračunali povprečno zmogljivost posamezne delovne postaje, ki se meri v številu sprocesiranih transakcij na uro.

5.3 Potek simulacije

V tabelah 5.1 in 5.2 je v stolpcu z znakom # označen posamezen *eksperiment*. Vsaka ponovitev sestoji iz petih ponovitev. Rezultati ponovitev simulacije so se shranjevali v datoteke katere smo analizirali s podpornimi skriptami.

Podporne skripte so bile spisane v programskem jeziku *Python*. Razlog za obstoj podpornih skript je ta, da ima program SIMPROCESS zelo omejeno podporo za večino izbranih metrik. Zato simulacija med izvajanjem zapisuje vmesne vrednosti v posebno datoteko. Datoteka je po končanem izvajanju simulacije analizirana s podpornimi skriptami.

5.4 Komentarji k rezultatom simulacije

V nadaljevanju so napisani komentarji rezultatov posameznih eksperimentov. Podrobnejši rezultati eksperimentov so navedeni v prilogi k diplomskemu delu A.

5.4.1 Prva faza

Vhodni podatki za prvi fazo so vidni v 5.1. Celotna faza sestoji iz štirih eksperimentov pri čemer je bil vsak eksperiment ponovljen petkrat. Prikazane vrednosti so povprečne vrednosti posameznega eksperimenta.

V eksperimentu A.1.1 najprej padejo v oči dolgi čakalni časi odpremnih transakcij satastega regalnega sistema. V mesecu oktobru pride do najvišje stopnje intenzitete porojevanja odpremnih transakcij v satastem regalnem sistemu. Regalno dvigalo ni sposobno postreči takšnega števila transakcij in zato pride do povečevanja števila zahtev v čakalnih vrstah delovnih postaj.

Pomemben vpliv na zastoje ima tudi povprečna količina odpremnega materiala na transakcijo. Če se ozremo na rezultate eksperimenta A.1.2 vidimo, da je količina odpremnega materiala na transakcijo iz satastega regalnega sistema trikrat večja kot v prvem eksperimentu. Posledično imamo trikrat manj transakcij kot v eksperimentu A.1.1.

Rezultati drugega eksperimenta nakazujejo, da je prav količina odpremnega materiala na transakcijo odločilen faktor pri zmanjšanju čakalnih časov. Ko je v mesecu oktobru višek porojevanja odpremnih transakcij satastega regalnega sistema je povprečen mesečni čakalni čas približno 6,5min. Tudi povprečna letna izkoriščenost dvigala satastega regalnega sistema se zaradi manjšega števila transakcij zmanjša.

Nekaj pozornosti namenimo še zmogljivosti delovnih postaj. Delovne postaje nadvoznega regalnega sistema imajo v obeh eksperimentih enako zmogljivost. Ta rezultat je pričakovan saj se vhodni podatki v prvih dveh eksperimentih ne razlikujejo.

Zmogljivost delovnih postaj satastega regalnega sistema pa se spremeni. Opazimo lahko, da se v drugem eksperimentu število sprocesiranih odpremnih transakcij na uro zmanjša. Krivec za zmanjšanje je povprečna količina odpremnega materiala na transakcijo, saj je potrebno več časa za odpremo 3t materiala kot 1t materiala.

V nadvoznem regalnem sistemu v obeh eksperimentih ne pride do nobenih komplikacij. Iz letne izkoriščenosti resursov je razvidno, da imajo resursi povezani z nadvoznim regalnim sistemom nizko letno stopnjo izkoriščenosti.

Rezultati nakazujejo, da je porazdelitev letne količine materiala med regalnima sistemoma neprimerna. Na eni strani imamo premalo izkoriščen nadvozen regalni sistem na drugi strani pa satast regalni sistem, ki se v mesecih z višjo intenziteto porojevanja zahtev sooča z zastoji in posledično neučinkovitim delovanjem.

Pri eksperimentih A.1.3 in A.1.4 smo za faktor 1,5 povečali letno količino prevzetega in odpremnega materiala. Če smo v eksperimentu A.1.1 naleteli na zastoje v mesecih z višjo stopnjo porojevanja zahtev potem lahko pričakujemo, da bodo s povečanjem količine materiala ti čakalni časi še daljši.

Rezultati eksperimenta A.1.3 to domnevo potrjujejo. Čakalni časi satastega regalnega

sistema so bistveno daljši, kar nakazuje na neodziven in neučinkovit sistem. Takšen sistem bi bil v praksi precej neučinkovit saj bi stranka v povprečju čakala najmanj 40 dni na naročen material.

Tudi izkoriščenost regalnega dvigala satstega regalnega sistema in delavne postaje za odpremo materiala iz satastega regalnega sistema kažeta visoko stopnjo zasedenosti.

V eksperimentu A.1.4 prve faze lahko podobno kot v eksperimentu A.1.2 opazimo bistveno nižje čakalne čase. Razlog se zopet skriva v količini odpremenega materiala na transakcijo, ki pripomore k trikrat manjšemu številu transakcij kot v tretjem eksperimentu. Ustrezno manjša je tudi zasedenost resursov povezanih z satastim regalnim sistemom.

Nadvozen regalni sistem je tudi pri povečani količini materiala sposoben pravočasno sprocesirati transakcije kar nakazujejo čakalni časi eksperimentov A.1.3 in A.1.4.

Izpostaviti velja zasedenost resursa **Sortirni zerjav**, ki znaša 51,86%. Ob dodatnem povečanju količine materiala bi ta žerjav lahko predstavljal potencialno ozko grlo. Kljub temu lahko še zmeraj opazimo nizko stopnjo zasedenosti ostalih resursov povezanih z nadvoznim regalnim sistemom.

Rezultati tretjega in četrtega eksperimenta še bolj izpostavijo neustrezno porazdelitev količine materiala glede na regalni sistem.

5.4.2 Druga faza

Druga faza poizkuša razrešiti problem neustrezne porazdelitve količine materiala glede na regalni sistem. V tej fazi je naročnik želel preveriti obnašanje sistema ob bolj enakomerni porazdelitvi letne količine materiala med regalnima sistemoma. Tako bi se satast regalni sistem malce razbremenil, nadvozen regalni sistem pa bi postal bolj izkoriščen.

Iz rezultatov eksperimenta A.2.1 lahko vidimo, da so čakalni časi satastega regalnega sistema bistveno nižji kot v eksperimentu A.1.1 prve faze. Tudi sama zasedenost resursov je nižja. Rezultati nakazujejo, da so satast regalni sistem in resursi povezani z njim sposobni sprocesirati takšno količino materiala.

Zaradi krajšega čakanja je tudi povprečna zmogljivost delovnih postaj satastega regalnega sistema višja. Opazimo pa povečano zasedenost in malce daljše čakalne čase nadvoznega regalnega sistema. Slednje ni presenetljivo saj je letna količina sprocesiranega materiala enkrat višja kot v prvi fazi simulacije. Opazimo, da je zasedenost resursa **Sortirni zerjav** narasla zato bomo v nadaljevanju na ta podatek dodatno pozorni.

Po pričakovanjih so rezultati satastega regalnega sistema iz eksperimenta [A.2.2](#) boljši kot v eksperimentu [A.2.1](#) druge faze. Zaradi večje količine odpremenega materiala na transakcijo je teh trikrat manj. Posledično imamo krajše čakalne čase in nižjo stopnjo zasedenosti resursov.

Rezultati drugega eksperimenta se pri nadvoznem regalnem sistemu ne spremenijo veliko saj so vhodni podatki enaki kot v prvem eksperimentu.

Podobno kot v prvi fazi smo tudi v drugi fazi za tretji in četrti eksperiment povečali letno količino prevzetega materiala za faktor 1,5.

Pri nadvoznem regalnem sistemu lahko v obeh eksperimentih opazimo daljše čakalne čase predvsem pri odpremnih transakcijah. Tudi zasedenost odpremnih delavnih postaj se poveča. Pričakovano opazimo visoko stopnjo zasedenosti resursa **Sortirni žerjav**. Pri letni količini prevzetega materiala eksperimenta 3 nastopa prej omenjeni resurs kot ozko grlo.

Rezultati eksperimenta [A.2.3](#) za satasti regalni sistem nakazujejo daljše čakalne čase pri procesiranju odpremnih transakcij. Slednje je izrazito predvsem v mesecu oktobru, ko je intenziteta porojevanja zahtev najvišja. Kot že prej omenjeno je razlog za to količina odpremnega materiala na transakcijo.

Pri eksperimentu [A.2.4](#) druge faze vidimo, da se čakalni časi satastega regalnega sistema na račun višje količine odpremnega materiala na transakcijo zmanjšajo.

5.5 Razprava

V komentarjih k rezultatom simulacije smo lahko dobili občutek kateri faktorji neposredno prispevajo k delovanju skladišča.

Rezultati eksperimentov nakazujejo, da bo obnovljeno skladišče sposobno sprocesirati zelene količine materiala ob določenih pogojih. Izstopajo predvsem rezultati eksperimentov kjer količina odpremnega materiala na transakcijo znaša 3t. V teh eksperimentih so čakalni časi krajši zato, ker je potrebno manj transakcij za obdelavo vhodne letne količine materiala.

Izpostavil bi rad predvsem rezultate druge faze simulacije, ki nakazujejo solidno uravnotežen sistem. Oba regalna sistema sta približno enako obremenjena. Pri tem je potrebno omeniti ozko grlo v obliki sortirnega žerjava na vhodu v odpremno cono. V prvih dveh eksperimentih druge faze to ozko grlo ni tako izrazito, medtem ko je v tretjem in

četrtem eksperimentu druge faze že močno izrazito. Sicer se vpliv sortirnega žerjava ne pozna na čakalnih časih, ker je material takrat že na poti izven modela.

V eksperimentu [A.2.3](#) pride do daljših čakalnih časov v mesecih z višjimi intenzitetami. Ti zastoji se lahko odpravijo s spremembo organizacije dela v obdobjih, ko je pričakovan povečan promet.

Faktor, ki je v naši simulaciji igral ključno vlogo pri odzivnosti sistema je količina obdelanega materiala na odpremno transakcijo. Rezultati so pokazali, da so transakcije z višjo količino odpremnega materiala za sistem bolj ustrezne. Slednja ugotovitev mogoče ni najbolj intuitivna, ker potrebujemo več časa za procesiranje takšnih transakcij, vendar imamo posledično manj transakcij.

Če želimo imeti višjo količino obdelanega materiala na odpremno transakcijo moramo zagotoviti, da je material v skladišču ustrezno konsolidiran. Le tako se izognemo nepotrebnim dodatnim potezam regalnega dvigala.

Enostaven način, ki bi razrešil veliko problemov je sprememba organizacije dela. Z uvedbo dvo izmenskega delavnika bi se količina sprocesiranega materiala lahko bistveno zvišala. Ena izmed sprememb, ki bi pripomogla k zmogljivosti sistema je uvedba deljenega delavnika. Pri takšnem delavniku bi se na primer odpremnne transakcije izvajale zjutraj, medtem ko bi se prevzemne transakcije izvajale v popoldanskem času. S takšnim pristopom bi se izognili deljenju resursov med različnimi tipi transakcij. Na žalost pa je spreminjanje organizacije dela povezano z dodatnimi stroški. Z uvedbo dvo izmenskega delavnika bi bilo potrebno zaposliti več delavcev.

Iz rezultatov je razvidno, da v nekaterih eksperimentih **Sortirni žerjav** predstavlja ozko grlo pri odpremnem podprocesu. Sama zasnova žerjava je že precej stara in ni primerna za bodoče naročnikove potrebe. Tako bi bilo vredno razmisliti o posodobitvi žerjava ali pa o razvoju novega, bolj učinkovitega sistema za distribucijo odpremnih enot.

Tekoči trak, ki teče pod odpremnimi delavnimi postajami nadvoznega regalnega sistema predstavlja konstanten pribitek časa pri odpremnih transakcijah iz nadvoznega regalnega sistema. Zaradi karakteristik tekočega traku in odpremnega procesa je prejšnji omenjeni pribitek dolg približno 1h.

Osebnost bi predlagal prekvalifikacijo cone 3 iz slike [2.6](#) v odpremno cono za nadvozen regalni sistem. V sami coni 3 je dovolj prostora za izgradnjo dodatnih delovnih postaj. Cona 3 ima tudi dovolj prostora ter potrebne resurse za nalaganje odpremnega materiala na tovorna vozila.

S tem načinom bi obšli omenjeni tekoči trak in se izognili nepotrebnemu časovnemu pribitku ter posledično skrajšali trajanje odpremne podprocesa. Tudi stroškovno je ta rešitev precej ugodna saj ni potrebno zaposliti nove delavne sile ter sama izgradnja novih delavnih postaj je relativno poceni.

Rezultati nekaterih eksperimentov nakazujejo dvigalo satastega regalnega sistema kot ozko grlo. Eden izmed predlogov za odpravo te omejitve bi bila uvedba regalnega sistema z dvema regalnima dvigaloma. Ob pravilni implementaciji in spremembi skladiščenja bi to lahko znatno prispevalo k povečanju zmogljivosti satastega regalnega sistema.

Na žalost pa je ta rešitev povezana z visokimi stroški in težavno implementacijo, ki lahko hitro privede do dodatnih zapletov in posledično dodatnih stroškov.

6 Zaključek

V diplomskem delu smo prikazali razvoj modela in izvajanje simulacije avtomatskega skladišča s programsko rešitvijo SIMPROCESS. Predstavili in opisali smo tudi posamezne korake procesa razvoja računalniškega modela. Pojasnili in opisali smo vlogo verifikacije in validacije modela ter nekaj osnovnih tehnik verifikacije in validacije.

Razloženo je tudi teoretično ozadje in koncepti na katerih temelji model skladišča. Predpostavili smo, da je proces porojevanja transakcij Poissonov proces, kar pomeni da so medprihodni časi transakcij eksponentno porazdeljeni. Za strežbo smo predpostavili, da je porazdeljena z normalno porazdelitvijo.

Z različnimi vhodnimi parametri smo s pomočjo diskretne simulacije pokazali kako se v določenih primerih model skladišča obnaša. Izmed predlaganih množic vhodnih parametrov smo na koncu tudi izpostavili primere, ki vračajo najboljše rezultate in nakazujejo najbolj stabilen in uravnotežen sistem.

Tekom razvoja modela smo se morali soočiti z različnimi problemi in omejitvami. Nekaj glavnih problemov oziroma omejitev je navedenih v nadaljevanju:

- Zaradi omejene globine pridobljenih podatkov smo bili primorani narediti veliko

predpostavk ter se odpovedati bolj poglobljeni analizi. Najbolje bi bilo, če bi imeli neposreden dostop do podatkovne baze informacijskega sistema skladišča vendar v našem primeru to iz različnih razlogov ni bilo mogoče. Z bolj podrobnimi podatki o nalogih ter postavkah naročil bi lahko bolj natančno modelirali proces porojevanja transakcij in se posledično bolj približali realnemu sistemu.

- Programska rešitev SIMPROCESS se je izkazala za primerno orodje za reševanje našega problema. Vendar smo se včasih soočali z neintuitivnim in na trenutke neodzivnim uporabniškim vmesnikom. Prav slednje zna biti na dolgi rok zelo moteče in doprinese k daljšemu času razvoja modela.

Tudi metrike in rezultati simulacij v nekaterih primerih niso bili zadostni. Zato smo nekaj časa porabili za implementacijo lastnih metrik delovanja sistema in orodij za analizo rezultatov simulacij.

Omenili bi radi še to, da za stranko model zgrajen v programu SIMPROCESS zgleda zelo neintuitivno in nenaravno. Animacija izvajanja simulacije naj bi pripomogla k razumevanju modela vendar smo ugotovili, da slednje nepoznavalca modelirnega orodja še bolj zmede. Na trgu obstajajo konkurenčna orodja, v katerih so zgrajeni modeli lažje razumljivi (npr. FlexSim).

Zaradi politike licenciranja proizvajalca je naš model zgrajen v programu SIMPROCESS tudi neprenosljiv. To pomeni, da je izvajanje in spreminjanje modela vezano zgolj na računalnik kjer se je model razvijal in izvajala simulacija. Naročniku je bilo tako onemogočeno samostojno izvajanje simulacij in preverjanje rezultatov.

- Zaradi geografskih ovir je bila komunikacija s stranko otežena. Ob hitrejši in učinkovitejši komunikaciji s stranko bi sam razvoj modela potekal hitreje saj bi se tako procesa validacije in verifikacije modela izvajala sproti.
- V našem primeru je prišlo do občasnih nesporazumov glede ciljev, želja in zahtev naročnika. Zato bi rad izpostavil pomembnost tega, da je naročnik jasen in eksplíciten glede zahtev in njegovih pričakovanj. Opisi poslovnih procesov, glavni cilji, metrike in struktura rezultatov morajo biti definirani še pred začetkom oziroma najkasneje v začetnih fazah razvoja modela.

6.1 Ideje za nadaljnji razvoj

Cilj nadaljnjega razvoja bi lahko bila natančnejša analiza procesov skladišča. V ta namen bi bilo potrebno pridobiti natančnejše podatke o različnih procesih.

Zanimiva bi bila predvsem analiza prihajanja tovornih vozil k odpremni rampam. S podatki o frekvenci prihodov, času zadrževanja, povprečni odpeljani količini materiala bi lahko optimizirali odpremni proces in lahko bolje svetovali naročniku. Na žalost pa je te podatke zelo težko pridobiti saj je za tovrstno logistiko odgovorno neko drugo podjetje.

Orodje SIMPROCESS vsebuje modul za ocenjevanje stroškov na osnovi aktivnosti, ki v naši simulaciji ni bil uporabljen. Z implementacijo stroškovnih vrednosti v našo simulacijo bi odločevalci dobili dodatno in tudi zelo pomembno dimenzijo pri ocenjevanju investicije.

Eksperimentiranje z različnimi organizacijami dela, kot so na primer več izmenski urniki in deljene izmene bi tudi odgovorilo na dodatna vprašanja. Še posebno bi bilo zanimiva kombinacija eksperimentiranja organizacije dela z ocenjevanjem stroškov.

LITERATURA

- [1] M. Hompel, T. Schmidt, *Warehouse Management*, Springer-Verlag, Dortmund, 2007.
- [2] J. Tompkins, J. Smith, *The Warehouse Management Handbook*, Tompkins Press, Chicago, 1998.
- [3] L. Kleinrock, *Queuing Theory*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1975.
- [4] E. Winsberg, *Science in the Age of Computer Simulation*, The University of Chicago Press, Chicago, 2010.
- [5] L. Birta, G. Arbez, *Modelling and Simulation*, Springer-Verlag, London, 2007.
- [6] R. Sargent, *Verification and Validation of Simulation Models* in Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, str. 183–198.
- [7] L. Anderson, *The Development of a Model for Computer Simulation of a Counseling Center*, University of Oregon, 1970.
- [8] J. Carson, *Model Verification and Validation* in Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002, str. 52–58.
- [9] T. Naylor, *Computer Simulation Techniques*, John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [10] CACI, *SIMPROCES Products Overview*, <http://simprocess.com/products/products.html>
- [11] V. Sundarapandian, *Probability, Statistics And Queuing Theory*, PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.

- [12] J. Virant, *Modeliranje in simuliranje računalniških sistemov*, Didakta, Radovljica, 1991.
- [13] L. Kleinrock, *Queuing Systems: Problems and Solutions*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [14] CACI, *User's Manual SIMPROCESS*, CACI, San Diego, 2012.
- [15] RANDOM.ORG - True Random Number Service, www.random.org, 2013.
- [16] A. Aghaie, *Random Numbers in Computer Simulation and Development of a Newly Combined Algorithm Generating Random Numbers* in Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, Teheran 2004, 12.3.1–12.3.10.

A Priloga

V nadaljevanju so navedeni podrobnejši rezultati simulacij. Program SIMPROCESS uporablja knjižnično metodo generiranja naključnih števil. To pomeni, da ima prednaloženo knjižnico z 215 semeni.

S pomočjo generatorja naključnih števil [15] smo generirali pet števil iz intervala $[1, 215]$. Generirana števila predstavljajo kazalce v SIMPROCESS-ovo knjižnico semen. Generator je tako generiral kazalce $\{139, 161, 193, 24, 48\}$. Vrednosti kazalcev so navedena v tem primeru:

$$\mathcal{A} = \{863792435, 1554330349, 1052096344, 1565288286, 763520381\}. \quad (\text{A.1})$$

Generator naključnih števil kot vir naključnosti uporablja atmosferski šum in tako zagotavlja popolno naključnost [15].

Vsak eksperiment je bil ponovljen petkrat pri čemer smo vsako ponovitev izvedli z drugim semenom iz množice semen (A.1). Rezultate posameznega eksperimenta smo kasneje povprečili in tako dobili sledeče rezultate.

A.1 Prva Faza

A.1.1 Eksperiment 1

```

Nadvozno material: 11.000t
Satasto material: 31.000t
*****
                Prevzem    Odprema
Nadvozno        3t        1t
Satasto         3t        1t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS:   21.37%
Dvigalo 2 NRS:   21.30%
Dvigalo SRS:     67.89%
Delavec Cona 1:  16.79%
Delavec Cona 9:   6.94%
Delavec Cona 4:  10.85%
Delavec Cona 8:  39.60%
DP PR NAD:       17.37%
DP OD NAD:       39.57%
DP PR SAT:       50.99%
DP OD SAT:       79.59%
Sortirni zerjav: 35.20%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10  2.467   3.100   3.707   16.152
Jul-10  1.021   1.996   2.800    6.179
Avg-10  0.102   1.083   0.191    2.628
Sep-10  5.426   0.411   5.054    9.188
Okt-10  0.483   1.098  22.947  1246.722
Nov-11  1.815   1.887  14.320   610.300
Dec-11  2.763   0.351   1.945    4.183
Jan-11  0.374   2.802   4.611   15.023
Feb-11  1.016   1.946   7.908   22.110
Mar-11  1.840   2.088   2.412    5.351
Apr-11  0.315   3.432   1.756   10.415
Maj-11  0.966   3.847   4.228    4.710
-----
Povp.    1.549    2.004    5.990  162.747
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD:      6
OD NAD:      8
PR SAT:     10
OD SAT:     14

```

A.1.2 Eksperiment 2

```

Nadvozno material: 11.000t
Satasto material: 31.000t
*****
          Prevzem    Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      3t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS: 21.49%
Dvigalo 2 NRS: 21.27%
Dvigalo SRS: 34.44%
Delavec Cona 1: 16.90%
Delavec Cona 9: 6.88%
Delavec Cona 4: 10.83%
Delavec Cona 8: 28.06%
DP PR NAD: 16.73%
DP OD NAD: 40.36%
DP PR SAT: 43.44%
DP OD SAT: 44.83%
Sortirni zerjav: 35.06%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10  9.323   2.861   3.214   8.840
Jul-10  0.240   1.703   0.362   5.668
Avg-10  0.069   0.658   0.173   4.328
Sep-10  0.329   2.557   3.417   2.317
Okt-10  0.860   2.416   6.417   6.458
Nov-11  0.938   3.917   3.465   6.426
Dec-11  0.399   2.315   3.105   2.312
Jan-11  1.477   3.194   1.851   6.038
Feb-11  0.430   1.997   7.591   4.704
Mar-11  0.913   2.512   1.058   5.148
Apr-11  0.292   1.349   3.246   3.017
Maj-11  0.317   2.158   2.677   4.746
-----
Povp.   1.299   2.303   3.048   5.000
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD: 6
OD NAD: 8
PR SAT: 12
OD SAT: 10

```

A.1.3 Eksperiment 3

```

Nadvozno material: 16.000t
Satasto material: 46.000t
*****
          Prevzem    Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      1t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS: 31.36%
Dvigalo 2 NRS: 31.63%
Dvigalo SRS: 95.69%
Delavec Cona 1: 24.26%
Delavec Cona 9: 10.17%
Delavec Cona 4: 16.01%
Delavec Cona 8: 55.16%
DP PR NAD: 26.35%
DP OD NAD: 52.07%
DP PR SAT: 75.43%
DP OD SAT: 98.40%
Sortirni zerjav: 51.98%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10 1.704   2.356   29.474  5047.018
Jul-10 0.437   3.191   5.750   6206.944
Avg-10 0.097   1.194   0.794   750.142
Sep-10 1.355   3.104   21.334  860.897
Okt-10 3.753   3.589   541.351 10430.013
Nov-11 1.785   2.323   201.078 31688.474
Dec-11 2.054   4.333   20.838 45397.583
Jan-11 3.144   5.658   13.404 44727.671
Feb-11 0.610   4.330   24.230 44565.762
Mar-11 1.359   8.918   10.534 52039.538
Apr-11 0.918   3.217   11.655 53118.940
Maj-11 2.777   1.942   10.840 48382.270
-----
Povp.   1.666   3.680   74.274 28601.271
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD: 6
OD NAD: 8
PR SAT: 8
OD SAT: 10

```

A.1.4 Eksperiment 4

```

Nadvozno material: 16.000t
Satasto material: 46.000t
*****
          Prevzem    Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      3t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS: 31.56%
Dvigalo 2 NRS: 31.31%
Dvigalo SRS: 51.21%
Delavec Cona 1: 24.35%
Delavec Cona 9: 10.21%
Delavec Cona 4: 15.93%
Delavec Cona 8: 39.15%
DP PR NAD: 24.41%
DP OD NAD: 53.19%
DP PR SAT: 60.84%
DP OD SAT: 59.31%
Sortirni zerjav: 51.86%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10  1.396   4.233   9.800   13.920
Jul-10  2.560   3.430   1.961   5.106
Avg-10  0.119   0.294   0.267   3.177
Sep-10  2.017   2.245   7.601   5.612
Okt-10  2.912   3.642  25.874  22.790
Nov-11  5.077   3.196  12.474  23.283
Dec-11  3.755   2.920   7.245   4.325
Jan-11  0.920   4.835   5.786   8.859
Feb-11  5.750   3.622   6.879  12.012
Mar-11  3.826   6.695   5.584   6.200
Apr-11  1.039   4.231   4.887   4.937
Maj-11  0.934   2.606   5.011   5.504
-----
Povp.   2.525   3.496   7.781   9.644
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD: 6
OD NAD: 8
PR SAT: 11
OD SAT: 10

```

A.2 Druga Faza

Vhodni podatki za 2. fazo so vidni v tabeli 5.2.

A.2.1 Eksperiment 1

```

Nadvozno material: 22.000t
Satasto material: 20.000t
*****
          Prevzem   Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      1t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS:  41.85%
Dvigalo 2 NRS:  41.49%
Dvigalo SRS:    43.98%
Delavec Cona 1: 22.18%
Delavec Cona 9:  4.50%
Delavec Cona 4: 21.12%
Delavec Cona 8: 26.24%
DP PR NAD:      33.01%
DP OD NAD:      64.12%
DP PR SAT:      30.11%
DP OD SAT:      57.64%
Sortirni zerjav: 68.87%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10 2.886   6.318   1.372   5.124
Jul-10 0.416   4.379   1.187   2.037
Avg-10 4.079   3.260   0.073   1.787
Sep-10 6.474   6.157   1.363   2.557
Okt-10 5.247   5.415   6.138   7.942
Nov-11 4.043   5.383   6.817   6.143
Dec-11 6.408   4.548   1.952   2.298
Jan-11 2.607   9.741   1.137   4.871
Feb-11 5.133   9.823   1.214   3.896
Mar-11 3.993  11.416   0.749   2.285
Apr-11 4.363   7.025   2.333   5.563
Maj-11 4.909   6.901   0.273   3.531
-----
Povp.   4.213   6.697   2.051   4.003
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD:      6
OD NAD:      8
PR SAT:     12
OD SAT:     16

```

A.2.2 Eksperiment 2

```

Nadvozno material: 22.000t
Satasto material: 20.000t
*****
          Prevzem    Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      3t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS: 42.07%
Dvigalo 2 NRS: 41.51%
Dvigalo SRS: 22.51%
Delavec Cona 1: 22.28%
Delavec Cona 9: 4.47%
Delavec Cona 4: 21.14%
Delavec Cona 8: 19.02%
DP PR NAD: 32.57%
DP OD NAD: 62.98%
DP PR SAT: 31.51%
DP OD SAT: 28.72%
Sortirni zerjav: 69.15%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10  7.028   7.166   1.355   3.076
Jul-10  0.939   2.941   0.176   2.541
Avg-10  4.403   1.624   0.118   0.192
Sep-10  2.460   6.521   1.722   3.583
Okt-10  7.628   9.943   2.818   3.449
Nov-11  8.425   7.129   3.469   5.465
Dec-11  1.985   2.511   2.738   2.023
Jan-11  2.533   9.672   1.040   2.443
Feb-11  3.804  14.068   1.992   0.628
Mar-11  1.116   8.932   0.701   1.956
Apr-11  5.640   7.155   1.121   2.666
Maj-11  0.934   5.713   2.737   2.051
-----
Povp.   3.908   6.948   1.666   2.506
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD:      6
OD NAD:      8
PR SAT:     12
OD SAT:     11

```

A.2.3 Eksperiment 3

```

Nadvozno material: 33.000t
Satasto material: 30.000t
*****
          Prevzem    Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      1t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS: 62.25%
Dvigalo 2 NRS: 62.21%
Dvigalo SRS: 65.74%
Delavec Cona 1: 31.88%
Delavec Cona 9: 6.65%
Delavec Cona 4: 31.30%
Delavec Cona 8: 38.48%
DP PR NAD: 48.96%
DP OD NAD: 82.85%
DP PR SAT: 48.50%
DP OD SAT: 77.01%
Sortirni zerjav: 94.50%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10  7.461   23.023   5.450   19.243
Jul-10  2.402   11.911   1.473   3.635
Avg-10  1.070    1.825    0.164   3.335
Sep-10  5.267   11.756   3.881   7.088
Okt-10  11.095   38.104   15.813  613.456
Nov-11  12.698   31.089   11.220  194.158
Dec-11  8.482    8.381    2.723   3.943
Jan-11  6.697   50.280   4.468   11.794
Feb-11  7.168   60.427   5.985   19.436
Mar-11  12.496  118.418   2.481   7.059
Apr-11  7.761   35.174   4.577   9.736
Maj-11  3.345   18.607   2.219   5.314
-----
Povp.   7.162   34.083   5.038   74.850
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD: 6
OD NAD: 7
PR SAT: 10
OD SAT: 14

```

A.2.4 Eksperiment 4

```

Nadvozno material: 33.000t
Satasto material: 30.000t
*****
          Prevzem    Odprema
Nadvozno      3t      1t
Satasto       3t      3t
*****
Izkoriscenost resursov:
Dvigalo 1 NRS: 62.16%
Dvigalo 2 NRS: 62.00%
Dvigalo SRS: 33.30%
Delavec Cona 1: 31.90%
Delavec Cona 9: 6.62%
Delavec Cona 4: 31.20%
Delavec Cona 8: 27.42%
DP PR NAD: 50.34%
DP OD NAD: 82.30%
DP PR SAT: 39.45%
DP OD SAT: 41.30%
Sortirni zerjav: 94.48%
*****
Cakalni casi (min):
Mesec  PR NAD  OD NAD  PR SAT  OD SAT
Jun-10  9.457  19.793  2.680  4.787
Jul-10  3.193  14.669  3.238  3.120
Avg-10  0.255  6.518  0.140  1.233
Sep-10  6.817  12.884  3.367  2.758
Okt-10  11.367  48.773  7.059  6.563
Nov-11  10.312  26.453  6.504  6.558
Dec-11  2.995  6.774  3.986  2.678
Jan-11  12.215  65.101  2.580  2.498
Feb-11  7.519  42.551  1.464  4.486
Mar-11  15.083  112.743  4.277  1.475
Apr-11  13.157  35.670  1.311  3.478
Maj-11  5.738  13.942  1.019  1.479
-----
Povp.   8.176   33.823   3.135   3.426
*****
Zmogljivost delavnih postaj (Transakcij/h):
PR NAD: 6
OD NAD: 7
PR SAT: 12
OD SAT: 10

```