

Razvoj simulacijskog modela za proizvodnju dijelova

Zima, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:297462>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

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



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**RAZVOJ SIMULACIJSKOG MODELA ZA PROIZVODNJU
DIJELOVA**

Rijeka, srpanj 2024.

Ana Zima

0069067653

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**RAZVOJ SIMULACIJSKOG MODELA ZA PROIZVODNJU
DIJELOVA**

Mentor: Prof. dr. sc. Mladen Perinić

Komentor: Doc. dr. sc. David Ištoković

Rijeka, srpanj 2024.

Ana Zima

0069067653

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**
Predmet: **Računalna simulacija proizvodnih procesa**
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Ana Hodak (0069067653)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Industrijsko inženjerstvo i menadžment**

Zadatak: **Razvoj simulacijskog modela za proizvodnju dijelova / Development of a simulation model for parts manufacturing**

Opis zadatka:

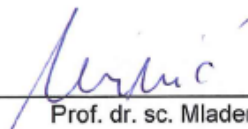
U radu je potrebno dati osnovne informacije o simulacijama te klasificirati simulacijske metode. Detaljnije razmotriti simulaciju diskretnih događaja. Obrazložiti osnovne prednosti primjene simulacijskih metoda u proizvodnji dijelova. Izraditi simulacijski model proizvodnje dijelova na primjeru iz realnog okruženja. Provesti simulacijske eksperimente sa stvarnim ulaznim podacima. Interpretirati i prikazati rezultate provedenog simulacijskog eksperimenta.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Mladen Perinić



Doc. dr. sc. David Ištoković (komentor)

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Sukladno *Pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija* Tehničkog fakulteta u Rijeci izjavljujem da je diplomski rad izrađen samostalno prema uputama za pisanje diplomskog rada. Prilikom izrade rada primijenila sam znanje stečeno na fakultetu, navedenu literaturu te savjete mentora.

Rijeka, srpanj 2024.

Ana Zima

ZAHVALA

Prvenstveno se želim zahvaliti mentoru prof. dr. sc. Mladenu Periniću i komentoru doc. dr. sc. Davidu Ištokoviću na prenesenom znanju tijekom studiranja te pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Hvala mojim kolegama na fakultetu, na poslu kao i mojim prijateljima koji su svojom pomoći i podrškom olakšali diplomski studij.

I na kraju, najveću zahvalnost iskazujem svojoj obitelji koji su mi bili najveća podrška tijekom studija. Hvala im za strpljenje i vjeru u mene.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. POJAM SIMULACIJE | 2 |
| 2.1. Simulacijsko modeliranje | 2 |
| 2.2. Simulacijski proces | 3 |
| 2.3. Primjena računalnih simulacija | 4 |
| 2.4. Prednosti i nedostaci simulacija | 4 |
| 2.5. Podjele simulacijskih modela | 5 |
| 3. PRIMJENA SIMULACIJSKIH METODA U PROIZVODNJI DIJELOVA | 8 |
| 3.1. Izbor programskog paketa | 8 |
| 3.2. Koncept proizvodnog procesa izrade dijelova | 9 |
| 3.2.1. Hodogrami izrade proizvoda | 10 |
| 4. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA | 13 |
| 4.1. Kreiranje ulaznih podataka | 14 |
| 4.2. Postavke prostornih elemenata | 18 |
| 4.3. Postavke kretanja materijala | 25 |
| 4.4. Uključivanje radnika | 30 |
| 4.5. Verifikacija i validacija | 38 |
| 5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJSKOG MODELA | 45 |

| | |
|---|----|
| 6. OPTIMIZACIJA PROIZVODNOG PROCESA IZRADE DIJELOVA | 51 |
| 7. ZAKLJUČAK | 55 |
| LITERATURA | 57 |
| POPIS OZNAKA I KRATICA..... | 58 |
| POPIS SLIKA | 59 |
| POPIS TABLICA | 63 |
| SAŽETAK..... | 64 |
| SUMMARY | 65 |

1. UVOD

U današnje vrijeme kada tržište diktira trendove gotovo je nemoguće zamisliti život bez računala i računalnih programa. Njihova široka primjena omogućuje čovjeku jednostavnije i brže obavljanje potrebnih aktivnosti naročito kada je riječ o industrijskoj proizvodnji. Osim toga, proizvodne tvrtke moraju konstantno raditi na stvaranju novih i unaprjeđivanju postojećih proizvoda kako bi održale konkurentnost na tržištu. Simuliranje kompletnog protoka materijala, uključujući svu relevantnu proizvodnju, skladištenje i djelatnosti prepoznate su kao ključna komponenta za daljnji napredak. Simulacijsko modeliranje koristi se za proučavanje i razumijevanje ponašanja stvarnog procesa kao i za promjene u ponašanju sustava tijekom vremena.

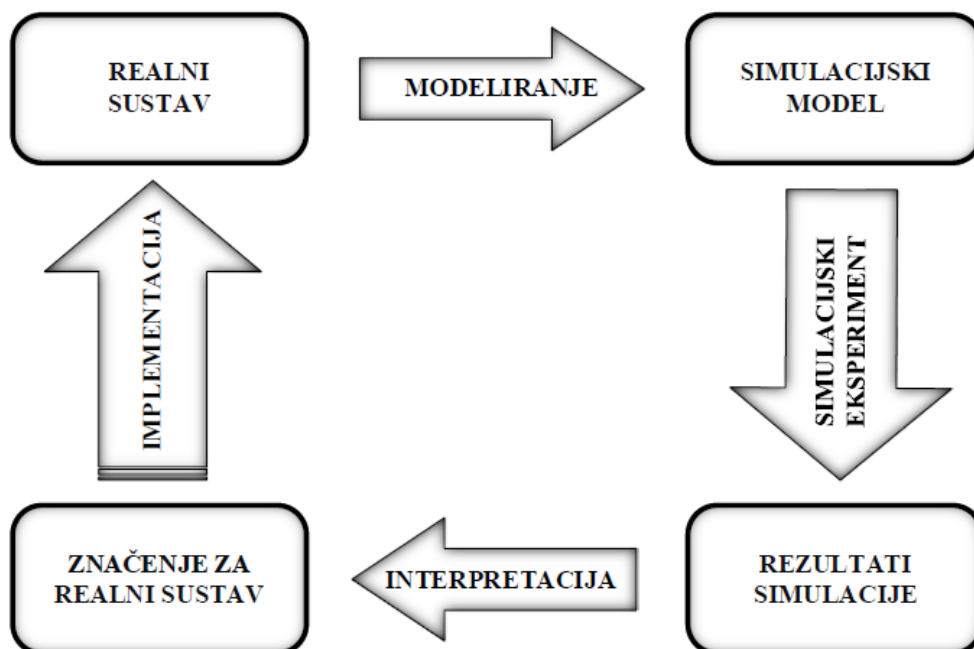
Tema ovog diplomskog rada je razvoj simulacijskog modela za proizvodnju dijelova. Za potrebe izrade simulacijskog modela korišten je program *Tecnomatix Plant Simulation* proizvođača *Siemens PLM Software*. U početnom dijelu rada objašnjen je pojam simulacije, prikazane su njene najvažnije značajke kao i osnovne podjele simulacijskih modela. Nadalje, prikazani su hodogrami izrade proizvoda za koje će se kreirati simulacijski model. Ostatak rada posvećen je izradi simulacijskog modela gdje se po koracima može vidjeti način unošenja osnovnih podataka kao što su proizvodi, proizvodni kapaciteti, međuskladišta. Osim toga, prikazan je način rada uključivanjem radne snage gdje radnici obavljaju poslove rada na proizvodnim kapacitetima i održavanja proizvodnih kapaciteta ukoliko dođe do kvara istih. Nakon izrade modela prikazuju se postupci validacije i verifikacije simulacijskog modela kako bi se potvrdila ispravnost kao i analiza dobivenih rezultata na temelju kojih se može provesti optimizacija procesa radi bolje iskoristivosti sustava.

2. POJAM SIMULACIJE

Simulacija predstavlja vrlo moćnu i široko korištenu znanstvenu tehniku upravljanja za analizu i proučavanje složenih sustava. Osim toga, simulacija se može definirati i kao oponašanje rada procesa ili sustava iz realnog okruženja tijekom vremena te uključuje stvaranje umjetne povijesti sustava i izvlačenje zaključaka iz nje. Razvojem simulacijskog modela moguće je proučavati promjene u ponašanju sustava tijekom određenog vremena [1].

2.1. Simulacijsko modeliranje

Simulacijski modeli predstavljaju modele dinamičkih sistema, tj. onih koji se mijenjaju u nekom vremenu. Iz tog razloga modeli prvenstveno moraju omogućiti ispravan prikaz i efikasno izvođenje pomaka vremena. Osim toga, nužno je omogućiti istovremeno odvijanje aktivnosti i opisivanje procesa. Na temelju promatranog stvarnog sustava izrađuje se simulacijski model. Osnovne komponente simulacijskog modeliranja i njihove relacije prikazane su slikom 2.1 [1, 2].



Slika 2.1 - Osnovni koncept simulacije [1]

Sustav možemo definirati kao dio realnog okruženja koji se promatra. Predstavlja skup određenih dijelova ili objekata koji međusobnim djelovanjem vode ka ostvarenju logičnih ciljeva. Osnovna karakteristika sustava je interakcija njegovih dijelova čime se omogućuje da svi zajedno djeluju kao cjelina [1].

Stanje sustava predstavlja skup varijabli koje su neophodne za opisivanje sustava u bilo kojem vremenskom trenutku. Definira se vrijednostima atributa i entitetima koje model sadrži. Ukupno stanje sustava određeno je stanjima svih njegovih dijelova [1].

Realni sustav definiramo kao izdvojeni dio stvarnog svijeta koji čini funkcionalnu cjelinu. Osim toga, realni sustav može predstavljati i nešto što u stvarnosti ne postoji već je zamišljeno, odnosno realizacija je moguća u budućnosti [3].

2.2. Simulacijski proces

Simulacijski proces je postupak rješavanja stvarnih problema pomoću simulacijskog modeliranja. Može se prikazati kao niz koraka koji opisuju pojedine faze u rješavanju problema. Važno je napomenuti kako struktura nije strogo sekvencijalna čime se omogućuje povratak na prethodne korake. Osnovni koraci simulacijskog procesa su [2, 3]:

1. Definicija cilja simulacijske studije - nužna je definicija cilja kako bi svrha bila jasna.
2. Identifikacija sustava - potrebna je analiza i procjena isplativosti simulacije.
3. Prikupljanje i analiza podataka o sustavu - nužno je osigurati sve potrebne podatke o sustavu.
4. Izrada simulacijskog modela - izrađuje se simulacijski model koji adekvatno opisuje sustav i omogućuje rješavanje zadanog problema.
5. Provjera simulacijskog modela ili verifikacija - provjerava se ponaša li se simulacijski model onako kako je zamišljeno. Model se smatra verificiranim ukoliko se rezultati dobiveni simuliranjem podudaraju sa izračunatim.
6. Vrednovanje simulacijskog modela ili validacija - ispitivanje kojim se želi dokazati da simulacijski model adekvatno predstavlja stvarni sustav. Validacija se provodi na način da se kao ulaz simuliranog modela koriste ulazne varijable iz realnog sustava za koje su poznate izlazne varijable.
7. Planiranje i izvođenje simulacijskih eksperimenata - određuju se scenariji koji će se simulirati u svrhu ispunjenja cilja studije.

8. Analiza rezultata eksperimenata - statistička analiza rezultata. Može se pokazati potreba za dopunom koraka 7 (izvođenje dodatnih eksperimenata).
9. Zaključci i preporuke - prezentacija rezultata na temelju kojih se mogu donijeti adekvatne odluke.

2.3. Primjena računalnih simulacija

Prilikom rješavanja problema postoji više razloga za korištenje simulacija. Prvenstveno, eksperimenti u realnom sustavu su najčešće jako skupi, a neki puta i nemogući. Nadalje, sustav može biti previše složen da bi se moglo doći do analitičkog rješenja. Osim toga, simulacijsko modeliranje koristi se prilikom rješavanja problema koji su važni za donošenje odluka. Pronalaženje glavnih faktora utjecaja u sustavu ključni su za razumijevanje sustava ili problema. Sustav je moguće sintetizirati odnosno oblikovati kao i vrednovati predložena rješenja u svrhu određivanja radnih karakteristika i kapaciteta sustava. Računalne simulacije omogućuju sinkronizaciju i fino podešavanje sustava te analizu utjecaja kvarova na rad. Također, simulacijom je moguće predvidjeti ponašanje sustava u budućnosti odnosno prognozirati efekte promjene vanjskih uvjeta i unutarnjih parametara [2].

Možemo zaključiti da simulacijsko modeliranje igra jako važnu ulogu u procesu donošenja odluka iz razloga što može opisivati i rješavati različite probleme te nudi raznovrsne načine za upotrebu modela. Takve mogućnosti dobivene su zbog pogodnosti rada koja nude mikroročunala, suvremeni način rada upotrebom menija i prozora te animacija simulacije [2].

2.4. Prednosti i nedostaci simulacija

Kao glavnu prednost korištenja računalnih simulacija možemo navesti mogućnost detaljnog predstavljanja složenih sustava iz realnog okruženja bez ometanja rada realnog sustava. Osim toga, omogućena je velika fleksibilnost u predstavljanju procesa iz realnog okruženja. Primjena simulacije je relativno jednostavna, a jednom izrađen model moguće je koristiti za različite analize. Uvjeti eksperimenta su pod potpunom kontrolom za razliku od stvarnog sustava gdje nije moguće utjecati na dinamiku procesa. Analiza simulacije može uvelike pomoći u razumijevanju sustava kao i otkrivanju uskih grla procesa. Vrijeme simulacije moguće je

prilagoditi kako bi se određeni događaji mogli detaljnije proučiti. Time je omogućeno kvalitetno donošenje odluka i predviđanje budućih događaja [1,2].

Nedostatak računalnih simulacija je potreba za poznavanjem velikog broja računalnih alata i metoda modeliranja. Kod kompleksnih sustava često je nemoguće pronaći optimalna rješenja, a proces modeliranja relativno je dug i skup. Osim toga, potrebno je izvođenje većeg broja simulacijskih eksperimenata da bi se dobio odgovarajući uzorak rezultata simulacije, a pojedinačno izvođenje eksperimenata zahtijeva mnogo vremena i memorije računala [1,2].

2.5. Podjele simulacijskih modela

Općenito, kada govorimo o modelima, dijelimo ih:

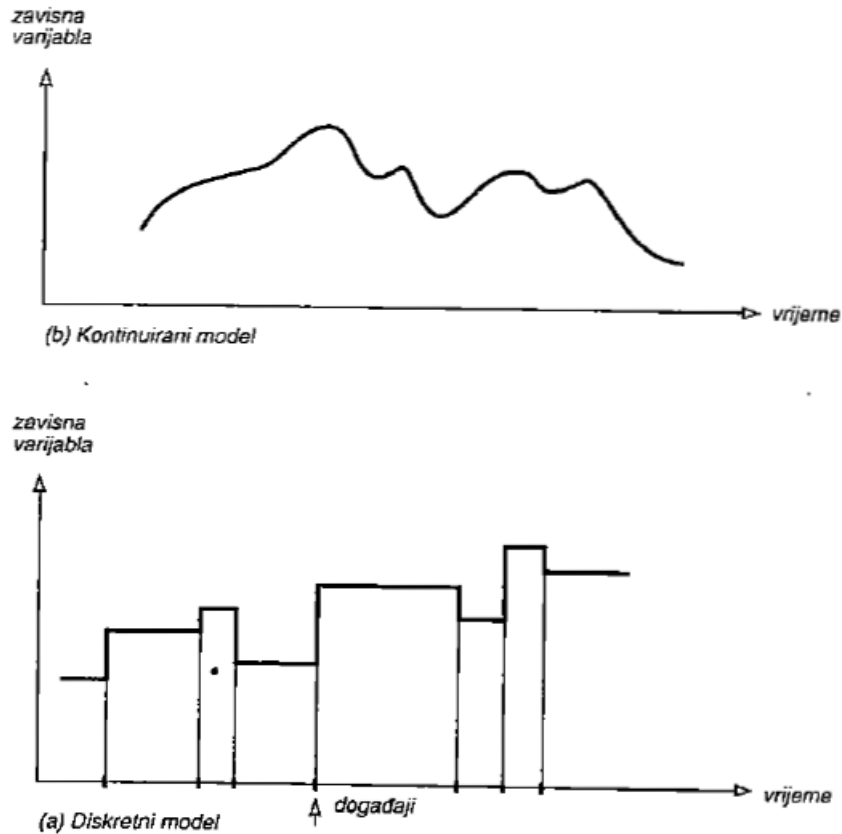
- prema strukturi na fizičke i apstraktne,
- prema načinu ponašanja na statičke i dinamičke,
- prema načinu rješavanja na konceptualne, matematičke i simulacijske.

Simulacijske modele dijelimo prema:

- vrsti varijabli u modelu na determinističke i stohastičke,
- načinu na koji se stanje modela mijenja u vremenu na kontinuirane i diskretne.

Deterministički modeli su oni kod kojih je ponašanje u potpunosti predvidivo, tj. novo stanje sustava koji je modeliran određeno je prethodnim stanjem. S druge strane, stohastički modeli su oni čije ponašanje nije moguće predvidjeti, ali se može odrediti vjerojatnost promjene stanja sustava [2].

Kod kontinuiranih modela varijable stanja mijenjaju se kontinuirano u određenom vremenu. U diskretnim modelima stanje sustava mijenja se samo u nekim vremenskim točkama. Takve promjene nazivamo događajima. Slikom 2.2. prikazana je razlika kontinuirane i diskretne promjene stanja [2].



Slika 2.2 - Kontinuirani i diskretni simulacijski modeli [2]

Četiri su osnovna tipa simulacijskih modela:

- Monte Carlo simulacija,
- Kontinuirana simulacija,
- Simulacija diskretnih događaja,
- Kombinirana diskretno-kontinuirana simulacija.

Monte Carlo simulacija predstavlja statističku simulaciju povezanu slučajnim fenomenima. Prilikom rješavanja problema koristi se vjerojatnostima i slučajnim brojevima. Metoda se temelji na poznavanju funkcije prijenosa kojom se ulazi pretvaraju u izlaz procesa. Prednost Monte Carlo simulacije je mogućnost optimizacije sustava provođenjem većeg broja simulacijskih eksperimenata promjenom ulaznih varijabli ili prijenosne funkcije što ne zahtijeva mnogo dodatnih resursa niti vremena. Nedostatak ove metode je manjak znanja o stvarnom modelu iz razloga što se definiranje modela temelji na prijašnjim podacima ili iskustvu [2].

Ako je riječ o rješavanju dinamičkih problema kod kojih se varijable stanja mijenjaju kontinuirano u vremenu tada govorimo o kontinuiranoj simulaciji. Kod kontinuirane simulacije najveći je naglasak na sistemskoj dinamici, tj. simulaciji sustava s povratnom vezom. Povratna veza može biti pozitivna ukoliko se pojačava rad sustava ili negativna kada se rad sustava stabilizira. Modeli s povratnom vezom koriste se kod modeliranja inženjerskih sustava te bioloških, društvenih i ekonomskih sistema [2].

Simulacija diskretnih događaja prvenstveno je namijenjena razvoju modela koji opisuju strukturu sustava i njegove dijelove, tj. oponašaju objekte iz stvarnog svijeta i njihovo međudjelovanje. Najčešće se koristi kod modeliranja i analize sustava sa čekanjima na resurse kao npr. radno mjesto ili transportno sredstvo. Kod ove metode promjene stanja sustava odvijaju se diskontinuirano te postoje dva tipa varijabli. Prva je nezavisna, ulazna varijabla čije se vrijednosti unose u sustav, a neke od njih su: vrijeme odvijanja pojedinog procesa, broj raspoloživih resursa. Druga varijabla je zavisna, izlazna čije se vrijednosti dobiju kao rezultat simulacije, a to mogu biti: vrijeme čekanja, propusnost sustava, iskorištenje sustava i slično [2,3].

Za neke vrste sustava način rada nije moguće opisati ni kontinuiranom simulacijom niti simulacijom diskretnih događaja. To su sustavi koji sadrže procese koji teku kontinuirano i događaje koji mogu dovesti do diskontinuiteta. Da bi se takvi modeli mogli uspješno modelirati i simulirati razvijena je kombinirana diskretno-kontinuirana simulacija koja omogućuje integraciju diskretnih i kontinuiranih elemenata sustava [2].

Pri izboru simulacijskog modela najvažnije je da model bude što jednostavniji i razumljiviji što zbog lakšeg modeliranja što zbog potrebe da ga korisnik lakše razumije. Važnu ulogu u izboru simulacijskog modela također ima sposobnost onoga tko je zaslužan za razvoj modela da pronađe adekvatno rješenje za zadani problem. Pri tome veliku važnost treba dati prethodnom iskustvu i intuiciji kao i poznavanju određenog simulacijskog jezika [2].






U ovom radu promatrat će se simulacija diskretnih događaja.

3. PRIMJENA SIMULACIJSKIH METODA U PROIZVODNJI DIJELOVA

Simulacija diskretnih događaja danas se učestalo koristi kako zbog sve složenijih ekonomskih i tehnoloških sustava koje je jako teško ili čak gotovo nemoguće modelirati i analizirati drugim metodama tako i zbog razvoja kojeg doživljavaju softverski alati za simulaciju. Svaki od softverskih alata ima neke prednosti i nedostatke. Prednosti i nedostaci moraju se prvenstveno promatrati kroz namjenu za koju je odgovarajući tip softvera stvoren. Ne postoji simulacijski model koji je najbolji za sve moguće namjene.

3.1. Izbor programskog paketa

Prilikom izbora odgovarajućeg softvera potrebno je analizirati za koje područje primjene i za koju vrstu problema se nabavlja simulacijski softver, tko će taj softver koristiti i koji je očekivani profit od korištenja modela [2]. Slikom 3.1. prikazani su glavni programski paketi za simulacijsko modeliranje koji se nalaze na tržištu.

| | |
|---|------------------------------|
|  Rockwell Automation | Arena® |
|  | Simulation Factory® |
|  LANNER Future. Proof. | Witness® |
|  | Delmia® |
|  SIEMENS | Tecnomatix Plant Simulation® |

Slika 3.1 - Simulacijski programski paketi [1]

Za potrebe ovog diplomskog rada koristit će se programski paket *Tecnomatix Plant Simulation* proizvođača *Siemens PLM Software*. *Tecnomatix Plant Simulation* je alat za simulaciju diskretnih događaja koji se koristi za modeliranje procesa u svrhu analize, optimizacije, dokumentiranja ili komunikacije s korisnikom. Osim toga, vrši se analiza postojećeg stanja sustava ili se projektira potpuno novi proizvodni sustav. Moguće je optimizirati tijek materijala, iskoristivost resursa te logistiku proizvodnih linija. Za rad koristi *Windows* operacijski sustav i može koristiti druge softvere kao što su *Matlab*, *Simatic IT*, *AutoCad*, *MS-Excel* za obavljanje specijaliziranih funkcija.

3.2. Koncept proizvodnog procesa izrade dijelova

Proizvodni proces na osnovu kojeg će se izraditi simulacijski model namijenjen je za obradu četiri vrste proizvoda A, B, C i D koji se u montaži spajaju u jedan finalni proizvod M. Za rad ukupno će se koristiti devet proizvodnih kapaciteta: pila, dvije tokarilice, tri glodalice, dva stroja za brušenje te jedinica za montažu. Osim toga, ideja je da se ulazni proizvodi dopremaju iz zasebnih skladišta repromaterijala (SRM) te da se finalni proizvod odlaže u skladište gotovih proizvoda (SGP). Unutar postojećeg proizvodnog sustava jedinice proizvoda kreću se zasebno, tj. ne ovise o drugim jedinicama proizvoda što predstavlja kontinuiran način odvijanja proizvodnje. Prostorni raspored proizvodnih kapaciteta bit će dvoredan. Predviđeno vrijeme za odvijanje proizvodnje je pet radnih dana u dvije smjene (7:00-23:00) dok smjena traje 8 sati. Rad na proizvodnim kapacitetima obavljat će za to kvalificirani radnici.

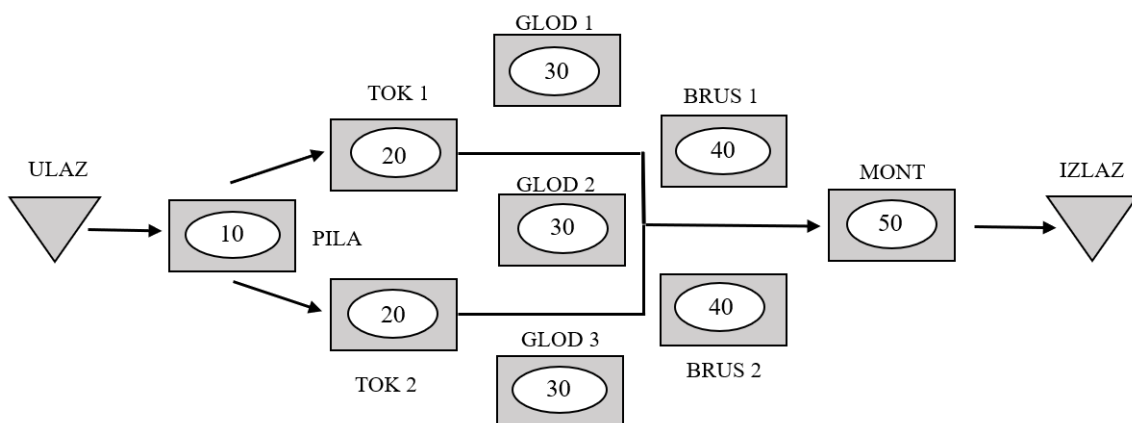
Važno je napomenuti da će se za vrijeme rada proizvodnih kapaciteta javljati i potencijalni kvarovi te je potrebno određeno vrijeme za njihovo otklanjanje. Tablicom 3.1. navedeni su podaci za udio raspoloživosti pojedinog stroja tj. udio u vremenu tokom kojeg strojevi rade bez kvara te potrebno vrijeme za rješavanje kvara na pojedinom stroju (engl. *Mean Time To Repair*, MTTR). Za popravak kvarova zaduženi su radnici obučeni za održavanje proizvodnih kapaciteta.

Tablica 3.1 - Proizvodni kapaciteti i njihova raspoloživost

| Br. | Proizvodni kapacitet | Kratice | Raspoloživost (%) | MTTR (min) |
|-----|----------------------|---------|-------------------|------------|
| 1 | Tračna pila | PILA | 90 | 15 |
| 2 | Tokarilica 1 | TOK 1 | 80 | 15 |
| 3 | Tokarilica 2 | TOK 2 | 80 | 15 |
| 4 | Glodalica 1 | GLOD 1 | 90 | 20 |
| 5 | Glodalica 2 | GLOD 2 | 90 | 20 |
| 6 | Glodalica 3 | GLOD 3 | 90 | 20 |
| 7 | Brusilica 1 | BRUS 1 | 85 | 15 |
| 8 | Brusilica 2 | BRUS 2 | 85 | 15 |
| 9 | Montaža | MONT | 90 | 10 |

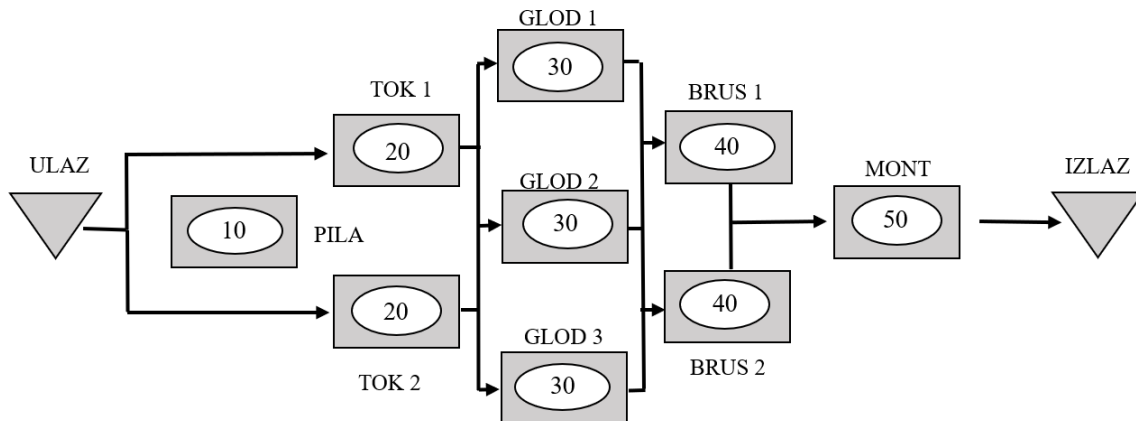
3.2.1. Hodogrami izrade proizvoda

Jedinica proizvoda A se po izlasku iz skladišta repromaterijala (SRM) najprije 6 minuta obrađuje na tračnoj pili (PILA) zatim 9 minuta na jednoj od raspoloživih tokarilica (TOK 1 ili TOK 2). Operacijom montaže (MONT) u trajanju od 5 minuta završava proces obrade proizvoda A te se gotov proizvod odlaže u skladište gotovih proizvoda (SGP). Proizvod A se u proizvodnom sustavu kreće u jediničnim serijama, a ukupno će se proizvesti trideset jedinica proizvoda A. Hodogram izrade proizvoda A prikazan je slikom 3.2.



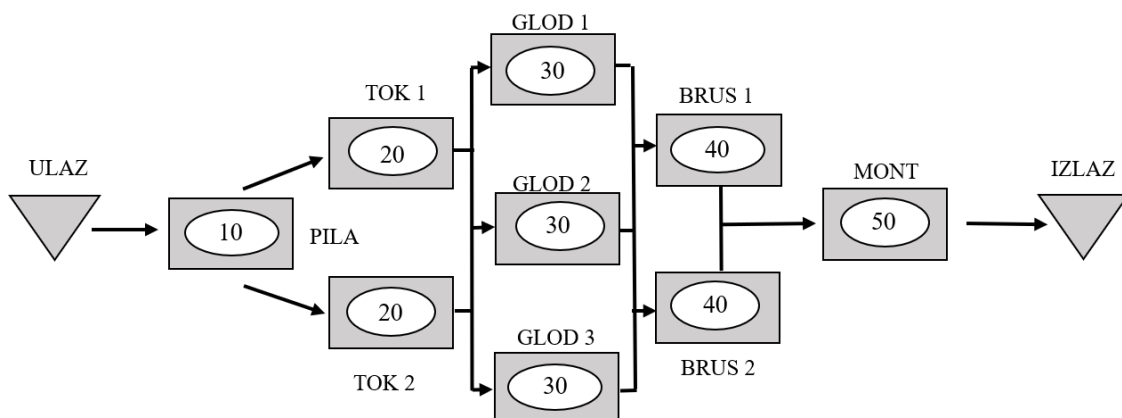
Slika 3.2 - Hodogram izrade proizvoda A

Jedinica proizvoda B se po izlasku iz skladišta repromaterijala obrađuje na jednoj od tokarilica (TOK 1 ili TOK 2) u trajanju od 7 minuta. Nakon toga 6 minuta obrađuje se na jednoj od raspoloživih glodalica (GLOD 1, GLOD 2, GLOD 3), a zatim slijedi obrada brušenja (BRUS 1 ili BRUS 2) u trajanju od 4 minute. Zadnja operacija je operacija montaže (MONT) u trajanju od 5 minuta. Proizvodi se kroz proces kreću u jediničnim serijama. Ukupna potrebna količina je šezdeset komada proizvoda B. Slikom 3.3. prikazan je hodogram izrade proizvoda B.



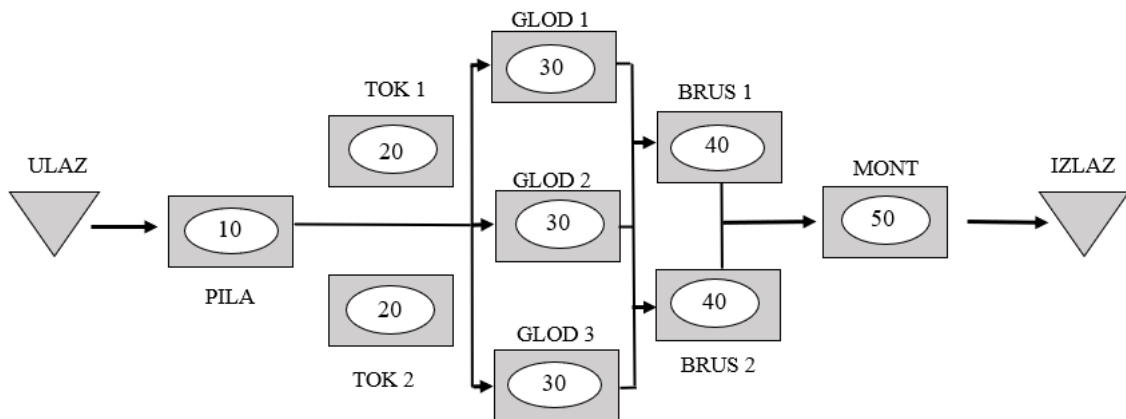
Slika 3.3 - Hodogram izrade proizvoda B

Jedinica proizvoda C najprije se obrađuje na tračnoj pili (PILA) 6 minuta nakon čega slijedi obrada na tokarilici (TOK 1 ili TOK 2) u trajanju od 8 minuta. Nakon tokarilice slijedi obrada na jednoj od glodalica (GLOD 1, GLOD 2, GLOD 3) 11 minuta, a zatim komadi 6 minuta provode na brušenju (BRUS 1 ili BRUS 2). Zadnja operacija je montaža (MONT) u trajanju od 5 minuta. Proizvodi se također kreću u jediničnim serijama. Ukupno će biti proizvedeno petnaest komada proizvoda C. Hodogram izrade proizvoda C prikazan je slikom 3.4.



Slika 3.4 - Hodogram izrade proizvoda C

Jedinica proizvoda D se po izlasku iz skladišta repromaterijala obrađuje na tračnoj pili (PILA) 5 minuta nakon čega slijedi proces obrade glodanjem 7 minuta na jednoj od glodalica (GLOD 1, GLOD 2 ili GLOD 3). Sljedeći korak je operacija brušenja (BRUS 1 ili BRUS 2) u trajanju od 8 minuta. Nakon toga slijedi montaža (MONT) u trajanju od 5 minuta. Ukupno će se proizvesti 30 komada proizvoda D. Slikom 3.5. prikazan je hodogram izrade proizvoda D.



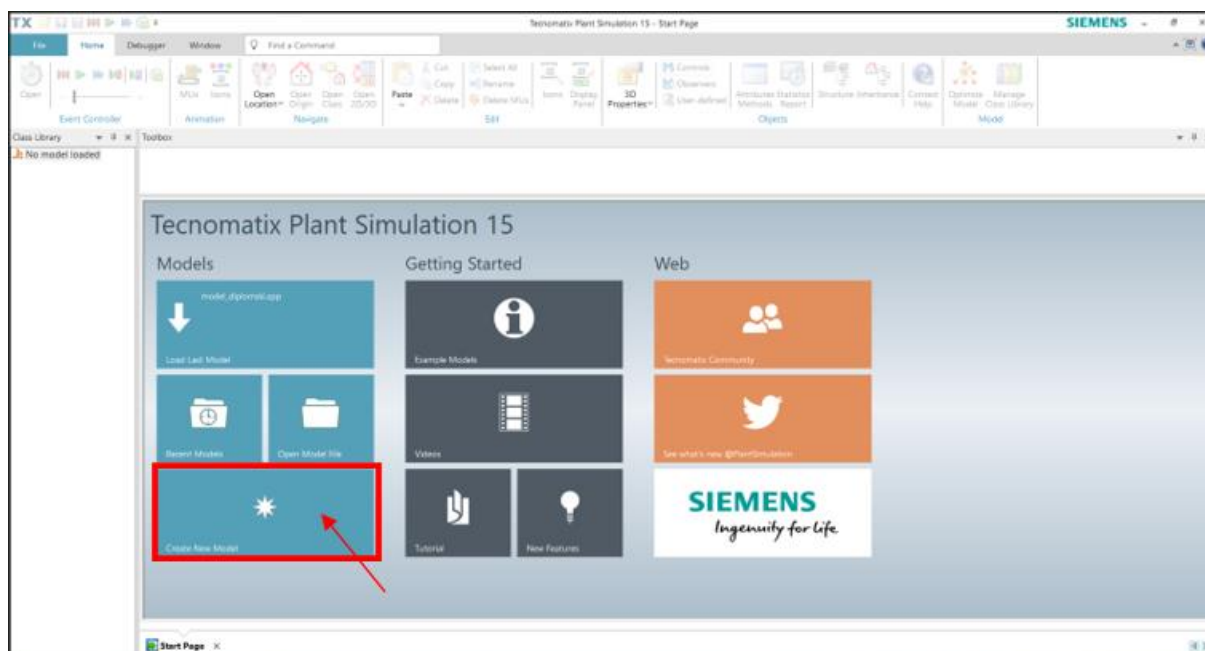
Slika 3.5 - Hodogram izrade proizvoda D

Proizvod M predstavlja finalni proizvod koji nastaje procesom montaže odnosno spajanjem dva komada proizvoda A, četiri komada proizvoda B, jednog komada proizvoda C i dva komada proizvoda D. Nakon procesa montaže proizvod M odlaže se u skladište gotovih proizvoda.

4. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA

Pokretanjem programa *Tecnomatix Plant Simulation* otvara se početno sučelje vidljivo na slici 4.1. Crvenom bojom označeno je polje *Create New Model* koje je potrebno odabrati ukoliko se želi kreirati novi model. Osim kreiranja novog i modificiranja postojećeg modela program nudi video materijale za lakše učenje i rad.

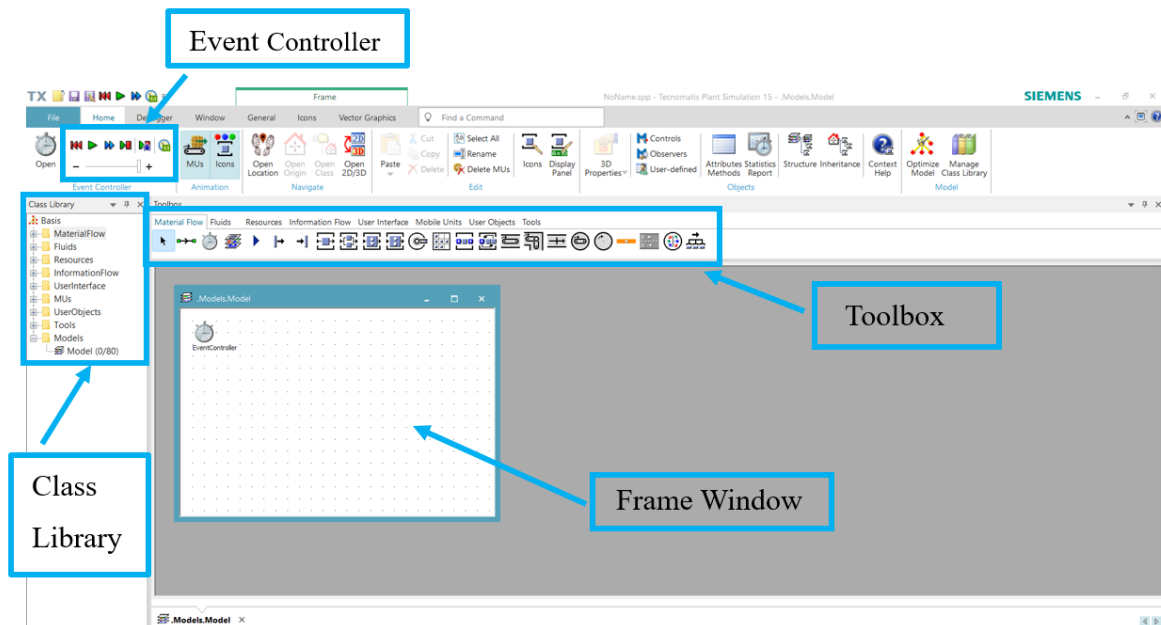
Klikom na polje *Create New Model* nudi se opcija kreiranja 2D ili 3D modela. Odabire se 2D zbog jednostavnijeg i jasnijeg prikaza simulacijskog modela te iz razloga što 3D vizualizacija u ovom slučaju nije bitna. Postavke kreiranja može se u bilo kojem trenutku promijeniti u postavkama modela.



Slika 4.1 - Početno sučelje *Tecnomatix Plant Simulation*-a

Na slici 4.2. prikazano je radno sučelje programa *Tecnomatix Plant Simulation*. Plavom bojom označeni su i imenovani osnovni dijelovi za rad u programu. Ikona *Class Library* sadržava sve potrebne objekte za izradu modela koji su grupirani prema svojim funkcijama. Osim toga, moguće je kreirati vlastite objekte koji su potrebni za rad na način da se dupliciraju postojeći objekti te ih se preimenuje. Nadalje, unutar *Toolbox*-a nalaze se svi objekti iz *Class Library*-a koji se jednostavno metodom *drag and drop* dovedu u radni prostor programa koji je označen

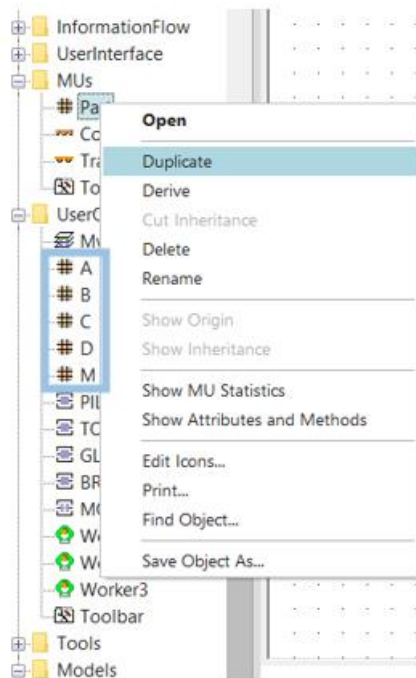
kao *Frame Window*. Ikonom *Event Controller* upravlja se simulacijom na način da ju je moguće pokrenuti, pauzirati ili resetirati. Također, moguće je podesiti neke značajke kao što su brzina izvođenja simulacije te datum početka i završetka.



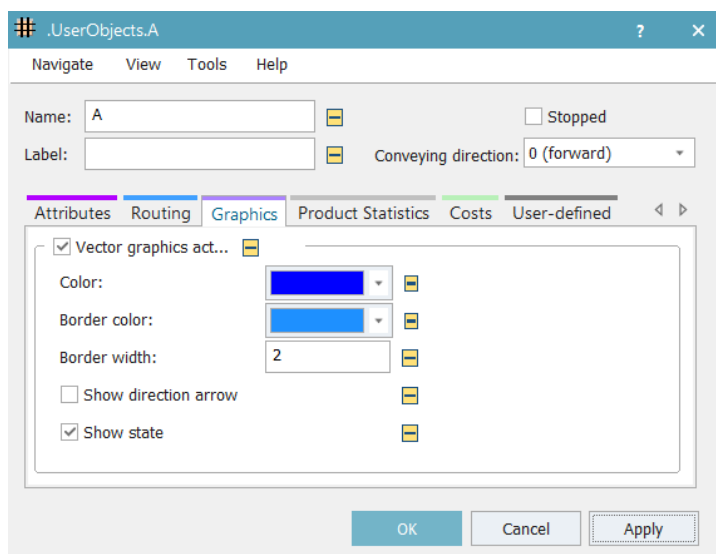
Slika 4.2 - Radno sučelje Tecnomatix Plant Simulation-a

4.1. Kreiranje ulaznih podataka

Početak izrade simulacijskog modela predstavlja kreiranje četiri vrste ulaznih proizvoda A, B, C i D te finalnog proizvoda M koji nastaje procesom montaže. Proizvodi se kreiraju na način da se u *Class Library*-u desnim klikom na objekt *Part* otvara padajući izbornik u kojem se odabere *Duplicate*. Obzirom da treba stvoriti pet vrsta proizvoda postupak se ponavlja pet puta, a nakon toga proizvodi se preimenuju. Postupak stvaranja proizvoda prikazan je slikom 4.3. Osim imena, svakom proizvodu dodijeliti će se i boja radi lakšeg raspoznavanja prilikom pokretanja simulacije. Boja se može dodijeliti na način da se dvostrukim klikom miša na pojedini proizvod otvara kartica proizvoda i pod ikonom *Graphics* odabire željena boja. Tako se proizvodu A dodjeljuje plava boja, proizvodu B crvena, proizvodu C zelena, proizvodu D žuta i na kraju proizvodu M ljubičasta boja. Slikom 4.4. prikazana je kartica proizvoda A gdje je vidljiva odabrana boja proizvoda. Za ostale vrste proizvoda postupak odabira boje je isti.



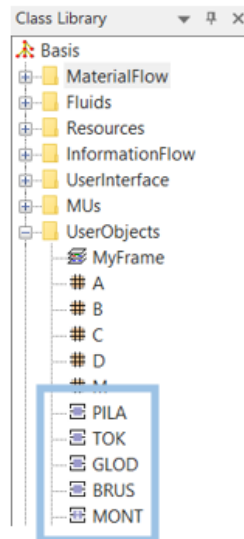
Slika 4.3 - Stvaranje traženih proizvoda



Slika 4.4 - Definiranje boje proizvoda A

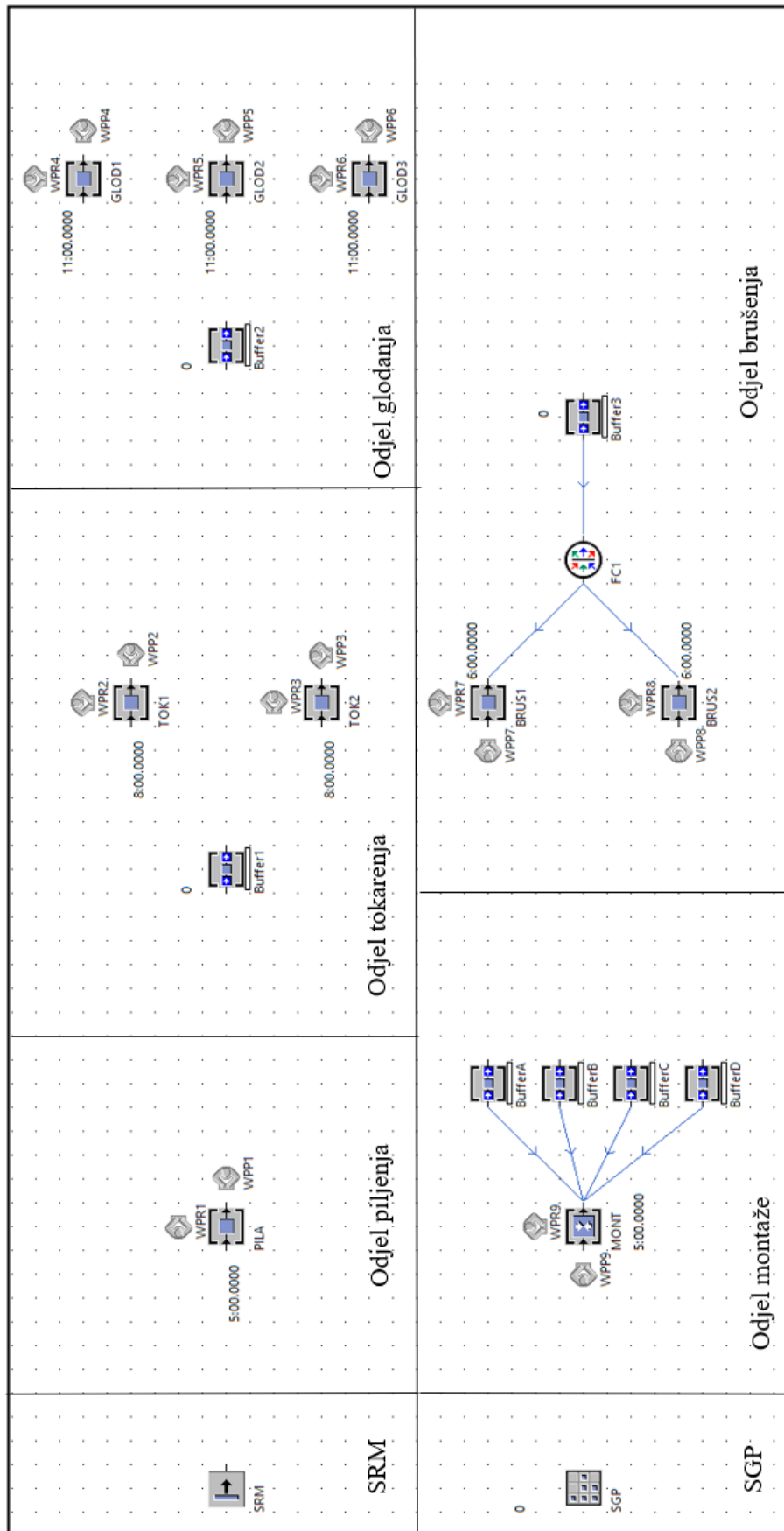
Proizvodni kapaciteti kreiraju se na način da se u *Class Library*-u u izborniku *MaterialFlow* desnim klikom miša odabere *Station* i duplecira četiri puta kako bi se dobila četiri proizvodna kapaciteta: tračna pila, CNC tokarilica, CNC glodalica i stroj za brušenje. Osim toga, potrebno

je kreirati radno mjesto gdje će se odvijati proces montaže, a kreira se dupliciranjem objekta *Assembly Station*. Sve proizvodne kapacitete potrebno je preimenovati prema kraticama koji su navedeni u hodogramima izrade. Slikom 4.5. prikazani su kreirani proizvodni kapaciteti. Tako kreirane proizvodne kapacitete potrebno je organizirati unutar *Frame Window*-a. Objekti se dodaju *drag and drop* metodom u radni prostor prema željenom rasporedu.



Slika 4.5 - Kreirani proizvodni kapaciteti

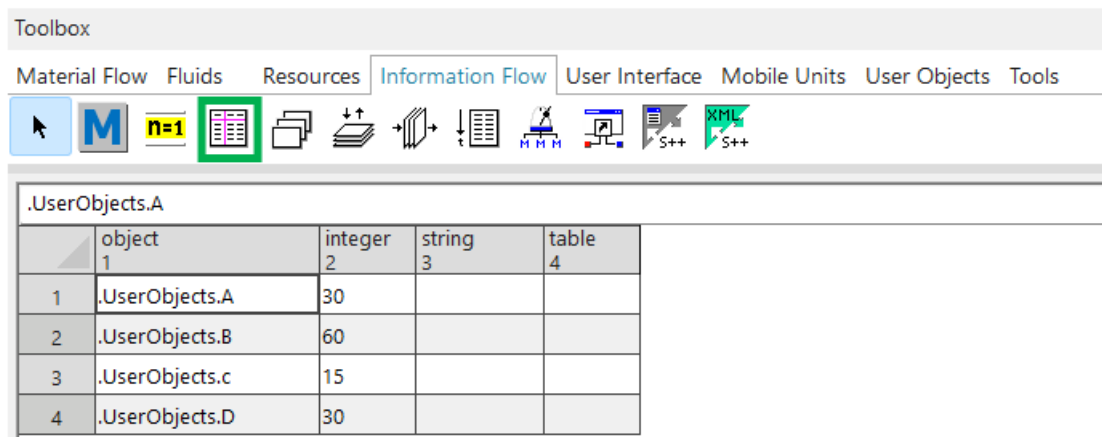
Proizvodni pogon zamišljen je na način da se sastoji od skladišta repromaterijala, odjela piljenja, odjela tokarenja, odjela glodanja, odjela brušenja, odjela montaže proizvoda te skladišta gotovih proizvoda. Odjel piljenja za rad koristi jednu tračnu pilu, odjel tokarenja sastoji se od dvije tokarilice i međuskladišta u koje se odlažu proizvodi nakon procesa piljenja. Nadalje, slijedi odjel glodanja koji se sastoji od tri proizvodna kapaciteta i međuskladišta koje skladišti proizvode nakon tokarenja, a prije glodanja. Odjel brušenja za rad koristi dvije brusilice i međuskladište gdje se pohranjuju proizvodi nakon glodanja. Ideja je da se nakon procesa brušenja komadi odlažu u međuskladišta prema vrsti proizvoda kako bi bili organizirani za proces montaže. Skladište repromaterijala (SRM) i skladište gotovih proizvoda (SGP) kreiraju se na način da pod karticom *Material Flow* unutar *Toolbox*-a treba odabrati *Source* za skladište repromaterijala te *Store* za skladište gotovih proizvoda i *drag and drop* metodom postaviti u *Frame Window*. Prostorni raspored proizvodnog pogona prikazan je slikom 4.6.



Slika 4.6 - Prostorni raspored proizvodnog pogona

4.2. Postavke prostornih elemenata

Kako bi se moglo definirati skladište repromaterijala potrebno je izraditi tablicu količina kojom će se prikazati količina proizvoda koja se doprema iz skladišta. Tablica se nalazi pod karticom *Information Flow* unutar *Toolbox*-a pod imenom *DataTable*. *Drag and drop* metodom postavlja se u *Frame Window* te preimenuje u „kolicina_proizvoda“. Tablica se otvara dvostrukim klikom miša i formatira desnim klikom na pravokutnik u gornjem desnom kutu tablice nakon čega se otvora izbornik i odabire *Format*. Unutar kartice odabere se *Dimension*, zatim se postavlja veličina tablice, a pod *Data Type* odabire se vrsta podataka koja će se upisivati u tablicu. Obzirom da se radi o količini važno je odabrati kategoriju *integer* jer to znači da će tablica čitati cijele brojeve. U prvom stupcu tablice dodaju se proizvodi koji su kreirani u *Class Library*-u, a u drugom stupcu su količine svakoga od njih. Podaci unutar tablice „kolicina_proizvoda“ i kartica *Information Flow* prikazani su slikom 4.7. Zelenom bojom označena je *DataTable* unutar kartice *Information Flow*.



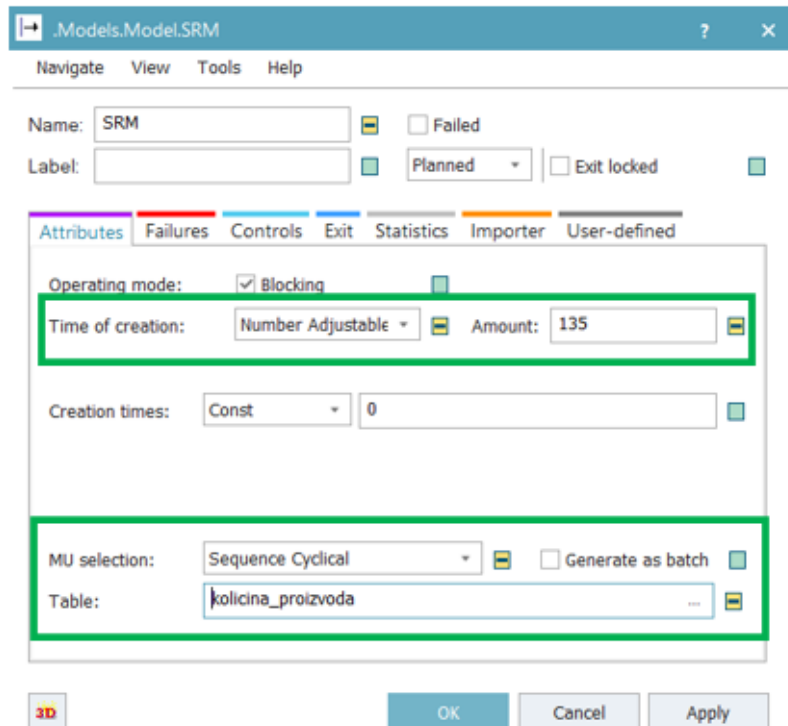
The screenshot shows a software interface with a 'Toolbox' at the top. The 'Information Flow' tab is selected, and a 'DataTable' icon is highlighted with a green box. Below the toolbox, a data table is displayed with the following content:

| | object 1 | integer 2 | string 3 | table 4 |
|---|----------------|-----------|----------|---------|
| 1 | .UserObjects.A | 30 | | |
| 2 | .UserObjects.B | 60 | | |
| 3 | .UserObjects.c | 15 | | |
| 4 | .UserObjects.D | 30 | | |

Slika 4.7 - Tablica „kolicina_proizvoda“

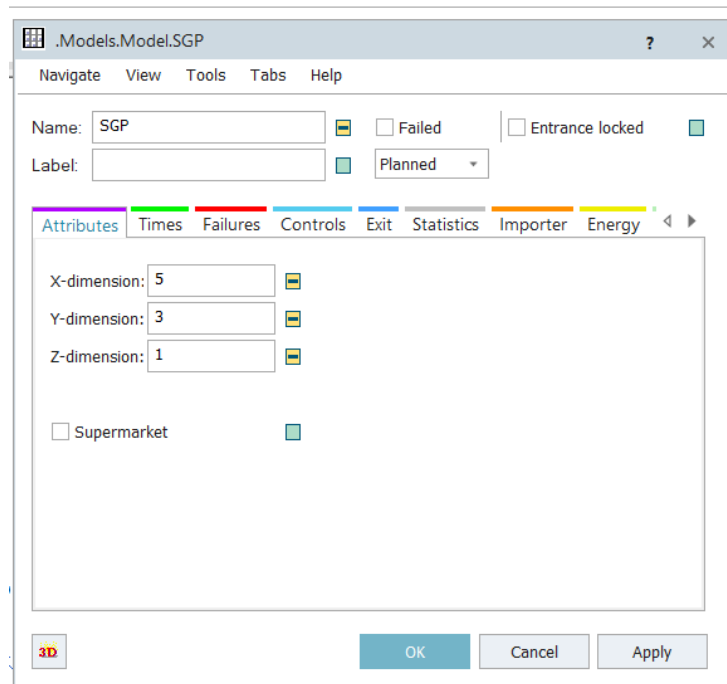
Nakon izrade tablice potrebno ju je povezati sa skladištem repromaterijala kako bi skladište dopremilo odgovarajući broj svakog proizvoda. Dvostrukim klikom na *SRM* otvaraju se svojstva gdje je moguće unositi određene postavke. Pod *Attributes* iz padajućeg izbornika za *Time of Creation* odabire se *Number Adjustable*, pod *Amount* 135 jer skladište ukupno doprema 135 komada proizvoda. Zatim, pod *MU Selection* iz padajućeg izbornika treba odabrati *Sequence Cyclical* da bi se omogućilo dodavanje tablice iz koje će se slijediti podaci o

količinama. U okvir *Table* za dodavanje tablice *drag and drop* metodom dodaje se prethodno izrađena tablica. Slikom 4.8. prikazane su opisane postavke.



Slika 4.8 - Postavke skladišta repromaterijala

Kod postavki skladišta gotovih proizvoda važno je da ukupno proizvedena količina proizvoda M stane u skladište. Skladišni prostor SGP-a organiziran je u obliku matrice pa se tako pod karticom *Attributes* unose vrijednosti za X , Y i Z -*dimension* gdje X -*dimension* predstavlja broj jedinica koje stanu po duljini, Y -*dimension* broj jedinica koje stanu po širini i Z -*dimension* broj jedinica koje stanu po visini. Slika 4.9. prikazuje postavke skladišta gotovih proizvoda. Osim dimenzija skladišta potrebno je definirati ulaznu metodu koja će zaustaviti simulacijski sat u trenutku kada u skladište uđe zadnji proizvod. Obzirom da procesom montaže nastaje petnaest komada proizvoda M , simulacijski sat zaustavit će se kada petnaesti komad uđe u SGP. Ulazna metoda postavlja se u postavkama SGP-a pod karticom *Controls*. U kućici *Entrance* izabere se opcija *Create Control*. Metodom se prvo definira nova varijabla m koja je *integer* (cijeli broj) i označava broj jedinica proizvoda koje će ući u skladište. Nakon toga postavlja se uvjet kada varijabla m bude jednaka petnaest simulacijski sat se zaustavlja. Na slici 4.10. prikazana je ulazna metoda SGP-a.



Slika 4.9 - Postavke skladišta gotovih proizvoda

```

var m : integer := SGP.statNumIn

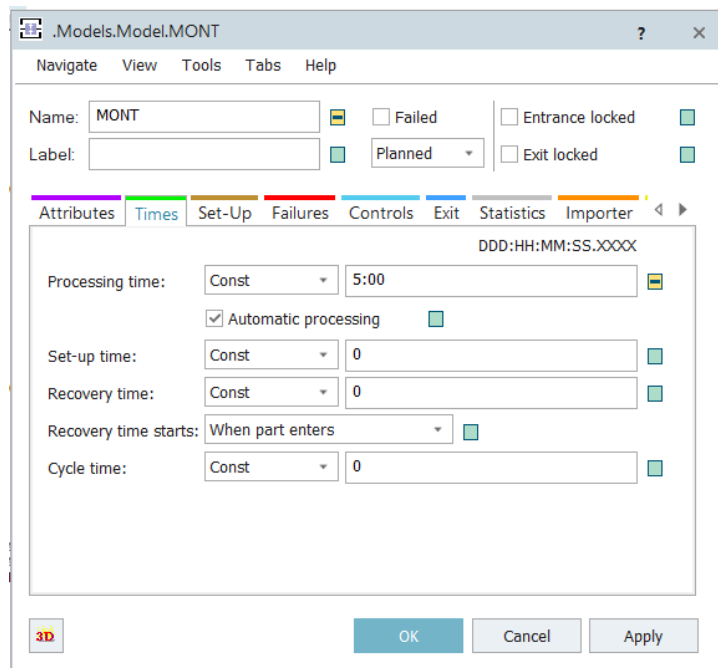
if m = 15
    root.EventController.stop
end

```

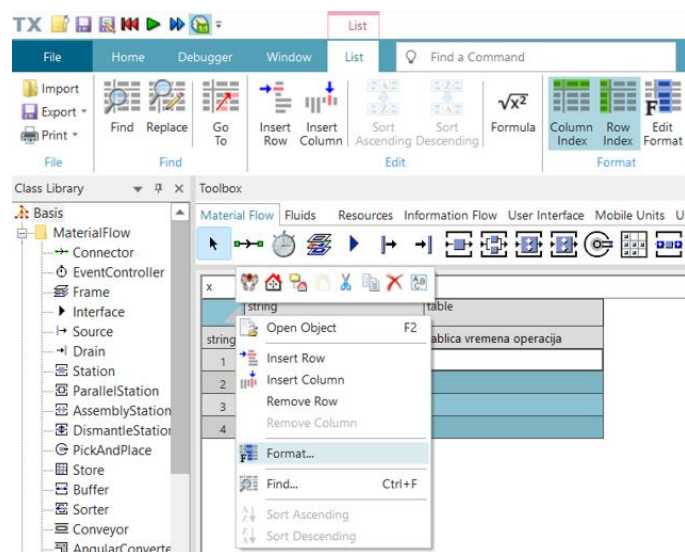
Slika 4.10 - Ulazna metoda SGP-a

Kako bi se vremena operacija mogla povezati sa proizvodnim kapacitetima potrebno je kreirati novu tablicu koja će sadržavati vremena operacija za pojedini proizvod. Vrijeme montaže je konstantno stoga nije potrebno unositi vrijednosti u tablicu već se jednostavno unosi u postavkama objekta. Dvostrukim klikom miša otvara se prozor s postavkama i pod karticom *Times* odabire se *Const* što predstavlja konstantno vrijeme bez oscilacija, i upisuje vrijeme trajanja obrade koje iznosi 5 minuta. Slikom 4.11. prikazane su postavke montaže. Za ostale proizvodne kapacitete kreirat će se tablica pod imenom „vremena_operacija“. Tablici je potrebno dodati nulti red i nulti stupac odabirom opcija *Column Index* i *Row Index* te ih zatim formatirati desnim klikom u lijevi gornji kut tablice. Pod *Dimension* prilagođava se broj redova i stupaca. Tablica će se sastojati od četiri reda, po jedan za svaku vrstu proizvoda i jednog stupca koji će sadržavati tablice vremena operacija. Osim toga, nužno je promijeniti i vrstu podataka

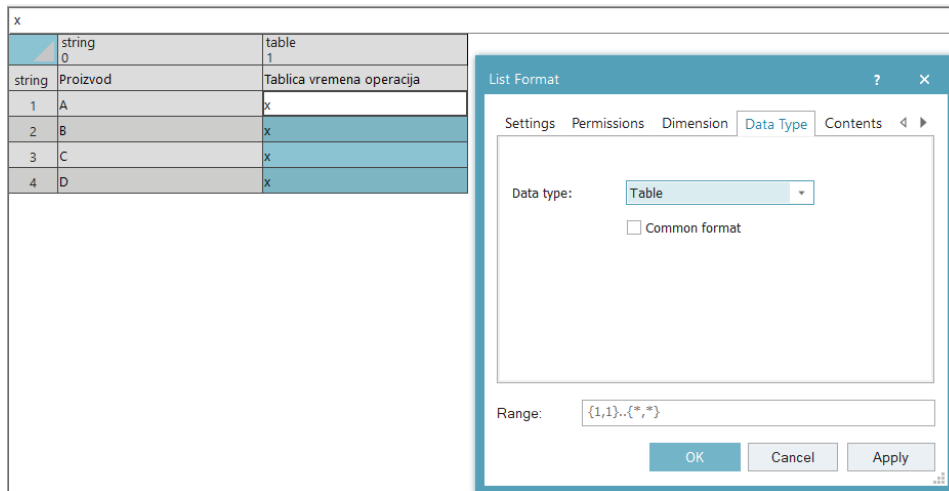
koju će stupci čitati, a to je u ovom slučaju tablica. Pod karticom *Data Type* iz padajućeg izbornika odabere se *Table* te se isključi opcija *Common Format* kako bi se tablice mogle oblikovati. Kada je tablica oblikovana unose se podaci. Prvom stupcu dodjeljuje se ime *Proizvod* i u njega se unose imena proizvoda A,B,C i D. U drugi stupac pod imenom *Tablica vremena operacija* upisuje se slovo „x“ kako bi se kreirale tablice vremena operacija unutar postojeće tablice. Slikama 4.12. i 4.13 prikazan je proces izrade tablice.



Slika 4.11 - Postavke vremena procesa montaže



Slika 4.12 - Opcije za formatiranje tablice



Slika 4.13 - Izgled tablice „vremena_operacija“

Dvostrukim klikom na „x“ otvara se nova tablica koju je također potrebno formatirati za svaki proizvod posebno. Obzirom da će se u novu tablicu unositi vrijeme za svaku operaciju za vrstu podataka prilikom formatiranja potrebno je odabrati *Time*. Prvi stupac nosit će naziv *Operacija*, a drugi *Vrijeme*. Tablice vremena operacija za četiri vrste proizvoda prikazane su slikom 4.14.

| | string 0 | time 1 |
|--------|-------------|-----------|
| string | Operacija | Vrijeme |
| 1 | 1 | 6:00.0000 |
| 2 | 2 | 9:00.0000 |

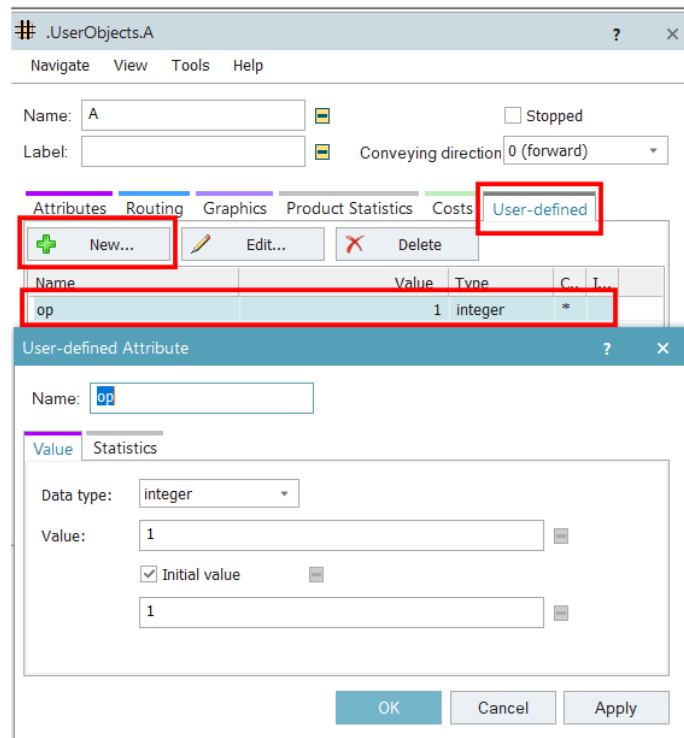
| | string 0 | time 1 |
|--------|-------------|-----------|
| string | Operacija | Vrijeme |
| 1 | 1 | 7:00.0000 |
| 2 | 2 | 6:00.0000 |
| 3 | 3 | 4:00.0000 |

| | string 0 | time 1 |
|--------|-------------|------------|
| string | Operacija | Vrijeme |
| 1 | 1 | 6:00.0000 |
| 2 | 2 | 8:00.0000 |
| 3 | 3 | 11:00.0000 |
| 4 | 4 | 6:00.0000 |

| | string 0 | time 1 |
|--------|-------------|-----------|
| string | Operacija | Vrijeme |
| 1 | 1 | 5:00.0000 |
| 2 | 2 | 7:00.0000 |
| 3 | 3 | 8:00.0000 |

Slika 4.14 - Tablice vremena operacija za proizvode A,B,C i D

Kako bi proizvodni kapaciteti mogli prepoznati o kojoj je operaciji riječ na svakoj vrsti proizvoda potrebno je definirati varijablu *op*. Dvostrukim klikom na proizvod otvara se kartica s postavkama gdje se pod *User-Defined* odabire *New* nakon čega se otvara prozor u koji se upisuje naziv varijable te njezina vrijednost. Na slici 4.15. prikazan je postupak definiranja varijable *op* za proizvod A.



Slika 4.15 - Definiranje varijable *op*

Tablicu sada treba povezati s proizvodnim kapacitetima za koja su unesena vremena operacija. Na ulazu svakog proizvodnog kapaciteta potrebno je kreirati metodu koja će vrijeme obrade povlačiti iz tablice „*vremena_operacija*“. U postavkama objekta pod karticom *Controls* u polju *Entrance* odabere se *Create Control*. Kada ulazna metoda utječe na vrijeme obrade važno je odabrati opciju *Before Actions*. Na slici 4.16 prikazane su postavke ulazne metode.

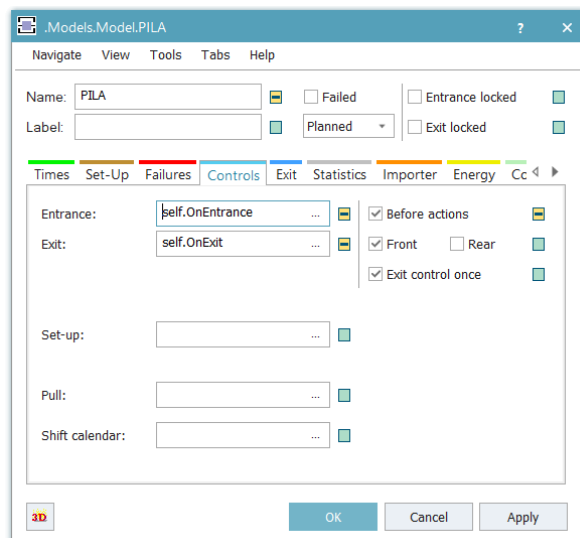
```

-- Postavljanje vremena operacije
self~.procTime := root.vremena_operacija[1, @.Name][1, @.op]

-- Povećanje broja operacija

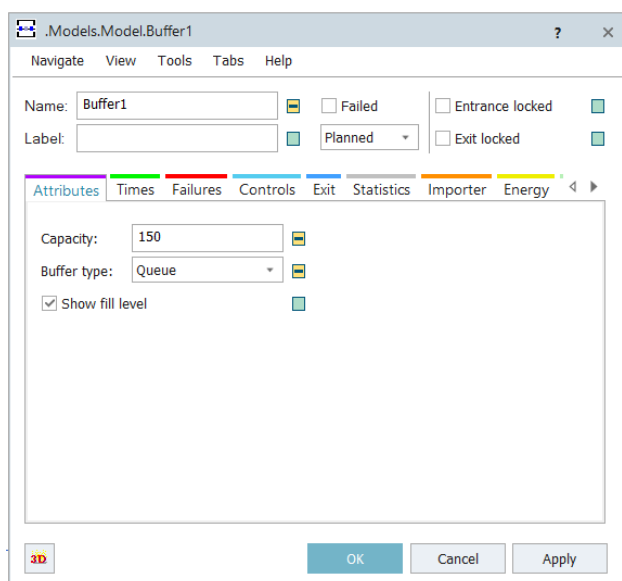
@.op := @.op + 1

```



Slika 4.16 - Postavke ulazne metode na proizvodnim kapacitetima

Osim proizvodnih kapaciteta u radni prostor mogu se dodavati i *Buffer*-i odnosno međuskладишта koja pohranjuju proizvode prije ili nakon izvršenih operacija. *Buffer* se nalazi unutar kartice *MaterialFlow* i jednostavno ga se *drag and drop* metodom dovede u radni prostor. U ovom modelu ukupno je kreirano sedam *Buffer*-a od kojih tri imaju funkciju pohranjivanja proizvoda nakon operacija, a prije procesa obrade na sljedećem proizvodnom kapacitetu (*Buffer1*, *Buffer2*, *Buffer3*). Ostali *Buffer*-i (*BufferA*, *BufferB*, *BufferC* i *BufferD*) kreirani su kako bi proizvodi koji su spremni za proces montaže bili što bolje organizirani. Dvostrukim klikom na objekt otvaraju se postavke u koje je moguće unijeti željena svojstva (slika 4.17).



Slika 4.17 - Postavke međuskладиšta

Pod karticom *Attributes* može se mijenjati kapacitet proizvoda koji stanu u međuskladište te tip međuskladišta. Pod *Capacity* postavljeno je 150 komada, a tip *Buffer*-a je *Queue* što znači da se proizvodi slažu u red.

4.3. Postavke kretanja materijala

Kako bi se simulacijski model mogao pokrenuti potrebno je prostorne objekte povezati pomoću *Connector*-a koji se nalaze u izborniku *Material Flow* ili definirati metode na ulazu ili izlazu prostornih objekata. U ovom slučaju protok materijala definirat će se uglavnom pomoću metoda koje prate hodograme izrade za pojedini proizvod. Prvu metodu potrebno je definirati na izlazu skladišta repromaterijala kako bi proizvode usmjerili na odgovarajuće proizvodne kapacitete. Metode definiramo u postavkama objekta pod karticom *Controls*. Na slici 4.18. prikazana je metoda na izlazu iz SRM-a.

```
if @.name = "B"  
    @.move(Buffer1)  
  
else  
    @.move(PILA)  
  
end
```

Slika 4.18 - Metoda na izlazu iz SRM-a

U prijevodu, programski kod govori da proizvodi A, C i D odlaze na obradu piljenja, a proizvod B se pohranjuje u međuskladište *Buffer1* koje se nalazi prije obrade tokarenja.

Nadalje, postavlja se metoda na izlazu PILE čime je definirano da se proizvodi nakon piljenja pohranjuju u *Buffer1*, osim ako se radi od proizvodima D onda se pohranjuju u *Buffer2* koji se nalazi prije obrade glodanja. Slikom 4.19. prikazana je metoda na izlazu PILE.

```

if @.name = "D"
  @.move(Buffer2)
else
  @.move(Buffer1)
end

```

Slika 4.19 - Metoda na izlazu PILE

Prema hodogramima izrade nakon obrade piljenja proizvodi A, B i C odlaze na obradu tokarenja. Na izlazu iz *Buffer1* definirana je metoda kojom se navedeni proizvodi šalju na tokarilice. Metoda je definirana na način da raspoređuje proizvode na dvije tokarilice. Ukoliko je prva tokarilica (TOK1) zauzeta komadi se šalju na drugu (TOK2). Slika 4.20. prikazuje metodu na izlazu iz *Buffer1*.

```

if @.name = "A"
  if not TOK1.occupied
    @.move(TOK1)
  else
    @.move(TOK2)
  end
elseif @.name = "B"
  if not TOK1.occupied
    @.move(TOK1)
  else
    @.move(TOK2)
  end
elseif @.name = "C"
  if not TOK1.occupied
    @.move(TOK1)
  else
    @.move(TOK2)
  end
end
end

```

Slika 4.20 - Metoda na izlazu iz *Buffer1*

Daljni protok materijala reguliran je metodama na izlazu tokarilica. Za proizvode B, C i D slijedi obrada glodanja pa se oni pohranjuju u *Buffer2* dok je za proizvod A nakon tokarenja cjelokupan proces obrade završen te se proizvodi odlažu u *BufferA*. Tako definirana izlazna metoda je prikazana slikom 4.21.

```

if @.name = "A"
  @.move(BufferA)
else
  @.move(Buffer2)
end

```

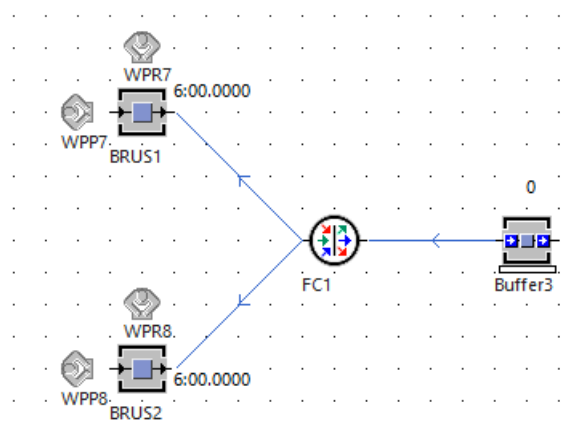
Slika 4.21 - Metoda na izlazu TOK1 i TOK2

Obzirom da proizvodi B, C i D nakon obrade glodanja idu i na obradu brušenja pohranit će se u *Buffer3*. To je definirano jednostavnom metodom koja je prikazana slikom 4.22.

```
@.move(Buffer3)
```

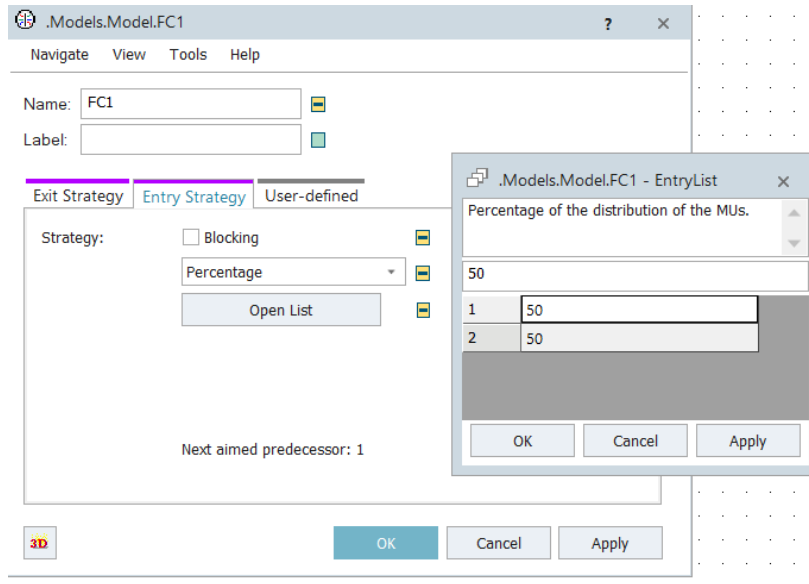
Slika 4.22 - Metoda na izlazu glodalica

Protok proizvoda koji iz *Buffera3* odlaze na proces brušenja definiran je objektom *FlowControl* (FC1). On služi za definiranje protoka jedinica proizvoda. Nalazi se u izborniku *MaterialFlow* te se *drag and drop* metodom postavlja u radni prostor i zatim preimenuje. Da bi ispravno radio potrebno ga je s ostalim objektima povezati pomoću *Connector*-a. Slikom 4.23. prikazan je objekt *FlowControl* u radnom prostoru simulacijskog modela.



Slika 4.23 - Postavljanje objekta *FlowControl* u radni prostor simulacijskog modela

Dvostrukim klikom na ikonu otvaraju se postavke gdje se mogu unijeti ulazne i izlazne strategije objekta, odnosno način raspoređivanja proizvoda. Obje strategije imat će jednake postavke, a to je *Percentage*. Odabirom *Open List* mogu se unijeti željeni postotci raspoređivanja. Slikom 4.24. vidljive su postavke objekta *FlowControl*.



Slika 4.24 - Postavke objekta *FlowControl*

Po završetku brušenja proizvodi se raspoređuju u međuskладиšta prema vrsti proizvoda kako bi proces montaže bio olakšan. Izlazna metoda postavlja se na obje brusilice. Metoda kojom se definira protok materijala nakon brušenja prikazana je slikom 4.25.

```

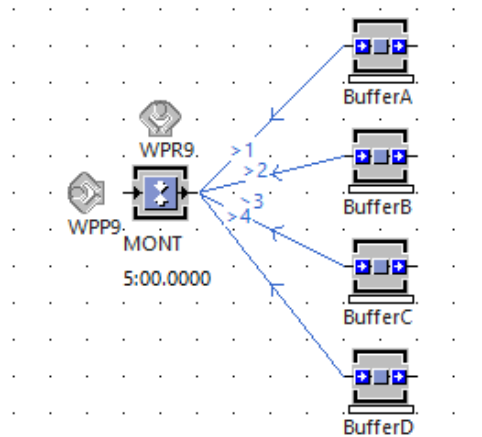
if @.name = "B"
    @.move(BufferB)
elseif @.name = "C"
    @.move(BufferC)
else
    @.move(BufferD)
end

```

Slika 4.25 - Metoda na izlazu *BRUS1* i *BRUS2*

Programski kod govori ukoliko se radi o proizvodu B odlaže se u *BufferB*, ukoliko se radi o proizvodu C odlaže se u *BufferC* dok proizvod D odlazi u *BufferD*.

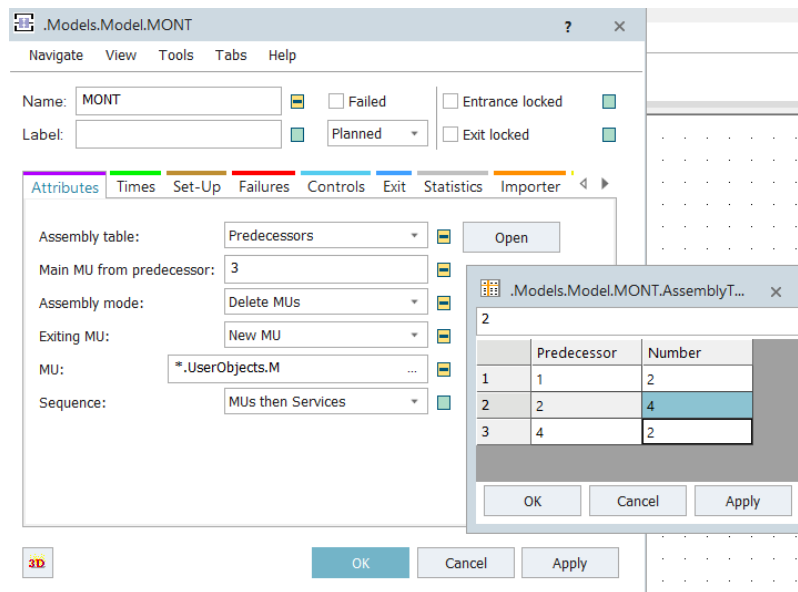
Kako je već ranije rečeno procesom montaže proizvoda A, B, C i D nastaje proizvod M. Kako bi proces montaže funkcionirao potrebno je *Buffer*-e u kojima su pohranjeni proizvodi povezati *Connector*-ima s objektom montaže kao što je prikazano slikom 4.26. Na slici je vidljivo da je *BufferA Predecessor 1*, *BufferB Predecessor 2*, *BufferC Predecessor 3* te *BufferD Predecessor 4*.



Slika 4.26 - Prikaz objekta montaže u radnom prostoru simulacijskog modela

Dvostrukim klikom na objekt MONT otvaraju se postavke gdje se pod *Attributes* definira način spajanja proizvoda. Pod *Assembly Table* iz padajućeg izbornika odabire se *Predecessors* što znači da će proces montaže slijediti proizvode s *Buffer*-a. Otvaranjem tablice upisuju se brojevi *Predecessors*-a te količina proizvoda koji su potrebni za sklapanje jednog proizvoda M. Tako se upisuje da se s *BufferA* uzimaju dva proizvoda, s *BufferB* četiri proizvoda i s *BufferD* dva proizvoda. Obzirom da sa *BufferC* dolazi jedan proizvod u tablici *Main MU from Predecessors* upisujemo broj 3. Kako je ideja da se stvara novi proizvod tako je pod *Assembly mode* važno odabrati *Delete MUs*, odnosno brisanje postojećih proizvoda u svrhu stvaranja novog. Pod *Exiting MU* bira se *NewMU*, a u tablici *MU drag and drop* metodom iz *Class Library*-a dodaje se proizvod M. Postavke montaže prikazane su slikom 4.27.

Na izlazu montaže postavlja se metoda kojom će se svi komadi proizvoda M pohranjivati u skladište gotovih proizvoda. Metoda na izlazu montaže prikazana je slikom 4.28.



Slika 4.27 - Postavke montaže

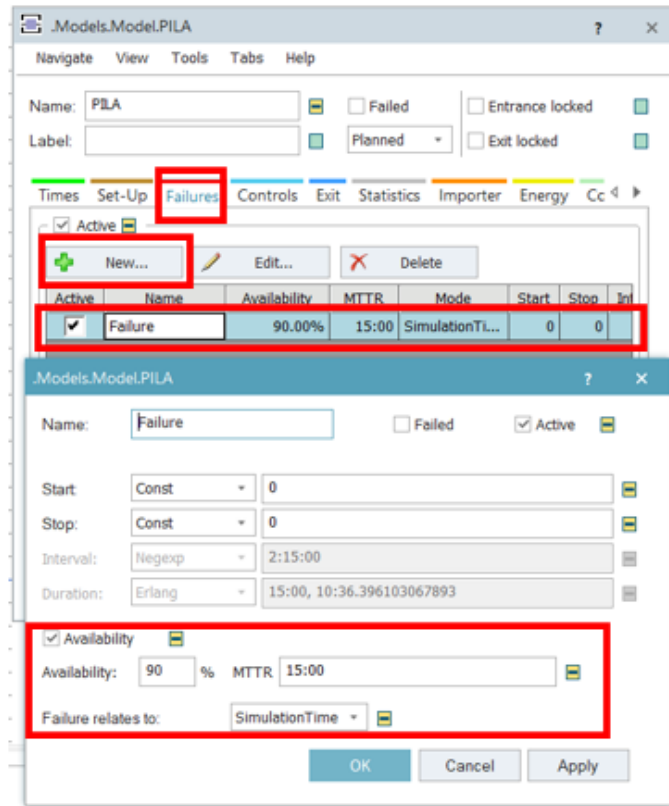
@.move(SGP)

Slika 4.28 - Metoda na izlazu montaže

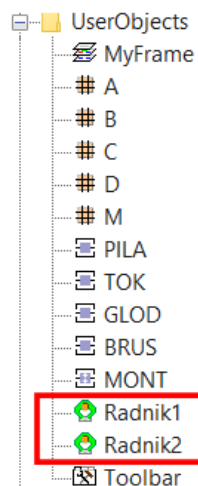
4.4. Uključivanje radnika

Prilikom kreiranja simulacijskog modela važno je uzeti u obzir raspoloživost proizvodnih kapaciteta. Jasno je da svaki stroj ne može raditi s iskoristivošću od 100% stoga je za svaki proizvodni kapacitet potrebno unijeti vrijednosti za raspoloživost kapaciteta kao i vrijeme potrebno za popravak kvara. Vrijednosti za pojedini stroj unose se prema tablici 3.1. Dvostrukim klikom miša na pojedini proizvodni kapacitet otvaraju se postavke gdje se pod *Failures* opcijom *New* može definirati novi kvar. U novom prozoru pod *Availability* upisuje se raspoloživost u %, a pod MTTR (engl. *Mean Time To Repair*) vrijeme u minutama koje je potrebno da se kvar otkloni. Postavke raspoloživosti za PILU prikazane su slikom 4.29. Za potrebe popravka kvarova na proizvodnim kapacitetima zaduženi su radnici obučeni za takvu vrstu aktivnosti. Osim za održavanje dodat će se i radnici čija će uloga biti rad na proizvodnim kapacitetima. Radnici se u simulacijski model dodaju na način da se u *Class Library*-u u izborniku *Resources* duplicira objekt *Worker*. Obzirom da se radnici koriste za dvije različite aktivnosti duplicirat će se dva puta te će njihovi nazivi biti *Radnik1* i *Radnik2*. *Radnik1* zadužen

je za rad na proizvodnim kapacitetima, a *Radnik2* za njihovo održavanje. Slikom 4.30. prikazani su kreirani radnici s odgovarajućim nazivima.

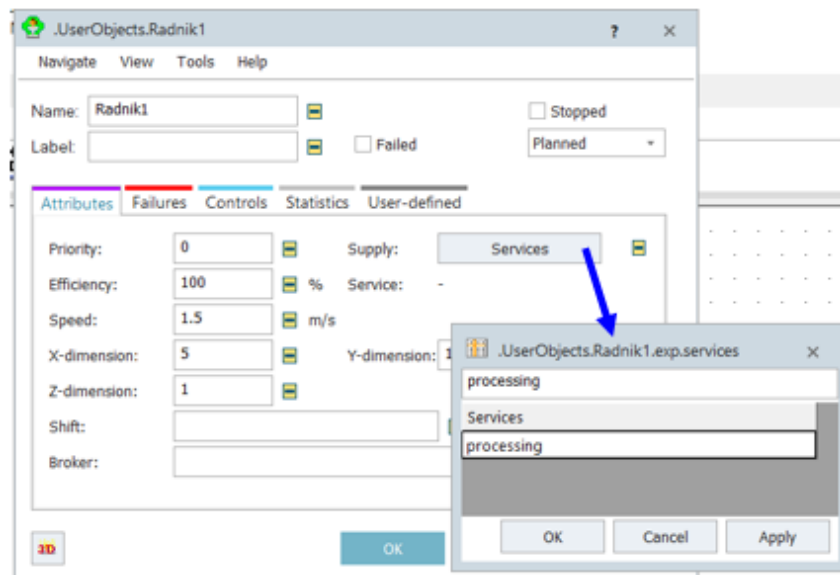


Slika 4.29 - Postavke raspoloživosti za PILU

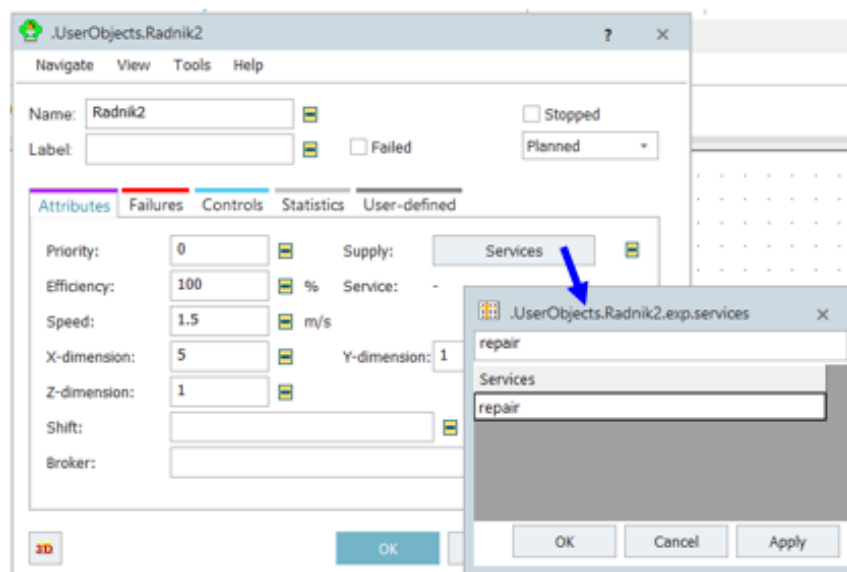


Slika 4.30 - Nazivi kreiranih radnika

Dvostrukim klikom na ikonu radnika otvaraju se postavke gdje se pod *Attributes* unosi vrsta usluge koju će radnik izvršavati. Postavku je moguće unijeti u polje *Services* (slike 4.31. i 4.32).



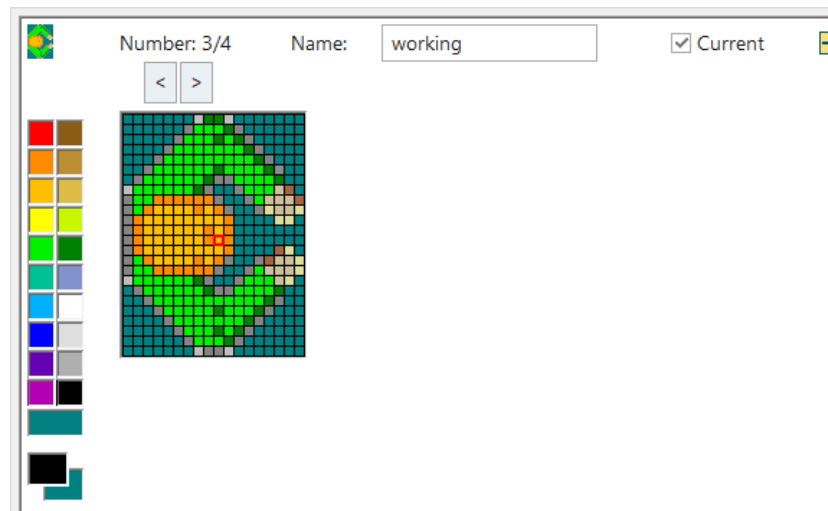
Slika 4.31 - Postavke Radnik1



Slika 4.32 - Postavke Radnik2

Da bi u simulacijskom modelu mogli razlikovati radnike svakom od njih dodijelit će se različita boja. Desnim klikom na ikonu radnika u *Class Library*-u otvara se izbornik u kojem se odabere opcija *Edit Icons*. Radnicima zaduženim za rad na proizvodnim kapacitetima (*Radnik1*)

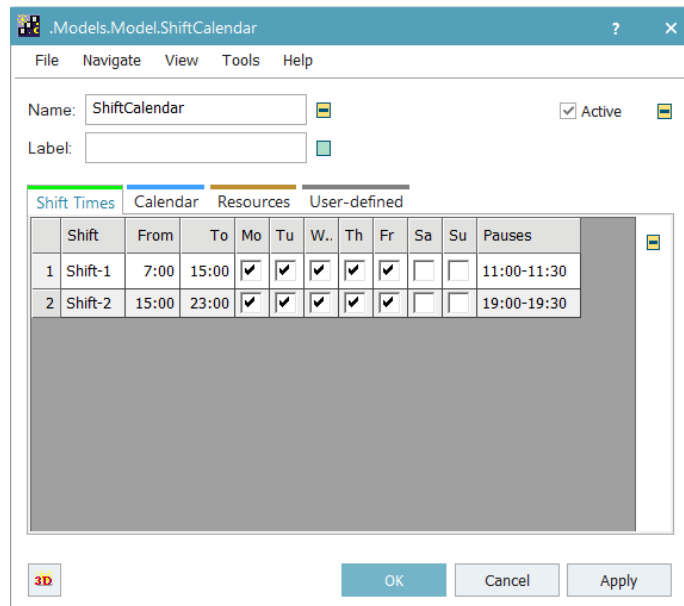
dodijelit će se zelena boja, a radnicima zaduženim za održavanje (*Radnik2*) dodijelit će se plava boja. Slikom 4.33. prikazano je uređivanje kartice *Radnik1*.



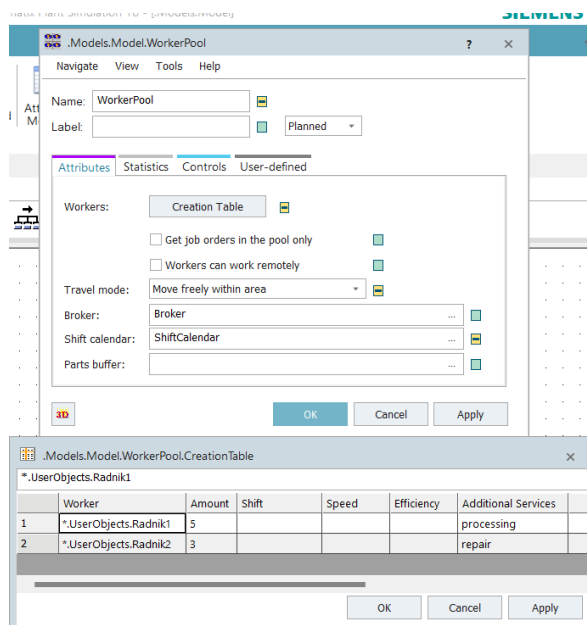
Slika 4.33 - Uređivanje kartice *Radnik1*

Kako bi radnici mogli izvršavati svoje aktivnosti u *Frame Window* potrebno je iz izbornika *Resources* unijeti objekte *WorkerPool* i *Broker*. *WorkerPool* je objekt koji omogućava prisustvo radnika u simulacijskom modelu, dok je objekt *Broker* posrednik između *WorkerPool-a* i svih drugih objekata koji zahtijevaju prisustvo radnika za obavljanje traženih aktivnosti.

Osim navedenih objekata u *Frame Window* unijet će se i *ShiftCalendar* gdje se unosi radno vrijeme u smjenama. Dvostrukim klikom na ikonu otvara se kartica *ShiftCalendar-a* i pod *Shift Times* kreira se tablica sa smjenama. Dodaje se rad u dvije smjene u trajanju od osam sati od ponedjeljka do petka uz pauzu od pola sata u navedenim terminima. Slikom 4.34. prikazane su postavke *ShiftCalendar-a*. U postavkama *WorkerPool-a* pod karticom *Attributes* potrebno je definirati uloge radnika. Otvaranjem polja *Creation Table* otvara se tablica u koju se *drag and drop* metodom iz *Class Library-a* unose imena *Radnik1* i *Radnik2*. Dalje se u stupcu *Amount* definira količina radnika za svaku aktivnost dok se u polje *Additional Services* definira aktivnost svakog radnika. Za količinu od pet *Radnik1* definira se uloga *processing*, a za količinu od tri *Radnik2* definira se uloga *repair*. Također, pod *Travel Mode* iz padajućeg izbornika treba odabrati *Move freely within area* kako bi se radnici mogli slobodno kretati unutar radnog prostora simulacijskog modela. Kako bi se simulacija odvijala prema definiranim smjenama, u polje *Shift calendar* odabire se *ShiftCalendar*. Postavke *WorkerPool-a* dane su slikom 4.35.

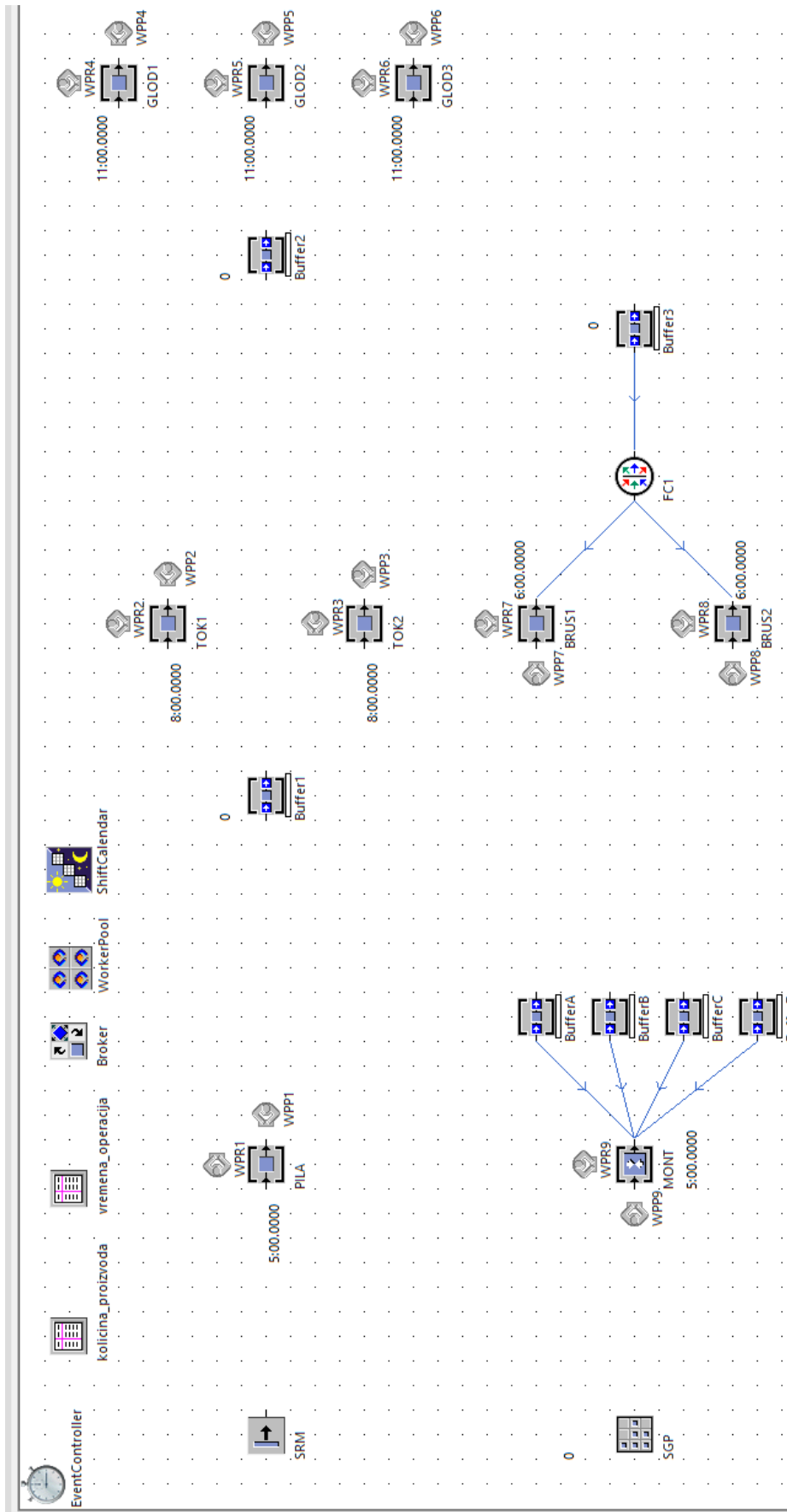


Slika 4.34 - Postavke ShiftCalendar-a



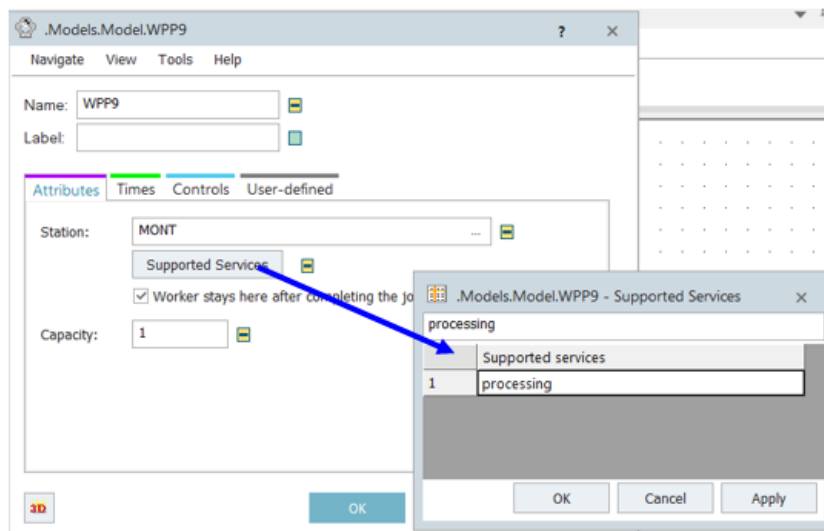
Slika 4.35 - Postavke WorkerPool-a

Sljedeći korak je postavljanje radnih mjesta u radni prostor kako bi radnici mogli obavljati svoje zadatke. Radna mjesta moguće je postaviti korištenjem objekta *Workplace* iz kartice *Resources*. Radno mjesto potrebno je postaviti što bliže proizvodnog kapaciteta kako bi to radno mjesto automatski bilo dodijeljeno upravo tom proizvodnom kapacitetu. Raspored radnih mjesta vidljiv je na slici 4.36.

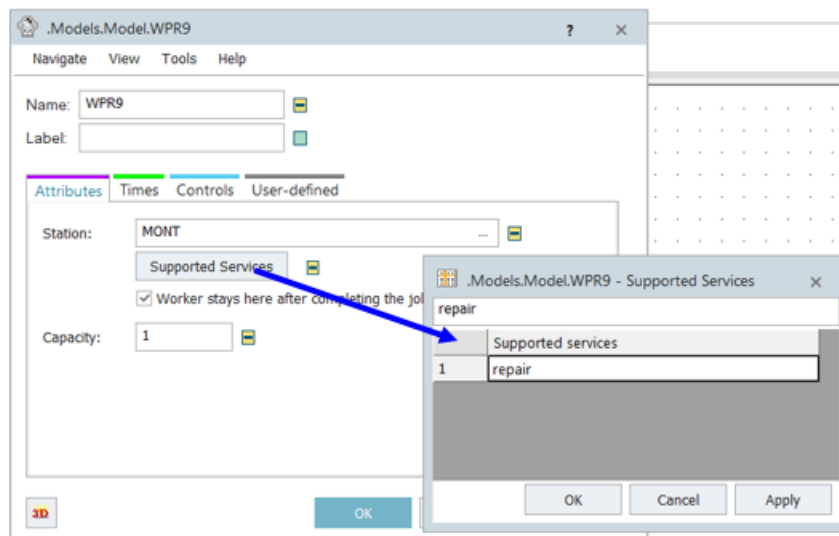


Slika 4.36 - Raspored radnih mjesta unutar radnog prostora simulacijskog modela

Iz slike 4.36 je vidljivo da su svakom proizvodnom kapacitetu dodijeljena po dva radna mjesta. Jedno radno mjesto namijenjeno je za rad na proizvodnim kapacitetima, a drugo za popravak kvarova. Radna mjesta potrebno je preimenovati pa će tako radna mjesta oznake WPP1 do WPP9 biti zadužena za rad na proizvodnim kapacitetima (*processing*), a radna mjesta oznake WPR1 do WPR9 za njihovo održavanje i popravak (*repair*). Te postavke unose se dvostrukim klikom na radno mjesto pod *Attributes*. Otvaranjem polja *Supported Services* otvara se tablica u koju se upisuje vrsta usluge koju će to radno mjesto izvršavati. U polje *Capacity* unosi se količina radnika koji su potrebni za to radno mjesto. Slikama 4.37. i 4.38. prikazane su postavke radnog mjesta.

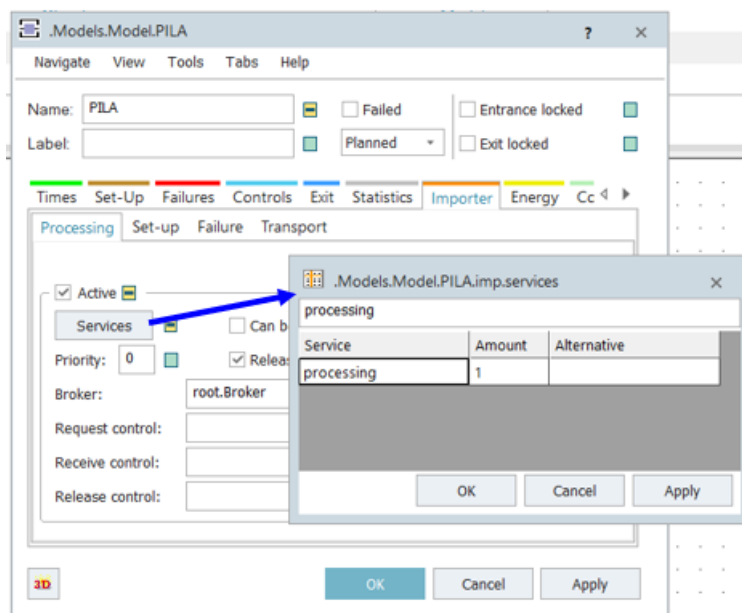


Slika 4.37 - Postavke radnog mjesta za uslugu *processing*

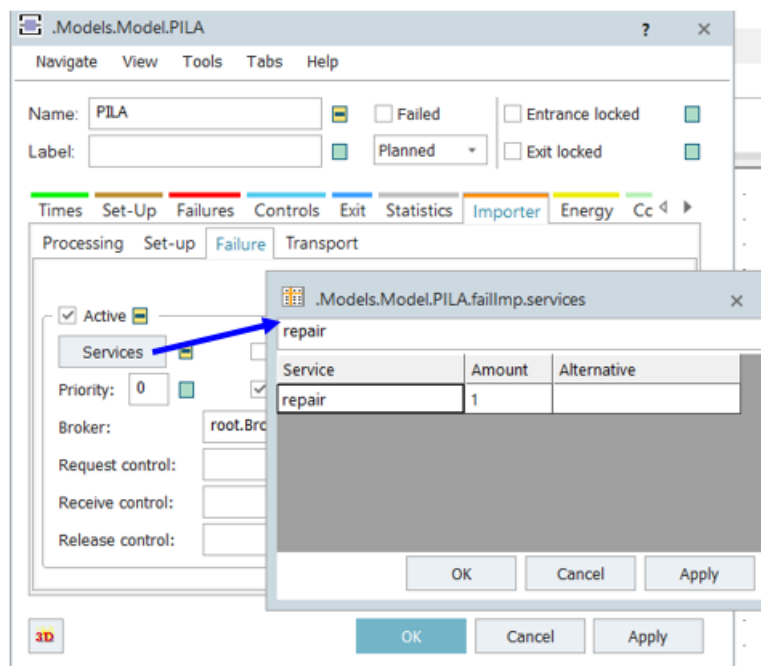


Slika 4.38 - Postavke radnog mjesta za uslugu *repair*

Proizvodne kapacitete je također potrebno povezati sa svakim radnim mjestom. Otvaranjem kartice svakog objekta u kartici *Importer* potrebno je aktivirati opcije *Processing* i *Failure*. Odabirom ikone *Services* otvara se tablica u koju se unosi vrsta usluge te količina radnika koja je potrebna za to radno mjesto. Pod karticom *Processing* za vrstu usluge upisuje se *processing*, a pod *Failure* se unosi *repair*. Slikama 4.39. i 4.40. prikazane su navedene postavke.



Slika 4.39 - Postavke proizvodnog kapaciteta za uslugu processing

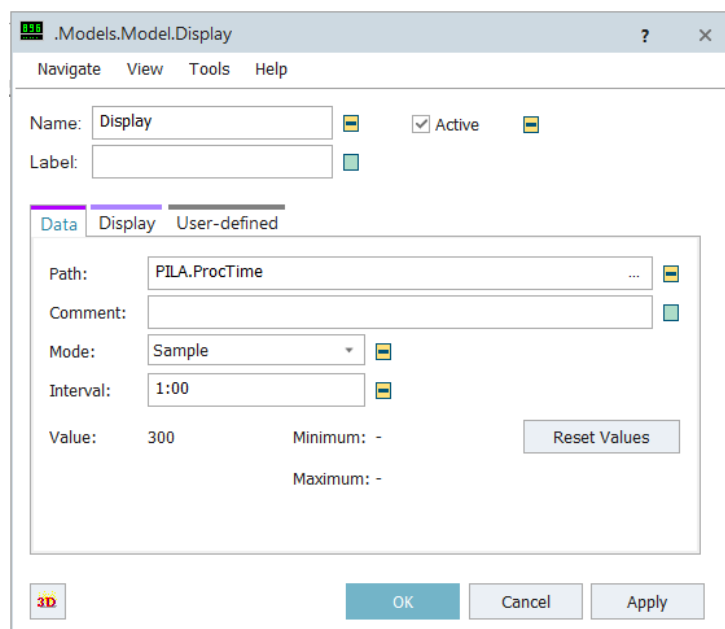


Slika 4.40 - Postavke proizvodnog kapaciteta za uslugu repair

4.5. Verifikacija i validacija

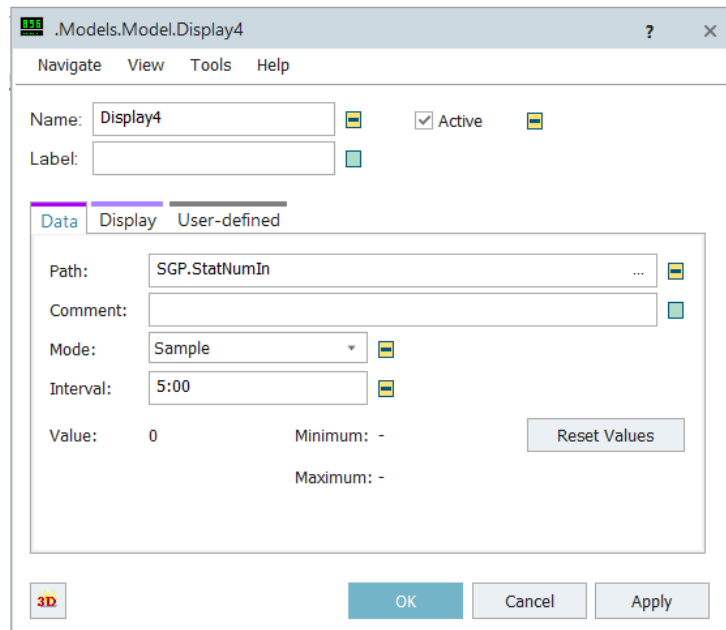
Izrađeni simulacijski model potrebno je verificirati i validirati u svrhu potvrde njegove ispravnosti. Verifikacija predstavlja ispravnost rada simulacijskog modela dok validacija predstavlja točnost dobivenih rezultata. Važno je napomenuti da je verifikacija simulacijskog modela neophodna, ali nije dovoljna za validaciju, odnosno simulacijski model može biti verificiran iako nije valjan.

Verifikacija modela radi se pomoću objekta *Display* koji se nalazi pod karticom *User Interface* unutar *Toolbox*-a. Na svaki proizvodni kapacitet postaviti će se *Display* koji će prikazivati vrijeme operacije, a na međuskladišta i skladište gotovih proizvoda postaviti će se *Display* koji će brojati komade koji se pohranjuju. Objekt *Display drag and drop* metodom uvede se u radni prostor i pozicionira blizu željenog objekta. Za računanje vremena operacija u postavkama *Display*-a potrebno je definirati ono što se želi prikazati. Pod karticom *Data* u polje *Path* upisuje se ime proizvodnog kapaciteta i dodaje nastavak *.ProcTime* za prikaz trajanja obrade. Pod opcijom *Mode* odabire se *Sample*, a ispod njega upisuje se interval mjerenja. Slikom 4.41. prikazane su postavke *Display*-a za prikaz trajanja obrade.



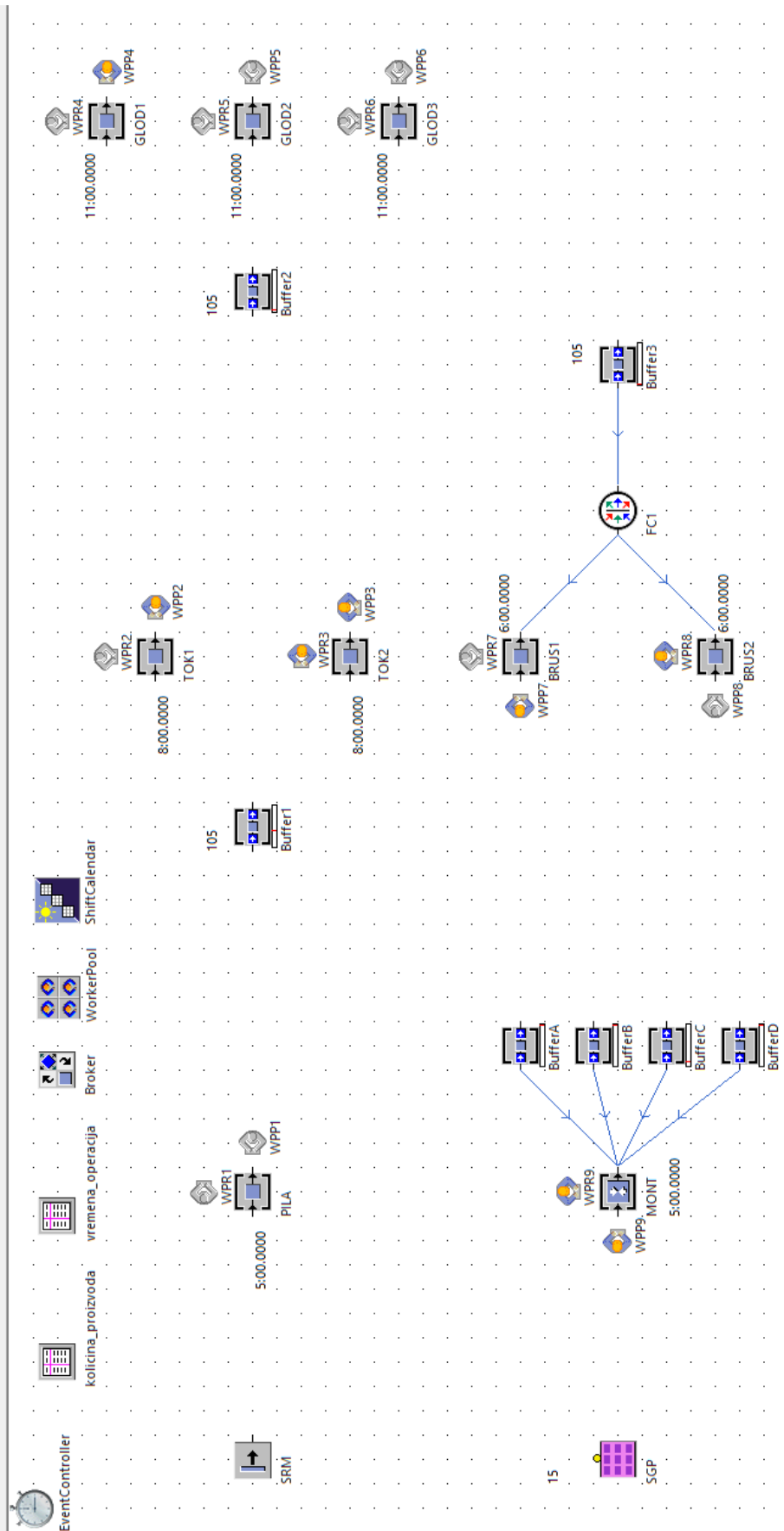
Slika 4.41 - Postavke *Display*-a za vremena operacija

Za prikaz količine proizvoda u postavkama pod *Path* upisuje se naziv skladišta te nastavak *.StatNumIn*. Za interval mjerenja postavlja se pet minuta jer je toliko potrebno za montažu jednog proizvoda M koji se nakon procesa montaže pohranjuje u SGP. Slikom 4.42. prikazane su postavke *Display*-a za prikaz količine proizvoda.



Slika 4.42 - Postavke *Display*-a za količinu proizvoda koja je ušla u SGP

Pokretanjem simulacijskog eksperimenta vizualnim pregledom utvrđeno je da su kretanja proizvoda kroz proizvodni proces ispravna, da su vremena obrade na pojedinim proizvodnim kapacitetima ispravna te da radnici adekvatno izvršavaju svoje zadatke. Također, količina proizvoda koja se nalazi u međuskladištima odgovara količini definiranoj metodama za protok materijala. Završetkom simulacije vidljivo je da se u skladište gotovih proizvoda pohranilo petnaest komada proizvoda M što odgovara traženoj količini (slika 4.43.). Na temelju navedenih informacija, utvrđuje se da je model ispravan, odnosno verificiran.



Slika 4.43 - Verifikacija simulacijskog modela

Kako je već prije spomenuto verificirani model nije dovoljan pokazatelj da je simulacijski model ispravno izrađen, stoga je potrebno potvrditi ispravnost dobivenih rezultata. Validacija će se provesti na način da se uspoređi tehnološko vrijeme izrade dobiveno analitičkim putem s tehnološkim vremenom dobivenim putem simulacijskog modela. Tehnološko vrijeme računa se za jedan komad određenog proizvoda. Najprije će se izračunati tehnološko vrijeme do montaže analitičkim putem gdje će se zbrojiti vremena operacije za svaki proizvod prema izrazu 4.1:

$$t_n = \sum t_i \quad (4.1)$$

gdje je:

t_n - ukupno vrijeme operacija pojedinog proizvoda [min],

t_i - vrijeme i -te operacije [min].

Tehnološko vrijeme proizvoda A:

$$t_A = t_{A10} + t_{A20} = 6 + 9 = 15 \text{ min}$$

Tehnološko vrijeme proizvoda B:

$$t_B = t_{B10} + t_{B20} + t_{B30} = 7 + 6 + 4 = 17 \text{ min}$$

Tehnološko vrijeme proizvoda C:

$$t_C = t_{C10} + t_{C20} + t_{C30} + t_{C40} = 6 + 8 + 11 + 6 = 31 \text{ min}$$

Tehnološko vrijeme proizvoda D:

$$t_D = t_{D10} + t_{D20} + t_{D30} = 5 + 7 + 8 = 20 \text{ min}$$

Tehnološko vrijeme dobiveno simulacijskim modelom računat će se na način da se u postojećoj ulaznoj metodi svakog proizvodnog kapaciteta doda funkcija za računanje tehnološkog vremena. Na slici 4.44. prikazana je tako dopunjena ulazna metoda.

```

-- Postavljanje vremena operacije

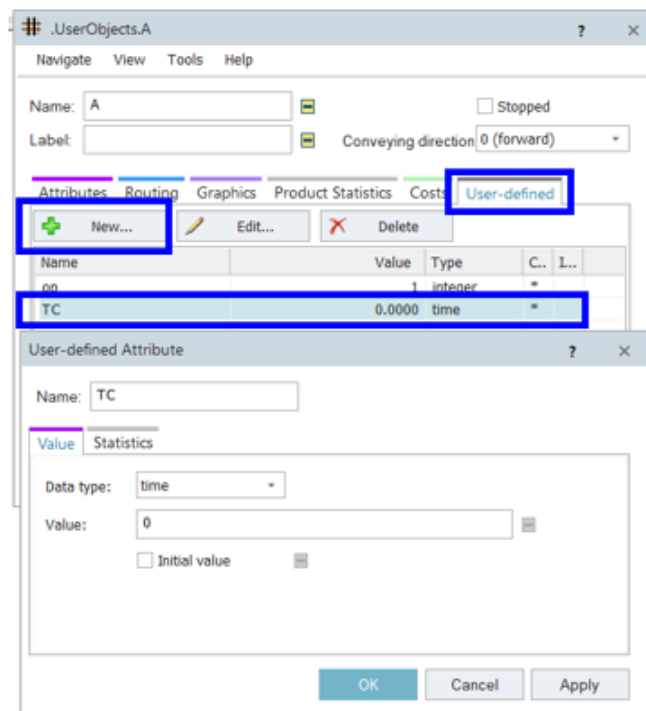
self.~.procTime := root.vremena_operacija[1, @.Name][1, @.op]
@.TC := @.TC + self.~.procTime
-- Povećanje broja operacija

@.op := @.op + 1

```

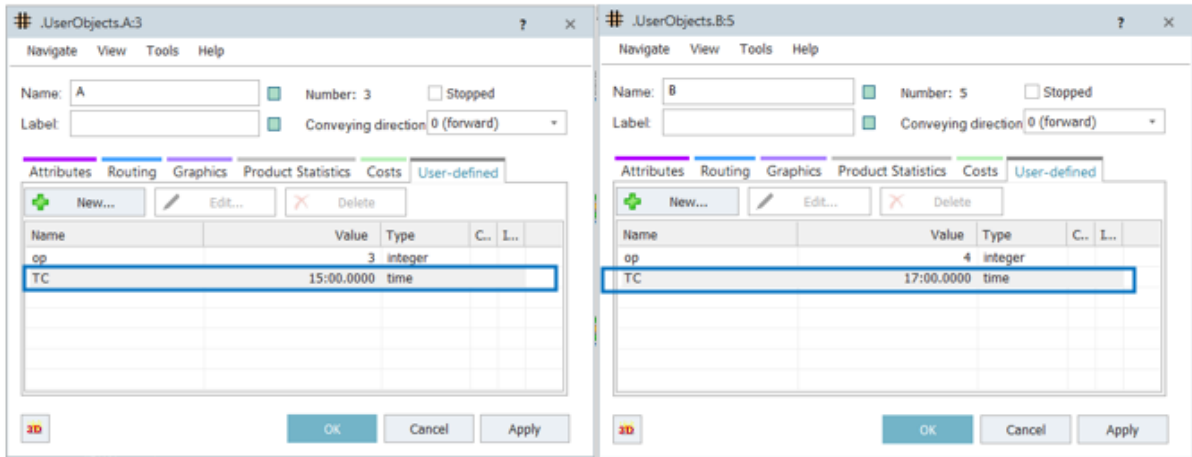
Slika 4.44 - Dopunjena ulazna metoda na proizvodnim kapacitetima

Kako bi simulacija prepoznala novu varijablu TC potrebno je na svakom proizvodu kreirati istu takvu varijablu koja će biti oblika *Time*, vrijednosti nula. Odabirom opcije *New* u kartici *User-Defined* svakog proizvoda kreira se nova varijabla (slika 4.45.).

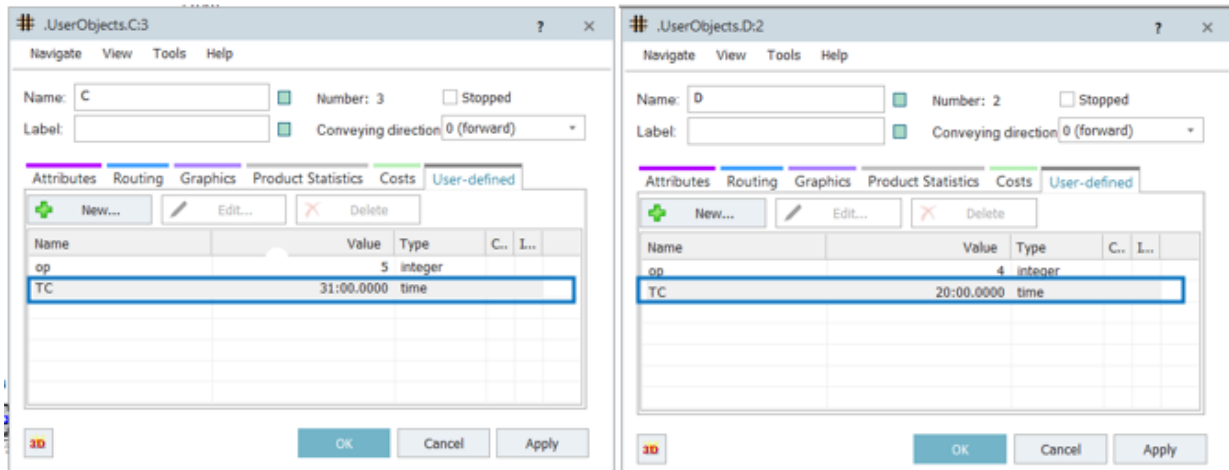


Slika 4.45 - Definiranje varijable TC

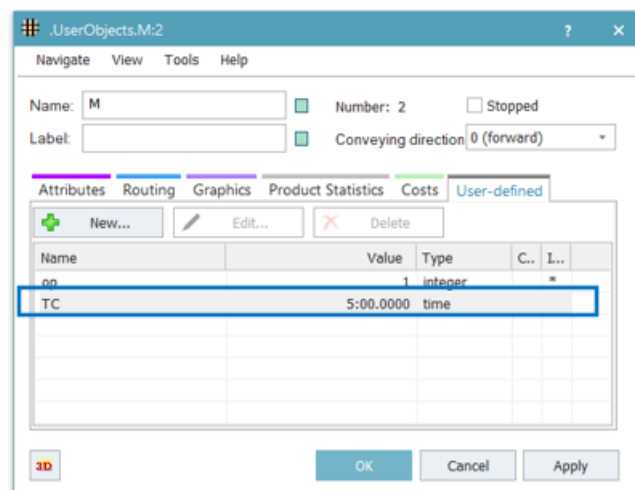
Rezultati tako definiranog tehnološkog vremena mogu se pratiti ulaskom proizvoda u međuskладиšta prije procesa montaže. Slikama 4.46. i 4.47. prikazani su dobiveni rezultati. Slikom 4.48. prikazano je vrijeme montaže jednog komada proizvoda M koje odgovara postavkama objekta MONT.



Slika 4.46 - Tehnološko vrijeme proizvoda A i B



Slika 4.47 - Tehnološko vrijeme proizvoda C i D

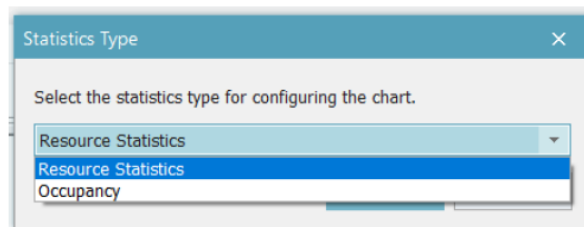


Slika 4.48 - Tehnološko vrijeme procesa montaže proizvoda M

Iz navedenih rezultata vidljivo je da su vremena dobivena analitičkim putem i dobivenih pokrenutim simulacijskim eksperimentom jednaka. Tehnološka vremena izračunata analitičkim putem za svaki proizvod se podudaraju s rezultatima unutar simulacijskog modela. Stoga se može zaključiti da je simulacijski model uspješno validiran.

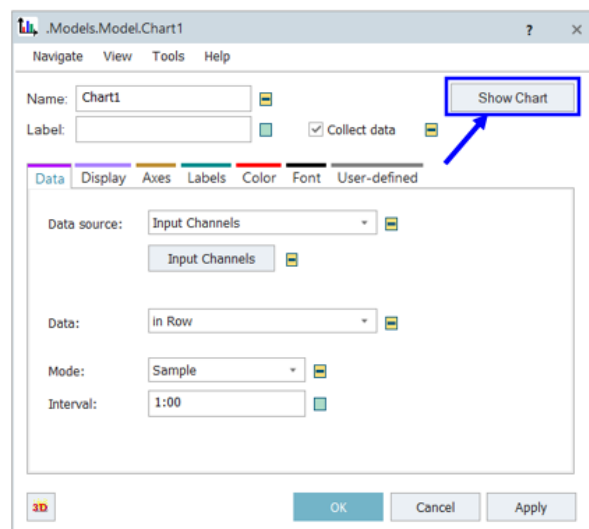
5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJSKOG MODELA

Najbolji pokazatelj iskoristivosti proizvodnog sustava je grafički prikaz korištenjem objekta *Chart*, odnosno grafikona koji prikazuje statističke podatke tijekom izvođenja simulacije. Objekt *Chart* nalazi se unutar kartice *User Interface* u izborniku *Toolbox*. *Drag and drop* metodom unosi se u radni prostor i prema želji preimenuje. Za prikaz rezultata simulacije koristit će se dva grafa. *Chart1* koji će prikazivati iskoristivost proizvodnih kapaciteta i *Chart2* za prikaz popunjenosti međuskladišta. Kako bi se traženi podaci prikazali, *drag and drop* metodom se svi proizvodni kapaciteti dovedu na ikonu *Chart1*. Otvara se novi prozor u kojem se odabire vrsta podataka za prikazivanje. Za *Chart1* odabire se *Resource Statistics* (slika 5.1.).



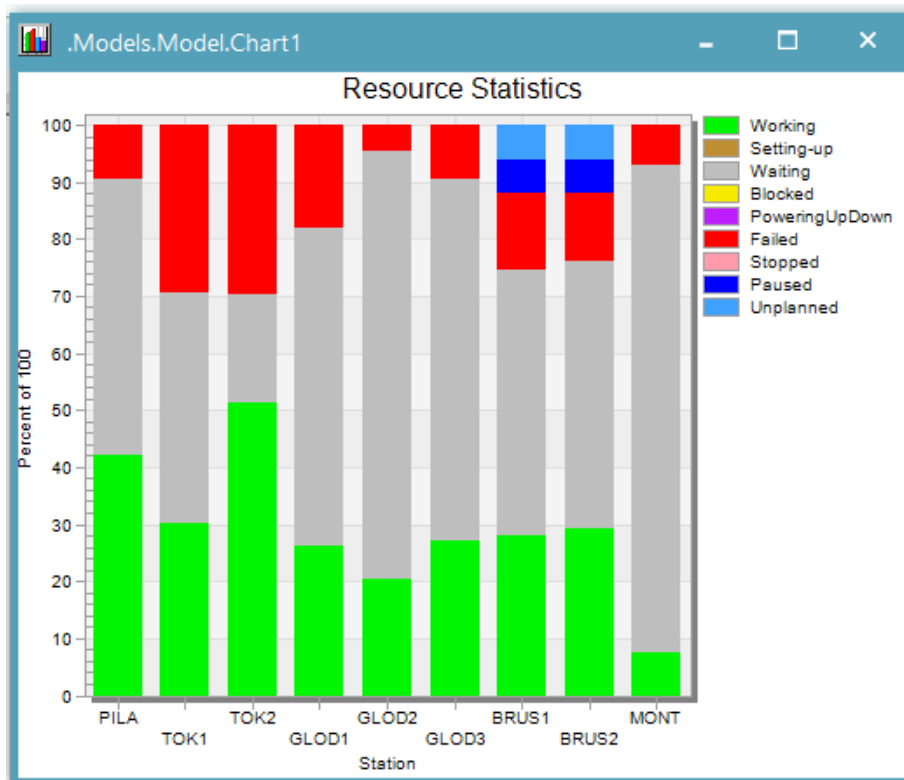
Slika 5.1 - Odabir vrste podataka za prikaz

Za vrijeme trajanja simulacije moguće je promatrati navedeni graf odabirom opcije *Show Chart* u postavkama *Chart*-a. Slikom 5.2. prikazane su postavke *Chart*-a.



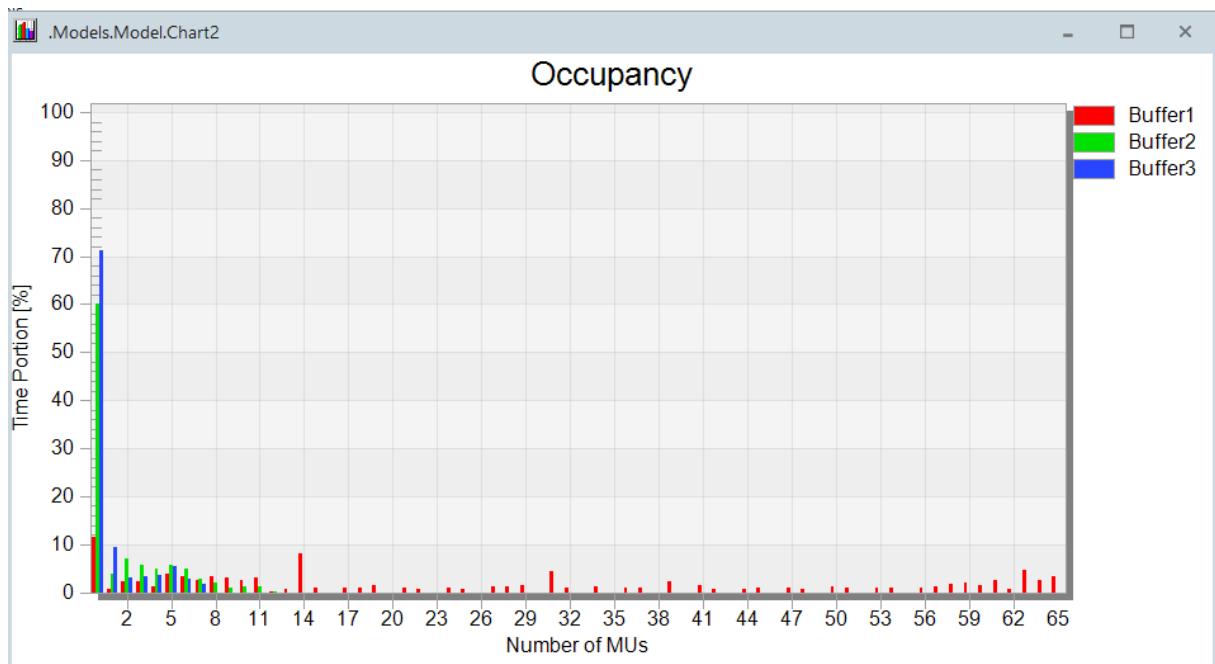
Slika 5.2 - Postavke *Chart*-a

Na slici 5.3. nalazi se grafički prikaz iskorištenosti svih proizvodnih kapaciteta unutar simulacijskog modela. Na osi X prikazani su proizvodni kapaciteti, a na osi Y postotak pojedine aktivnosti. S desne strane nalazi se legenda u kojoj je objašnjeno značenje svake boje. Iz grafa je vidljivo da je najviše vremena utrošeno na čekanja (siva boja) čime je iskorištenost sustava na razini od najviše 50%. Zbog čekanja najmanju iskoristivost ima montaža, ispod 10%, a najveću tokarilica TOK2 gdje ona iznosi nešto više od 50%. Osim toga, ako se promatra crvena boja na grafu može se primijetiti kako kod određenih kapaciteta velik postotak odlazi na pojavu kvarova i njihovo otklanjanje. Na temelju dobivenih rezultata zaključuje se kako je potrebna optimizacija sustava kako bi se iskorištenost sustava poboljšala.



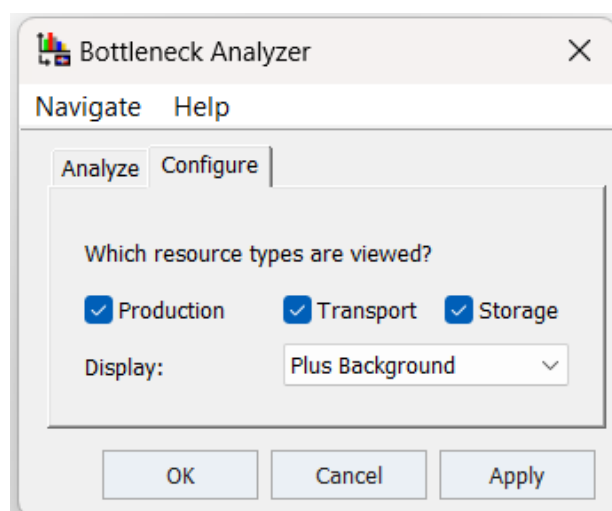
Slika 5.3 - Grafički prikaz iskorištenosti proizvodnih kapaciteta

Za prikaz podataka u *Chart2 drag and drop* metodom na ikonu *Chart*-a dovedu se međuskladišta *Buffer1*, *Buffer2* i *Buffer3*, a za prikaz podataka odabire se *Occupancy* da bi se prikazala popunjenost. Na slici 5.4. nalazi se grafički prikaz popunjenosti navedenih međuskladišta. Rezultati su prikazani histogramom gdje os X predstavlja količinu proizvoda, a os Y udio vremena u postocima.



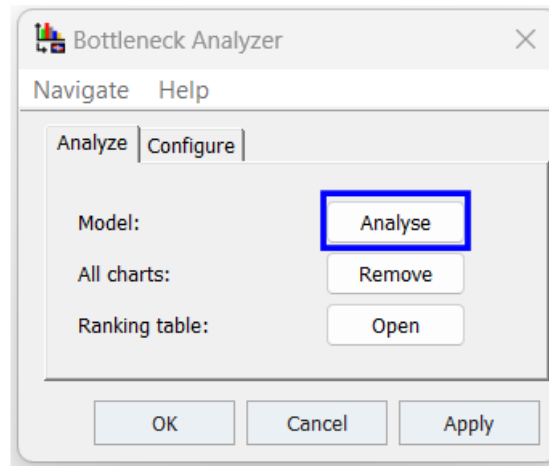
Slika 5.4 - Grafički prikaz popunjenosti međuskладиšta

Sljedeći alat koji se koristi za analizu, a vezan je za identifikaciju uskog grla naziva se *BottleneckAnalyzer*. Pronalazi se unutar kartice *Tools* u izborniku *Toolbox*. *Drag and drop* metodom uvede se u radni prostor. Obzirom da ne prikuplja podatke tijekom simulacije moguće ga je dodati i nakon završetka simulacije. Dvostrukim klikom na ikonu objekta otvaraju se postavke gdje je moguće odabrati vrstu resursa koja se želi promatrati (slika 5.5).

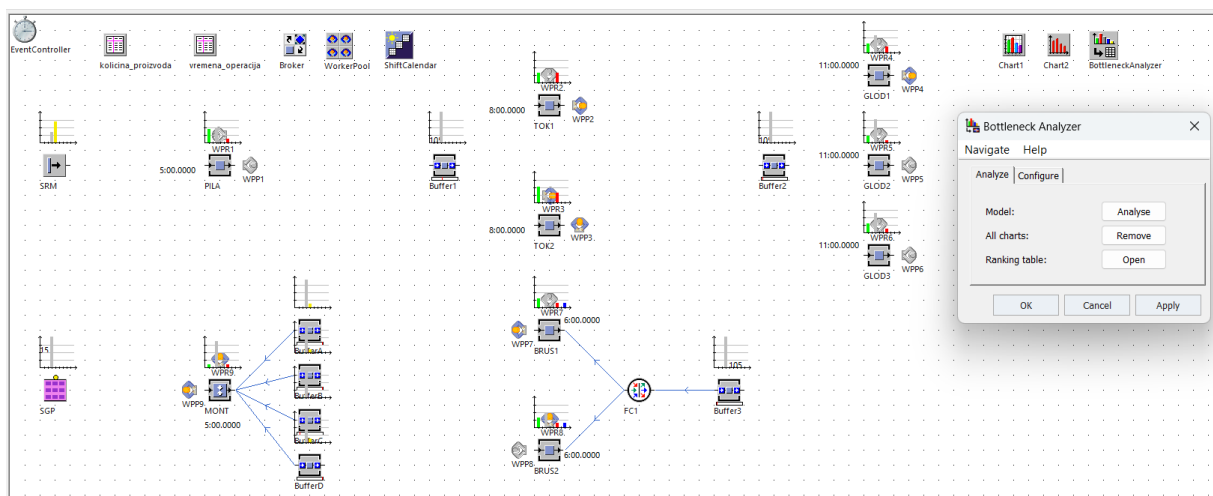


Slika 5.5 - Postavke *BottleneckAnalyzer*-a

Tijekom izvođenja simulacije klikom na opciju *Analyse* u svakom trenutku se rezultati mogu osvježiti (slika 5.6.). Rezultati se prikazuju u obliku grafa za svaki objekt unutar simulacijskog modela. Slikom 5.7. prikazani su rezultati analize.

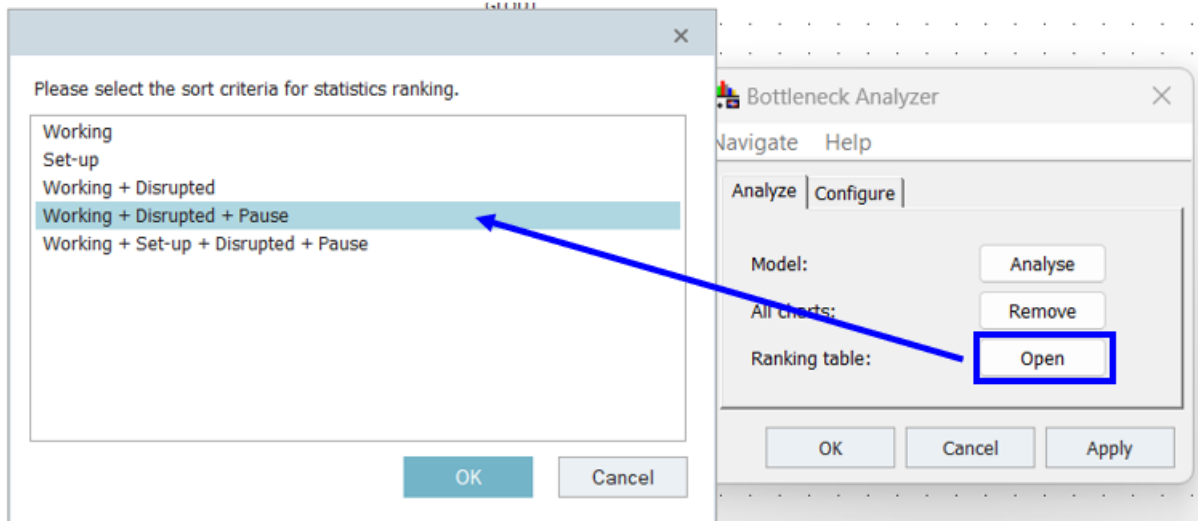


Slika 5.6 - Analiza uskog grla pomoću BottleneckAnalyzer-a



Slika 5.7 - Prikaz BottleneckAnalyzer analize

Osim toga, rezultati se mogu prikazivati i u obliku tablice na način da se pod opcijom *Ranking Table* odabere *Open* i odabere vrsta podataka koja se želi prikazati. Slikom 5.8. prikazani su odabrani podaci za prikaz. Odabirom kriterija i klikom na OK otvara se tablica koja prikazuje željene podatke (slika 5.9.).



Slika 5.8 - Odabir podataka za prikaz u BottleneckAnalyzer-u

Sorted according to the sum of working time, failure time and pause time

| | object | real | real | real | real | real | real | real | real | real | real |
|--------|--------------|---------|--------|---------|---------|----------------|-----------|---------|-------|--------------|------|
| string | resource | working | set-up | waiting | blocked | poweringUpDown | disrupted | stopped | pause | sortCriteria | |
| 1 | root.TOK2 | 51.16 | 0.00 | 19.19 | 0.00 | 0.00 | 29.66 | 0.00 | 0.00 | 80.81 | |
| 2 | root.TOK1 | 30.25 | 0.00 | 40.26 | 0.00 | 0.00 | 29.48 | 0.00 | 0.00 | 59.74 | |
| 3 | root.BRUS1 | 27.94 | 0.00 | 46.75 | 0.00 | 0.00 | 13.25 | 0.00 | 12.06 | 53.25 | |
| 4 | root.BRUS2 | 29.35 | 0.00 | 46.80 | 0.00 | 0.00 | 11.79 | 0.00 | 12.06 | 53.20 | |
| 5 | root.PILA | 42.21 | 0.00 | 48.34 | 0.00 | 0.00 | 9.45 | 0.00 | 0.00 | 51.66 | |
| 6 | root.GLOD1 | 26.33 | 0.00 | 55.68 | 0.00 | 0.00 | 17.99 | 0.00 | 0.00 | 44.32 | |
| 7 | root.GLOD3 | 27.24 | 0.00 | 63.41 | 0.00 | 0.00 | 9.35 | 0.00 | 0.00 | 36.59 | |
| 8 | root.GLOD2 | 20.30 | 0.00 | 75.09 | 0.00 | 0.00 | 4.61 | 0.00 | 0.00 | 24.91 | |
| 9 | root.MONT | 7.54 | 0.00 | 85.47 | 0.00 | 0.00 | 6.99 | 0.00 | 0.00 | 14.53 | |
| 10 | root.SRM | 0.00 | 0.00 | 31.75 | 68.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 11 | root.SGP | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 12 | root.Buffer2 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 13 | root.Buffer1 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 14 | root.Buffer3 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 15 | root.BufferA | 0.00 | 0.00 | 90.29 | 9.71 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 16 | root.BufferB | 0.00 | 0.00 | 92.12 | 7.88 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 17 | root.BufferC | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 18 | root.BufferD | 0.00 | 0.00 | 89.88 | 10.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |

Slika 5.9 - Brojčani podaci dobiveni BottleneckAnalyzer-om

Na slici 5.9 je vidljivo da je usko grlo sustava operacija tokarenja koja uzrokuje zastoje na pili, a zatim i na glodalicama i brusilicama. Analizom vremena izrade (slika 5.10) utvrđeno je da ukupno vrijeme izrade petnaest komada proizvoda M iznosi 16 sati 34 minute 58 sekundi. Treba naglasiti da je takvo vrijeme obrade postignuto radom pet proizvodnih radnika i tri radnika zaduženih za popravak proizvodnih kapaciteta. Rad se odvija u dvije smjene pet dana u tjednu s pauzom od pola sata po smjeni, vikendi i praznici su neradni.

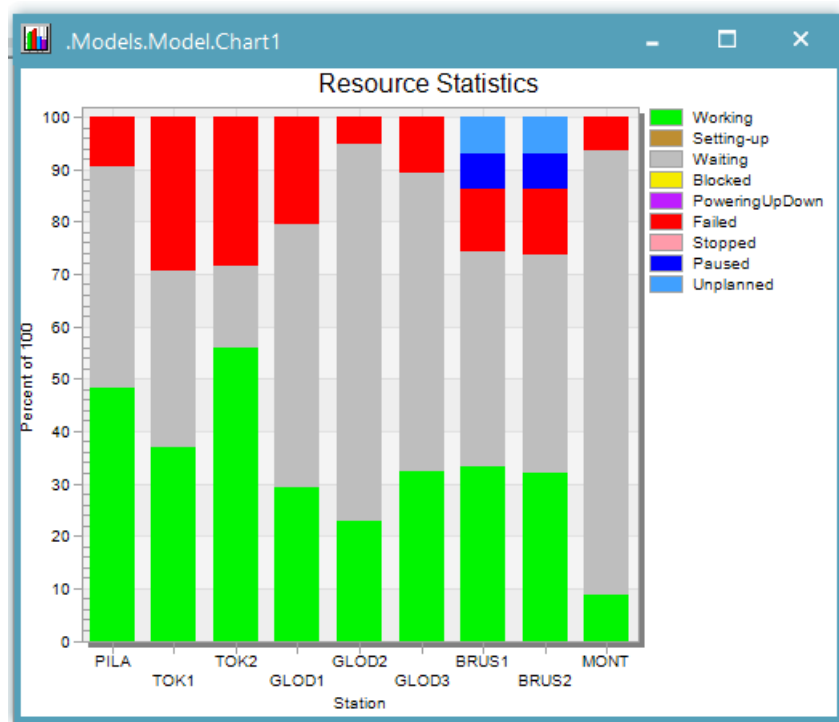
| Object | Portion | Count | Sum | Mean Value | Standard Deviation |
|---------|---------|-------|--------------|------------|--------------------|
| SRM | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| SGP | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| PILA | 42.21% | 76 | 7:00:00.0000 | 5:31.5789 | 38.6648 |
| TOK1 | 30.25% | 40 | 5:01:00.0000 | 7:31.5000 | 1:41.0147 |
| GLOD2 | 20.30% | 28 | 3:22:00.0000 | 7:12.8571 | 1:51.1841 |
| BRUS2 | 29.35% | 55 | 4:52:00.0000 | 5:18.5455 | 1:51.9667 |
| MONT | 7.54% | 15 | 1:15:00.0000 | 5:00.0000 | 0.0000 |
| TOK2 | 51.16% | 69 | 8:29:00.0000 | 7:22.6087 | 1:18.5150 |
| GLOD1 | 26.33% | 35 | 4:22:00.0000 | 7:29.1429 | 2:08.0021 |
| GLOD3 | 27.24% | 43 | 4:31:00.0000 | 6:18.1395 | 1:08.8027 |
| BRUS1 | 27.94% | 51 | 4:38:00.0000 | 5:27.0588 | 1:47.5415 |
| Buffer2 | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Buffer1 | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Buffer3 | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| BufferA | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| BufferB | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| BufferC | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| BufferD | 0.00% | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Working Time

Slika 5.10 - Analiza vremena rada proizvodnih kapaciteta

6. OPTIMIZACIJA PROIZVODNOG PROCESA IZRADE DIJELOVA

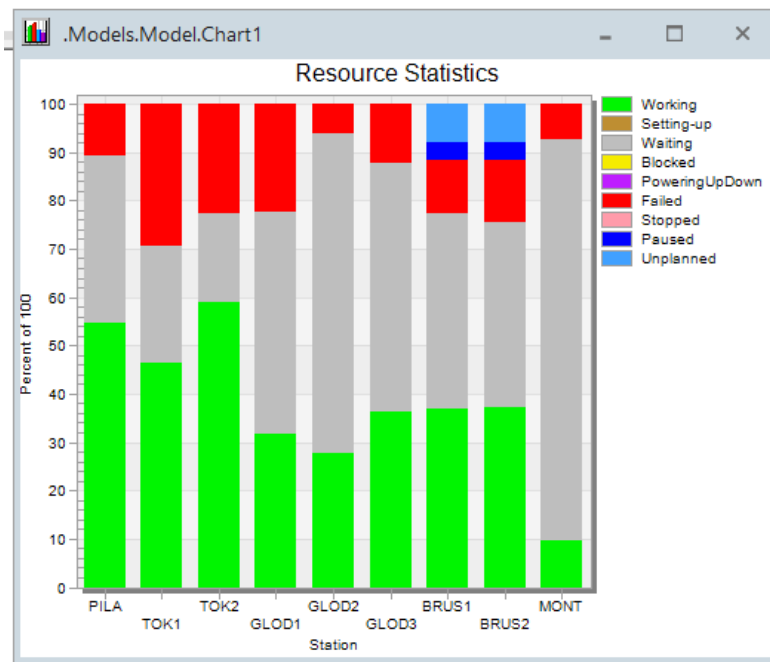
Obzirom na dobivene rezultate iskoristivosti sustava i vremena izrade provest će se optimizacija proizvodnog procesa. Iako navedeni rezultati nisu toliko loši provest će se eksperiment povećanjem količine radne snage i uvođenjem još jedne smjene. Prvo će se provesti analiza povećanjem broja radnika koji rade na proizvodnim kapacitetima tako da će ih kod prve analize ukupno biti sedam, a broj radnika zaduženih za održavanje ostaje isti. Slikom 6.1. prikazani su rezultati.



Slika 6.1 - Rezultati nakon provedenog prvog poboljšanja

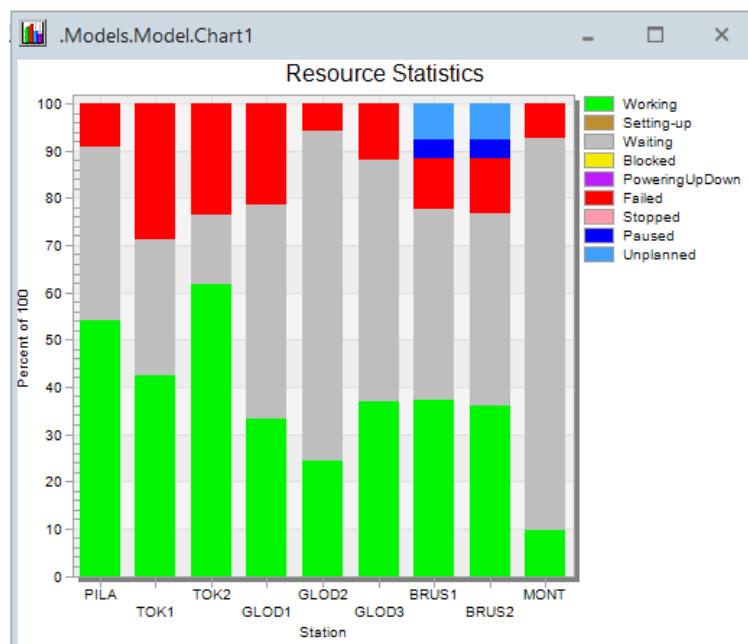
Iz grafa je vidljivo da se vrijeme rada proizvodnih kapaciteta povećalo za otprilike 5% čime se povećala i iskoristivost sustava. Vrijeme izrade se smanjilo te sada iznosi 14 sati 31 minutu i 24 sekunde.

U sljedećoj analizi broj radnika u proizvodnji biti će devet što znači da će svaki proizvodni kapacitet imati jednog radnika. Broj radnika za održavanje ostaje nepromijenjen. Slikom 6.2. prikazani su rezultati provedene analize.



Slika 6.2 - Rezultati nakon provedenog drugog poboljšanja

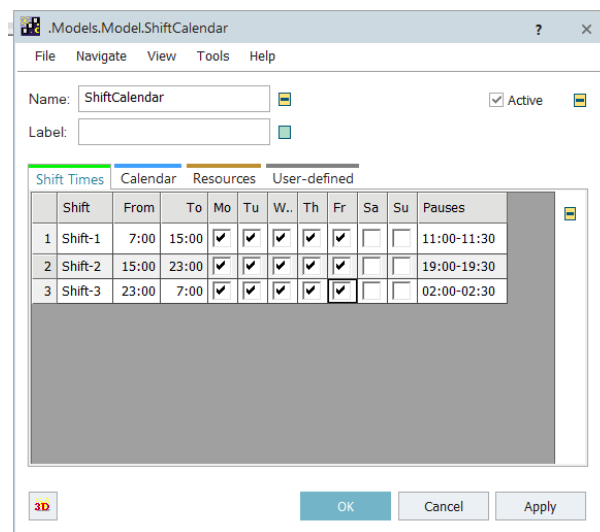
Iz navedenog grafa vidljivo je da se vrijeme rada nije puno promijenilo obzirom da su dodana dva dodatna radnika. Vrijeme izrade se smanjilo na 12 sati 47 minuta i 21 sekundu. Za sljedeću analizu povećat će se broj radnika zaduženih za održavanje kako bi se pokušalo smanjiti vrijeme koje proizvodni kapaciteti provode u kvaru. Broj radnika povećat će se na pet. Broj radnika u proizvodnji iznosi sedam. Na slici 6.3. prikazani su rezultati.



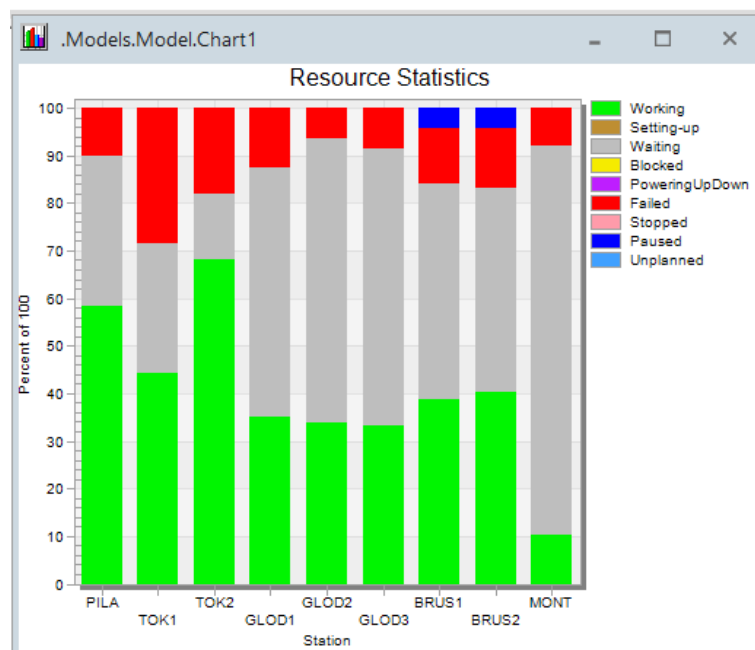
Slika 6.3 - Rezultati nakon provedenog trećeg poboljšanja

Iz slike 6.3 je vidljivo da se velike promjene nisu dogodile što znači da tri radnika mogu pokrivati količinu kvarova koja se pojavi na proizvodnim kapacitetima. Smanjilo se vrijeme obrade pa sada iznosi 12 sati 56 minuta i 44 sekunde.

Posljednje provedeno poboljšanje koje se provelo je uvođenje treće smjene. Količina radnika u proizvodnji postavlja se na sedam, a količina radnika za održavanje na tri. Treća smjena dodaje se unutar objekta *ShiftCalendar* (slika 6.4.). Na slici 6.5. prikazani su dobiveni rezultati.



Slika 6.4 - Dodavanje treće smjene



Slika 6.5 - Rezultati nakon provedenog četvrtog poboljšanja

Iz navedenih rezultata primjećuje se da se vrijeme rada povećalo, a kod nekih proizvodnih kapaciteta smanjio se postotak koji se odnosi na kvarove. Vrijeme obrade sada iznosi 12 sati. Zaključak je da se uvođenjem dodatne smjene iskoristivost sustava povećala.

Navedene varijante poboljšanja pokazale su različite rezultate koje se naknadno mogu analizirati s različitih aspekata isplativosti. Treba uzeti u obzir troškove zapošljavanja dodatnih radnika u odnosu na povećanje iskoristivosti. Isto tako, uvođenje dodatne smjene zahtijeva dodatna ulaganja u opremu i resurse te svakako treba osigurati dovoljan broj radne snage. Osim toga, iskoristivost se može dugoročno povećati dodatnim ulaganjima u proizvodne kapacitete kako bi se smanjio broj kvarova. Jedan od načina je uvođenje preventivnog održavanja koje za cilj ima provoditi određenu razinu održavanja postojeće opreme na način da planski odrađuje radove održavanja u odgovarajuće vrijeme čak i kada strojevi ne pokazuju simptome kvara. Također, dodatna ulaganja u radnu snagu u smislu dodatnih usavršavanja za rješavanje iznenadnih kvarova mogu donijeti poboljšanje proizvodnog sustava. Na taj način smanjio bi se udio vremena koje se potroši na čekanja dok je stroj u kvaru.

Važno je napomenuti da se rezultati dobiveni na temelju simulacijskih modela mogu dodatno analizirati. Iako takve analize nisu apsolutno točne, mogu biti misao vodilja u daljnjim planiranjima. U proizvodnim procesima dolazi do mnogih neočekivanih pogrešaka što ljudskih što pogonskih tako da se nije moguće u potpunosti osloniti na dobivene rezultate.

7. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme potreba za što kvalitetnijom i bržom izradom proizvoda sve je veća. Zahtjevi tržišta diktiraju razvoj i upotrebu novih tehnologija kako bi se omogućila jednostavnija i brža obrada pod uvjetom da su troškovi izrade što manji. Da bi se to omogućilo sve se više koriste računalni programi koji pomoću svojih brojnih alata i pomagala omogućuju izradu modela koji se može koristiti za različite analize. Simulacijsko modeliranje može se koristiti za rješavanje problema koji su vezani za donošenje odluka kao što su nalaženje glavnih faktora utjecaja u sustavu, određivanje radnih karakteristika sustava i predviđanje ponašanja sustava u budućnosti. Isto tako, simulacijski model koristi se za analize određenog sustava ili nekog procesa bez straha od narušavanja trenutnog stanja kao i zbog uvida u razne dijelove sustava i njihove međusobne interakcije.

Jedan od računalnih programa za simulacijsko modeliranje je *Tecnomatix Plant Simulation*. Ovaj računalni program predstavlja vrlo koristan alat koji se koristi za modeliranje procesa u svrhu analize, optimizacije, dokumentiranja i komunikacije s korisnikom. Također, moguće je vršiti analizu postojećeg stanja sustava ili projektirati potpuno novi proizvodni sustav.

U ovom diplomskom radu opisan je razvoj simulacijskog modela za proizvodnju četiri vrste proizvoda A, B, C i D koji se procesom montaže sklapaju u završni proizvod M. Proizvodni sustav sastoji se od ukupno devet proizvodnih kapaciteta: pile, dvije tokarilice, tri glodalice, dva stroja za brušenje i jedinice za montažu. Tok proizvodnje određen je hodogramima izrade za svaki proizvod te je navedeno trajanje obrade na svakom proizvodnom kapacitetu. Kako se za vrijeme rada javljaju i kvarovi tablicom su uneseni podaci za udio raspoloživosti pojedinog stroja te potrebno vrijeme za rješavanje kvarova. Za rad na proizvodnim kapacitetima i za popravak kvarova koriste se radnici kojima su navedena radna mjesta definirana u postavkama radnih mjesta i objekata. Za definiranje ulaznih podataka kao što su vrijeme izrade i količina proizvoda korištene su tablice radi lakše preglednosti i lakšeg izvođenja simulacijskih eksperimenata po završetku izrade modela. Protok materijala u proizvodnom sustavu definiran je uglavnom pomoću metoda na ulazu ili izlazu objekata na način da se proizvodi šalju na sljedeći proces obrade ili se skladište u jednom od postavljenih međuskladišta. Nakon izrade modela provodi se verifikacija i validacija modela da bi se utvrdila ispravnost rada i točnost dobivenih podataka. Verifikacijom je potvrđena ispravnost rada simulacijskog modela dok je

validacijom potvrđena točnost rezultata na način da se tehnološko vrijeme dobiveno analitičkim putem usporedi s tehnološkim vremenom dobivenim iz simulacijskog modela. Nadalje, provedene su analize sa aspekta iskoristivosti sustava čime je utvrđeno da je iskoristivost prihvatljiva, ali su ipak provedene dodatne analize kako bi iskoristivost bila što bolja. Početno vrijeme obrade iznosilo je 16 sati 34 minute i 58 sekundi, a nakon dodavanja dva radnika u proizvodnji i uvođenjem dodatne smjene vrijeme obrade smanjilo se na 12 sati. Ukoliko se želi postići još manje vrijeme izrade i bolja iskoristivost postoje alati kojima se to može postići, ali je važno uzeti u obzir troškove.

Primjenom simulacijskog modeliranja i korištenjem računalnog programa *Tecnomatix Plant Simulation* može se reći da je proces planiranja proizvodnje uvelike olakšan. Važno je napomenuti kako simulacija neće predstavljati stvarno stanje realnog sustava, ali može doprinijeti njegovom poboljšanju.

LITERATURA

- [1] Ištoković, D.: „Računalna simulacija proizvodnih procesa“, Predavanje 1, Tehnički fakultet u Rijeci, Rijeka, 2022.
- [2] Čerić, V.: „Simulacijsko modeliranje“, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [3] Ištoković, D.: „Simulacijski okvir za određivanje optimalnoga vremenskog iskorištenja višepredmetnoga linijskoga proizvodnog sustava“, doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Rijeci, Rijeka, 2021.
- [4] Bangsow, S.: „Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Njemačka, 2010.
- [5] Bangsow, S.: „Tecnomatix Plant Simulation“, drugo izdanje, Springer Nature; Švicarska, 2020.
- [6] Internet, <https://training.plm.automation.siemens.com/index.cfm>, lipanj 2024.

POPIS OZNAKA I KRATICA

| | |
|-------|---|
| BRUS | stroj za brušenje |
| FC | objekt <i>FlowControl</i> |
| GLOD | stroj za glodanje |
| MONT | montaža |
| MTTR | vrijeme potrebno za popravak proizvodnog kapaciteta (engl. <i>Mean Time To Repair</i>) |
| op | varijabla kojom je definiran redni broj operacije |
| PILA | strojna pila |
| SGP | skladište gotovih proizvoda |
| SRM | skladište repromaterijala |
| t_i | vrijeme i -te operacije |
| t_A | tehnološko vrijeme proizvoda A |
| t_B | tehnološko vrijeme proizvoda B |
| t_C | tehnološko vrijeme proizvoda C |
| t_D | tehnološko vrijeme proizvoda D |
| t_n | ukupno vrijeme operacija pojedinog proizvoda |
| TC | varijabla koja predstavlja tehnološko vrijeme |
| TOK | tokarilica |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2.1 - Osnovni koncept simulacije [1] | 2 |
| Slika 2.2 - Kontinuirani i diskretni simulacijski modeli [2]..... | 6 |
| Slika 3.1 - Simulacijski programski paketi [1]..... | 8 |
| Slika 3.2 - Hodogram izrade proizvoda A..... | 10 |
| Slika 3.3 - Hodogram izrade proizvoda B..... | 11 |
| Slika 3.4 - Hodogram izrade proizvoda C..... | 11 |
| Slika 3.5 - Hodogram izrade proizvoda D..... | 12 |
| Slika 4.1 - Početno sučelje Tecnomatix Plant Simulation-a..... | 13 |
| Slika 4.2 - Radno sučelje Tecnomatix Plant Simulation-a | 14 |
| Slika 4.3 - Stvaranje traženih proizvoda | 15 |
| Slika 4.4 - Definiranje boje proizvoda A..... | 15 |
| Slika 4.5 - Kreirani proizvodni kapaciteti | 16 |
| Slika 4.6 - Prostorni raspored proizvodnog pogona | 17 |
| Slika 4.7 - Tablica „kolicina_proizvoda“ | 18 |
| Slika 4.8 - Postavke skladišta repromaterijala | 19 |
| Slika 4.9 - Postavke skladišta gotovih proizvoda..... | 20 |
| Slika 4.10 - Ulazna metoda SGP-a..... | 20 |
| Slika 4.11 - Postavke vremena procesa montaže..... | 21 |
| Slika 4.12 - Opcije za formatiranje tablice..... | 21 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.13 - Izgled tablice „vremena_operacija“ | 22 |
| Slika 4.14 - Tablice vremena operacija za proizvode A,B,C i D..... | 22 |
| Slika 4.15 - Definiranje varijable op | 23 |
| Slika 4.16 - Postavke ulazne metode na proizvodnim kapacitetima | 24 |
| Slika 4.17 - Postavke međuskladišta | 24 |
| Slika 4.18 - Metoda na izlazu iz SRM-a | 25 |
| Slika 4.19 - Metoda na izlazu PILE | 26 |
| Slika 4.20 - Metoda na izlazu iz Buffer1..... | 26 |
| Slika 4.21 - Metoda na izlazu TOK1 i TOK2..... | 27 |
| Slika 4.22 - Metoda na izlazu glodalica | 27 |
| Slika 4.23 - Postavljanje objekta FlowControl u radni prostor simulacijskog modela | 27 |
| Slika 4.24 - Postavke objekta FlowControl..... | 28 |
| Slika 4.25 - Metoda na izlazu BRUS1 i BRUS2..... | 28 |
| Slika 4.26 - Prikaz objekta montaže u radnom prostoru simulacijskog modela | 29 |
| Slika 4.27 - Postavke montaže | 30 |
| Slika 4.28 - Metoda na izlazu montaže | 30 |
| Slika 4.29 - Postavke raspoloživosti za PILU | 31 |
| Slika 4.30 - Nazivi kreiranih radnika | 31 |
| Slika 4.31 - Postavke Radnik1 | 32 |
| Slika 4.32 - Postavke Radnik2 | 32 |

| | |
|---|----|
| Slika 4.33 - Uređivanje kartice Radnik1 | 33 |
| Slika 4.34 - Postavke ShiftCalendar-a..... | 34 |
| Slika 4.35 - Postavke WorkerPool-a..... | 34 |
| Slika 4.36 - Raspored radnih mjesta unutar radnog prostora simulacijskog modela | 35 |
| Slika 4.37 - Postavke radnog mjesta za uslugu processing | 36 |
| Slika 4.38 - Postavke radnog mjesta za uslugu repair | 36 |
| Slika 4.39 - Postavke proizvodnog kapaciteta za uslugu processing | 37 |
| Slika 4.40 - Postavke proizvodnog kapaciteta za uslugu repair | 37 |
| Slika 4.41 - Postavke Display-a za vremena operacija | 38 |
| Slika 4.42 - Postavke Display-a za količinu proizvoda koja je ušla u SGP | 39 |
| Slika 4.43 - Verifikacija simulacijskog modela..... | 40 |
| Slika 4.44 - Dopunjena ulazna metoda na proizvodnim kapacitetima | 42 |
| Slika 4.45 - Definiranje varijable TC | 42 |
| Slika 4.46 - Tehnološko vrijeme proizvoda A i B | 43 |
| Slika 4.47 - Tehnološko vrijeme proizvoda C i D | 43 |
| Slika 4.48 - Tehnološko vrijeme procesa montaže proizvoda M | 43 |
| Slika 5.1 - Odabir vrste podataka za prikaz | 45 |
| Slika 5.2 - Postavke Chart-a | 45 |
| Slika 5.3 - Grafički prikaz iskorištenosti proizvodnih kapaciteta | 46 |
| Slika 5.4 - Grafički prikaz popunjenosti međuskладиšta | 47 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.5 - Postavke BottleneckAnalyzer-a..... | 47 |
| Slika 5.6 - Analiza uskog grla pomoću BottleneckAnalyzer-a | 48 |
| Slika 5.7 - Prikaz BottleneckAnalyzer analize..... | 48 |
| Slika 5.8 - Odabir podataka za prikaz u BottleneckAnalyzer-u | 49 |
| Slika 5.9 - Brojčani podaci dobiveni BottleneckAnalyzer-om..... | 49 |
| Slika 5.10 - Analiza vremena rada proizvodnih kapaciteta | 50 |
| Slika 6.1 - Rezultati nakon provedenog prvog poboljšanja..... | 51 |
| Slika 6.2 - Rezultati nakon provedenog drugog poboljšanja..... | 52 |
| Slika 6.3 - Rezultati nakon provedenog trećeg poboljšanja | 52 |
| Slika 6.4 - Dodavanje treće smjene | 53 |
| Slika 6.5 - Rezultati nakon provedenog četvrtog poboljšanja..... | 53 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 3.1 - Proizvodni kapaciteti i njihova raspoloživost | 10 |
|---|----|

SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada opisuje razvoj simulacijskog modela za proizvodnju dijelova. Početni dio rada usmjeren je na osnovne informacije o simulacijama. Opisani su koraci simulacijskog procesa te su navedene prednosti i nedostaci primjene istih. Nadalje, klasificirane su simulacijske metode s naglaskom na simulaciju diskretnih događaja. Za izradu simulacijskog modela korišten je računalni program *Tecnomatix Plant Simulation*. Simulacijski model namijenjen je za izradu četiri vrste proizvoda koji se procesom montaže sklapaju u jedan finalni proizvod. Za potrebe izrade navedenih proizvoda korišteno je ukupno devet proizvodnih kapaciteta. Osim toga, za rad proizvodnih kapaciteta i za popravak istih ukoliko se pojavi kvar zaduženi su za to kvalificirani radnici. U radu su detaljno objašnjeni svi koraci izrade, a nakon izrade modela pristupilo se verifikaciji i validaciji modela u svrhu provjere ispravnosti modela. Nakon uspješne provjere provedeni su simulacijski eksperimenti i analizirani dobiveni rezultati.

Ključne riječi: simulacija, simulacijski model, proizvodnja dijelova, Tecnomatix Plant Simulation

SUMMARY

This master thesis describes development of a simulation model for parts manufacturing. The initial part of the paper focuses on basic information about simulations. The steps of the simulation process are described and the advantages and disadvantages of their application are listed. Furthermore, simulation methods are classified focusing on the discrete event simulation. The Tecnomatix Plant Simulation program was used to create the simulation model. The simulation model is intended for processing four types of products which are combined into final product through the assembly process. A total of nine production capacities were used. Moreover, workers are responsible for processing on production capacities and for their repair if a malfunction occurs. All the steps of creation are explained in detail and after the model was created the verification and validation of the model was started in order to check the correctness of the model. After the successful verification, simulation experiments were conducted and the obtained results were analyzed.

Keywords: simulation, simulation model, manufacturing of parts, Tecnomatix Plant Simulation