

Simulacijski model proizvodnog sustava tvrtke SELK Kutina

Knezović, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:938002>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petar Knezović

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Petar Knezović

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Goranu Đukiću na ukazanom povjerenju, strpljenju i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se poduzeću SELK d.d. na pruženoj pomoći, gospodinu Aleksandru Vrbancu i Matku Juretiću na utrošenom vremenu i savjetima pri izradi rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci na podršci i strpljenju tijekom školovanja.

Petar Knezović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **PETAR KNEZOVIĆ** Mat. br.: 0035196963

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacijski model proizvodnog sustava tvrtke SELK Kutina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation model of production system of SELK Kutina**

Opis zadatka:

Simulacije kao alat nalaze svoju primjenu i u evaluaciji složenih proizvodnih sustava, u kojima se događaju proizvodni procesi s više različitih proizvoda i s većem brojem različitih operacija izrade, kontrole i rukovanja. Na primjeru proizvodnog sustava tvrtke SELK Kutina potrebno je prikazati, za navedenu svrhu, primjenu dostupnog simulacijskog programa.

U radu je potrebno:

- ukratko prikazati tvrtku,
- opisati proizvodni sustav i proizvodni proces,
- izraditi simulacijski model proizvodnog sustava,
- validirati model temeljem usporedbe s poznatim podacima,
- temeljem rezultata simulacija i spoznajama iz tvrtke predložiti promjene (unapređenja) sustava,
- simulacijskim modelom provesti "što ako" simulacije i evaluirati predložene promjene.

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

Zadatak zadan:
30. travnja 2020.

Rok predaje rada:
2. srpnja 2020.

Predvideni datum obrane:
6. srpnja do 10. srpnja 2020.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Goran Đukić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KRATICA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. SELK d.d.	3
2.1. Profil tvrtke i proizvodni program	4
2.2 Tehnologija.....	7
3. SIMULACIJSKE TEHNOLOGIJE U PROIZVODNIM SUSTAVIMA	9
3.1. Simulacija i sustav.....	9
3.2. Podjela simulacijskih modela.....	12
3.2.1 Deterministički i stohastički modeli	12
3.2.2. Diskretni i kontinuirani modeli	12
3.2.3 Statički i dinamički model	12
3.3. Vrste simulacija.....	12
3.3.1 Monte Carlo simulacija.....	13
3.3.2. Kontinuirana simulacija.....	13
3.3.3 Simulacija diskretnih događaja.....	13
3.3.4. Kombinirana diskretno – kontinuirana simulacija	14
3.4 Simulacijski alati	14
3.4.1. Siemens Tecnomatic	14
3.4.2. AnyLogic.....	16
3.4.3. FlexSim.....	17
3.4.4. Arena	19
3.4.5. Enterprise Dynamics	20
4. PROIZVODNI PROCES TVRTKE SELK	26
4.1 Strojevi u proizvodnom procesu	28
4.2 Vremena i količine vezana uz proizvodni proces.....	31
5. SIMULACIJA PROIZVODNOG PROCESA TVRTKE SELK.....	34
5.1 Operacije unutar modela	34
5.2 Pretpostavke i ograničenja modela.....	34
5.3 Prikaz simulacije	35
5.4 Objašnjenje korištenih atoma i njihovih parametara.....	37
5.5 Rezultati početnog modela simulacije.....	40
5.6 Simulacija modificiranog modela i usporedba sa simulacijom početnog modela	44
6. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tvrtka SELK [1]	3
Slika 2.	Podjela eksperimentiranja nad sustavom [8].....	10
Slika 3.	Siemens Tecnomatic [10].....	15
Slika 4.	Prikaz potrošnje energije [10]	16
Slika 5.	Tri vrste metodologije simulacija [11]	16
Slika 6.	Simulacija proizvodnje solarnih ćelija [11].....	17
Slika 7.	Korisničko sučelje [12]	18
Slika 8.	Dijagram toka [12]	19
Slika 9.	Arena [13].....	20
Slika 10.	ED korisničko sučelje [14]	22
Slika 11.	Prozor za odabir atoma [14]	22
Slika 12.	Povezivanje atoma [14]	23
Slika 13.	Prozor manipulacije vremena [14]	23
Slika 14.	Simulacija trgovine [14].....	25
Slika 15.	Tlocrt PTC sektora	27
Slika 16.	Tok materijala.....	29
Slika 17.	Radna stanica optičke kontrole.....	30
Slika 18.	Prikaz korištenih atoma u simulaciji	35
Slika 19.	Prikaz modela u 3D	35
Slika 20.	Prikaz simulacijskog modela s povezanim kanalima	36
Slika 21.	Postave <i>Product</i> atoma.....	37
Slika 22.	Postavke <i>Source</i> atoma.....	38
Slika 23.	Kod u postavkama atoma strojne obrade	39
Slika 24.	Kod u postavkama atoma radnih stanica	39
Slika 25.	Postavke atoma <i>Queue</i>	40
Slika 26.	Iskoristivost Resistomata 5.....	43
Slika 27.	Iskoristivost radne stanice 8	43
Slika 28.	Iskoristivost Printera TPX i radnika pakiranja 1	44
Slika 29.	Modificirani tok materijala.....	45
Slika 30.	Grafovi iskoristivosti u modelu #2.....	46

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Proizvodni koraci	27
Tablica 2.	Tablica strojeva	28
Tablica 3.	Tablica aktivnosti stroja RES	30
Tablica 4.	Tablica količina	32
Tablica 5.	Vremena kontrole otpora	33
Tablica 6.	Vremena pripreme stroja i optičke kontrole	33
Tablica 7.	Vremena pakiranja.....	33
Tablica 8.	Prikaz završih količina	42
Tablica 9.	Usporedba rezultata	46

POPIS KRATICA

LED - *Light emitting diode* – Svjetleća dioda

MLCC - *Multilayer ceramic capacitors* - Višeslojni keramički kapacitatori

MLNTC – *Multilayer negative temperature Coefficient* – Višeslojni otpornici s negativnim temperaturnim koeficijentom

MLV - *Multilayer varistors* - višeslojni otpornici

MOM – *Management, Operations and Maintenance* - Menadžment, operacije i održavanje

PDM – *Product data management* – Upravljanje podacima o proizvodu

PLM – *Product lifecycle management* – Upravljanje životnim ciklusom proizvoda

PTC – *Positive Temperature Coefficient* – Otpornici s pozitivnim temperaturnim koef.

TDK - *Tokyo Denkikagaku Kogyo* – Tokyo elektronička kemijska industrija

VR – *Virtual reality* – Virtualna realnost

SAŽETAK

U ovome radu se analizira proizvodni sustav pomoću simulacijskog modeliranja. Simulacija je oponašanje realnog sustava za dobivanje kvalitetnih analiza na osnovu kojih se mogu donijeti odluke prilikom promjene starog ili uvođenja novog sustava. Cilj ovog rada je pokazati primjenu i prednosti simulacijskih tehnologija primjenom u stvarnom proizvodnom pogonu. Objašnjene su osnovne komponente simulacija, uključujući podjelu modela i vrsta simulacija. Predstavljeni su najpoznatiji simulacijski alati korišteni u proizvodnim sustavima. Detaljno je objašnjen simulacijski softver Enterprise Dynamics u kojem su napravljeni modeli trenutnog (postojećeg) i modificiranog (predloženog za unapređenje) proizvodnog sustava. Nakon provedenih simulacija napravljena je usporedba dvaju spomenutih sustava temeljem analiziranih rezultata simulacija.

Ključne riječi: Simulacija, simulacijske tehnologije, proizvodni sustav, Enterprise Dynamics 10, optimizacija

SUMMARY

In this thesis, the production system is analyzed through the use of simulation modeling. Simulation is the imitation of a real system for obtaining quality analyzes on the basis of which decisions can be made when changing the old or introducing a new system. The aim of this thesis is to show the application and advantages of simulation technologies by application in a real production plant. The basic components of simulations are explained, including the division of models and types of simulations. The most famous simulation tools used in production systems are presented. The Enterprise Dynamics simulation software is explained in detail, in which the models of the current (existing) and modified (proposed for improvement) production system are made. After the simulations, a comparison of the two mentioned systems was made based on the analyzed simulation results.

Keywords: Simulation, simulation technologies, production system, Enterprise Dynamics 10, optimization

1. UVOD

Poduzeća se danas suočavaju s neviđenim razinama i vrstama konkurencije u svijetu koji se neprestano razvija. Globalizacija uzorkuje poticanje sve viših razina složenosti u upravljanju ionako složenim poslovnim sustavima. Jedan od tih proizvodnih sustava je proizvodno poduzeće u kojem proizvodne i neproizvodne funkcije moraju koegzistirati. Sustav proizvodnog poduzeća je kompleksan dinamički sustav i ta složenost se neprestano povećava s prolaskom vremena. Rastući trend globalizacije i decentralizacije proizvodnje zahtijeva razmjenu informacija u realnom vremenu između različitih proizvodnih odjela, npr. dizajn, projektiranje, planiranje proizvodnje, montaža i ostali. Proizvodni razvojni procesi postaju sve složeniji jer proizvodi postaju svestraniji, zamršeniji i kompliciraniji. Kako se varijacije proizvoda umnožavaju potrebno je odgovoriti na potrebe prilagodbe tržištu.

Menadžeri za vođenje takvih integriranih poduzeća u takvim poslovnim okruženjima trebaju novi sveobuhvatni alat za oblikovanje i testiranje sustava. Alat koji je učinkovit, ali također i jednostavan, također koji je u mogućnosti pratiti promjene unutar sustava. Alat o kojem se radi, je simulacijski alat koji radi na principu modeliranja i analize sustava. Takva vrsta alata omogućuje uvid u složene procese unutar proizvodnih sustava. Najveća prednosti tih alata je što moguće dobiti sliku proizvodnog sustava prije nego što sami proizvodni sustav postoji ili bez smetnje postojećeg sustava. U ovome radu će se upotrijebiti jedan od simulacijskih alata za bolje razumijevanje i potencijalno poboljšanje određenog proizvodnog procesa unutar proizvodnog sustava poduzeća SELK.

U prvom dijelu rada definira i opisuje se poduzeće SELK. Navedene su osnovne informacije o poslovanju, djelatnostima i asortimanu poduzeća. Navedeni su svi proizvodi i kratka povijest poduzeća, također je opisan način rada poduzeća i suradnja s multinacionalnom kompanijom TDK. Prvi dio se također bavi općenitim definiranjem proizvodnje u današnjem svijetu.

Drugi dio posvećen je simulaciji i njezinoj važnosti u današnjem svijetu proizvodnje i utjecaja u analizi i optimizaciji proizvodnih sustava i procesa. Napravljen je pregled najznačajnijih softverskih alata na tržištu, a detaljno je objašnjen softverski paket Enterprise Dynamics 10 koji će se koristiti kod izrade simulacije.

Treći dio se bavi simulacijskim modelom proizvodnog procesa unutar poduzeća SELK. Detaljno je objašnjen svaki korak simulacije, kao i svi elementi unutar modela. Analizirani su dobiveni rezultati i preporučena potencijalna poboljšanja proizvodnog sustava.

2. SELK d.d.

SELK d.d. je Hrvatsko poduzeće koje se bavi proizvodnjom visokosofisticiranih elektroničkih komponenta i elektroničkih dijelova za auto industriju, IT sektor, industriju komunikacije i mobilne telefonije i 100% je izvoznog karaktera. SELK posluje već 44 godine. Trenutno zapošljava više od 800 radnika, među kojima je i 10% inženjera (sveučilišni stupanj) posvećenih kreiranju novih tehnologija i najsuvremenijoj proizvodnji na tržištu [1].



Slika 1. Tvrtnka SELK [1]

Registrirane djelatnosti [2]:

- Proizvodnja računala i druge opreme za obradu podataka
- Ostali kopneni cestovni prijevoz putnika
- Cestovni prijevoz robe
- Proizvodnja rashladne i ventilacijske opreme, osim za kućanstvo
- Proizvodnja električnih aparata za kućanstvo
- Proizvodnja optičkih instrumenata i fotografske opreme
- Proizvodnja namještaja
- proizvodnja žarulja i električnih svjetiljki
- proizvodnja elektroničkih komponenata
- proizvodnja satova
- zastupanje inozemnih tvrtki
- doradni poslovi
- kupnja i prodaja robe

- obavljanje trgovačkog posredovanja na domaćem i inozemnom tržištu
- pripremanje hrane i pružanje usluga prehrane, pripremanje i usluživanje pića i napitaka i pružanje usluga smještaja
- pripremanje hrane za potrošnju na drugom mjestu (u prijevoznim sredstvima, na priredbama i sl) i opskrba tom hranom (catering)
- međunarodno otpremništvo
- proizvodnja, promet i korištenje opasnih kemikalija

2.1. Profil tvrtke i proizvodni program

Tvrtka SELK osnovana je 1976. godine te postaje poznata u regiji kao prvi proizvođač ručnih i ostalih satova, elektroničkih elemenata, aparata za igre na sreću i proizvoda s područja optoelektronike. Iste godine započinje licencirana proizvodnja elektroničkih satova američke tvrtke Opcoa iz New Jersey, te proizvodnja LED dioda, LED pokazala i LED modula [2].

Godine 1991. kao poznati proizvođač digitalnih satova i LED dioda, početkom domovinskog, rata gubi trenutno tržište te traži nova. Godine 1992. započinje suradnja s Njemačkom tvrtkom Siemens Matsushita, odnosno njihovom tvornicom u Deutschlandsbergu u Austriji. Posao je dogovoren i proveden na način, da matična tvornica u Deutsehlandsbergu u Austriji proizvodi poluproizvode pojedinih vrsta elektroničkih komponenti i zatim ih šalje u Selk, zajedno sa svom potrebnom sirovinom, potrošnim pomoćnim materijalima i dijelovima na dovršetak, uključujući sve završne kontrole kvalitete, označavanje i pakiranje, prema specifikaciji krajnjeg kupca, odnosno međunarodno prihvaćenim standardima za tu vrstu proizvoda. Posao je pokrenut s keramičkim rezonatorima. Proces koji su odrađivani u Selk-u na rezonatorima, bili su unutarnja i vanjska metalizacija tipova koji su metalizirani srebrom, kao i podešavanje rezonantne frekvencije, mehaničkim brušenjem, te 100% električno mjerenje i lemljenje vanjskih kontakata za ugradnju na elektroničke sklopove kod krajnjeg kupca te završno mjerenje i obilježavanje pojedinih komponenti tampon tiskom [2].

Nakon godine 1990. počinje masovno uvođenje mobilne telefonije u svijetu, i selk-u je sudjelovanjem u proizvodnji mikrovalnih filtra sudjelovao u toj velikoj tehnološkoj promjeni u svijetu. Kako je proizvodnja mobilnih telefona dramatičnom brzinom rasla od 1992. do 2000. godine, tako se 2000. proizvodnja naglo smanjila. Sukladno tome je varirao i broj zaposlenih u Selk-u. 1998. godine je tvrtka Siemens Matsushita izašla na svjetsko tržište

dionica i pretvorena je u novu tvrtku imenom EPCOS, koja je i dalje nastavila već uspostavljenu dobru suradnju sa Selk-om. Godine 2000. tvrtka EPCOS je odlučila u Selk preseliti i završne procese nekih drugih proizvoda, djelom već poznatih i etabliranih na svjetskom tržištu, a dijelom i potpuno novih proizvoda, razvijenih od strane EPCOS-a koji su predstavljali pravu revoluciju u automobilskoj industriji.

Tada je proizvodnja u Selku podijeljena u dva sektora proizvodnje. Proizvodnja standardnih višeslojnih keramičkih komponenti i proizvodnju Piezo elemenata.

Proizvodnja višeslojnih keramičkih komponentata odvija se u dvije faze. Prva faza se odvija zaključno sa sinteriranjem, u matičnoj tvornici u Deutschlandsbergu u Austriji, po završetku te prve faze proizvodnje, dobivene komponente - poluproizvodi, imaju već sva električna svojstva definirana. Sinterirane komponente se šalju na dovršetak proizvodnje u tvornicu Selk u Kutini, gdje se nanose vanjski kontakti (koji moraju osigurati dugotrajnu lemljivost kod svake pojedine komponente), te se na visoko sofisticiranim strojevima vrši 100% električno mjerenje i razdvajanje komponenti koje ne zadovoljavaju propisane električne specifikacije, od onih koje ih ne zadovoljavaju. Jednako tako se tehnološki jako naprednim strojevima vrši 100% optička kontrola svake pojedine komponente i to sa svih 6 strana i prema katalogu optičkih grešaka, komponente se razdvajaju na dobre i škart. Nakon svega nabrojanog provode se razni testovi na uzorcima, kojima se provjeravaju većina važnih parametara, svake proizvedene šarže. Završna operacija je pakiranje u blistere, sukladno međunarodno priznatim normama za tu vrstu komponenti. Komponente pakirane u blister, koji se namata na kolute, sukladno međunarodnim standardima te tako vraća u skladište za otpremu konačnim kupcima u matičnoj tvornici u Deutschlandsbergu u Austriji.

Drugi sektor proizvodnje je proizvodnja Piezo elemenata. Tu je tvrtka Epcos ugledala svoju priliku jer je imala dugogodišnje iskustvo s keramičkim materijalima i pojavila se ideja da se napravi nova elektromehanička komponenta bazirana na piezo - električnom efektu. Piezo električni efekt je pojava da se neki materijali, kada se na njega dovede električni napon ponašaju tako da mijenjaju svoje mehaničke dimenzije (u pravilu se povećavaju). Tako je tvrtka Epcos u suradnji s poznatim proizvođačima sustava za ubrizgavanje goriva Siemens VDO (danas Continental) i Bosch krenula u razvoj piezo aktuatora baziranog na gore opisanom efektu.

Kao i kod višeslojnih keramičkih komponenata, proizvodnja Epcosovih piezo aktuatora za automobilsku industriju, odvija se u dvije faze. Prva faza u matičnoj tvornici, zaključno sa sinteriranjem, nakon kojeg su već postignute gotovo sve važne elektromehaničke specifikacije ovih komponenti, nakon tog se ove komponente, kao poluproizvodi, šalju na dovršetak u tvornicu Selk u Kutini. Postoji više različitih tipova piezo aktuatora, ali završni dio proizvodnje u Kutini uglavnom započinje brušenjem sinteriranih keramičkih komponenti na konačne dimenzije prema specifikacijama koje su jako uske, tolerancija u mikronima, jer samo tako mogu obavljati predviđenu funkciju u dizi za ubrizgavanje diesel goriva, nakon toga uglavnom slijedi nanošenje i montaža kontakata, preko kojih će se u dizi na aktuator dovoditi napon za otvaranje dize u željenom trenutku.

To je jedan od ključnih i najkritičnijih procesa, zatim slijedi ugrađivanje takvog aktuatora u odgovarajuća kućišta te zaštita vanjskih bočnih površina keramičkog dijela aktuatora definiranim izolacijskim materijalima, koji eliminiraju rizik od kratkog spoja između pojedinih slojeva elektroda, te tako i potencijalni rizik od zakazivanja aktuatora, odnosno dize u radu, što bi predstavljalo veliki rizik od zakazivanja motora u radu. Kod ovi procesa je izuzetno važna čistoća, pa se dio procesa odvija u tzv. Čistoj sobi (slično uvjetima u operacijskim dvoranama, gdje se odgovarajućom filtracijom i posebno izvedenim sustavom izmjene zraka osigurava da zrak u radnom prostoru bude bez i mikronski čistih onečišćenja. Tome je prilagođena i radna odjeća ljudi koji rade u tom prostoru. Tijekom proizvodnje vrše se i 100% električna mjerenja svih komponenti, te odvajanje škarta od dobrih dijelova, te optička sortiranja, dijelom automatizirana, a dijelom te kontrole rade ljudi uz pomoć mikroskopa, ručno. Obuka ljudi za ovakvu vrstu sortiranja je dugotrajna, jer postoji velik broj različitih vrsta optičkih grešaka, koje moraju naučiti, te ih na pravi način znati prepoznati. Zato svi radnici koji rade ovaj posao idu na redovitu liječničku kontrolu vida, a redovito se od strane kompetentnih za to određenih radnika, provjeravaju rezultati njihovog rada, jer se nikako ne smije dogoditi da nekome promakne komponenta s greškom i takva bude isporučena. Kod ovih proizvoda se na kraju proizvodnje iz svake šarže izuzimaju uzorci i testiraju, te tek nakon potvrde da su svi rezultati testiranja dobri, pojedina šarža dobiva odobrenje za isporuku i ide na pakiranje u ambalažu, sukladno zahtjevu krajnjeg kupca, te se tako zapakirana na dnevnoj bazi isporučuje u matičnu tvornicu u Deuschlandsbergu u Austriji.

2.2 Tehnologija

Kao što je rečeno proizvodnja u Selku je podijeljena u dva sektora proizvodnje. Proizvodnja standardnih višeslojnih keramičkih komponenti i proizvodnju Piezo elemenata. Proizvodnja standardnih višeslojnih keramičkih komponenti je pokrenuta s keramičkim rezonatorima. Do uvođenja keramičkih rezonatora kao nove tehnologije titrajnih krugova, potrebnih za svaki generator sinusnog napona, u tu svrhu su primjenjivani titrajni krugovi sastavljeni od zavojnice (induktiviteta) i kondenzatora u paralelnoj vezi, koji uz odgovarajuću pobudu predstavljaju rezonantni strujni krug, čija je frekvencija određena vrijednostima kapaciteta kondenzatora i induktiviteta [4]. Problem ovakvih rezonantnih elektroničkih sklopova nastaje na višim frekvencijama, zbog prevelikog gušenja signala. Kod keramičkih rezonatora je taj problem eliminiran i kao tehnologija se koristi svojstvo kratkospojenog odsjeka koaksijalnog voda da se ponaša kao titrajni krug, a rezonantnu frekvenciju određuje dužina samog rezonatora. Daljim razvojem tehnologije keramičkih komponenti za potrebe komunikacija, tehnologija se razvijala u smjeru da se više rezonatora kombinira u jedan blok keramike prešan zajedno, koji predstavlja više rezonatora u paralelnoj električnoj vezi, koji se u području visokih frekvencija ponašaju kao visokofrekventni filtri. Upravo te komponente su omogućile razvoj mobilne telefonije i kvalitetu radio signala uz vrhunsku razumljivost, kakvu danas poznajemo. Telekomunikacijski uređaji radio veze starijih generacija, prije 1990 godine imali su velike probleme s uspostavljanjem veze, a i kvalitetom signala, odnosno čujnošću i razumljivošću razgovora [4].

Proizvodnja standardnih višeslojnih keramičkih komponenti poznatih kao:

MLCC (multilayer ceramic capacitors – višeslojni keramički kondenzatori; - kondenzatori su standardne komponente u gotovo svakom elektroničkom sklopu, a prednost višeslojnih keramičkih kondenzatora u odnosu na druge starije tehnologije između ostalog u puno povoljnijem odnosu vrijednosti kapaciteta (napona) i dimenzije kondenzatora te jednostavnost ugradnje.

MLV(Multilayer varistors- višeslojni varistori);- višeslojni keramički varistori primjenjuju se za zaštitu elektroničkih sklopova od prevelikog napona. Primjenu nalaze u najjednostavnijim elektroničkim uređajima, pa preko mobilnih telefona, računala do automobilske industrije. MLNTC (višeslojni otpornici s negativnim temperaturnim koeficijentom),- primjenjuju se kao vrlo precizni senzori za mjerenje temperature.

PTC (otpornici s pozitivnim temperaturnim koeficijentom) – također se primjenjuju, kao temperaturni senzori, ali i kao komponente, za zaštitu strujnih krugova od preopterećenja jer,

kako se povećava struja, koja kroz njih teče, PTC otpornici se griju i kako imaju pozitivan temperaturni koeficijent, s povećanjem temperature, povećava im se i električni otpor, te tako smanjuje i struja u strujnom krugu u kojem su spojeni.

Proizvodnja Piezo aktuatora: Piezo aktuatori su noviji proizvod na svjetskom tržištu i razvijeni su od strane tvrtke Epcos u suradnji s proizvođačima sustava za ubrizgavanje goriva u automobilskim motorima. Stare generacije sustava za ubrizgavanje goriva funkcionirale su na način, da se svaka diza za ubrizgavanje mehanički (pritiskom opruge) podešavana tlak goriva dopremljenog od visokotlačne pumpe, od kojeg će se diza otvoriti i raspršiti gorivo u komoru za sagorijevanje. Nedostaci ovakvih sustava su nepreciznost mehaničke sinkronizacije položaja klipova i trenutka ubrizgavanja goriva u komoru za sagorijevanje, što za posljedicu ima prevelike gubitke, odnosno nedovoljno sagorijevanje goriva. Relativno mali tlak ubrizgavanja goriva te zbog toga lošije raspršivanje čestica goriva i miješanje s pregrijanim zrakom [4]. Kako bi usavršili rad diesel motora proizvođači sustava za ubrizgavanje goriva razvili su nove tzv. Common rail sustave za ubrizgavanje dizel goriva. Kod prvih ovakvih sustava kao izvrsni sklop za otvaranje pojedinih diza po primljenom upravljačkom električnom signalu, upotrijebljen je elektromagnet, no i elektromagnet, kao elektromehanička komponenta ima svojih nedostataka, zbog kojih se sve prednosti common rail sustava nisu mogle iskoristiti do kraja. Ta ograničenja su mala sila elektromagneta te time još uvijek postoji ograničenje u primjeni viših tlakova goriva. Zato su proizvođači common rail sustava za ubrizgavanje diesel goriva, zajedno s proizvođačima automobilskih motora bili u potrazi za novom elektromehaničkom komponentom, koja neće imati ograničenja poput elektromagneta, a to je piezo sustav [3].

Prednosti Piezo u odnosu na magnet. Sila koju ostvaruje piezo aktuator, sastavljen od puno keramičkih slojeva koji imaju piezoelektrični efekt, je značajno veća od sile koju može postići elektromagnet, te je piezo aktuator u stanju otvoriti dizu pod značajno većim tlakom nego elektromagnet, što doprinosi puno boljem raspršivanju čestica goriva i miješanju istih s pregrijanim zrakom, te time i puno bolje sagorijevanje, tako veću iskoristivost goriva te veću snagu motora uz manju potrošnju goriva. Dok su Siemens VDO i Bosch konstruirali Piezo električni efekt djeluje u oba smjera, dakle, ako se na neki materijal koji ima piezo električna svojstva vrši mehanički pritisak, na njegovim polovima će se inducirati električni napon, opće poznata je primjena ovakvog djelovanja je u plinskim upaljačima koji se ne pale kremenom, nego pritiskom na odgovarajuće dugme uz jak škljocaj, koji izaziva stvaranje oku vidljive iskre [3].

3. SIMULACIJSKE TEHNOLOGIJE U PROIZVODNIM SUSTAVIMA

Kao što je rečeno u uvodu, cilj ovog rada je pokazati primjenu i prednosti simulacijskih tehnologija primjenom u stvarnom proizvodnom pogonu. Radi boljeg razumijevanja simulacija, u ovom poglavlju se objašnjavaju osnove i vrste simulacija, njezina važnosti u današnjem svijetu proizvodnje i utjecaja u analizi i optimizaciji proizvodnih sustava i procesa. Također je napravljen je pregled najznačajnijih softverskih alata na tržištu, a detaljno je objašnjen softverski paket Enterprise Dynamics 10 koji će se koristiti kod izrade simulacije.

3.1. Simulacija i sustav

Simulacija je oponašanje realnih stvari, stanja ili procesa. Objekt interesa koji se oponaša obično se naziva sustavom i radi njegovog znanstvenog proučavanja često se mora napraviti skup pretpostavki o tome kako taj sustav funkcionira [5]. Te pretpostavke, koje obično imaju oblik matematičkih ili logičkih veza, čine model koji se koristi da bi se pokušalo steći razumijevanje načina ponašanja odgovarajućeg sustava. Ako su odnosi koji sačinjavaju model dovoljno jednostavni, moguće je koristiti matematičke metode za dobivanje točnih podataka o pitanjima o sustavu, to se naziva an analitičko rješenje. Međutim, većina je sustava u svijetu previše složena da bi dopuštala analitičko ocjenjivanje modela, pa se ti modeli moraju proučavati pomoću simulacije. U simulaciji za procjenu modela koristi se računalo za numeričku analizu, a podaci se prikupljaju kako bi se ostvarila što kvalitetnija slika modela. Simulacija je oblik modeliranja koji se koristi za analizu i ocjenu performansi sustava. Tehnički, simulacija je proces dizajniranja i stvaranja računalnog modela stvarnog ili predloženog sustava u svrhu provođenja numeričkih eksperimenata radi boljeg razumijevanja njegovih ponašanje za određeni skup uvjeta [6].

Područja primjene za simulaciju su brojna i raznolika: [7]

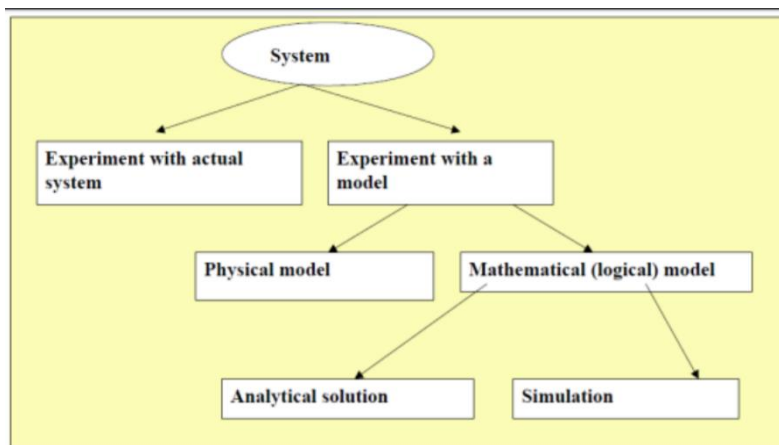
- Projektiranje i analiza proizvodnih sustava
- Procjena hardverskih i softverskih zahtjeva za računalni sustav
- Evaluacija novog vojnog oružanog sustava ili taktike
- Određivanje pravila za naručivanje za inventurni sustav
- Projektiranje komunikacijskih sustava i protokola poruka
- Projektiranje i upravljanje prometnim mogućnostima poput autocesta, aerodroma, podzemne željeznice ili luke
- Procjena dizajna za uslužne organizacije kao što su bolnice, pošte ili restorani brze hrane

- Analiza financijskih ili ekonomskih sustava

Sustav je definiran kao skup entiteta (npr. ljudi ili strojevi) koji djeluju i komuniciraju zajedno za ostvarivanje određenog cilja. Na primjer, ako netko želi proučavati sustav banke kako bi odredio broj zaposlenika na šalteru potrebnih za pružanje odgovarajuće usluge za klijente koji žele samo uplatiti novce ili izvršiti uplatu, sustav se može definirati kao onaj dio banke koji se sastoji od šaltera s kupcima koji čekaju u redu ili bivaju posluženi. Stanje sustava se definira kao skup varijabli potrebnih za opis sustava u određenom vremenu u odnosu na željeni cilj sustava. U proučavanju sustava banke primjeri mogućih varijabli stanja su broj zaposlenika koji rade, broj klijenata u banci i vrijeme dolaska pojedinog klijenta.

Sustavi se kategoriziraju u dvije vrste, diskretni i kontinuirani. Diskretni sustav je onaj kod kojeg se varijable stanja mijenjaju u određenim vremenskim točkama. Sustav banke je primjer diskretnog sustava, budući da se varijabla kao što je broj klijenata mijenja samo u trenucima kada u banku uđe ili izađe klijent. Kontinuirani sustav je onaj u kojem se varijable stanja kontinuirano mijenjaju u vremenu. Automobil koji se kreće određenom brzinom je primjer kontinuiranog sustava s obzirom da se varijable stanja kao što su njegova brzina ili pozicija kontinuirano mijenjaju u vremenu.

Na slici 2. su prikazane razine podjele eksperimentiranja nad sustavom.



Slika 2. Podjela eksperimentiranja nad sustavom [8]

- Eksperimentiranje sa stvarnim sustavom i eksperimentiranje s modelom sustava.

Ako je moguće (i isplativo) sustav fizički promijeniti i zatim analizirati njegov radu u novim uvjetima, to je poželjno. Međutim, to je rijetko izvedivo jer bi takav eksperiment često bio preskup. Na primjer, banka možda razmišlja o smanjenju broja zaposlenika na šalterima radi smanjenja troškova, ali u stvarnosti to može dovesti do velikih redova i kašnjenja. Također u

proizvodnoj firmi u kojoj se planira napraviti novi raspored strojeva za kojeg se smatra da će povećati produktivnost određene proizvodne linije. Zaustavljanje proizvodnje financijski opterećuje firmu, te stvaranje modela nad kojim će se eksperimentirati čini se logičnim odabirom.

- Fizički model i matematički model.

Ukoliko odluka bude da će se eksperimentirati na modelu. Stvara se mogućnost odabira između fizičkog i matematičkog modela. Pod riječ "model" često se misli na makete automobila ili nekih drugih vozila u zračnim tunelima, pilotskim kabinama odvojene od svojih zrakoplova koji će se koristiti u obuci pilota ili minijature podmornice u bazenu. Ovo su primjeri fizičkih modela i često nisu tipični tip modela za istraživanje i analizu sustava, ali povremeno je korisno izgraditi fizičke modele za proučavanje inženjerskih ili upravljačkih sustava. Ipak velika većina modela izgrađenih za istraživačke svrhe su matematički, predstavljajući sustav u smislu logičkih i kvantitativnih odnosa s kojim se manipulira i mijenja kako bi se vidjelo kako model reagira, a time i kako bi sustav reagirao.

- Analitičko rješenje i simulacija.

Jednom kada se izgradi matematički model, mora se ispitati kako bi se utvrdilo na koji se način može odgovoriti na pitanje od interesa za sustav koji bi trebao predstavljati. Ako je model dovoljno jednostavan, možda je moguće raditi sa svojim odnosima i količinama da se dobije točno, analitičko rješenje. To su modeli problema koji se svode na matematički tretman pomoću metoda algebre, matematičke analize, teorije vjerojatnosti i sl. Primjer takvih problema su jednostavni problemi njihala i repova čekanja [9].

Neka analitička rješenja mogu postati neobično složena i zahtijevati velike računalne resurse. Ako analitičko rješenje matematičkog modela je dostupno i računski učinkovito, obično je poželjno model proučiti na ovaj način, a ne putem simulacija. Međutim, mnogi su sustavi vrlo složeni, tako da su njihovi matematički modeli složeni i onemogućavaju bilo koju mogućnost analitičkog rješenja. U ovom slučaju model se mora proučiti pomoću simulacije. Zbog nemogućnosti prikaza složenih dinamičkih sustava u analitičkom obliku, modeli su zadani u proceduralnom obliku kojim se prikazuje način rada sustava. Problem se rješava numerički, provođenjem eksperimenata modelom koji oponašaju razvoj sustava u vremenu. Primjer sustava koji se modeliraju i analiziraju simulacijskim modeliranjem su diskretni sustavi s povratnom vezom, npr. iskorištavanje resursa na Zemlji i dinamika promjene populacija, biljaka i životinja [9].

3.2. Podjela simulacijskih modela

Postoje tri osnova tipa podjele simulacijskih modela, jedan prema vrsti varijable u modelu (deterministički i stohastički), drugi prema načinu na koji se stanjem modela mijenja u vremenu (diskretni i kontinuirani), a treći prema utjecaju varijable vremena prema modelu (statički i dinamički) [9].

3.2.1 Deterministički i stohastički modeli

Simulacijski modeli mogu biti deterministički ili stohastički. Deterministički modeli opisuju dinamičko ponašanje sustava uz pretpostavku da nema slučajnih efekata i daje isti izlaz za isti ulaz. Stohastički simulacijski modeli opisuju dinamičko ponašanje kada postoje nasumični efekti i oni daju samo procjene stvarnog odgovora sustava, jer su rezultati slučajne varijable. Ovo zahtijeva potrebu za nekoliko pokretanja modela za procjenu sustava s minimalnom varijancom [6].

3.2.2. Diskretni i kontinuirani modeli

Modeli mogu biti diskretni i kontinuirani ovisno o tome kako se varijable uključene u model mijenjaju s vremenom. Kada se stanje sustava (predstavljeno određenim varijablama) mijenja u određenim točkama vremena, tada je model diskretan. Kada je promjena kontinuirana kroz vrijeme i uzrokuje napredak vremena, tada je model kontinuiran. Postoje dva načina diskretnog modela: korak s vremenom i događaj u korak. Vremenski povećani modeli ažuriraju stanje sustava na svakom unaprijed postavljenom vremenskom koraku. Modeli s događajima ažuriraju stanje sustava nakon pojave nekih događaja koji utječe na stanje sustava.

3.2.3 Statički i dinamički model

Statički modeli su modeli kod kojih nema promjena stanja u vremenu (vrijeme nije bitno). Dinamički modeli su oni modeli kod kojih se promjene varijabli stanja događaju u vremenu [8].

3.3. Vrste simulacija

Navedeni simulacijski modeli doveli su do formiranja četiri osnovnih tipova simulacija, koji se razlikuju kako po pristupu modeliranja i tipu problema koji se njima rješavaju, tako i tehnikama modeliranja i simulacija koje su za njih razvijene [9].

3.3.1 Monte Carlo simulacija

Statistička simulacija, koristi se za statičke tipove simulacija kod kojih se u rješavanju problema koristi stvaranje uzoraka iz razdioba slučajnih varijabli (temelji se na uzastopnom uzorkovanju slučajnih brojeva). Problemi koje rješava mogu biti determinističkog i stohastičkog iskustva [8]. Monte Carlo simulacije koriste se za modeliranje vjerojatnosti različitih ishoda u procesu koji se ne može lako predvidjeti zbog intervencije slučajnih varijabli. To je tehnika koja se koristi za razumijevanje utjecaja rizika i nesigurnosti u modelima predviđanja. Može se koristiti za rješavanje niza problema u gotovo svim područjima kao što su financije, inženjerstvo, lanac opskrbe i znanost. Monte Carlo simulacija se također naziva i simulacije višestruke vjerojatnosti. Razvijena je u tijeku drugog svjetskog rata u Los Alamosu za rješavanje složenih problema vezanih za proizvodnju atomske bombe, poput proračuna raspršenja neutrona u atomskoj jezgri. Problemi kod kojih se koristi Monte Carlo simulacija, mogu biti i determinističkog i stohastičkog karaktera.

3.3.2. Kontinuirana simulacija

Kontinuirana simulacija koristi varijable stanje koje se mijenjaju kontinuirano u vremenu. Kontinuirana simulacija je karakterizirana upotrebom matematičkih formula koje opisuju kako simulirani sustav reagira na različite uvjete. Npr., sklop opisan na razini tranzistora, otpornika i kondenzatora. Ponašanje svih ovih komponenti dobro se razumije i njima upravlja nekoliko jednadžbi koje opisuju njihovo ponašanje. Postoje tri osnovna tipa kontinuiranih simulacijskih modela, a to su sustavi običnih diferencijalnih jednadžbi, sustavi parcijalnih diferencijalnih jednadžbi i sustavska dinamika. Sustavi običnih diferencijalnih jednadžbi su jednadžbe s jednom nezavisnom varijablom (x) po kojoj se deriviraju zavisne varijable (y_i) čija je brzina promjene (dy_i/dx) opisana u odnosu prema nezavisnoj varijabli. Parcijalne diferencijalne jednadžbe sadrže više od jedne nezavisne varijable (x_i) po kojoj se deriviraju zavisne varijable. Sustavska dinamika je simulacija sustava s povratnom vezom, odnosno sustava u kojima postoji veza između ulaza i izlaza sustava [9].

3.3.3 Simulacija diskretnih događaja

Simulacija diskretnih događaja uključuje modele koji se sastoje od strukturiranih kolekcija objekata čije se promjene stanja odvijaju u diskretnim (diskontinuiranim) vremenskim trenucima. Ovakav tip simulacija ima mjesto među veoma detaljnim modelima kontinuiranih simulacija jednostavnih sustava i jako agregiranim modelima sustavske dinamike složenih sustava. Simulacija diskretnih događaja usredotočena je na procese u sustavu na srednjoj

razini apstrakcije. Obično nisu navedeni posebni fizički detalji, poput geometrije automobila ili ubrzanja vlaka. Diskretno modeliranje simulacija događaja široko se primjenjuje u proizvodnji, logistici i zdravstvu. U današnje vrijeme se koristi jedna novija vrsta simulacije diskretnih događaja, a to je metoda modeliranja na temelju agenata (Agent Based Modelling). Koristi se za razvoj računalnih modela simulacije ponašanja sustava te razvoj modela kompleksnih mreža za analizu interakcije entitea sustava iz stvarnih ili umjetno stvorenih podataka [9]. Kod modeliranja na temelju agenata onaj koji izrađuje model identificira agente odnosno objekte koji mogu biti: ljudi u različitim ulogama, oprema i vozila, nematerijalne stvari i organizacije.

3.3.4. Kombinirana diskretno – kontinuirana simulacija

Za neke vrste sustava, ni kontinuirana simulacija, ni simulacija diskretnih događaja ne mogu u potpunosti opisati način rada sustava. To su sustavi koji sadrže i procese koji teku kontinuirano i događaje koji dovode do diskontinuiteta u razvoju sustava. Da bi se takvi sustavi modelirali i simulirani, razvijena je kombinirana simulacija koja omogućuje integriranje kontinuiranih i diskretnih elemenata sustava [9].

3.4 Simulacijski alati

Simulacijski softveri u današnje vrijeme se koriste za razne upotrebe, ali postoje određeni koji se usavršavaju u određenim područjima primjene kao što su proizvodnja, logistika i upravljanje lancem opskrbe. Neki od tih simulacijskih alata su:

- Siemes Tecnomatic
- Any Logic
- FlexSim
- Arena
- Enterprise Dynamics

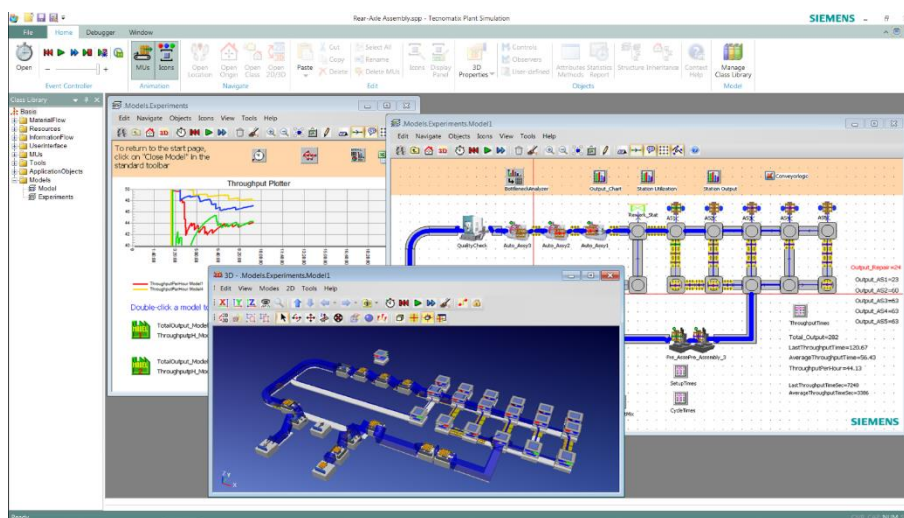
3.4.1. Siemens Tecnomatic

Tecnomatix Plant simulacijski program je objektno orijentirani 3D program koji se koristi za simulaciju diskretnih događaja, što omogućava brzo i intuitivno stvaranje realističnih, digitalnih logističkih sustava (npr. proizvodnje) i na taj način testira svojstva sustava i optimizira njihove karakteristike [10].

Simulacijski softver je izradila njemačka tvrtka Siemens PLM Softver koji je vodeći svjetski dobavljač softvera za PLM (Upravljanje životnim ciklusom proizvoda) i MOM (Upravljanje

produktivnim operacijama). Rješenja koja pruža Siemens u sklopu Smart Innovation Portfolio pomažu proizvodnim tvrtkama da optimiziraju digitalna poduzeća i implementiraju inovacije. Software je napravljen u otvorenoj arhitekturi tako da je kompatibilan s ostalim PDM sustavima (Activex, CAD, Oracle, SQL, ODBC, XML, Socket, OPC) i lako se mogu unijeti razni gotovi modeli. Ima svoju bazu podataka, Teamcenter, koja sakuplja projekte od ostalih korisnika (uz dozvolu) te omogućava njihovo korištenje. Koristi se u raznim industrijama kao što su, automobilska industrija, zračna industrija, procesna industrija, elektronička industrija, itd. Rezultati simulacija osiguravaju informacije potrebne za brzo donošenje dobrih odluka u ranim fazama planiranja proizvodnje. Pored toga, na ovaj način moguće je optimizirati protok materijala, korištenje resursa i logistike na svim razinama planiranja - počevši od globalnih proizvodnih pogona, preko lokalnih poduzeća, do pojedinačnih linija.

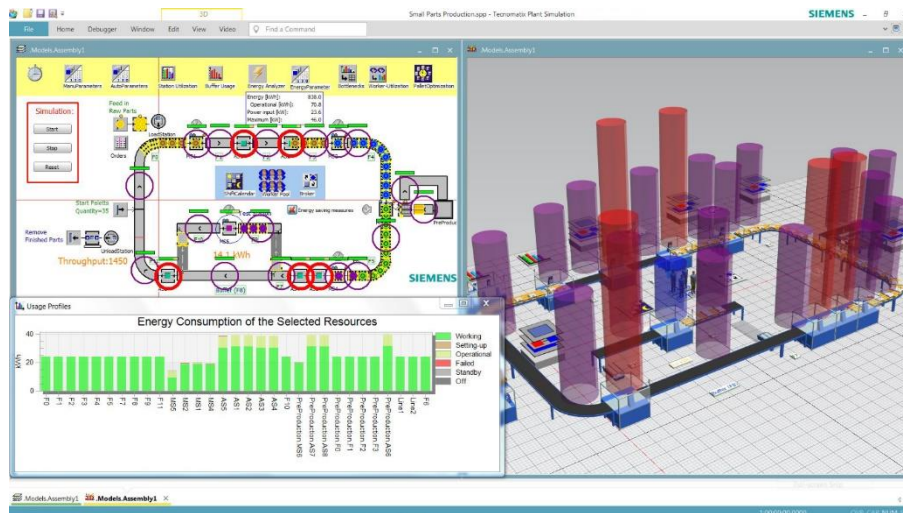
Aplikacija Tecnomatix Plant Simulacija dostupna je na: engleskom, njemačkom, japanskom, mađarskom, ruskom i kineskom. Vrlo važna značajka programa je mogućnost modeliranja i simuliranja procesa prateći paradigme objektno orijentiranog programiranja. Tecnomatix Plant Simulacija pruža učinkovite i jednostavne analitičke alate koji omogućuju otkrivanje uskih grla (Bottleneck Analyzer), praćenje protoka materijala (Sankey Dijagrami) i identifikacija viška resursa (Čarobnjak za grafikone).



Slika 3. Siemens Tecnomatix [10]

Simulacijski softver nudi mogućnost optimiziranja performansi i potrošnje energije postojećih proizvodnih sustava poduzimajući mjere koje su provjerene simulacijskim modelima. Tecnomatix Plant Simulacija uključuje integrirani alat za analizu energije koji pokazuje trenutnu, maksimalnu i ukupnu potrošnju energije. Softver dinamički vizualizira potrošnju

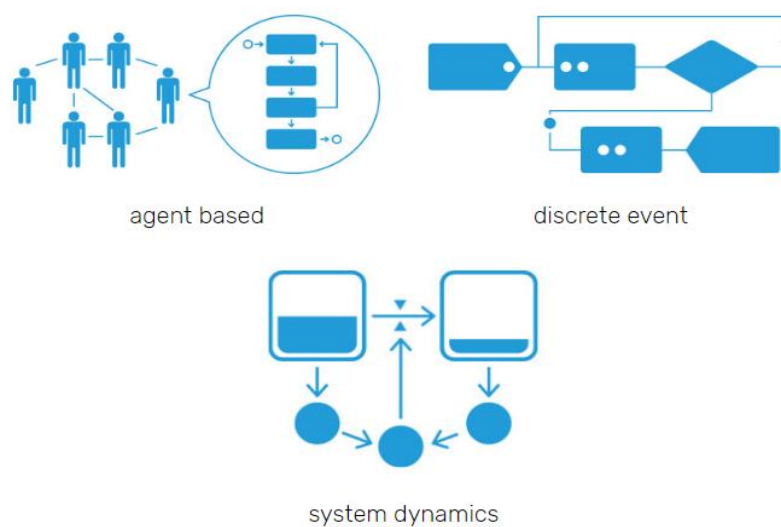
energije tijekom simulacije omogućavajući da se vidi potrošnja energije tijekom radnog vremena i zakazanih pauza.



Slika 4. Prikaz potrošnje energije [10]

3.4.2. AnyLogic

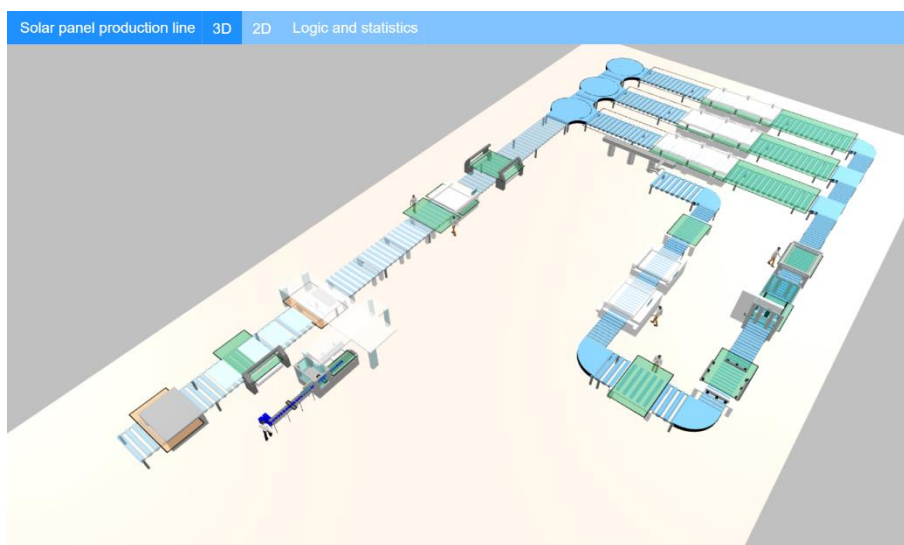
AnyLogic je prvi i jedini simulacijski softver koji nudi mogućnost modeliranja tri vrste metodologije simulacija. Diskretne simulacije, sustavske dinamike tj. simulacije s povratnom vezom i simulacijske sustave temeljene na agentima (agent based simulation) sve unutar istog programskog jezika i istog programa. Te tri metode se mogu koristiti u bilo kojoj kombinaciji, s jednim softverom, za simulaciju poslovnih sustava visoke složenosti [11].



Slika 5. Tri vrste metodologije simulacija [11]

Većina je slučajeva u stvarnom svijetu složena i prikladno je opisati različite dijelove sustava različitim metodama. Mogućnost hvatanja poslovnih sustava s njihovom stvarnom složenošću i interakcijama može se ozbiljno ograničiti samo jednom metodom. Neke će elemente sustava morati isključiti ili ih razviti zaobilazno rješenje.

Ako postoji mnogo neovisnih objekata, AnyLogic predlaže korištenje pristupa zasnovanom na agentu. Ako postoje samo podaci o globalnim ovisnostima, korištenje sustavske dinamike. Ako je sustav lako opisiv kao proces, koristiti diskretnu simulaciju. Ako sustav ima sve te aspekte, probati kombinirati sve tri metode. Pristup svim metodama istovremeno daje fleksibilnost potrebnu za uspješno rješavanje problema. Na slici 6. se može vidjeti model proizvodnje solarnih ćelija. U ovom se modelu solarne ćelije sastavljaju od strojne opreme i postavljaju na posebno pripremljeno staklo pomoću sustava za polaganje. Zatim se stakleni modul sa solarnim ćelijama



Slika 6. Simulacija proizvodnje solarnih ćelija [11]

Grafičko sučelje, programski alati i datoteka entiteta tj. objekata omogućuje brzo modeliranje različitih područja poput proizvodnje, logistike, poslovnih procesa, ljudskih resursa i ponašanja potrošača. Fleksibilnost i složenost softvera AnyLogic omogućava korištenje simulacije i modeliranje u svim sektorima i odjela raznih poslovanja, osiguravajući isplativije donošenje odluka i učinkovitije rješavanje problema.

3.4.3. FlexSim

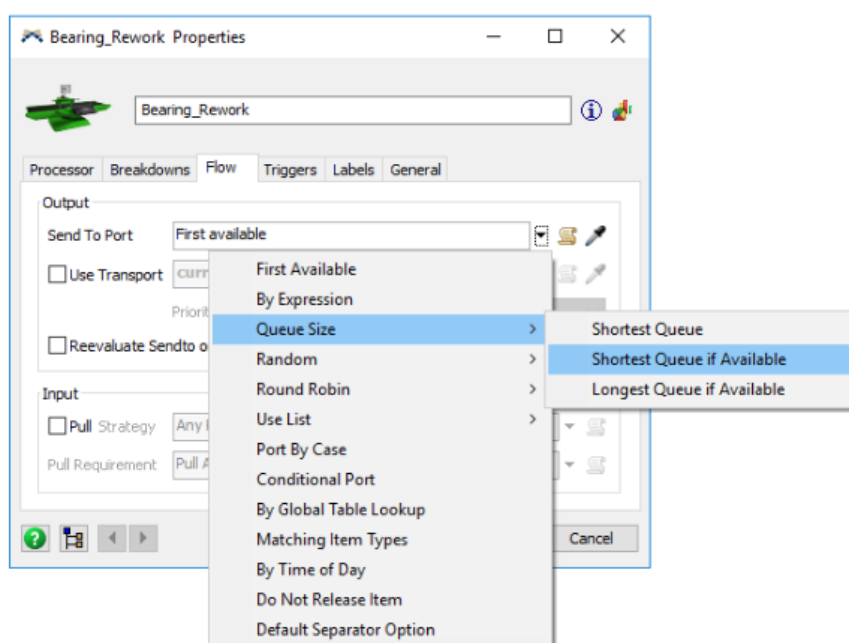
FlexSim je diskretni simulacijski softver razvijen od tvrtke FlexSim Software Products. Tvrtka FlexSim Software Products također nudi FlexSim Healthcare program specijalno

namijenjen za rješavanje problema u zdravstvenim ustanovama. Također postoje dodaci *Optquest* i *Expertfit* koji nude alate za dodatne detaljnije statističke analize unutar simulacija. Kao softver za simulaciju opće namjene, *FlexSim* se koristi u mnogim poljima: proizvodnja, rukovanje materijalima, logistika i distribucija, prijevoz, nafta, trgovina, aerodromi i ostalo. *FlexSim* je poznat po iznimno realističnim 3D prikazima koji nudi korisnicima bolji uvid u rad sustava. Radi na principu „*what if*“ analize gdje se promjenom ulaznih parametara dobiva brza povratna informacija o utjecaju tih promjena na ukupan procesa [12].

Tvrtke koriste softver za:

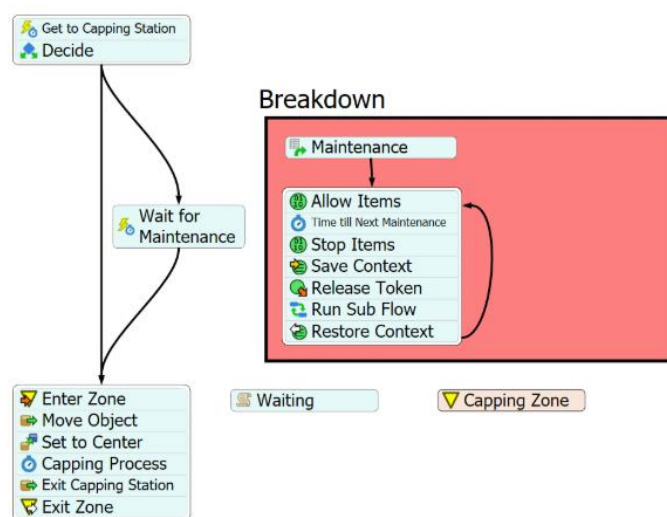
1. Ispitivanje za učinkovitiju raspodjelu sustava
2. Smanjenje vremena čekanja i redova čekanja
3. Utvrđivanje optimalne veličine serija i redosljed dijelova
4. Analizu učinka vremena postavljanja i promjene alata
5. Optimiziranje prioriteta i logiku otpremu roba i usluga.

Simulacija se stvara tako da se iz biblioteke objekata koji predstavljaju određeni entitet unutar sustava koji se želi simulirati jednostavno u 3D pogledu povuče na prozor izrade simulacije. Prilagodba pojedinog entiteta je jednostavna, samo se odabere iz unaprijed konfiguriranog ponašanja, mogućnosti miješanja i podudaranja, pa čak i stvaranja vlastito ponašanje. Na slici 7. se može vidjeti izbornik koji se pojavi prilikom odabira određenog entiteta.



Slika 7. Korisničko sučelje [12]

Nude se razne mogućnosti konfiguracije njegovog ponašanja. Ukoliko na izborniku ne postoji tražena naredba, FlexSim dolazi uz snažan programski jezik FlexScript koji nudi mogućnost modeliranja stotina različitih naredbi. Također postoji mogućnost pisanja naredbi u C++ programskom jeziku. Alat *ExpertFit* unutar softvera FlexSim služi za utvrđivanje statističkih zakonitosti za prikupljene podatke određenog entiteta. Nudi se više od 40 različitih distribucija podataka. Dijagram toka koji se može vidjeti na slici 8. jedan je od najnovijih alata. Koristi se za unaprijed izradu blokova aktivnosti za izgradnju osnovnih ili složenih logika u poznatom okruženju. Čuva logiku na jednom prikladnom mjestu i dobro se prilagođava s bilo kojim modelom koji se mijenja.



Slika 8. Dijagram toka [12]

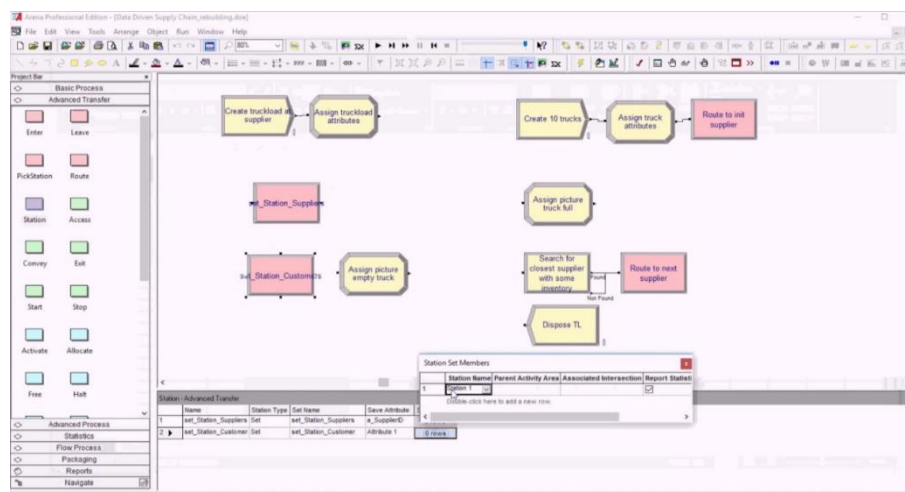
3.4.4. Arena

Arena je simulacijski softver namijenjen za simulaciju diskretnih i automatiziranih događaja razvijen od strane System Modelling i kupljen od Rockwell Automation 2000. godine [14]. Koristi SIMAN programski jezik za izradu simulacijskih jezika. Brojne tvrtke koriste ovaj alat. Neke od njih: General Motors, UPS, IBM, Nike, Xerox, Lufthansa, Ford Motor Company. Postoje osnovne komponente softverskog alata ARENA koje je potrebno poznavati za izgradnju modela, a to su:

- Entiteti - stvari, subjekti, koje prolaze kroz proces koji se modelira. Razni tipovi subjekata koji mogu prolaziti kroz procese kao što su ljudi, prijevozna sredstva, proizvodi i dr.
- Resursi - subjekti koji obavljaju posao nad entitetima. Kao što može biti više tipova entiteta tako može biti više izvora resursa za rad na jednom objektu, entitetu.

- Atributi su karakteristike koje su zajedničke svim subjektima istog tipa. Entiteti mogu biti različitog tipa, no svaki tip ima određene attribute poput vremena dolaska na posluživanje i trajanje posluživanja. Atributi su važan dio za izradu modela.
- Događaji (Events) su stvari koje se događaju subjektima, entitetima, dok prolaze kroz proces. Najčešći događaji u procesu su dolazak i odlazak entiteta nakon posluživanja.
- Varijable su slične atributima. Razlika je što se one primjenjuju na cijeli proces a ne samo na određen tip subjekta, te se često nazivaju globalne varijable. U većini procesa postoji samo jedna globalna varijabla i ona označava sat koji prati vrijeme simulacije.

Korisnik izrađuje model za simulaciju na način da povlači resurse iz baze podataka samog programa jednostavnim „drag and drop“ principom. Moduli, koji postoje u raznim oblicima i s raznim mogućnostima. Dodavanjem modula automatski se pojavljuje prikaz modula u prozoru proračunskih tablica. Linijama se povežu željeni moduli za specijalni tok entiteta koji predstavljaju stvari i subjekte modeliranog sustava. Arena može biti integrirana s Microsoft alatima. S Visual Basic aplikacijama može se dodatno konfigurirati i automatizirati rad resursa kroz razne algoritme. Također podržava Microsoft Visio dijagram toka, i u mogućnosti je čitati i slati podatke iz Excell tablica. Postoje komercijalne verzije i studentske besplatne verzije.



Slika 9. Arena [13]

3.4.5. Enterprise Dynamics

Enterprise Dynamics (ED) je objektno – orijentirani softverski program za modeliranje, vizualizaciju i kontrolu dinamičkih procesa [15]. ED služi za izrade modela proizvodnje, skladišta, rukovanje materijalima i logistike. Također se koristi u aerodromima za analizu protoka putnika i prtljage, javnim događanjima, željezničkoj industriji, stadionima i arenama. Softver se sve više koristi za modeliranje, simuliranje i vizualizaciju usluga i protoka

podataka unutar raznih sustava. Uz ove tradicionalne namjene, ED također se koristi za nadgledanje procesa u stvarnom vremenu.

Enterprise Dynamics® omogućava [15]:

- Testiranje budućih sustava u ranoj fazi dizajna.
- Stvaranje digitalnih blizanaca raznih objekata.
- Ispitivanje i poboljšavanje predloženih modifikacija koje proizlaze iz npr. Lean Manufacturing ili Six Sigma metodologija, bez utjecaja na operativno okruženje.
- Modeliranje i analiziranje nekoliko scenarija, poput planiranja kapaciteta.
- Optimiziranje i osiguravanje plana za ulaganja za proizvodnju i transportnu opremu.
- Procjenjivanje utjecaja nesigurnosti i varijacija, poput kvarova i promjenjivog vremena procesa na performanse sustava.
- Analiziranje i vizualiziranje operativnih sustava u 2D, 3D i VR animaciji.

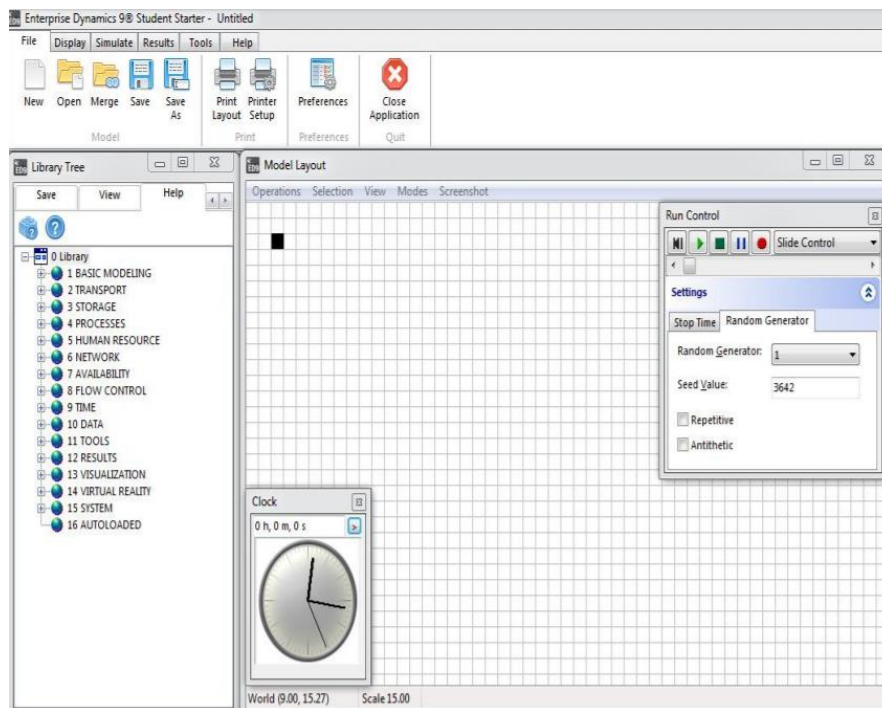
Enterprise Dynamics je baziran na Taylor II softveru kojeg je razvila tvrtka F&H Simulations. 1998. godine predstavljena je novorazvijena platforma za simulaciju Taylor Enterprise Dynamics, a 2000. godine tvrtka F&H Simulations kupila je konzultantska tvrtka i distributer simulacijskog softvera Incontrol Business Engineers. Novo ime tvrtke postalo je INCONTROL Simulation solutions, a Taylor ED preimenovan je u Enterprise Dynamics. U to se vrijeme F&H Simulations, koji sada naziva Flexsim Software Products, osamostalila i razvila novi simulacijski softver pod nazivom Flexsim [15].

Neke od poznatijih tvrtki koje koriste Enterprise Dynamics [14]:

- Volvo Group
- DMT GmbH
- TATA Steel
- Vanderlande Industries
- Nacco Material Handling Group

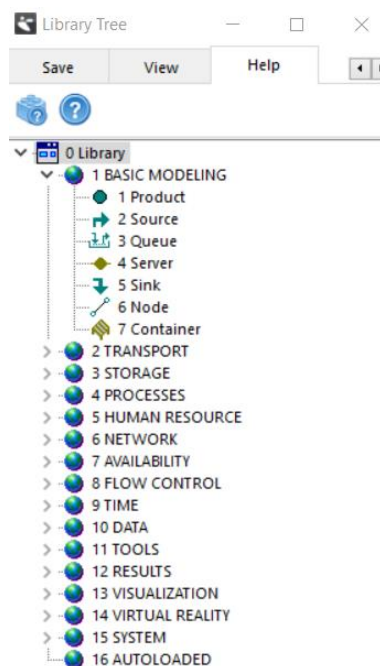
Ključnu ulogu u ED softveru imaju objekti koji se zovu „Atomi“ koji predstavljaju bilo koji proces ili stvar kao što je stroj, brojilo, proizvod, ali može i biti nefizikalna veličina poput grafa. Na početku izrade simulacije u programu, korisnik postavlja razne željene atome iz baze podataka samog softvera na plan modela. Dostupno je više od 200 različitih atoma za izradu modela, i mjesečno se izrađuju novi atomi koji se mogu preuzeti s taylor-ed.com web stranice. Odabir atoma ponajviše ovisi o tome koji objekt se želi simulirati i na koji način. Ukoliko niti jedan atom nije u mogućnosti reprezentirati željeni objekt u sustavu, moguće je

samostalno izraditi svoj atom koristeći Taylor Eds Atom Editor. Izgled korisničkog sučelja softvera prikazan je na slici 10.



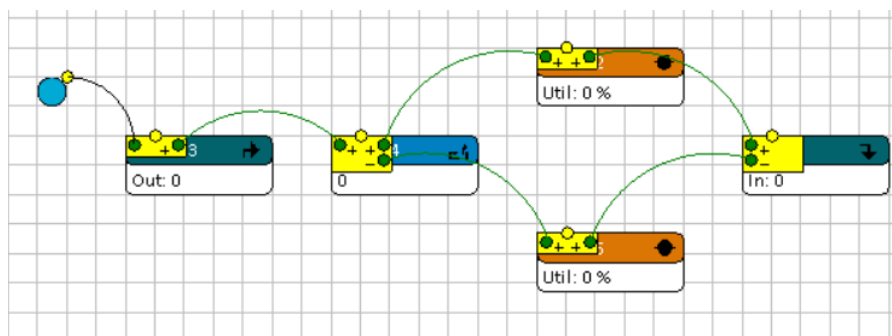
Slika 10. ED korisničko sučelje [14]

Postoje 4 prozora koja se mogu manipulirati. Najveći prozor u kojemu se izrađuje model, tj. u kojemu se ubacuju željeni atomi („model layout“), prozor za odabir atoma („library tree“), prozor za kontrolu simulacije („run control“) i sat za prikaz prijedrenog vremena.



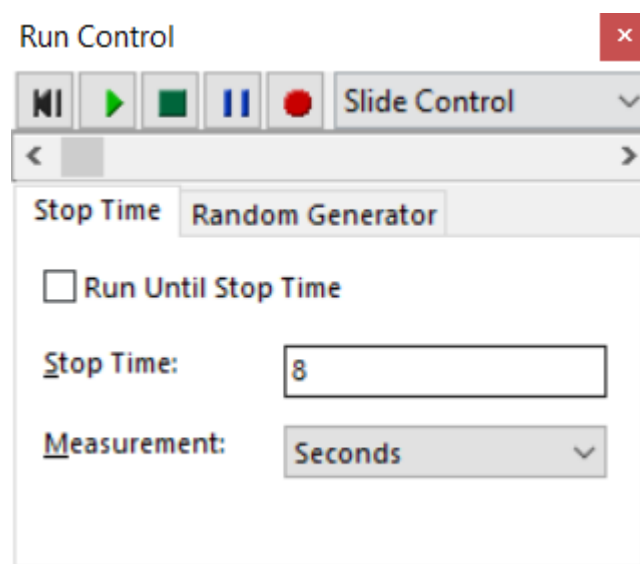
Slika 11. Prozor za odabir atoma [14]

Prozor *library tree* (slika 11) se sastoji od svih ponuđenih atoma podijeljenih u grupe kao što su: osnovni modeli, transport, procesi, ljudski resursi, i drugi. U grupi osnovni modeli su najčešće korišteni atomi: source, queue, server, sink i product te će detaljnije biti objašnjeni u nastavku rada.



Slika 12. Povezivanje atoma [14]

Nakon što su se odabrali atomi za izradu modela, sljedeći korak je njihovo međusobno povezivanje (slika 12) na način koji najbolje imitira prolaz entiteta u simuliranom sustavu. Svaki atom ima mogućnost imanja više ulaznih i izlaznih kanala. To se mijenja jednostavnim klikom „+“ na kraj ulaznog illi izlaznog kanala. Svakom od atoma se može naknadno mijenjati konfiguracija, tj. logika rada koja utječe na simulaciju. Dvostrukim klikom na određeni atom, otvara se izbornik u kojemu se mogu podesiti određeni parametri.



Slika 13. Prozor manipulacije vremena [14]

Simulacija se upravlja pomoću prozora „Run control“ prozora prikazanog na slici 13. Moguće je definiranje trajanja simulacije i brzina odvijanja. Odvijanje simulacije moguće je promatrati u 2D, 3D i VR prikazu. Nakon što je model kreiran, atomi povezani i pripisane su im

određene značajke tj. logike ponašanja moguće je pokrenuti simulaciju za dobivanje rezultata. Uz pojedinačne simulacije, korisnik može definirati višestruko pokretanje po želji više scenarija. ED uključuje i modul OptQuest Optimizer koji omogućava korisnicima da definiraju uvjete, varijable i ograničenja koja treba testirati, koliko puta svaku simulaciju treba izvesti, duljinu svakog prolaza za dobivanje što kvalitetnijih podataka [15]. Rezultati simulacija mogu biti prikazani na više načina, u grafičkom ili tabličnom prikazu. Moguć je odabir više vrsta grafova za prikaz rezultata te je moguće ispisati („Summary report“) tj. sažeto izvješće u kojem su prikazani određeni podaci za svaki atom uključen u simulaciju.

Jedan od novijih razloga korištenja simulacija je trenutna pandemija virusa COVID 19. Način života svih ljudi na svijetu se promijenio i stručnjaci tvrde dok se ne pronade cjepivo da će ljudske navike morati biti promijenjene. Sasvim je sigurno da u toj epidemiji koronavirusa najteže pada socijalno distanciranje radi mogućeg kapljičnog prenošenja virusa. Upravo je ta socijalna distanca učinila velike promjene i uvela određena ograničenja u objektima gdje inače ulazi veliki broj ljudi, prvenstveno trgovine.

Trgovci traže smjernice za reorganiziranje unutarnjih i vanjskih područja i objekata kako bi kupci ostali sigurni i smanjili utjecaj zaraze COVID 19. ED nudi mogućnost jednostavnih analiza mogućih rješenja za suočavanje s virusom. Simulacija u ovim slučajevima olakšava dizajniranje i optimiziranje tih područja i objekata.

Slika 14. prikazuje jednostavan primjer simulacije održavanja društvene udaljenosti u supermarketu. Točka označava osobu, a krug oko nje označava minimalnu udaljenost do drugih osoba. Unutar simulacije je moguće programirati entitete koji predstavljaju kupce u trgovini, te time dobiti broj bliskih prolazaka između ljudi.



Slika 14. Simulacija trgovine [14]

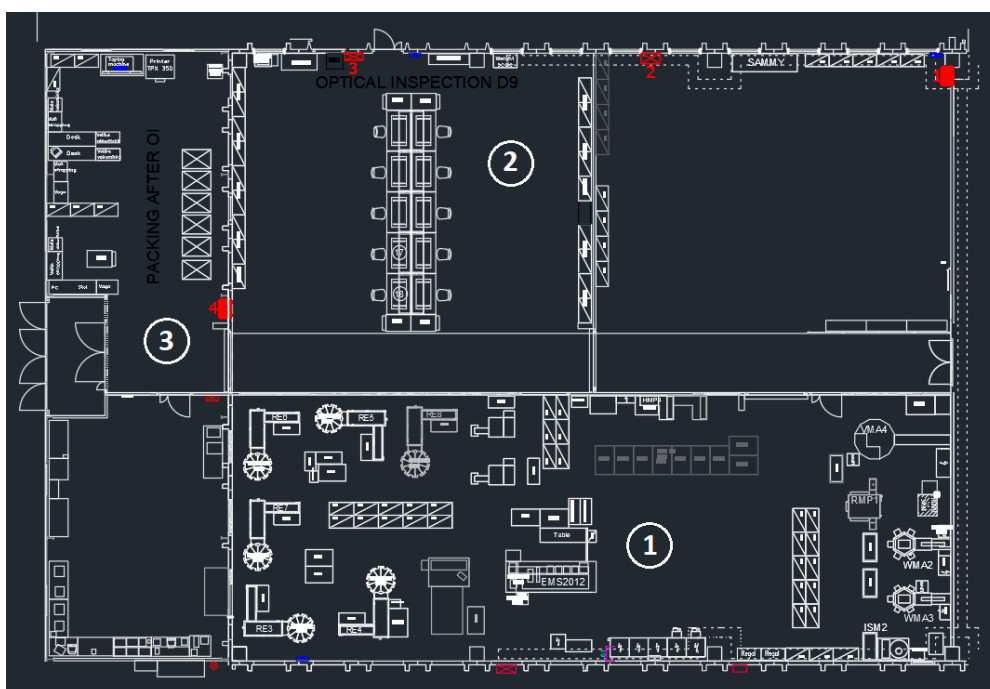
4. PROIZVODNI PROCES TVRTKE SELK

Kao što je rečeno, tvrtka SELK se sastoji od dva sektora proizvodnje: proizvodnja standardnih višeslojnih keramičkih komponenti i proizvodnja Piezo aktuatora. Jedan od zadataka prilikom odrađivanja prakse u tvrtki SELK bio je analiza modifikacije tj. promjene proizvodnog procesa u sektoru kontrole PTC višeslojnih keramičkih komponenti. Upravo će taj proizvodni proces biti uključen u simulaciju. Proces kontrole unutar sektora proizvodnje PTC komponenti se sastoji od malo koraka, ali od iznimno velikog broja prolaza proizvoda s obzirom na tehnološku razvijenost tj. brzinu strojeva koji kontroliraju proizvode. Poluproizvodi koji dolaze iz Austrije nakon ulaza u PTC sektor prvo prolaze kroz strojeve za mjerenje otpora i sortiranje samih komponenti. Nakon toga slijede radne stanice, na kojima radnici vrše 100 % optičku kontrolu svake pojedine komponente te stavljaju u drugačija pakiranja. Nakon što se skupi dovoljan broj paketa na radnim stanicama, šalju se u sljedeću prostoriju gdje se vrši završno pakiranje sukladno zahtjevima kupca. Unutar sektora kontrole PTC komponenti dolazi do izmjene raznih vrsta poluproizvoda, različitih po geometriji i traženim tehnološkim svojstvima kao što je mogućnost držanja različitog napona struje. Mjesečno kroz proizvodnju prođe i do 30 različitih vrsta proizvoda. Za svrhu simulacije korištena su 6 tipova najčešće korištenih poluproizvoda za koja se smatraju da reprezentativno predstavljaju i ostale poluproizvode. Za iste te komponente će biti objašnjen njihov proces kontrole.

To su poluproizvodi:

- 1.B59303R 140B210V61
- 2.B59504R 150B 10V60
- 3.B59390R 80B 10V60
- 4.B59053U 220B 10V60
- 5.B59126A 130B 10V61
- 6.B59045U 240B 10V60

Radi jednostavnosti, prilikom spominjanja poluproizvoda koristiti ćemo njihove redne brojeve od 1 do 6.



Slika 15. Tlocrt PTC sektora

Na slici 15. se vidi dio proizvodnje u kojemu se odvija proizvodni proces čiji rad će se simulirati. Proces kontrole PTC komponenti se odvija u prostorijama 1,2 i 3 kako je naznačeno na slici. U prostoriji 1 se nalaze svi strojevi koji su uključeni u prvi korak procesa, a to je strojna kontrola otpora poluproizvoda. U tablici 1. se može vidjeti proizvodni korak za svaki pojedini poluproizvod.

Tablica 1. Proizvodni koraci

Proizvodni korak /Materijal	1.	2.	3.	4.	5.
Materijal 1	Ulaz robe	Kontrola otpora	Optička kontrola	Pakiranje	
Materijal 1	Ulaz robe	Kontrola otpora	Optička kontrola	Pakiranje	
Materijal 3	Ulaz robe	Kontrola otpora	Printanje koda	Optička kontrola	Pakiranje
Materijal 4	Ulaz robe	Kontrola otpora	Optička kontrola	Pakiranje	
Materijal 5	Ulaz robe	Kontrola otpora	Optička kontrola	Pakiranje	
Materijal 6	Ulaz robe	Kontrola otpora	Optička kontrola	Pakiranje	

4.1 Strojevi u proizvodnom procesu

U tablici 2. mogu se vidjeti svi strojevi koji ulaze u model početne simulacije. Svi strojevi se nalaze u prostoriji jedan i prvi su u procesu kontrole PTC komponenti, osim stroja Printer TPX koji se nalazi u prostoriji 3 te čija će uloga u nastavku biti objašnjena.

Tablica 2. Tablica strojeva

Naziv stroja	Količina
Resistomat	6
VMA	2
EMS 2012	1
Printer TPX	1
Ukupno strojeva	10

Resistomat

Resistomati služe za mjerenje i sortiranje do 7 klasa otpora dijelova. Stroj uzima sirovi komad s pokretne trake, kroz vodilice ga navodi do mjesta mjerenja te izvrši mjerenje. Ako su parametri unutar granica, komad pusti u žlicu za prihvat koja ga spušta u točno određenu kutiju za dijelove s tim specifikacijama. Ako je komad loš, onda ga ispušta u kutiju za škart.

VMA

VMA služi za mjerenje i sortiranje do 7 klasa otpora. Disc heater dijelova (s i bez printanog otiska) uzima sirovi komad s pokretne trake, kroz vodilice ga navodi do gnijezda na letvi gdje se dijelovi kreću do mjesta stavljanja otiska na komad. Zatim se izvrši mjerenje, te se ispuštaju dijelovi u kutije prema klasama ili ako je komad loš, onda ga ispušta u kutiju za škart.

EMS

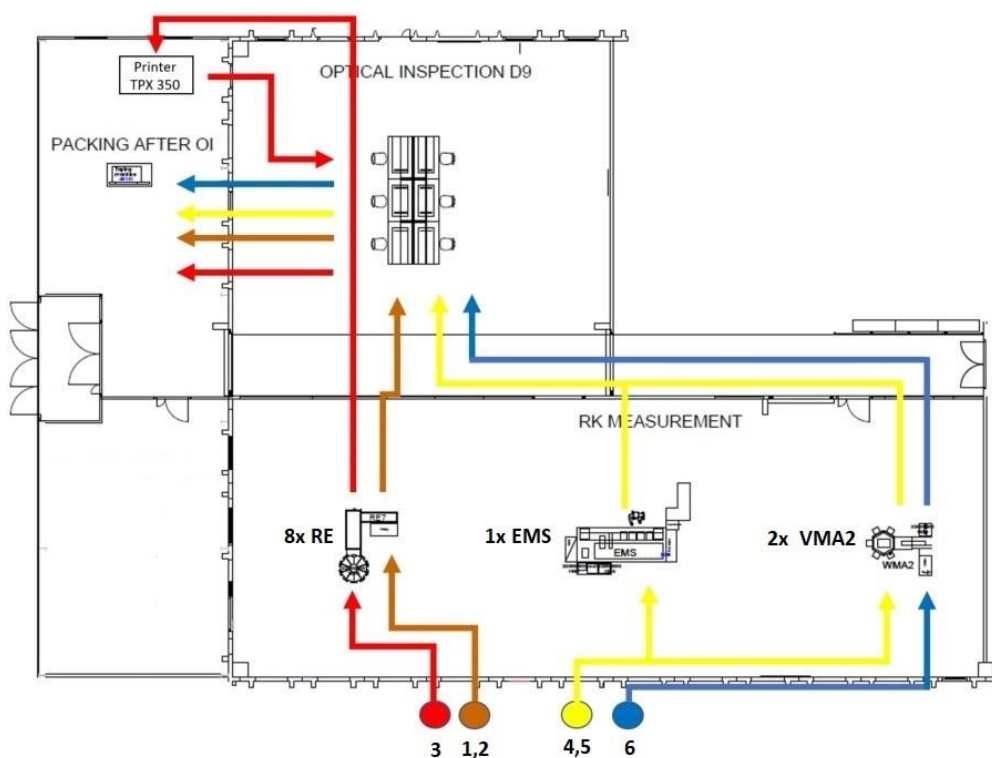
Služi za mjerenje i sortiranje do 7 klasa otpora Disc heater i Motorstart dijelova (s i bez printanog otiska). Djelatnik stavlja komade na ploču s gnijezdima, kojom se transferiraju dijelovi u metalnu ploču za mjerenje, zatim tu metalnu mjernu ploču stavlja u stroj. Stroj sam, u određenim ciklusima, vuče ploču kroz pozicije. Također odrađuje izbacivanje loše izmjerenih dijelova, stavljanje otiska na komade, nakon toga ploča s dobrim dijelovima izađe

van stroja, a djelatnik komade stavi u kutiju s kojom će dijelove dalje transportirati na sljedeći korak obrade.

PRINTER TPX

Printer TPX nalazi se u odjelu pakiranja, roba se morala nakon električnog mjerenja dijelova, iz pogona električnog mjerenja, nositi u pogon pakiranja, te se tamo obavljalo printanje na komade putem sitotiska, a zatim su se komadi nosili u odjel optičke kontrole. Sada se ta procedura svela na to da se komadi označavaju/printaju usporedno s električnim mjerenjem dijelova na stroju EMS. Komadi na istom tom stroju se i označavaju laserskim printerom, i nakon toga komadi idu na optičko sortiranje.

Printer TPX služi tj. služio je za ispis raznih kodova na komponente koje bi prošle strojnu kontrolu napona. S obzirom da se s vremenom na strojeve u prostoriji jedan počeli dodavati alati za mogućnost laserskog printanja na komponente, printer TPX je gubio svoju svrhu. Svi poluproizvodi, osim poluproizvoda 3, su prešli na ispisivanje vlastitog koda na strojevima koji vrše kontrolu napona. Poluproizvod 3 je zadnji dobio mogućnost ispisa koda paralelno s kontrolom otpora i upravo taj prijelaz je cilj ispitivanja simulacije.



Slika 16. Tok materijala

Na slici 16. je vidljiv tok poluproizvoda kroz proizvodnju. Na dnu slike su naznačeni brojevi vrsti poluproizvoda te je različitom bojom prikazan drugačiji tok. Može se primijetiti da određeni proizvodi idu na samo određene strojeve, te da neki proizvodi mogu ići na dva stroja – proizvod 4 i 5. Vidljivo je također da se tok proizvoda tri razlikuje upravo po potrebi odlaska na Printer TPX čime se gubi određena logičnost puta koju ostali komadi imaju.

Unatoč tome što svi strojevi u procesu veliku većinu vremena rade sami, postoje radnici koji poslužuju stroj. U tablici 3. su vidljive sve aktivnosti vezane uz stroj resistomat. Aktivnosti su podijeljene po grupama: glavne aktivnosti, pomoćne aktivnosti i druge aktivnosti. Također su u tablici napisani mogući prekidi tj. aktivnosti u kojima je radnik koji opslužuje stroj u nemogućnosti izvršavati svoj posao. To su prekidi uzrokovani kvarovima i prekidi uzrokovani procesom.

Tablica 3. Tablica aktivnosti stroja RES

1	Glavna aktivnosti
1	Mjerenje dijelova (operator stoji)
2	Mjerenje dijelova - usipava dijelove na ulaznu traku (operator radi)
3	Mjerenje dijelova - pražnjenje škarta (operator radi)
4	Mjerenje dijelova - kontrola upisanih podataka Los lista-PC (operator radi)
5	Mjerenje dijelova - uzima novi los iz regala (operator radi)
6	
2	Pomoćne aktivnosti
7	Operator vadi punu kutiju izmjerenih dijelova iz stroja i stavlja praznu
8	Operator vadi komad koji je zapeo u kosoj vodilici
9	Operator vadi komad koji je zapeo u horizontalnoj vodilici
10	Operator vadi polomljene dijelove sa ulazne trake
11	
3	Prekidi uzrokovani kvarovima
12	Komad zapeo u kosoj vodilici i stroj ne radi (operator stoji)
13	Neispravan senzor na kosoj vodilici - djelatnik održavanja
14	Ulazna traka ugašena, ne puni stroj
15	Operaterka popravlja sklop sa mjernim iglama (operator radi)
16	
4	Prekidi uzrokovani procesom
17	Kutija napunjena max. brojem izmjerenih komada
18	Preventivno održavanje - djelatnik održavanje
19	
5	Druge aktivnosti
20	Nema robe (operator stoji)
21	Promjena cilindara za "korpe" ruku karusela - djelatnik održavanja

Nakon strojne kontrole otpora slijedi 100 % - na optička kontrola od strane radnika na za to predviđenim radnim stanicama. Aktivnosti koje spadaju u optičku kontrolu su sljedeće:

1. Priprema radnog mjesta za početak rada (rukavice, papirići, zeleni kartončić, bijeli kartončić, pakirne kutije...)
2. Otvaranje bijele transportne kutije, odlaganje poklopca i spužve
3. Uzimanje kartona, upisivanje podataka na njega.
4. Montiranje kartona u kartonsku kutiju i stavljanje na stalak
5. Uzimanje komada i transportne kutije, stavljanje na stavljanje na jastuk, gledanje 1. i 2. strane. Slaganje u stupić i stavljanje u kartonsku kutiju.
6. Završavanje punjenja kartonske kutije s bijelim kartončićima i odlaganje pune kartonske kutije sa strane.
7. Odljepljivanje naljepnice s prazne bijele transportne kutije i odlaganje kutije i spužvi.
8. Odošanje dijelova, oznaka, alata i pomoćnog materijala.

Na slici 17. je vidljiva jedna od radnih stanica za 100 % - nu kontrolu komponenti.



Slika 17. Radna stanica optičke kontrole

4.2 Vremena i količine vezana uz proizvodni proces

PTC komponente su sitni poluproizvodi i u kratkom vremenu se obradi velika količina. U proizvodnju dolaze u kutijama u točno definiranom broju, ovisno kako za koji poluproizvod, koji se zove „Loss“. To su brojke između 45 000 i 90 000 komada po kutiji. Svi poluproizvodi, osim broja 3, nakon što prođu prvi proces tj. kontrolu otpora se dijele u manje kutije radi lakšeg manipuliranja. Poluproizvod 3 se dijeli u manje kutije tek nakon sljedeće operacije, a to je printanje koda na poluproizvodu. Nakon što se stave u manje kutije, idu do radnih stanica, na optičku kontrolu gdje ih radnici nakon što ih kontroliraju odvajaju dalje za pakiranje. Svaki poluproizvod ima točno definiran broj kutija za završno pakiranje.

Tablica 4. Tablica količina

Poluproizvod	1	2	3	4	5	6
Veličina Lossa – broj komada	90 000	92 400	90 000	64 000	80 000	60 140
Broj kutija	200	264	409	160	400	97
Broj komada po kutiji	450	350	220	400	200	620
Potreban broj poluproizvoda za pakiranje	2250	1750	1100	4000	2000	6200
Potreban broj kutija za pakiranje	5	5	5	10	10	10

U tablici 4. se vidi na koji način poluproizvodi idu kroz proizvodnju. Npr. broj jedan dolazi u proizvodnju u „Lossu“ od 90 000 komada, kao takav dolazi do prve točke proizvodnog procesa, tj. kontrole otpora gdje ga sam stroj dalje prebacuje u manje kutija, točnije u njih 200. U svakoj kutiji ima točno 450 komada. Iste te kutije dolaze do radnih stanica na optičku kontrolu, nakon koje odlaze u istom broju po kutiji. U pakiranju kad se skupi dovoljan broj kutija, tj. za materijal jedan kad se skupi pet kutija one se mogu pakirati.

U tablicama 5., 6. i 7. su dane vrijednosti trajanja određenih operacija na određenim poluproizvodima. Sva vremena su zadana u sekundama i sva vremena su zadana za količine koje su maloprije objašnjene. To znači da poluproizvod jedan dolazi na stroj RES gdje je potrebno 104 400 sekundi da stroj obradi cijeli „Loss“ tj 90 000 komada. Nakon kontrole otpora poluproizvod jedan koji je podijeljen u 200 manjih kutija ide na neku od slobodnih radnih stanica gdje se odvija optička kontrola. Vrijeme optičke kontrole je zadano za jednu kutiju, u slučaju poluproizvoda jedan za kutiju od 450 komada. Vrijeme potrebno da se odradi jedna takva kutija ja 882 sekunde. Čim se odradi pet kutija, odlaze u pakiranje gdje je za poluproizvod jedan potrebno 206 sekundi da se pakira u finalni proizvod.

Također je za svaki poluproizvod zadano vrijeme pripreme stroja kod izmjene vrste poluproizvoda. Vremena strojeva za obradu kontrole otpora poluproizvoda su fiksna i njihove vrijednosti se mogu vidjeti u tablici 5.

Tablica 5. Vremena kontrole otpora

Vrijeme/poluproizvod	1	2	3	4	5	6
Kontrola otpora	104 400	107 184	104 400	23 040	18 400	21 654

Vremena ostalih proizvodnih procesa, kao što su priprema stroja, optička kontrola i pakiranje (tablica 6 i 7), variraju te je za svaki od tih procesa vrijeme obrade podešeno tako da odgovara vremenima obrade u stvarnosti. Više o raspodjeli vremena slijedi u nastavku rada.

Tablica 6. Vremena pripreme stroja i optičke kontrole

Poluproizvod/Vrijeme	Priprema stroja	Optička kontrola
1	Max(0,Normal(1 825,236))	Max(0,Normal(882,28))
2	Max(0,Normal(1 873,248))	Max(0,Normal(548,33))
3	Max(0,Normal(1 825,236))	Max(0,Normal(424,23))
4	Max(0,Normal(8 762,546))	Max(0,Normal(167,15))
5	Max(0,Normal(2 428,112))	Max(0,Normal(109,5))
6	Max(0,Normal(8 234,796))	Max(0,Normal(225,17))

Tablica 7. Vremena pakiranja

Poluproizvod/Vrijeme	Pakiranje
1	Max(0,Normal(206,48))
2	Max(0,Normal(158,39))
3	Max(0,Normal(150,22))
4	Max(0,Normal(184,43))
5	Max(0,Normal(143,56))
6	Max(0,Normal(170,61))

5. SIMULACIJA PROIZVODNOG PROCESA TVRTKE SELK

Simulacija proizvodnje je izrađena u programu Enterprise Dynamics 10.1 Student pro. Istraživanje je provedeno u nekoliko faza. U prvoj fazi je izvršeno snimanje zatečenog stanja, što je izvedeno prikupljanjem podataka o proizvodnji u periodu od mjesec dana. U drugoj fazi je stvoren simulacijski model sustava. Simulacijski pokusi su vršeni u trećoj fazi. U završnoj fazi izvršena je obrada rezultata.

5.1 Operacije unutar modela

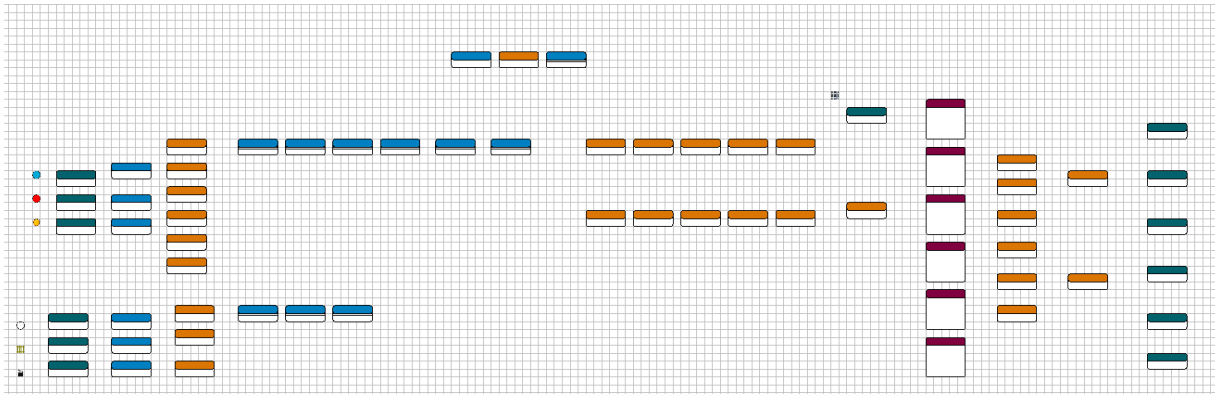
Za izradu simulacijskog modela proizvodnog sustava tvrtke SELK potrebno je imati kvalitetne ulazne podatke i kvalitetan uvid u funkcioniranje proizvodnog sustava. Svi poluproizvodi imaju zajedničke operacije: ulaz robe, kontrola otpora, optička kontrola, pakiranje i izlaz robe. Kao što je već rečeno transporti u ovoj simulaciji će biti zanemareni što znači da se neće gledati ulaz i izlaz robe kao takav. Kontrola otpora se vrši na strojevima resistomat, VMA i EMS. Radnik poslužuje te strojeve tako da dolazi s kutijom poluproizvoda i spušta ih na pokretnu traku koja ih vodi do vodilice do mjesta mjerenja, gdje se mjerenje izvrši. Radnik koji poslužuje stroj će biti zanemaren u simulaciji jer osim što je njegovo vrijeme stroja posluživanja iznimno malo, također i ne utječe na ukupno vrijeme procesa jer radi paralelno sa strojem. Nakon stroja za kontrolu otpora poluproizvodi idu dalje na optičku kontrolu na radne stanice gdje radnici prolaze svaki poluproizvod, kontroliraju ga i stavljaju u nova pakiranja. Postoji 10 radnih stanica za optičku kontrolu. Poslije 100 % - ne kontrole, poluproizvod dolazi do završnog pakiranja gdje rade dva radnika. U tablici 1. je vidljivo da svi poluproizvodi osim, poluproizvoda 3, imaju identične operacijske korake. Kod poluproizvoda 3 između kontrole otpora i optičke kontrole ja operacija printanja koda na stroju Printer TPX. Upravo će taj proces biti središnji dio simulacije, jer ćemo u modificiranom modelu maknuti taj proces tako što će se nadograditi jedan od strojeva koji će imati mogućnost i mjerenja otpora i printanje koda.

5.2 Pretpostavke i ograničenja modela

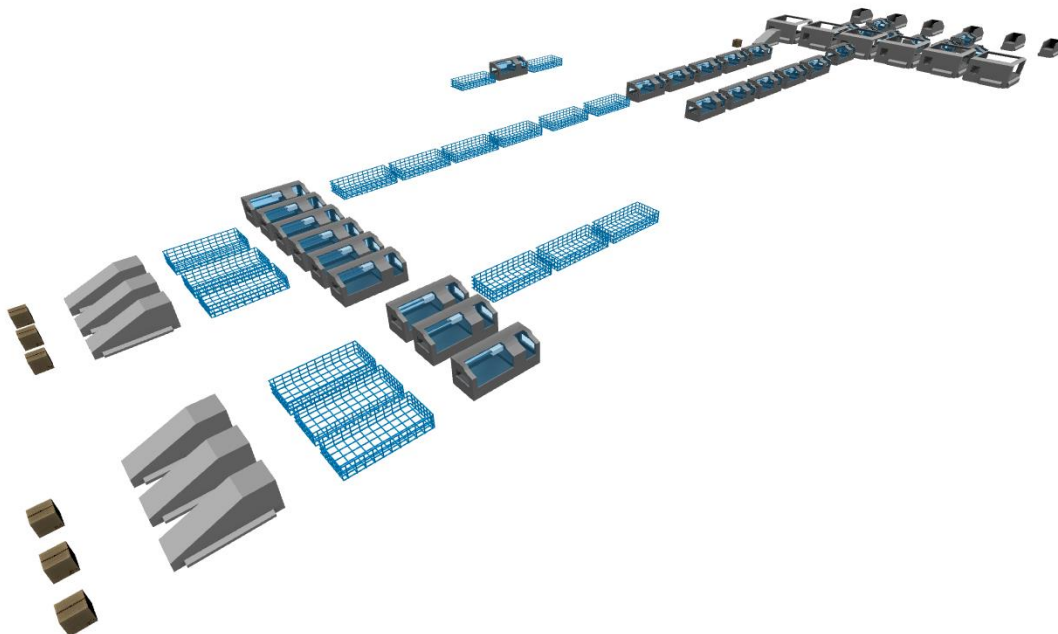
U modelu je zanemaren transport, tj. doprema i otprema materijala od jedne proizvodne točke do druge. S obzirom da se radi o iznimno velikim količinama proizvoda i malim dimenzijama njihov transport u ovoj simulaciji nam neće biti od velikog značaja jer se na jednostavan i brz način prenosi u kutijama.

Kroz proizvodnju prolazi veliki broj različitih dimenzija i tehničkih svojstva poluproizvoda, ali se u simulaciji nastoji pouzdano reprezentirati postojeći proizvodni program. Također je razumljivo da ovisno o radnim nalogima i potrebama proizvodnje iskoristivost strojeva i radnika može varirati, ali s obzirom da je cilj simulacije usporediti dva različita stanja proizvodnog programa, prvo stanje će se uzeti kao reprezentativni primjer.

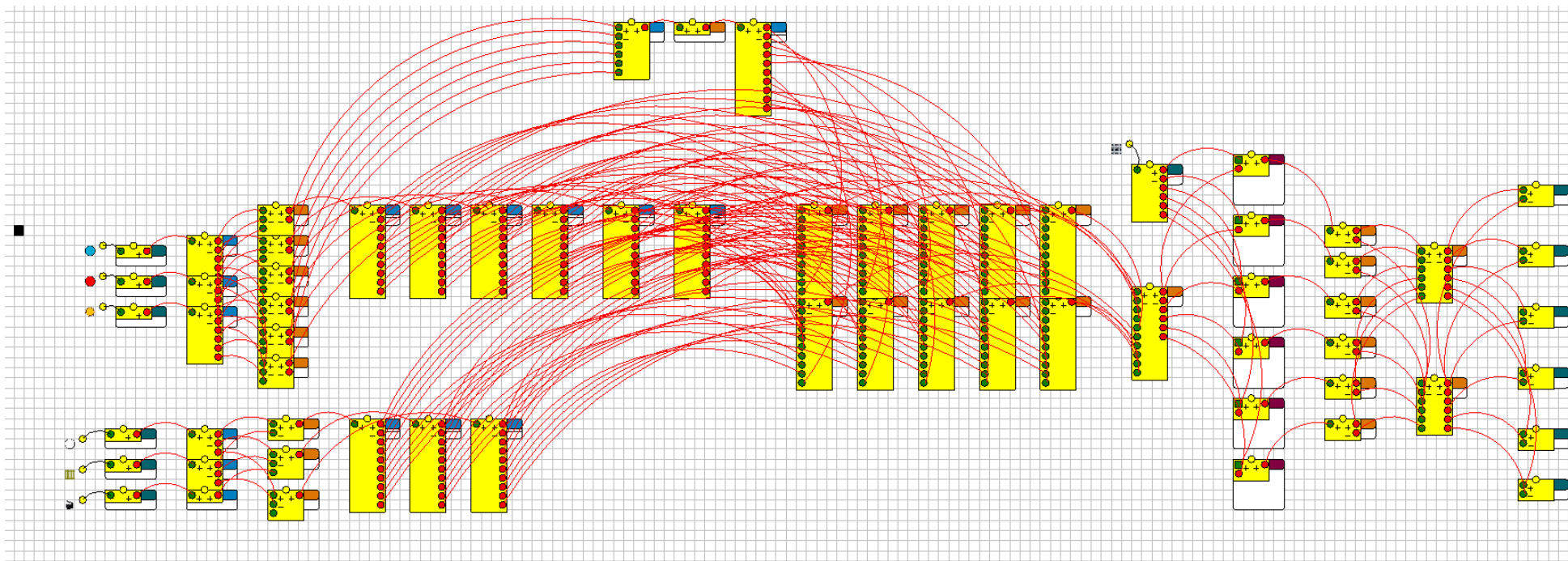
5.3 Prikaz simulacije



Slika 18. Prikaz modela u 2D



Slika 19. Prikaz modela u 3D



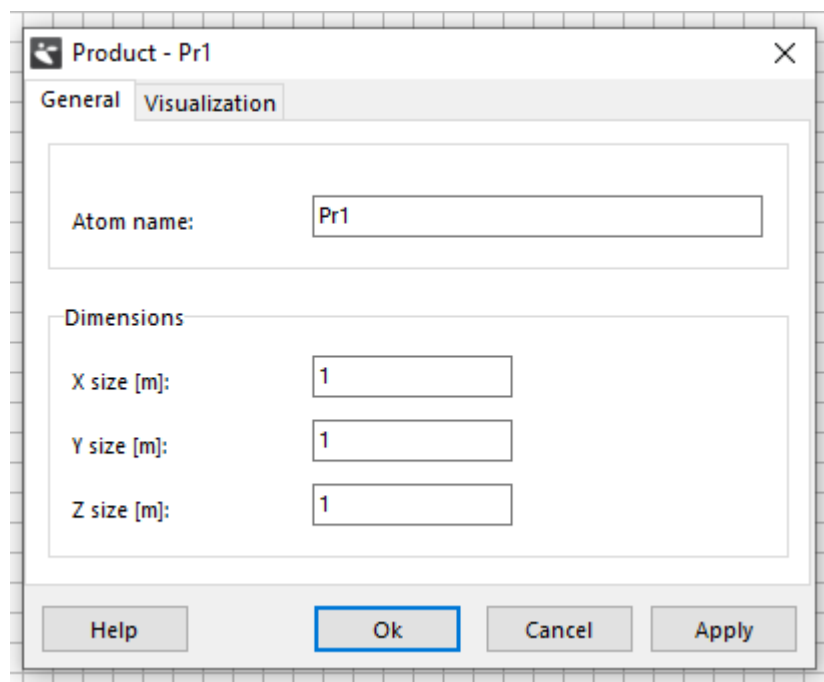
Slika 20. Prikaz simulacijskog modela s povezanim kanalima

5.4 Objašnjenje korištenih atoma i njihovih parametara

Atomi su entiteti u softveru Enterprise Dynamic i koriste se kod izgradnje modela. U daljnjem tekstu objašnjavaju se korišteni atomi sa svojim originalnim nazivima na Engleskom jeziku.

Product

Atom *Product* je osnova simulacijskog modela. Koristi se kod modeliranja materijalnih tokova. Ti tokovi mogu predstavljati sve što se kreće kroz određeni sustav kao što su proizvodi, određena dobara, dokumenti ili ljudi. Mogu mu se definirati ime i veličina po x, y i z osi. Također mu se može zadati vizualni izgled u 2D i 3D prikazu. U simulaciji proizvodnog procesa tvrtke SELK atomi *Product* predstavljaju 6 poluproizvoda čiji će se proizvodni tok promatrati u simulaciji. Svakom poluproizvodu zadan je drugačiji vizualni izgled u 2D prikazu radi lakšeg praćenja tokova materijala. Svakom poluproizvodu je dan naziv s rednim brojem (npr Pr1) iz razloga što će se kasnije u simulaciji taj naziv koristiti za slanje komada u različitim smjerovima, tj. prema različitim drugim atomima.

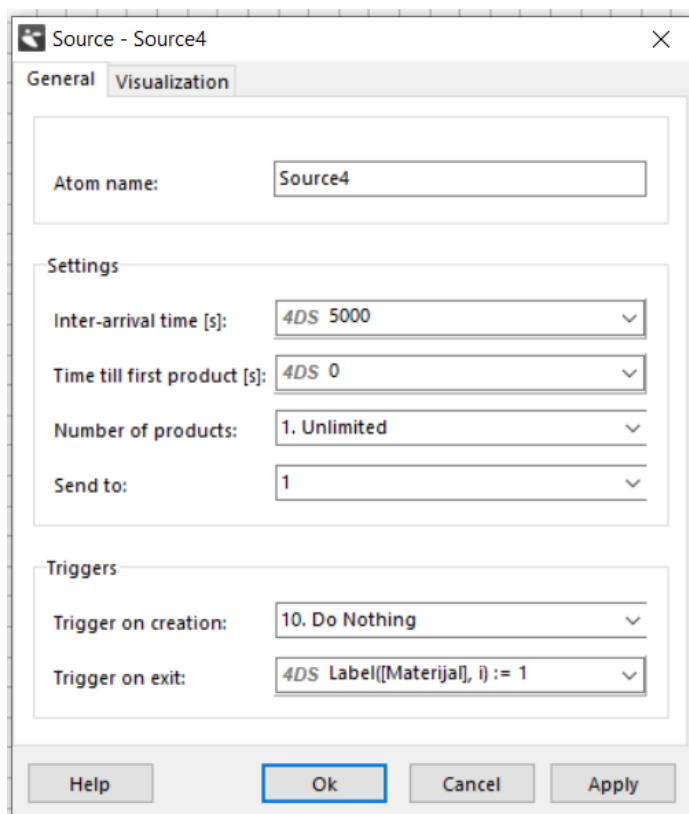


Slika 21. Postave *Product* atoma

Source

Atom *Source* služi za generiranje prolaznih entiteta u simuliranom sustavu. Odnosno, on omogućava atomima, uglavnom *Product* atomima, prolaz kroz model simulacije. Ovo je kompleksniji atom od atoma *Product* jer ima puno mogućnosti podešavanja njegovih

karakteristika. Na svakom od atoma *Source* postavljen je okidač koji svakom atomu *Product* pripisuje određenu vrijednost koja kasnije služi za raspoznavanje. Naziv tih okidača je *Label* i prilikom korištenja te funkcije potrebno je pridodati naziv samom okidaču radi kasnijeg snalaženja u različitim situacijama. Naziv okidača u ovoj simulaciji se zove Materijal i koristit će se kod davanja naredbi za različito trajanje procesa na istom atomu s različitim entitetima tj poluproizvodima.

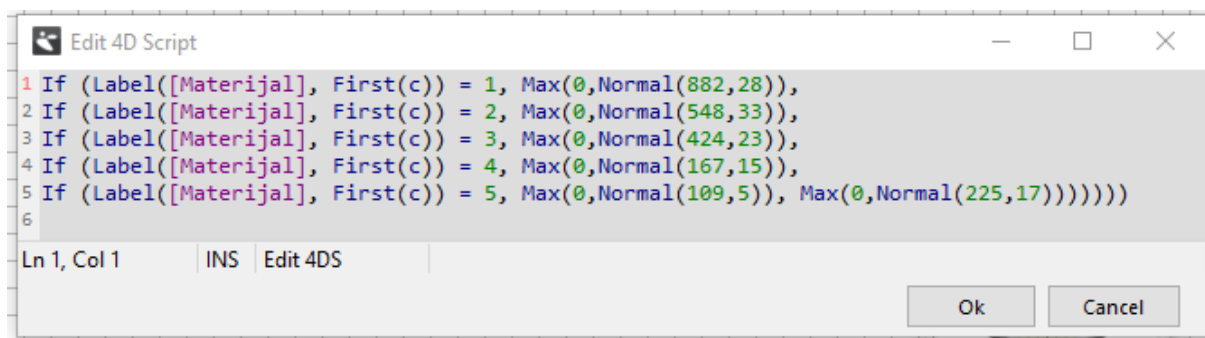


Slika 22. Postavke *Source* atoma

Server

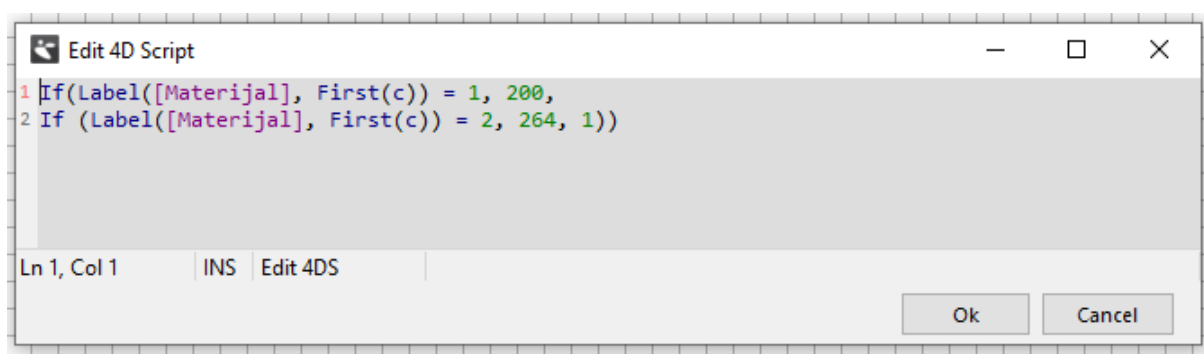
Atom Server se koristi za modeliranje radnih operacija kroz koji prolaze prolazni entiteti tj. atomi *Product*. Ovaj atom može predstavljati bilo koju radnu operaciju u sustavu, stroj, radnu stanicu, brojilo ili bilo što predstavlja mjesto obrade. Ovo je atom koji se najčešće koristi u modelu jer on predstavlja sve strojeve, radna mjesta optičke kontrole i pakiranja Server ima mogućnost podešavanja različitih parametara. Općenite postavke kao trajanje operacije, vrijeme pripreme stroja, definiranja slanja proizvoda prema sljedećem atomu i druge. Na slici 23. je prikazan kod koji se koristi kod vremena trajanja operacija kod radnih stanica optičke kontrole. Preko okidača definirano je različito vrijeme za svaku vrstu poluproizvoda.

Korištena je *if* petlja koja prepoznaje *Label* tj okidač svake vrste poluproizvoda i na osnovu njega definira trajanje operacije tog komada na serveru radne stanice optičke kontrole. Na slici 24. je također prikazan kod koji radi na principu *if* petlje gdje se preko okidača definira broj paketa koji nastaju nakon strojne operacije kontrole komada.



```
1 If (Label([Materijal], First(c)) = 1, Max(0,Normal(882,28)),
2 If (Label([Materijal], First(c)) = 2, Max(0,Normal(548,33)),
3 If (Label([Materijal], First(c)) = 3, Max(0,Normal(424,23)),
4 If (Label([Materijal], First(c)) = 4, Max(0,Normal(167,15)),
5 If (Label([Materijal], First(c)) = 5, Max(0,Normal(109,5)), Max(0,Normal(225,17))))))
6
```

Slika 23. Kod u postavkama atoma radnih stanica

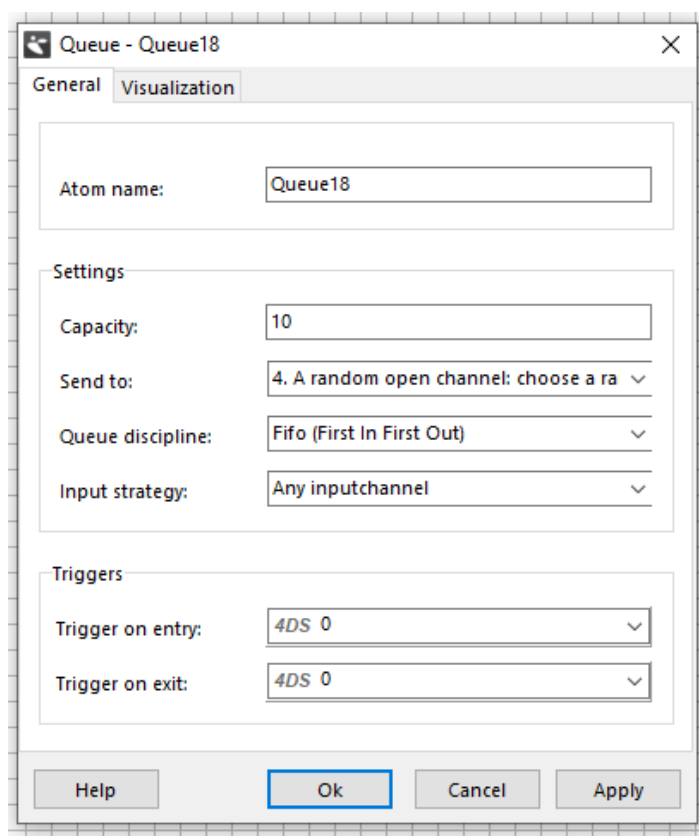


```
1 If(Label([Materijal], First(c)) = 1, 200,
2 If (Label([Materijal], First(c)) = 2, 264, 1))
```

Slika 24. Kod u postavkama atoma strojne obrade

Queue

Atom *Queue* služi kao mjesto na kojem atom *Product* ili više njih čekaju tj. na kojem se zadržavaju dok se ne oslobodi mjesto na sljedećem atomu. Može predstavljati bilo koje mjesto u sustavu gdje se skupljaju određeni entiteti kao što su proizvodi, ljudi ili bilo kakvi materijal. Slično drugim atomima imaju različite mogućnosti postavki karakteristika. Neke od važnijih su kapacitet atoma, tj. maksimalni broj entiteta koji se mogu zadržati u atomu. Ključna postavka je također disciplina koja definira prolaz entiteta kroz atom, tj. *fifo* ili *lifo* princip. U svim modelima u *Queue* atomima se koristi *fifo* princip skladištenja.



Slika 25. Postavke atoma *Queue*

Assembler

Atom *Assembler* služi kao atom koji ima mogućnost manipuliranja s više različitih ulaznih prolaznih entiteta koji kroz atom izlaze u drugačijem obliku ili broju. U modelu proizvodnog procesa se atom *Assembler* koristi nakon optičke kontrole gdje kad se skupi dovoljan broj kutija atom *Assembler* ih skuplja u veću cjelinu tj. u veće pakiranje. Takvo pakiranje dalje ide do radne stanice pakiranja. S obzirom na to da je moguće napraviti veliku broj ulaznik kanala kod atoma *Assembler* potrebno je definirati tablicu materijala tj. prikaz količina svih ulaznih izlaznih materijala. U slučaju modela u ovome radu s obzirom da svaka vrsta poluproizvoda ima svoj *Assembler*, potrebna je jednostavna tablica s jednom kolonom s dva ulazna kanala. Jedan kanal je za dolazne poluproizvode, dok je drugi kanal kutija u koji poluproizvodi idu.

5.5 Rezultati početnog modela simulacije

Nakon što se izradio model potrebno ga je pokrenuti za analizu dobivenih podataka. Simulacija se odradila na mjesečnoj bazi, tj. u trajanju od 720 sati. Razlog zašto se uzelo 720 sati je činjenica što je za prolaz jednog „Lossa“ kroz strojeve za kontrolu napona potrebno

puno vremena, pa da vrijeme čekanja prvog prolaza na strojevima ne utječe previše na simulaciju. Proizvodnja kao takva uvijek ovisi o trenutnim radnim nalogima i potrebama kupaca. Model koji je napravljen je jedan od mnogih koji se mogu zateći u proizvodnji, ali se uzima u obzir da su uzeti poluproizvodi koji su najčešće u proizvodnji.

name	content		throughput		staytime average
	current	average	input	output	
Source4	1	0.913	46	45	52 486.738
Source10	1	0.915	45	44	51 357.255
Source11	1	0.915	45	44	53 208.509
Source12	1	0.986	18585	18584	136.765
Source13	1	0.986	18492	18491	137.631
Source14	1	1.000	97	96	26 694.888
RES3	1	161.233	3919	3918	106 656.405
RES4	1	112.198	2736	2735	106 270.817
RES5	200	112.944	2931	2731	106 455.624
RES6	1	63.514	1526	1525	107 082.637
RES7	1	147.798	3573	3572	107 060.601
RES8	1	55.378	1325	1324	107 175.589
VMA2	400	360.299	37360	36960	25 158.487
VMA3	97	99.432	8742	8645	29 485.749
EMS2012	400	356.222	36960	36560	25 108.300
PrinterTPX350	409	392.526	7771	7362	13 1684.400
RS1	1	0.959	10467	10466	237.393
RS2	1	0.959	10447	10446	237.850
RS3	1	0.959	10450	10449	237.805
RS4	1	0.959	10458	10457	237.606
RS5	1	0.959	10468	10467	237.338
RS6	1	0.959	10489	10488	236.925
RS7	1	0.959	10467	10466	237.396
RS8	1	0.959	10475	10474	237.178
RS9	1	0.959	10472	10471	237.258
RS10	1	0.959	10463	10462	237.499
Pakiranje1	0	0.396	6393	6393	160.531
Pakiranje2	1	0.392	6357	6356	160.007
Sink1	0	0.000	1360	0	0.000
Sink2	0	0.000	1742	0	0.000
Sink3	0	0.000	1472	0	0.000
Sink4	0	0.000	1853	0	0.000
Sink5	0	0.000	5498	0	0.000
Sink6	0	0.000	824	0	0.000

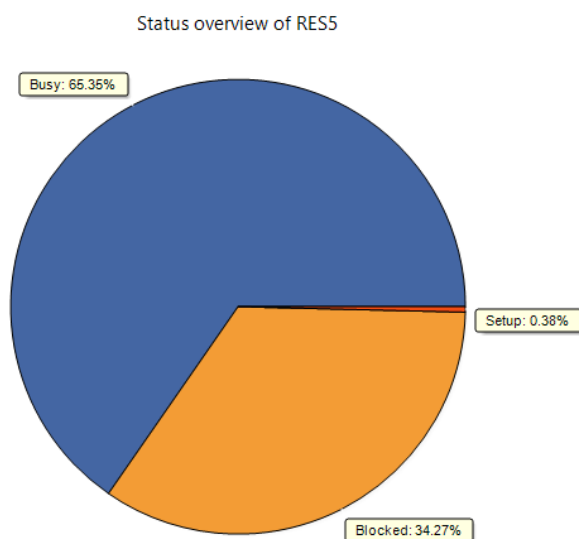
Rezultati simulacije prikazani su ukupnim izvješćem (Summary report). U izvješću je moguće vidjeti sadržaj, prolaz i vrijeme čekanja za svakih od atoma u modelu. Sadržaj daje informaciju o broju trenutnih proizvoda koji se nalaze u samome atomu u trenutku ispisivanja izvješća i prosječni broj entiteta u atomu tijekom cijele simulacije. Prolaz ili propusnost daje informaciju o broju entiteta koji su ušli i izašli iz svakog atoma. U resistomatu 3 je ušlo 3919 proizvoda, a izašlo 3918 što ima smisla jer sadržaj njegov u trenutku prekida simulacije je 1. Vrijeme čekanja daje informaciju o prosječnom provedenom vremenu svih entiteta koji prođu

određeni atom. Pa je vrijeme čekanja svih radnih stanica oko 237 sekundi što također ima smisla jer ako bi se iz ukupnog izvješća. išao gledati prosjek svih vremena proizvoda na optičkoj provjeri dobio bi se broj oko 237. Ključnu informacija koja se može iščitati iz ovog izvješća je broj prolaznih entiteta koji je ušao u atom *Sink*, tj. ukupni broj paketa za svakog od proizvoda. Preko broja sadržaja za svakog od atoma *Sink* može se dobiti ukupni broj poluproizvoda koji su obrađeni unutar mjesec dana. Izvađeni podaci se mogu vidjeti u tablici 8.

Tablica 8. Prikaz završih količina

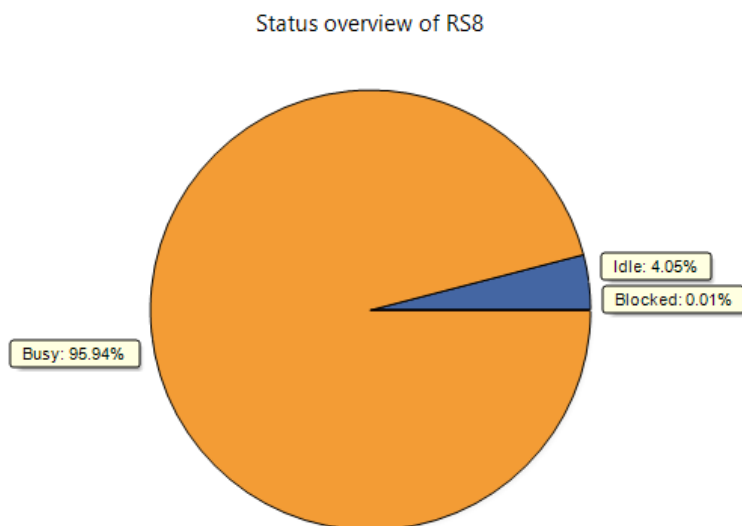
Materijal	Količina paketa	Količina proizvoda
1	1.360	3.060.000
2	1.742	3.048.500
3	1.472	1.619.200
4	1.853	7.412.000
5	5.498	10.996.000
6	824	5.108.800

Osim dobivenih podataka o prolazu proizvoda kroz PTC proizvodnju, također se mogu izvući podaci iskoristivosti svakog od korištenog atoma, tj. svake radne stanice ili stroja. Podatkom o iskoristivosti svake radne stanice se može dobiti bolji uvid u proizvodni sustav i vidjeti koji su procesni koraci preopterećeni, a koji nisu. Mogu se saznati potrebe uvođenja novog, ili micanja viška radnih stanica. Prosječna iskoristivost 6 resistomata čija je vrijednost ispisana na modelu je 68,6%, što nije u potpunosti zadovoljavajuća brojka ali je očekivana s obzirom na radnih stanica koji su na sljedećoj operaciji. Na slici 26. se može vidjeti graf koji prikazuje iskoristivosti jednog od šest strojeva resistomata. Ima relativno zadovoljavajuću iskoristivost od 65,35%, vrijeme pripreme stroja je iznimno niska, 0,38%, što je bilo za očekivati. Također se vidi da je 34,27% vremena stroj blokiran.



Slika 26. Iskoristivost Resistomata 5

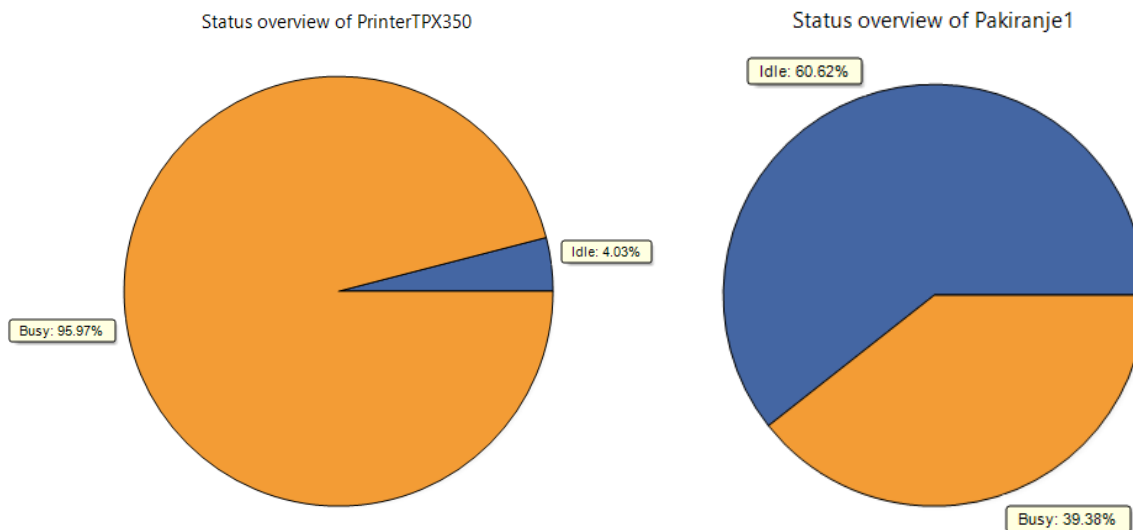
Iskoristivost svih radnih stanica je slična i vrti se oko istog broja, prosjek je 95,86% što je iznimno visoka iskoristivost. Na slici 27. je prikazan graf iskoristivosti jedne od radnih stanica. Iskoristivost te radne stanice je 95,94%. Stanica je blokirana 0,01% vremena što je zanemarivo i bez posla provede 4,05% vremena. Očito je da je veliki postotak vremena blokiranosti stroja resistomat uzorkovan velikom opterećenošću radnih stanica, tj. radne stanice ne stignu odraditi proizvoda koliko ih strojevi izbace.



Slika 27. Iskoristivost radne stanice 8

Još dvije važne informacije su vremena iskoristivosti uređaja PrinterTPX350 i radnih stanica pakiranja. Printer na kojem se odvija ispisivanje koda poluproizvoda 3 ima veliko vrijeme iskoristivosti od čak 95,97%, ostatak vremena je u čekanju. Prosjek iskoristivosti dviju radnih

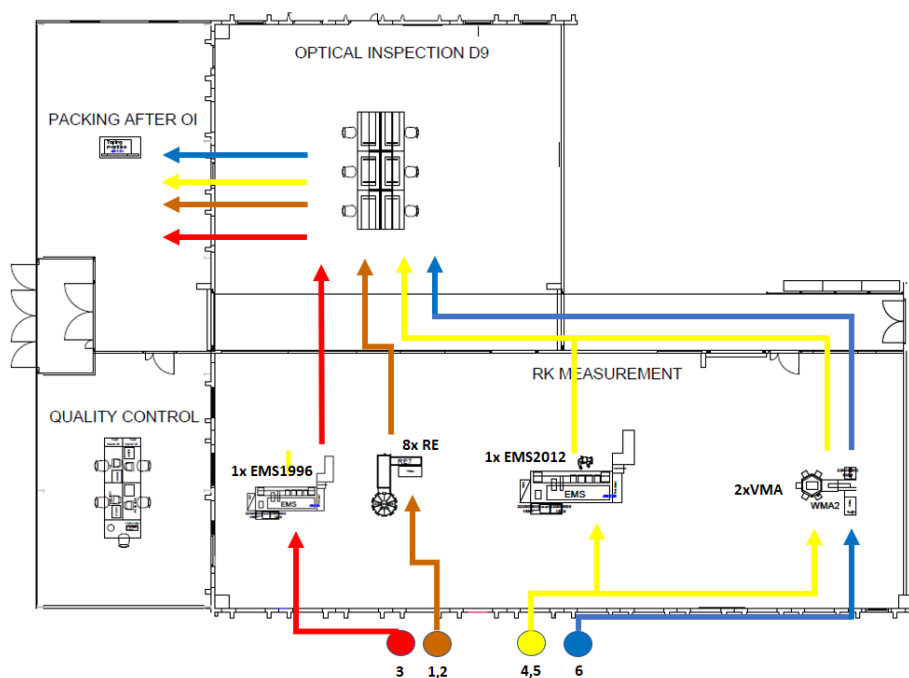
stanica pakiranja iznosi 39,5% i na slici 28. se može vidjeti graf iskoristivosti za jednu stanicu pakiranja. Većinski dio vremena radnik je u čekanju što znači da ima vremena obavljati druge poslove.



Slika 28. Iskoristivost Printera TPX i radnika pakiranja 1

5.6 Simulacija modificiranog modela i usporedba sa simulacijom početnog modela

Razlika između početnog modela i modificiranog modela je u stroju PrinterTPX350. Kao što je rečeno poluproizvod 3 je zadnji koji nema mogućnost odvijanja dvije radnje na stroju kontrole, a to su ispitivanje otpora samom proizvoda i printanje koda na njemu. U modificiranom modelu se uvodi novi stroj EMS1996, PrinterTPX350 se miče iz modela, a ostali strojevi ostaju. Na slici 29. je prikazan tok materijala u modificiranom modelu. Novi proizvodni proces za poluproizvod 3 je ulaz u PTC sektor, kontrola i kodiranje na stroju EMS1996, optička kontrola te pakiranje. Vrijeme potrebno za obradu jednog „Losa“ poluproizvoda 3 na stroju EMS1996 je 80000 sekundi. Količine poluproizvoda ostaju iste što se tiče promjene pakiranja tijekom proizvodnje. Broj resistomata ostaje isti što znači da je 6 resistomata na raspolaganju za samo dva poluproizvoda pa se očekuje povećanje broja gotovih poluproizvoda broj 1 i 2. Na slici 29. je prikazan tok materijala nakon promjene proizvodnog sustava. Vidljivo je da u putu poluproizvoda 3 nema povratne linije s printera na optičku inspekciju.



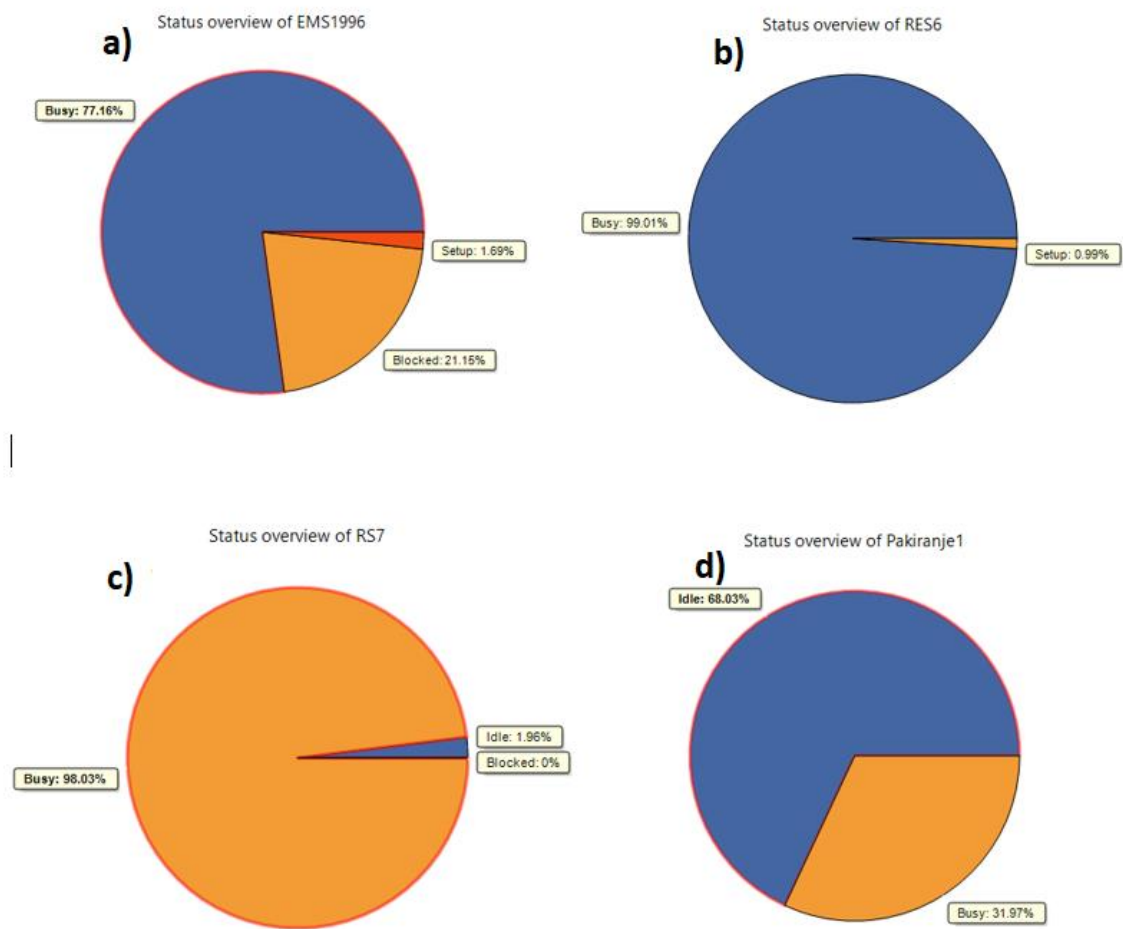
Slika 29. Modificirani tok materijala

Konačni brojevi tj. konačne količine nakon simulacije modificiranog modela prikazane su u tablici 9. Kao što je očekivano došlo je do porasta obrađenih komada broja 1 i 2 iz razloga što se oslobodilo mjesta na resistomatima s obzirom da se poluproizvod 3 više ne obrađuje na njima. Također je došlo do porasta broja obrađenih komada broj 3 što je također logično jer je iz njihovog proizvodnog procesa maknut jedan stroj tj. korak što ga čini kraćim. Kod poluproizvoda dolazi do velikog pada obrađenih komada iz razloga što su komadi 1 i 2 svojim velikim količinama zauzeli većinu vremena rada na optičkoj kontroli, tj. s obzirom na to da su na radne stanice optičke kontrole dolazile velike količine poluproizvoda 1 i 2, poluproizvodi 4,5 i 6 su gubile važnost prioriteta na radnim stanicama iz razloga što ih se nije u tolikim količinama skupljalo.

Tablica 9. Usporedba rezultata

Materijal	Količina Model#1	Količine Model#2	Razlika
1	1.360	2.120	55,88%
2	1.742	2.745	57,58%
3	1.472	1.781	20,99%
4	1.853	681	- 63,25%
5	5.498	1.883	- 65,75%
6	824	708	- 14,08%

Također je uspoređena iskoristivost svih ključnih proizvodnih pozicija tj. strojeva ili radnih stanica. Prosječna iskoristivost 6 resistomata u novom modelu iznosi visokih 98,8% što je za 44% više nego u početnom modelu. Jedan od mogućih razloga je sigurno činjenica što se umjesto 3 vrste poluproizvoda, sada na njemu obrađuju samo dvije vrste. S obzirom na to da su samo dvije vrste, svih 6 strojeva uspijeva obraditi više komada pa na sljedećoj proizvodnom procesu optičke kontrole dobivaju viši prioritet od ostalih poluproizvoda. Novi stroj EMS1996 ima iskoristivost od 77,16 % koja je zadovoljavajuća s obzirom na to da je ovo slučaj gdje samo jedan stroj obrađuje samo jednu vrstu poluproizvoda. Na slici 30. pod a) prikazan je graf vremena iskoristivosti. 21,15% vremena je stroj blokiran zbog preopterećenosti sljedećeg proizvodnog procesa. Vrijeme postavljanja stroja iznosi 1,69% vremena. Iskoristivost radnih stanica optičke kontrole je skočilo s 95,86% iz prvog modela, na 98% u drugom modelu što je povećanje za 2,23%. Graf iskoristivosti vremena jedne od radnih stanica je prikazan na slici 30. c) Prosjek iskoristivosti dviju radnih stanica pakiranja je 32% što je s obzirom na prošli model pad od 23,43%. Prikaz jedne radne stanice pakiranja je na slici 30. d).



Slika 30. Grafovi iskoristivosti u modelu #2

6. ZAKLJUČAK

Simulacije u današnje vrijeme nalaze primjenu u raznim sferama industrije, ali i života. Korištenje simulacije u proizvodnim sustavima jedan je od mogućnosti primjene. U ovome radu su se spomenule osnove simulacijskih tehnologija i simulacijskih poznatijih alata. Globalizacija općenito, ali i u proizvodnoj industriji dovodi do povećanja klijenata, ali i povećanja konkurentskih kompanija. Potaknuti time tvrtke su prisiljene pronalaziti način da ostanu konkurentne, tj. pronalaziti načine smanjivanja troškova. Simulacija sa svojom početnom cijenom ipak dugoročno firmi može smanjiti troškove, naravno ukoliko se kvalitetno koristi. Kao i za svaku visoku tehnologiju potrebni su kvalitetni i obrazovani radnici koji su sposobni iskoristiti pun potencijal ovakvih alata. Uporaba simulacijskih tehnologija omogućava detaljan, ali jednostavan pregled postojećeg stanja ili planiranje budućeg stanja. Za kompliciranije modele potrebno je znanje programskih jezika s kojima se može izraditi vrlo složeniji model. Cilj ovog rada je bio upoznati se sa simulacijskih tehnologijama i mogućnostima koje nudi. Kroz praktičnu izradu simulacijskog modela su se detaljnije uočile prednosti i mane izrade simulacije u proizvodnom sustavu. Proizvodnja u SELK - u zbog velike palete vrsti proizvoda prolazi kroz česte izmjene u količinama i također i potrebama rada određenih sektora proizvodnje. U radu se uzeo snimak jednog dijela proizvodnje tvrtke SELK, tj. PTC dijela kontrole. Uzeto je šest vrsti poluproizvoda koji su najčešći u proizvodnji i pušteni su kroz model simulacije s određenim brojem strojeva i radnih mjesta. Nakon simulacije prvog modela analizirane su sve ključne informacije kao što je broj obrađenih komada i iskoristivosti određenih proizvoda. Zatim se napravila modifikacija u modelu gdje se za jedan proizvod promijenio proizvodni proces. Cilj rada je bio vidjeti utjecaj promijenjenog proizvodnog procesa na taj komad, ali također i na ostale komade i radne pozicije. Očekivano, broj komada na koji je promijenjeni proizvodni proces direktno utjecao se povećao dok su se neki drugi komadi povećali, a neki smanjili ovisno o količini strojeva na kojima su oni obrađivani.

LITERATURA

- [1] <https://selk.hr/> , 25.5.2020.
- [2] <http://www.poslovnahrvatska.hr/>, 29.5.2020.
- [3] Materijali tvrtke SELK
- [4] <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/180332/company/tdk-electronics-worldwide>
- [5] Mourtzis, D.;Doukas, M.;Bernidaki; Simulation in Manufacturing Review and Challenges, Laboratory for Manufacturing Systems and Automation, University of Patras
- [6] Magy Helal., A hybrid system dynamics – discrete event simulation approach to simulating the manufacturing enterprise, University of Florida
- [7] Averill M. Law, W. David Kelton; Simulation modeling & analysis, McGraw – Hill Series in Industrial Engineering and Management Science
- [8] Đukić, Goran; Predavanja „Simulacija proizvodnih i logističkih sustava“, FSB. Zagreb, 2019
- [9] Čerić, Vlatko; Simulacijsko modeliranje, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [10] Siemens Tecnomatic: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/>, 10.6.2020.
- [11] AnyLogic: <https://www.anylogic.com/> , 10.6.2020.
- [12] FlexSim: <https://www.flexsim.com/flexsim/>, 15.6.2020.
- [13] Arena: <https://www.arenasimulation.com/>, 15.6.2020.
- [14] Enterprise Dynamics: <https://www.incontrolsim.com/software/enterprise-dynamics/>, 26.6.2020.
- [15] Taylor Enterprise Dynamics – William B. Nordgren