



4. Simulaciono modeliranje i analiza

Simulacionim modeliranjem i analizom (engl. *simulation modelling and analysis* - SMA) nastoje se ispuniti zahtevi Conant–Ashby teoreme (Conant i Ashby, 1970), definišući model sistema kao dobrog regulatora, koji ima onoliko veza, delova i stanja koliko i njegov izvorni fizički pandan. Time pruža mogućnost izgradnje digitalnog modela i uspostavljanja digitalne laboratorije koja će omogućiti njegovo istraživanje, prilagođavanje i optimizaciju. Rezultujući simulacioni modeli su apstraktni, dinamički i u većini slučajeva stohastički, budući da su njihove varijable sistema modelirane distribucijama verovatnoće.



4.1 Simulacija u logistici

U logistici SMA može pružiti vredne inpute za optimizaciju lanaca snabdevanja (engl. *supply chain* - SC) i transportnih mreža (engl. *traffic network* - TN). Simulaciono modeliranje može se koristiti za grafičku vizualizaciju vremenskih tokova kroz složene SC i TN procese i resurse, omogućavajući predviđanje i kvantifikaciju mogućih ishoda iz različitih scenarija. Ovo pomaže SC i TN entitetima da izvuku vredne zaključke i razumeju učinke svojih potencijalnih odluka na SC i TN verzije uključujući SC vreme isporuke (engl. *lead-times*), TN vreme putovanja i troškove. Stoga, SMA u SC i TN modeliranju može doprineti SC i TN analizi i poboljšanju njihovog dizajna usmerenog na postizanje veće učinkovitosti i održivosti.

Postoje mnogi aspekti SC-a, koji predstavljaju različite perspektive upravljanja lancem snabdevanja. Aspekt posmatranja menadžera proizvodnje na lanac snabdevanja razlikuje se od menadžera marketinga, koji se opet razlikuje od menadžera nabavke, itd. Dakle, korišćeni modeli su različiti, čak i za istu kompaniju, a posebno za ceo SC.

Prilikom rešavanja problema SMA u logistici, menadžeri treba da donose odluke na strateškom, taktičkom i operativnom nivou, zavisno od njihovog učinka na SC ili TN u celini. Zbog svoje međuovisnosti, menadžeri često nisu u mogućnosti rešiti probleme ni na jednom nivou. Istovremeno, takođe je teško posmatrati sva tri nivoa iz perspektive bilo koje pojedinačne celine. Iz perspektive SMA, SC ili TN se mogu posmatrati na dva nivoa:



1. Makro nivo

- samoorganizacija,
- koevolucija entiteta,
- zavisnost od veza/transportnih ruta.

2. Mikro nivo

- višestruki i heterogeni entiteti,
- lokalne interakcije među entitetima,
- strukturirani entiteti,
- adaptivni entiteti.

Iako se izvode u stvarnom vremenu, vremenski aspekt SC operacija je donekle dvosmislen. Zavisno od nivoa i perspektive, trajanje operacija može se meriti u danima, nedeljama ili čak mesecima kada su u pitanju među-organizacione aktivnosti, dok se s druge strane, unutar-organizacione operacije mere u satima ili čak sekundama. Zavisno od prirode modeliranog problema, trajanje najkraće operacije ili maksimalna učestalost dolaznih/odlaznih zahteva određuje ne samo prikaz vremena u SMA modelu, već i njegovu granularnost. Što je kraće minimalno trajanje najkraće operacije ili što je veća učestalost zahteva, to je finija granularnost vremena, odnosno preciznost vođenja vremena u modelu. Ovo je važno za modelara, budući da vreme reakcije modela ne može biti kraće od unapred definisane vremenske granularnosti. Stoga je potrebno unapred proceniti trajanje svih operacija i vremena između dolazaka dolaznih/odlaznih signala kako bi se mogle ispravno odrediti vremenske jedinice modela sistema.

U simulacionom modelu vreme može napredovati kritičnim događajima od transakcije do transakcije ili kontinualno. U poslednjem slučaju, tok vremena u modelu ne zavisi od učestalosti operacija. S protokom vremena pokrenutog kritičnim događajem, operacije se pozivaju prema vremenu njihovog pojavljivanja, odnosno kritičnih događaja. Prednost SMA je u tome što se tokom simulacije može ubrzati tok vremena u modelu, tako da se procesi izvode brže nego u stvarnom vremenu. Stoga se mogu napraviti rana predviđanja sledećih događaja.



Vremena između dolaznih simulacionih jedinica i vremena njihove obrade/tranzita mogu proizaći iz posmatranja i merenja. Ako ne variraju, onda su deterministička. Međutim, obično su po svojoj prirodi stohastička. Stoga je potrebno uvođenje konstrukata koji modeliraju njihove funkcije distribucije verovatnoća (npr. trougaone, uniformne, eksponencijalne, itd.).

4.2 Simulacija diskretnih događaja



Simulacija diskretnih događaja (engl. *discrete event simulation* – DES) nudi menadžeru proizvodnje najdetaljniji uvid u logistički (proizvodni) proces po konzistentnom i koherentnom modelu. Stoga je DES visoko cenjen alat za određivanje ponašanja i iskorišćenja resursa u stvarnom vremenu u procesnoj industriji, uključujući logistiku.

Konstrukti:

- Jedinice toka predstavljaju jedinice simulacije (npr. narudžbine, materijali itd.) koje ulaze u sistem na ulazu(ima) i napreduju kroz model sistema;
- Procesori predstavljaju mobilne (npr. ljudi, viljuškari itd.) i fiksne (npr. mašine, proizvodne linije itd.) resurse koji obrađuju simulacione jedinice;
- Redovi čekanja čuvaju jedinice toka do njihovog prelaza na sledeći dostupni procesor;
- Konektori definišu pomicanje jedinica kroz model sistema.

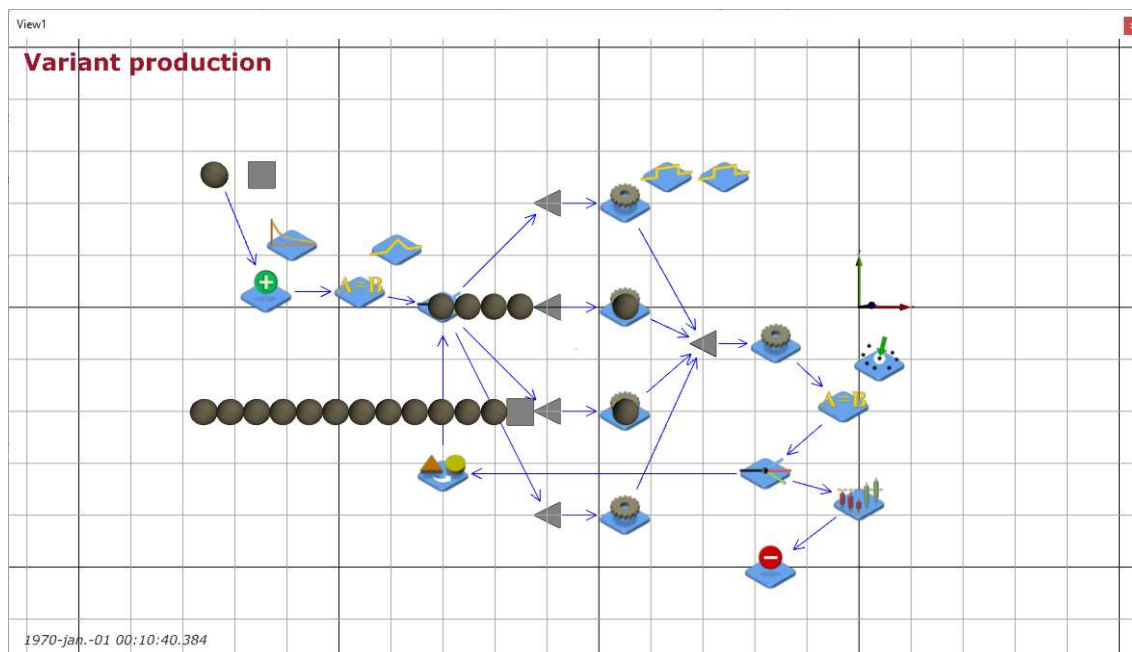
Svojstva:

- Orijentisan na proces;
- Fokusira se na detaljno modeliranje procesa;
- Heterogeni entiteti;
- Mikro-entiteti su pasivni objekti;
- Događaji unose dinamiku u sistem;
- Diskretna vremenska progresija; od jednog (vremenskog) događaja do sledećeg;
- Fleksibilnost se postiže promenom strukture modela; struktura sistema tokom simulacije je fiksna.



Primer

Primer DES-a (Slika 4.1, iz simulacionog okruženja JaamSim (JaamSim Development Team, 2023)) uključuje model varijante proizvodnje, gde se proizvode četiri različita proizvoda (Gumzej i Rakovska, 2020). Prema planu proizvodnje, proizvodi se 10, 30, 40, 20% proizvoda vrste 1, 2, 3, odnosno 4. Izbor vrste proizvoda određen je trougaonom raspodelom između 1 i 4 s modulom na 3. Svaka vrsta proizvoda ima namensku proizvodnu liniju. Proizvodni nalozi se ispunjavaju po eksponencijalnoj distribuciji sa srednjom vrednošću od 30 s. Proizvodnja svakog pojedinačnog proizvoda traje 100-120s prema ravnomernoj distribuciji. Nakon što su finalizirani, kvalitet proizvoda se proverava na namenskom kontrolnom mestu. Provera kvaliteta traje 10 s. Iz iskustva kompanije, u proseku jedan od 10 proizvoda ne prođe kontrolu. Proizvodi nezadovoljavajućeg kvaliteta transportuju se nazad na izvornu proizvodnu liniju. Njihova ponovna obrada traje 120-130s prema ravnomernoj raspodeli. Trajanje proizvodnje i kontrole kvaliteta te ponovne obrade ne zavise od vrste proizvoda. Nakon što su uspešno prošli kontrolu kvaliteta, gotovi proizvodi se transportuju s mesta proizvodnje u skladište gotovih proizvoda. Ponovna obrada neispravnih proizvoda dok su još u proizvodnji je način da se smanji uticaj na životnu sredinu i troškove proizvodnje.



Slika 4.1 Varijanta proizvodnje s kontrolom kvaliteta.



Sinopsis

DES može da analizira i optimizira sledeće procesne parametre:

- Vreme proizvodnog ciklusa i učinak.
- Iskorišćenost proizvodnih ćelija i prostora.
- Kapacitet skladišnih prostora kao i vreme zadržavanja skladišnih jedinica.
- Korišćenje mobilnih resursa (npr. operateri, pokretne trake, viljuškari).

4.3 Sistemska dinamika



Analiza sistemske dinamika (engl. *system dynamics* – SD) predstavlja pogled menadžera SC-a na proizvodni proces pomoću doslednog i koherentnog modela. SD se smatra najprikladnijim alatom za određivanje strukture, kao i optimalnih količina za pojedinačne lokacije (kada i koliko inputa, zaliha i outputa). Stoga, omogućava učinkovito korišćenje proizvodnih i skladišnih objekata.

Konstrukti:

- Zalihe predstavljaju tamponi koji mogu čuvati stavke isporuke u lancu snabdevanja.
- Tokovi predstavljaju kanale snabdevanja.
- Petlje povratne sprege predstavljaju parametre finog podešavanja za popunjavanje zaliha.

Svojstva:

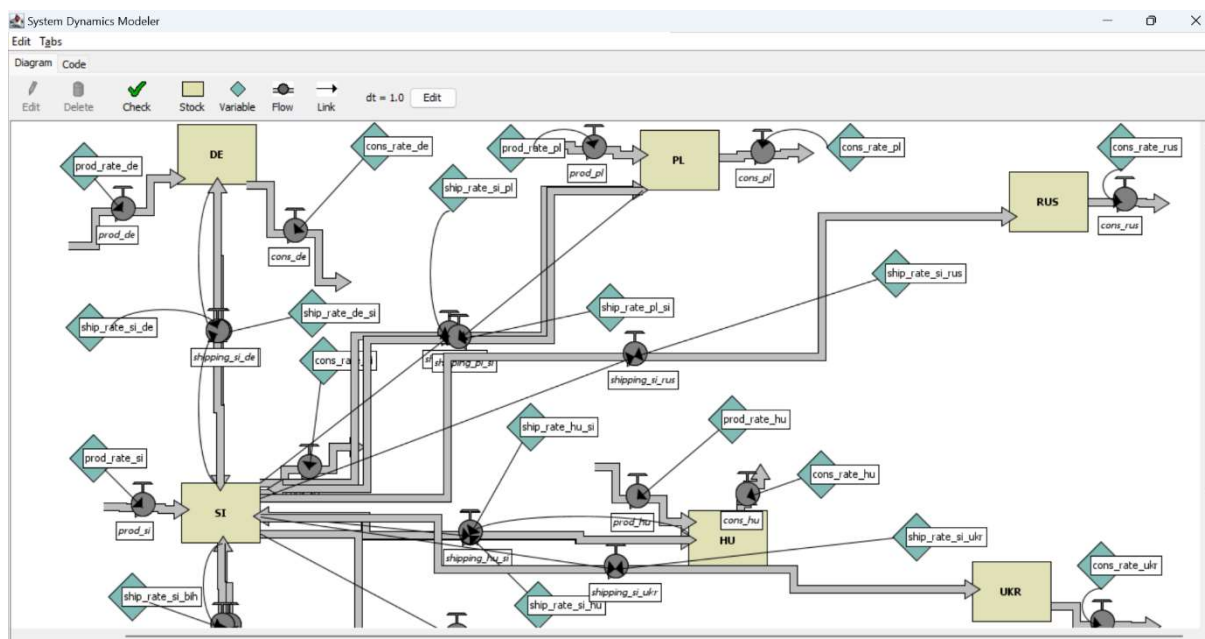
- Usmeren na sistem.
- Modeliranje varijabli sistema je usmereno na ključne pokazatelje učinka.
- Homogeni entiteti.
- Entiteti na mikronivou se zanemaruju.
- Dinamika se uvodi petljom povratne sprege.



- Kontinuirana vremenska progresija; vreme napreduje sinhronizovano za sve komponente modela sistema.
- Fleksibilnost se postiže promenom strukture modela.
- Struktura sistema tokom simulacije je fiksna.

Primer

Primer SD-a (Slika 4.2, iz simulacionog okruženja NetLogo (Wilensky, 1999)) obuhvata lanac snabdevanja kompanije kućnih aparata i opisuje tokove materijala između njenih podružnica (Gumzej i Rakovska, 2020). Kompanija ima više proizvodnih lokacija: glavnu lokaciju u Sloveniji (SI) kao i podružnice u Nemačkoj (DE), Poljskoj (PL), Mađarskoj (H) i Bosni i Hercegovini (BIH). Uz proizvodna mesta, veleprodajna mesta kompanije nalaze se u Rusiji (RUS), Ukrajini (UKR) i Rumuniji (RU). Proizvodne lokacije snabdevaju sopstvena tržišta gotovim proizvodima i jedna drugu komponentama proizvoda.

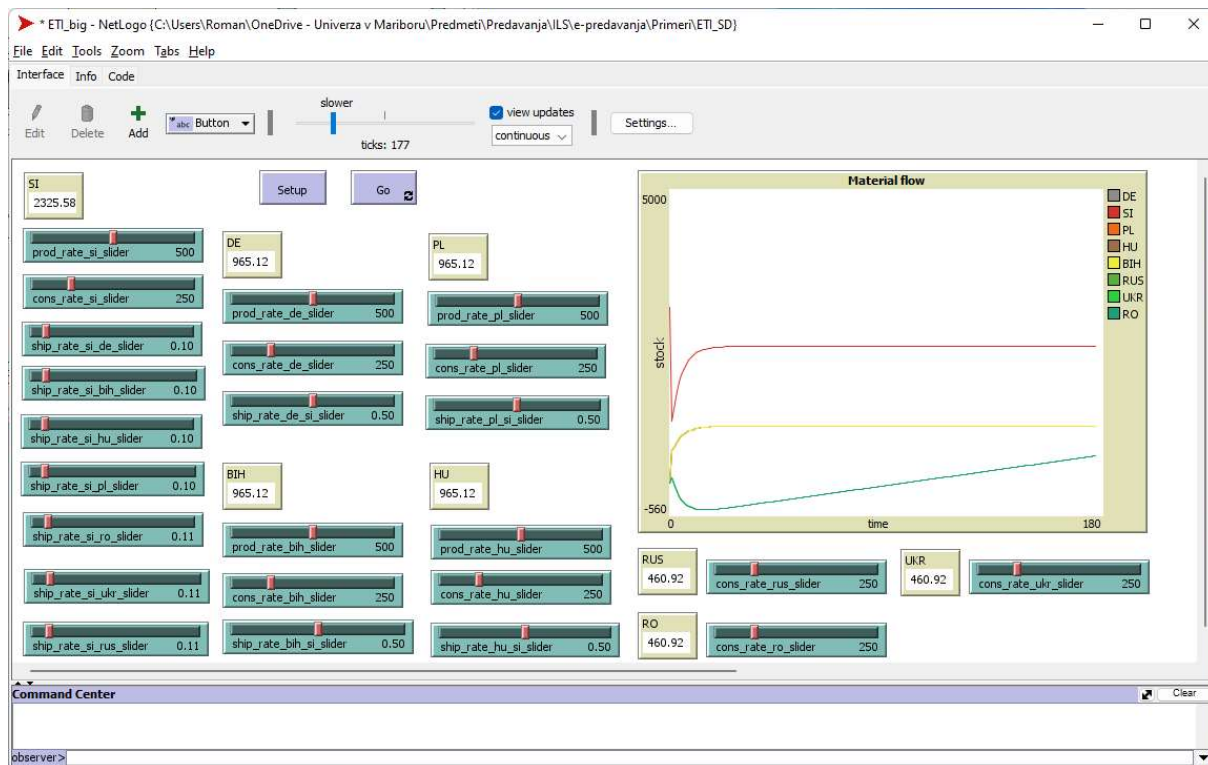


Slika 4.2 Layout lanca snabdevanja.

Povezana NetLogo nadzorna ploča (slika 4.3) služi kao alat za podršku odlučivanju (engl. *decision support tool* - DST), za povezivanje proizvodnje i količina zaliha s predispozicijama i njihovom fizičkom distribucijom. Vremenski tok je neprekidan kroz svakodnevne transakcije, tj. svaki dan se određeni broj komponenti isporučuje između proizvodnih mesta i određeni broj gotovih proizvoda se troši na licu mesta ili se otprema na mesta distribucije. Na osnovu



početnih zaliha od 300 jedinica na SI lokaciji, 0 zaliha na drugim lokacijama i modela distribucije, količine zaliha na pojedinačnim lokacijama predstavljaju prosečne zalihe prema definisanoj proizvodnji (kom), potrošnji (%) i otpremi (%).



Slika 4.3Nadzorna ploča lanca snabdevanja.

Sinopsis

Simulacija sistemske dinamike omogućava:

- Planiranje layouta SC-a.
- Optimizaciju proizvodnih i distributivnih kapaciteta.
- Procenu opterećenja kanala distribucije i povezanih troškova.



4.4 Simulacija zasnovana na agentima

Analiza simulacijama zasnovanim na agentima (engl. *agent-based simulation* – ABS) nudi pogled na tržište od strane strateškog menadžera ili regulatora tržišta. Stoga se ABS smatra alatom koji je najprikladniji za određivanje optimalne strukture i rasporeda/asortimana nečijeg tržišta i/ili SC-a uzimajući u obzir njihove globalne karakteristike (npr. demografiju, klimu, BDP, kvalitet, svest, itd.).



BDP,

Konstrukti:

Agenti koji predstavljaju čvorove lanca snabdevanja (npr. dobavljači, trgovci na malo i inspektori) sa svojim svojstvima, odnosima i ponašanjem.

Svojstva:

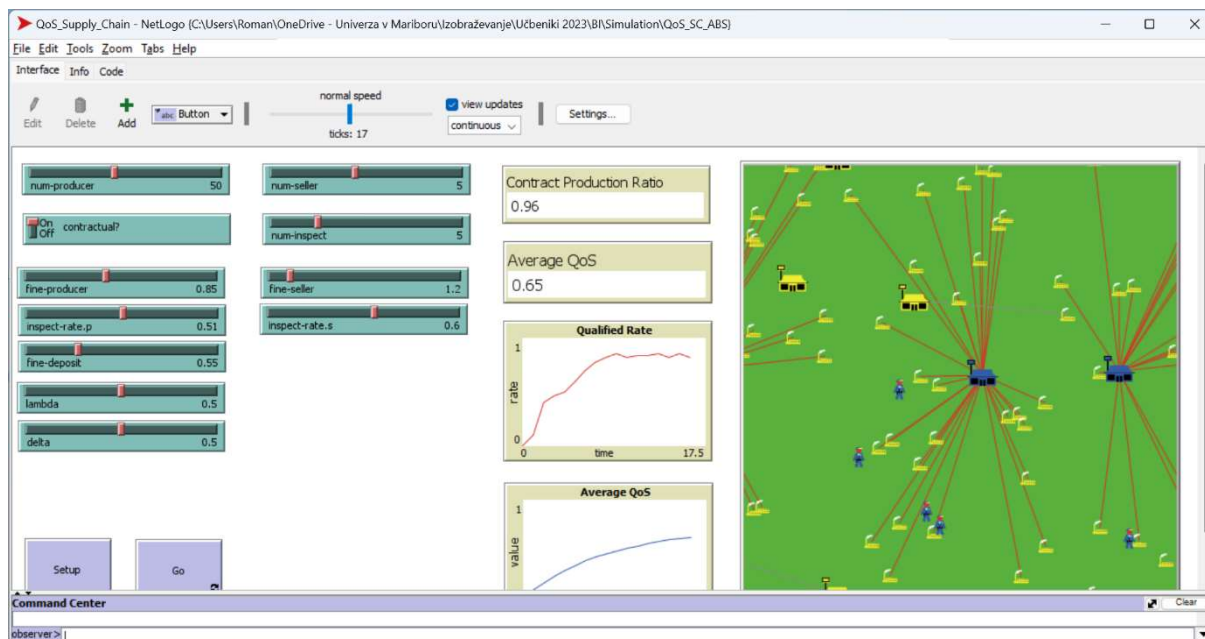
- Fokusiran na entitet.
- Problemski orijentirano modeliranje entiteta i njihovih interakcija.
- Heterogenost entiteta.
- Mikro-entiteti su aktivni objekti koji deluju u svom okruženju, međusobno komuniciraju i samostalno donose odluke.
- Odluke i interakcije između agenata unose dinamiku u sisteme.
- Agenti i njihovo okruženje čine formalne modele.
- Protok vremena je diskretan i univerzalan na nivou modela; vreme modela je u skladu s učestalošću SC transakcija i životnim ciklusima SC čvorova.
- Fleksibilnost modela postiže se promenom strukture sistema i ponašanja agenata.
- Struktura sistema tokom simulacije je promenjiva.

Primer

Primer ABS-a (slika 4.4, iz simulacionog okruženja NetLogo (Wilensky, 1999)) korišćen je za analizu ponašanje ešalona lanca snabdevanja na otvorenom tržištu (Gumzej i Rakovska, 2020), s obzirom na njihov kvalitet usluge (engl. *Quality of Service* - QoS). U primeru, različite politike



koje su vezane za ukupno upravljanje kvalitetom kompanije istraživane su modelom koji se sastoji od dobavljača, kupaca i regulatora tržišta.



Slika 4.4Regulacija tržišta.

Sinopsis

Simulacija zasnovana na agentima omogućava:

- Planiranje layouta SC-a.
- Modeliranje dinamičkog rasta SC-a.
- Modeliranje ponašanja partnera unutar SC-a.
- Optimizaciju globalnih pokazatelja.

4.5 Simulacija mreže



Analiza bazirana na simulaciji mreže (engl. *network simulation* – NS) nudi mrežni regulatorni pogled na mrežu. Stoga se NS smatra alatom koji je najprikladniji za određivanje optimalne strukture, rasporeda i asortimana sopstvene mreže uzimajući u obzir njene globalne karakteristike (npr. propusnost, emisije, QoS pokazatelji, itd.).

Konstrukti:



Agenti koji predstavljaju objekte toka s njihovim svojstvima, odnosima i ponašanjem.

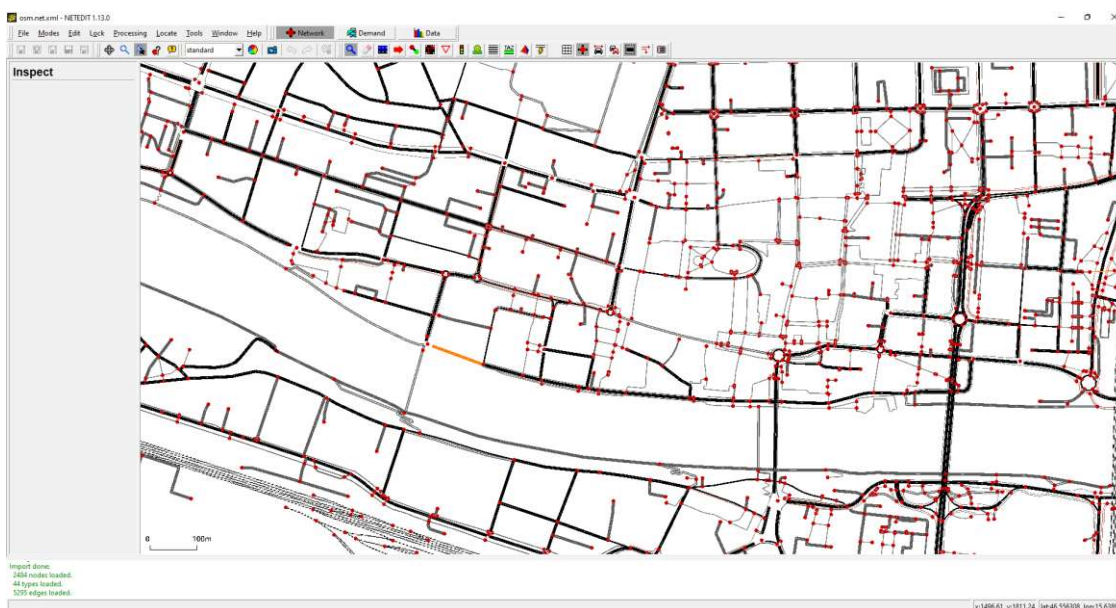
Mreža koja predstavlja mrežu preklapanja (npr. saobraćajnu mrežu) na kojoj se objekti toka kreću.

Svojstva:

- Usmeren na sistem.
- Problemski orijentisano modeliranje entiteta i njihovih interakcija.
- Heterogenost entiteta.
- Mikro-entiteti su aktivni objekti koji deluju u svom okruženju, međusobno komuniciraju i samostalno donose odluke.
- Odluke i interakcije između agenata unose dinamiku u sisteme.
- Agenti i njihovo okruženje čine formalne modele.
- Protok vremena je diskretan i univerzalan na nivou modela; vreme je u skladu s relativnim brzinama objekata toka.
- Fleksibilnost modela postiže se promenom mrežne strukture koja se fiksira tokom simulacije i ponašanja agenata koje varira zavisno od stanja (prometa) mreže i njihovih ciljeva.

Primer

Predstavljeni primer (slika 4.5, iz SUMO (Pablo et.al., 2018.) simulacionog okruženja) korišćen je za određivanje saobraćajnih tokova i propusnosti ulica u središtu grada pogođenih planiranom blokadom saobraćajnica (Šinko i Gumzej, 2021). Osim toga, mereni su pokazatelji povezani sa saobraćajem, poput vremena putovanja, potrošnje goriva i emisija.



Slika 4.5 Saobraćajna situacija i mreža.

Sinopsis

Mrežna simulacija omogućava:

- Planiranje layouta mreže.
- Modeliranje dinamičkog ponašanja mreže za određivanje uskih grla i slabih veza.
- Modeliranje toka mrežnih stavki.
- Optimizacija pokazatelja globalne mreže.

4.6 Projekti logističke simulacije

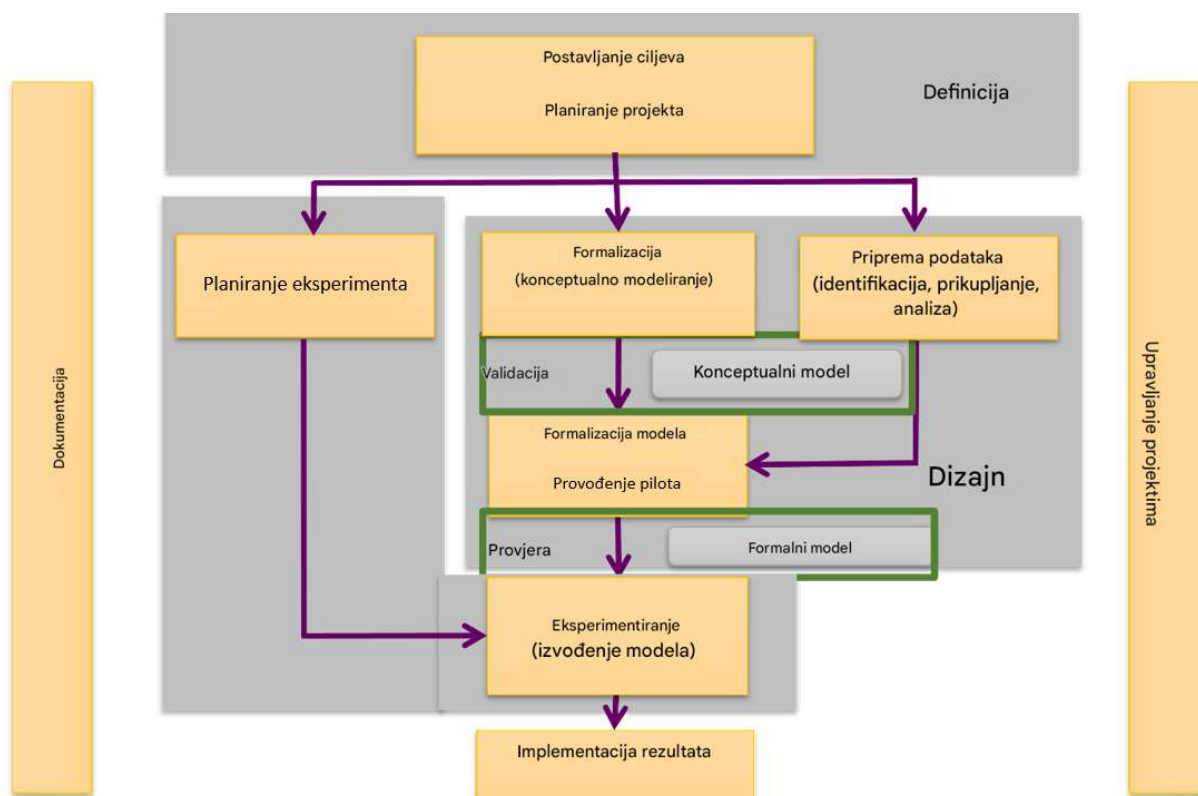
Projekti logističke simulacije dizajnirani su u skladu s paradigmom Šest sigma (engl. *Design for Six Sigma* - DFSS) i zasnivaju se na Demingovom ciklusu poboljšanja:



- Planiranje: definiranje sistema i ciljeva.
- Postavka: dizajn simulacionog modela.
- Analiza: eksperimentisanje sa simulacionim modelom i procena alternativa.
- Akcija: korišćenje rezultata simulacije za implementaciju poboljšanja.

Svaki projekat logističke simulacije (slika 4.6) sastoji se od sedam faza:

1. Strateški plan: analiza postojećih i predloženih resursa i procesa.
2. Konceptualni model: apstraktni model sistema i definicija predispozicija, prikupljanje podataka.
3. Logički model: tok objekta, zalihe i tok ili mrežni dijagram modela sistema.
4. Simulacioni model: izrada odgovarajućeg simulacionog modela.
5. Verifikacija i validacija simulacionog modela: provera konzistentnosti i koherentnosti modela.
6. Analiza na osnovu simulacionog modela: dizajn i izvođenje eksperimenta.
7. Korišćenje rezultata simulacije za izradu akcionog plana: projekcija poboljšanja sistema.



Slika 4.6 Proces simulacionog modeliranja i analize (SMA).

4.7 Zaključak

U logistici je SMA važna komponenta operacionih istraživanja (OR) koja omogućava optimizaciju procesa.



Sistemska dinamika (SD) je metodologija za analizu složenih, dinamičkih i nelinearnih interakcija u sistemima, što rezultuje novim strukturama i politikama za poboljšanje ponašanja sistema. Ovde se rešavaju fizički i informacioni tokovi s ciljem smanjenja njihovog kašnjenja i konačno zaliha u lancu snabdevanja.

Druga popularna procesno orijentisana metodologija je simulacija diskretnih događaja (DES). To je jedan od najčešće korišćenih i najfleksibilnijih analitičkih alata u SMA proizvodnih sistema. Uspešno se nosi s neizvesnošću i pruža mogućnosti upoređivanja alternativnih načina za smanjenje vremena isporuke kao i optimizaciju korišćenja mašina i resursa.

Korisna metodologija za razumevanje ponašanja organizacija i njihovih interakcija (npr. lanaca snabdevanja i njihovih entiteta) je simulacija zasnovana na agentima (ABS). Simulacija mreže (NS), kao posebna vrsta ABS-a, omogućava modeliranje i optimizaciju (saobraćajnih) mreža.

Zaključak je da holistički pristup primene SMA u logistici uveliko doprinosi složenim odlukama o dizajnu sistema, gde postoji mnogo varijabli koje međusobno deluju. Koristan integrisani pristup, uključujući metodologije SD, DES i ABS, koji može kvantifikovati protoke na različitim nivoima lanca snabdevanja, predstavljen je u (Gumzej & Rakovska, 2020). U analizi i optimizaciji saobraćajnog toka, NS metodologija pruža potreban okvir u vezi s praćenjem i finim podešavanjem ključnih pokazatelja uspešnosti (Šinko i Gumzej, 2021).

LITERATURA 4. POGLAVLJA

- Conant R.C. and Ashby W.R. (1970). Every good regulator of a system must be a model of that system, *Int. J. Systems Sci.*, 1(2), pp. 89-97.
- Gumzej, R. and Rakovska, M. (2020). Simulation modeling and analysis for sustainable supply chains. In *Ecoproduction – Sustainable logistics and production in industry 4.0 : new opportunities and challenges*, Grzybowska, K., Awasthi, A., Sawhney, R. (ed.). Springer Nature, pp. 145-160.
- JaamSim Development Team (2023). JaamSim: Discrete-Event Simulation Software. Version 2023-08. [Available at: <https://jaamsim.com>, access November 8th, 2023]
- Šinko, S. and Gumzej, R. (2021). Towards smart traffic planning by traffic simulation on microscopic level. *International journal of applied logistics*, 11(1), pp. 1-17.



- Wilensky, U. (1999). NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. [Available at: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, access November 8th, 2023]
- Pablo A.L., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P. and Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), IEEE. The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 4.-7. Nov. 2018, Maui, USA, pp. 2575-2582.