



## 4. Simulacijsko modeliranje in analiza

S simulacijskim modeliranjem in analizo (SMA) si prizadevamo izpolniti zahteve Conant-Ashbyjevega teorema (Conant in Ashby, 1970), ki opredeljuje model sistema kot dobrega regulatorja, ki ima toliko ročic, delov in stanj kot njegov izvirni fizični ustreznik; tako je mogoče zgraditi njegov digitalni model in vzpostaviti digitalni laboratorij, ki bo omogočal njegovo raziskovanje, prilagajanje in optimizacijo. Nastali simulacijski modeli so abstraktni, dinamični in v večini primerov stohastični, saj so njihove sistemske spremenljivke modelirane z verjetnostnimi porazdelitvami.



### 4.1 Simulacija v logistiki

V logistiki lahko SMA zagotovi dragocene podatke za optimizacijo oskrbovalne verige (SC) in prometnega omrežja (TN). Simulacijsko modeliranje se lahko uporablja za grafično vizualizacijo časovnih tokov skozi kompleksne procese in vire v SC in TN, kar omogoča napovedovanje in količinsko opredelitev možnih rezultatov različnih scenarijev. To subjektom SC in TN pomaga pridobiti dragocene vpoglede in razumeti učinke njihovih morebitnih odločitev na delovanje SC in TN, vključno s časi izvedbe SC, potovalnimi časi TN in stroški. Zato lahko SMA pri modeliranju SC in TN prispeva k analizi SC in TN ter izboljšanju njihovih zasnov za doseganje večje učinkovitosti in trajnosti.

SC ima več vidikov, ki predstavljajo različne perspektive upravljanja SC. Pogled vodje proizvodnje na SC se razlikuje od pogleda vodje trženja, ki se spet razlikuje od pogleda vodje oskrbe itd. Zato so uporabljeni modeli različni celo za isto podjetje, kaj šele za celoten SC.

Pri reševanju problemov SMA v logistiki morajo menedžerji sprejemati odločitve na strateški, taktični in operativni ravni glede na njihov učinek na KS ali TN kot celoto. Zaradi njihove medsebojne odvisnosti menedžerji pogosto ne morejo reševati problemov na nobeni posamezni ravni. Hkrati je tudi težko opazovati vse tri ravni z vidika posamezne enote. Z vidika SMA je mogoče opazovati KS ali TN na dveh ravneh:

#### 1. Makro raven

- samoorganizacija,
- so-razvoj entitet,



- odvisnost od povezav/prevoznih poti.

## 2. Mikro raven

- številne in heterogene entitete,
- lokalne interakcije med entitetami,
- strukturirane subjekte,
- prilagodljive entitete.

Čeprav se izvajajo v realnem času, je časovni vidik operacij SC nekoliko dvoumen. Odvisno od ravni in vidika se lahko trajanje operacij meri v dnevih, tednih ali celo mesecih, kadar gre za medorganizacijske dejavnosti, medtem ko se po drugi strani notranje organizacijske operacije merijo v urah ali celo sekundah. Glede na naravo modeliranega problema trajanje najkrajše operacije ali največja pogostost vhodnih/izhodnih zahtevkov ne določa le predstavitev časa v modelu SMA, temveč tudi njegovo granulacijo. Čim krajše je najkrajše trajanje najkrajše operacije ali čim večja je najvišja frekvenca zahtevkov, tem večja je granularnost časa ali z drugimi besedami natančnost vodenja časa v modelu. To je pomembno za izdelovalca modela, saj reakcijski čas modela ne more biti krajši od vnaprej določene granulacije časa. Zato je treba vnaprej oceniti trajanje vseh operacij in čas med prihodi vhodnih/izhodnih signalov, da lahko pravilno določimo časovne enote modela sistema.

V simulacijskem modelu lahko čas napreduje po kritičnih dogodkih od transakcije do transakcije ali neprekinjeno. V slednjem primeru je potek časa v modelu neodvisen od pogostosti operacij. Pri časovnem toku, ki ga sprožijo kritični dogodki, se operacije sprožijo glede na čas njihovega pojavljanja, tj. kritičnih dogodkov. Prednost SMA je v tem, da lahko med simulacijo pospešimo potek časa v modelu, tako da procesi potekajo hitreje kot v realnem času. Tako je mogoče zgodaj napovedati naslednje dogodke.

Časi med vhodnimi simulacijskimi enotami in časi njihove obdelave/tranzita so lahko rezultat opazovanj in meritev. Če se ne spreminjajo, so deterministični. Vendar so običajno po svoji naravi stohastični. Zato je treba uvesti konstrukcije, ki modelirajo njihove verjetnostne porazdelitvene funkcije (npr. trikotno, enakomerno, eksponentno itd.).



## 4.2 Simulacija diskretnih dogodkov



Analiza DES ponuja vodji proizvodnje najbolj podroben vpogled v logistični (proizvodni) proces z doslednim in skladnim modelom. Tako je DES zelo cenjeno orodje za določanje obnašanja v realnem času in uporabe virov v procesni industriji, vključno z logistiko.

Konstrukti:

- Enote pretoka predstavljajo simulacijske enote (npr. naročila, materiali itd.), ki vstopajo v sistem na vhodu(-ih) in napredujejo skozi model sistema.
- Procesorji predstavljajo mobilne (npr. ljudje, viličarji itd.) in fiksne (npr. stroji, proizvodne linije itd.) vire, ki obdelujejo simulacijske enote.
- V čakalnih vrstah so enote pretoka shranjene do njihovega prehoda na naslednji razpoložljivi procesor.
- Konektorji določajo napredovanje enot po modelu sistema.

Lastnosti:

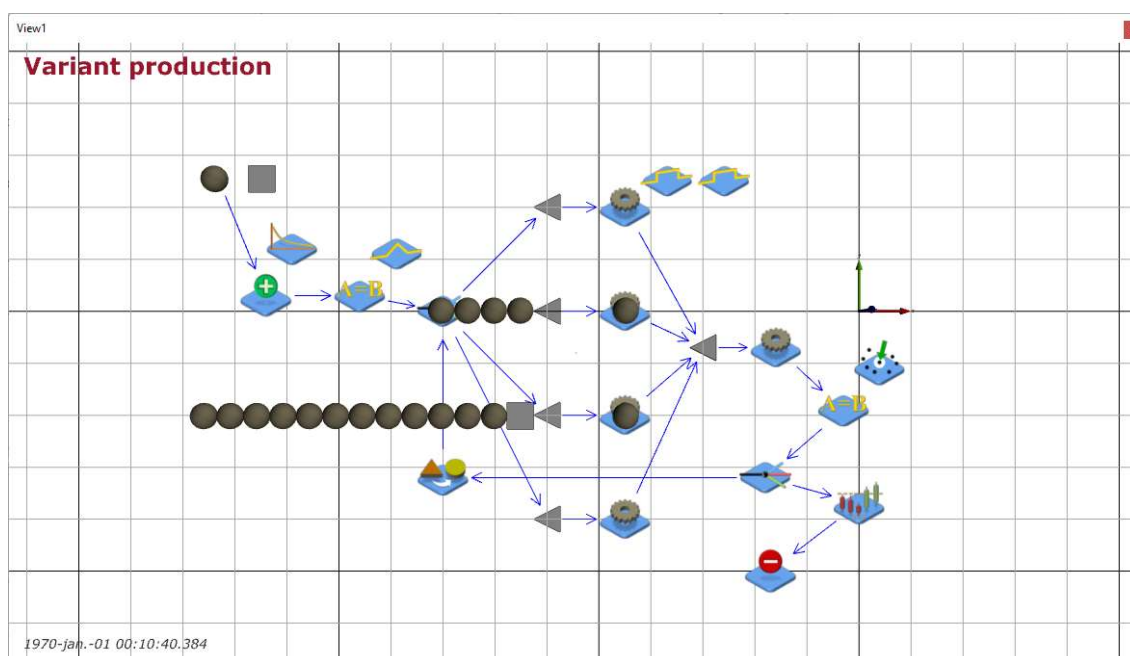
- Usmerjenost v proces.
- Osredotoča se na podrobno modeliranje procesov.
- Heterogeni subjekti.
- Mikrosubjekti so pasivni predmeti.
- Dogodki v sistem vnašajo dinamiko.
- Diskretno časovno napredovanje; od enega (časovnega) dogodka do naslednjega.
- Prilagodljivost je dosežena s spreminjanjem strukture modela; struktura sistema med simulacijo je fiksna.

### Primer

Primer DES (slika 4.1, povzeta iz simulacijskega okolja JaamSim (JaamSim Development Team, 2023)) vključuje model proizvodnje variant, kjer se proizvajajo štirje različni izdelki (Gumzej in Rakovska, 2020). V skladu s proizvodnim načrtom se proizvede približno 10, 30, 40 in 20 % vrst izdelkov 1, 2, 3 oziroma 4. Izbira vrste izdelka je posledica trikotniške porazdelitve med 1 in 4 z modulom pri 3. Vsaka vrsta izdelka ima posebno proizvodno linijo. Proizvodna naročila se izpolnijo



v skladu z eksponentno porazdelitvijo okoli 30-s povprečne časovne vrednosti. Proizvodnja vsakega posameznega izdelka traja 100-120 s v skladu z enakomerno porazdelitvijo. Ko so izdelki dokončani, se njihova kakovost preveri na posebnem testnem mestu. Preverjanje kakovosti traja 10 s. Po izkušnjah podjetja v povprečju vsak 1 od 10 izdelkov ne ustreza zahtevam pregleda. Izdelki nezadostne kakovosti se prepeljejo nazaj na prvotno proizvodno linijo. Njihova ponovna obdelava traja 120-130 s glede na enakomerno porazdelitev. Trajanje proizvodnje in pregleda kakovosti ter ponovne obdelave ni odvisno od vrste izdelka. Po uspešno opravljenem pregledu kakovosti se končni izdelki prepeljejo s proizvodnega mesta v skladišče končnih izdelkov. Ponovna proizvodnja izdelkov z napako, ko so ti še v proizvodnji, je učinkovit način za zmanjšanje vplivov na okolje in proizvodnih stroškov.



**Slika 4.1 Proizvodnja variant z nadzorom kakovosti.**

#### Povzetek

Z DES je mogoče analizirati in optimizirati naslednje parametre postopka:

- Čas proizvodnega cikla in učinkovitost.
- Uporaba proizvodnih celic in prostorov.
- Zmogljivost prostorov za shranjevanje in čas bivanja enote za shranjevanje.
- Uporaba mobilnih virov (npr. upravljavcev, transporterjev, viličarjev).



## 4.3 Dinamika sistema



Analiza SD predstavlja pogled vodje SC na proizvodni proces z doslednim in skladnim modelom. SD velja za orodje, ki je najprimernejše za določanje strukture in optimalnih količin (kdaj in koliko) vhodov, zalog in izhodov posameznega mesta. Zato omogoča učinkovito uporabo proizvodnih in skladiščnih zmogljivosti.

Konstrukti:

- Zaloge predstavljajo rezervoarje, v katerih se lahko shranjujejo predmeti dobave v oskrbovalni verigi.
- Tokovi predstavljajo dobavne poti.
- Povratne zanke predstavljajo parametre za natančno uravnavanje dopolnjevanja zalog.

Lastnosti:

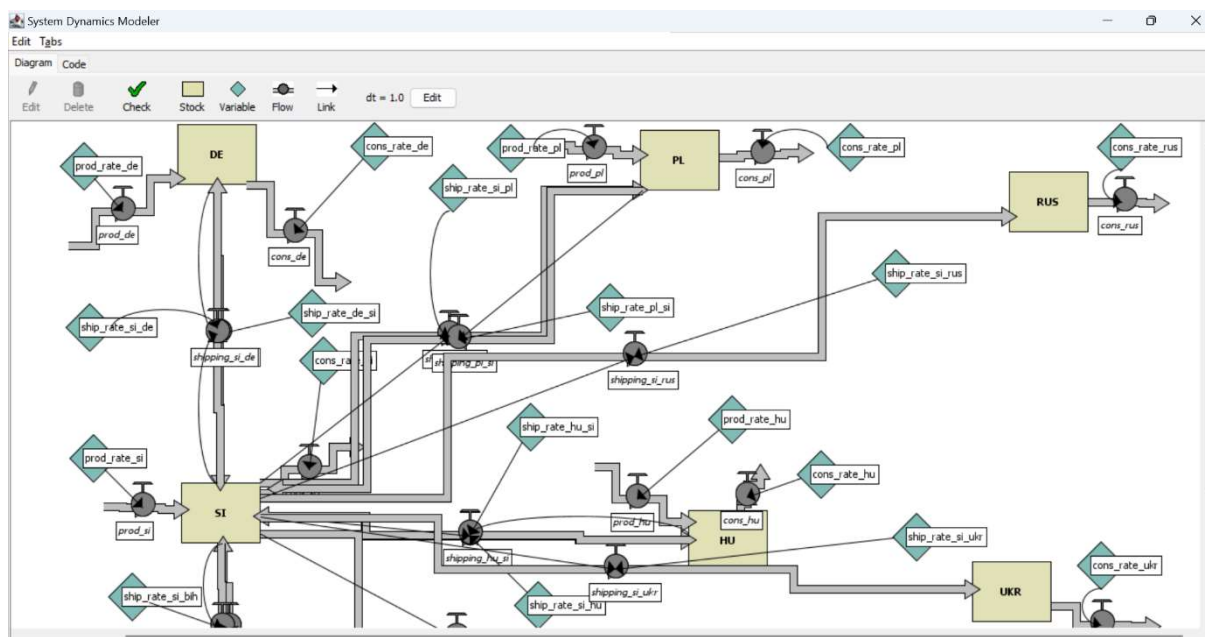
- Osredotočenost na sistem.
- Ključni kazalniki uspešnosti, usmerjeni v modeliranje sistemskih spremenljivk.
- Homogene enote.
- Subjekti na mikroravni se ne upoštevajo.
- Dinamika se uvaja s povratno zanko.
- Neprekinjeno časovno napredovanje; čas napreduje sinhrono za vse komponente modela sistema.
- Prilagodljivost se doseže s spreminjanjem strukture modela.
- Struktura sistema med simulacijo je fiksna.

### Primer

Primer SD (slika 4.2, povzeta iz simulacijskega okolja NetLogo (Wilensky, 1999)) zajema SC podjetja za gospodinjske aparate in opisuje materialne tokove med njegovimi podružnicami (Gumzej in Rakovska, 2020). Podjetje ima več proizvodnih obratov: glavni obrat v Sloveniji (SI) ter hčerinska podjetja v Nemčiji (DE), na Poljskem (PL), Madžarskem (H) ter v Bosni in Hercegovini (BIH). Poleg proizvodnih obratov so obrati za bruto prodajo v Rusiji (RUS), Ukrajini (UKR) in

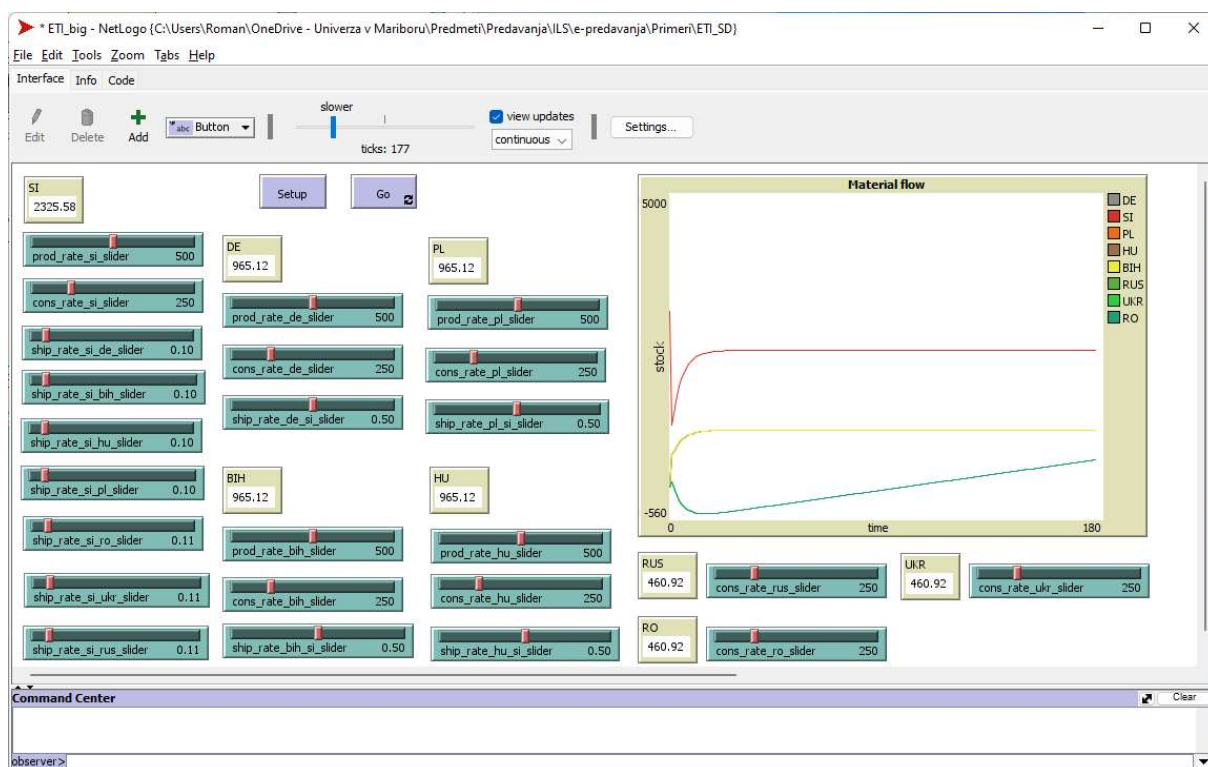


Romuniji (RU). Proizvodni obrati oskrbujejo svoje trge s končnimi izdelki, drug drugemu pa dobavljajo sestavne dele izdelkov.



Slika 4.2 Razporeditev SC.

Povezana nadzorna plošča NetLogo (slika 4.3) služi kot orodje za podporo odločanju (DST), ki omogoča povezovanje količin proizvodnje in zalog s predispozicijami in njihovo fizično porazdelitvijo. Časovni tok je neprekinjen skozi vsakodnevne transakcije, tj. vsak dan se določeno število sestavnih delov pošlje med proizvodnimi lokacijami in določeno število končnih izdelkov se porabi na lokaciji ali pošlje na distribucijske lokacije. Na podlagi začetne zaloge 300 enot na lokaciji SI in 0 zalog na drugih lokacijah ter distribucijskega modela količine zalog na posameznih lokacijah predstavljajo povprečno zalogo glede na dane stopnje proizvodnje (v kosih), porabe (v %) in pošiljanja (v %).



Slika 4.3 Nadzorna plošča SC.

## Sinopsis

Simulacija sistemske dinamike omogoča:

- Načrtovanje postavitve SC.
- Optimizacija proizvodnih in distribucijskih zmogljivosti.
- Ocena obremenitve distribucijskih kanalov in s tem povezanih stroškov.

## 4.4 Simulacija na podlagi agentov

Analiza ABS ponuja pogled strateškega menedžerja ali tržnega regulatorja na trg. Zato ABS velja za orodje, ki je najprimernejše za določanje optimalne strukture in razporeditve/asortimenta posameznega trga in/ali SC ob upoštevanju njihovih globalnih značilnosti (npr. demografija, podnebje, BDP, kakovost, ozaveščenost itd.).



Konstrukcije:

agenti, ki predstavljajo vozlišča oskrbovalne verige (npr. dobavitelji, trgovci na drobno in inšpektorji) s svojimi lastnostmi, odnosi in obnašanjem.





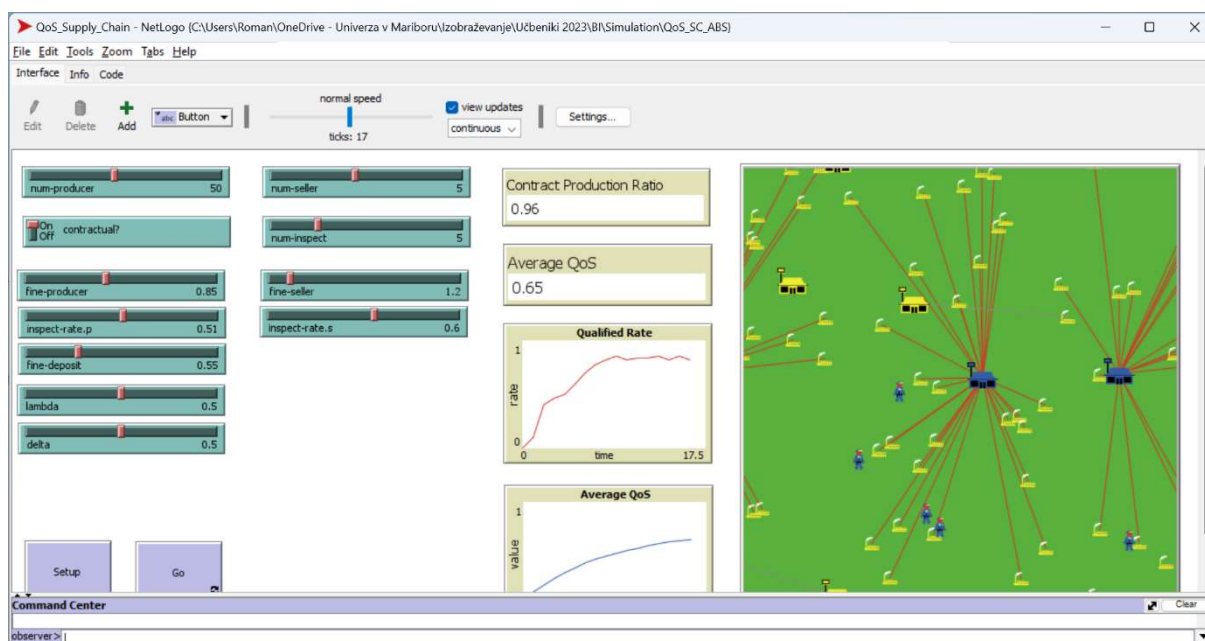
Lastnosti:

- Osredotočenost na entiteto.
- Problemsko usmerjeno modeliranje entitet in njihovih interakcij.
- Heterogenost subjektov.
- Mikro-objekti so aktivni predmeti, ki delujejo v svojem okolju, komunicirajo med seboj in samostojno sprejemajo odločitve.
- Odločitve in interakcije med agenti vnašajo dinamiko v sisteme.
- Agenti in njihova okolja so formalni modeli.
- Časovni tok je diskreten in univerzalen na ravni modela; časovni potek modela je skladen s pogostostjo transakcij SC in življenjskimi cikli vozlišč SC.
- Prilagodljivost modela je dosežena s spreminjanjem strukture sistema in obnašanja agentov.
- Struktura sistema med simulacijo je spremenljiva.

#### Primer

Primer ABS (slika 4.4, povzet iz simulacijskega okolja NetLogo (Wilensky, 1999)) je bil uporabljen za analizo obnašanja ešalonov SC na odprtem trgu (Gumzej in Rakovska, 2020) glede na njihovo kakovost storitev (QoS). V tem primeru so bile različne politike v zvezi z upravljanjem celovite kakovosti podjetja raziskane z modelom, ki je vključeval njegove dobavitelje, odjemalce in tržne regulatorje.





Slika 4.4 Ureditve trga.

## Sinopsis

Simulacija, ki temelji na agentih, omogoča:

- Načrtovanje postavitve SC.
- Modeliranje dinamične rasti SC.
- Modeliranje obnašanja partnerjev v SC.
- Optimizacija globalnih kazalnikov.

## 4.5 Simulacija omrežja



Analiza NS ponuja pogled regulatorja omrežja na omrežje. Zato NS velja za najprimernejše orodje za določanje optimalne strukture, postavitve in izbora omrežja ob upoštevanju njegovih globalnih značilnosti (npr. prepustnosti, emisij, kazalnikov QoS itd.).

Konstrukcije:

Agenti, ki predstavljajo predmete toka z njihovimi lastnostmi, odnosi in obnašanjem.

Omrežje, ki predstavlja prekrivno omrežje (npr. prometno omrežje), v katerem se predmeti pretoka pretakajo.

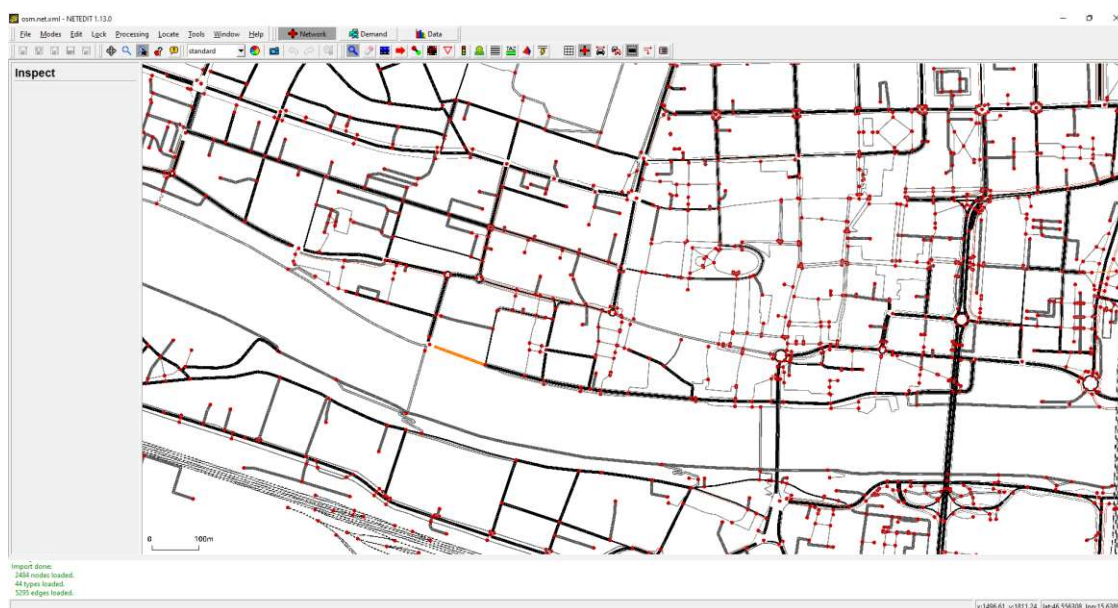


Lastnosti:

- Osredotočenost na sistem.
- Problemsko usmerjeno modeliranje entitet in njihovih interakcij.
- Heterogenost subjektov.
- Mikroobjekti so aktivni predmeti, ki delujejo v svojem okolju, komunicirajo med seboj in samostojno sprejemajo odločitve.
- Odločitve in interakcije med agenti vnašajo dinamiko v sisteme.
- Agenti in njihova okolja so formalni modeli.
- Časovni tok je diskreten in univerzalen na ravni modela; časovni potek je skladen z relativnimi hitrostmi predmetov toka.
- Prilagodljivost modela je dosežena s spreminjanjem strukture omrežja, ki je med simulacijo nespremenljiva, in obnašanja agentov, ki se spreminja glede na stanje (prometnega) omrežja in njihove cilje.

#### Primer

Predstavljeni primer (slika 4.5, vzeta iz simulacijskega okolja SUMO (Pablo et.al., 2018)) je bil uporabljen za določitev prometnih tokov in prepustnosti ulic v mestnem središču, ki jih je prizadela načrtovana zapora ceste (Šinko in Gumzej, 2021). Poleg tega so bili izmerjeni s prometom povezani kazalniki, kot so potovalni časi, poraba goriva in emisije.



Slika 4.5 Prometne razmere in omrežje.

## Sinopsis

Simulacija omrežja omogoča:

- Načrtovanje postavitve omrežja.
- Modeliranje dinamičnega obnašanja omrežja za določitev ozkih grl in šibkih členov.
- Modeliranje pretoka omrežnih elementov.
- Optimizacija kazalnikov globalnega omrežja.

## 4.6 Logistični simulacijski projekti

Logistični simulacijski projekti so zasnovani v skladu s paradigmo Design for Six Sigma (DFSS) in temeljijo na Demingovem ciklu izboljšav:



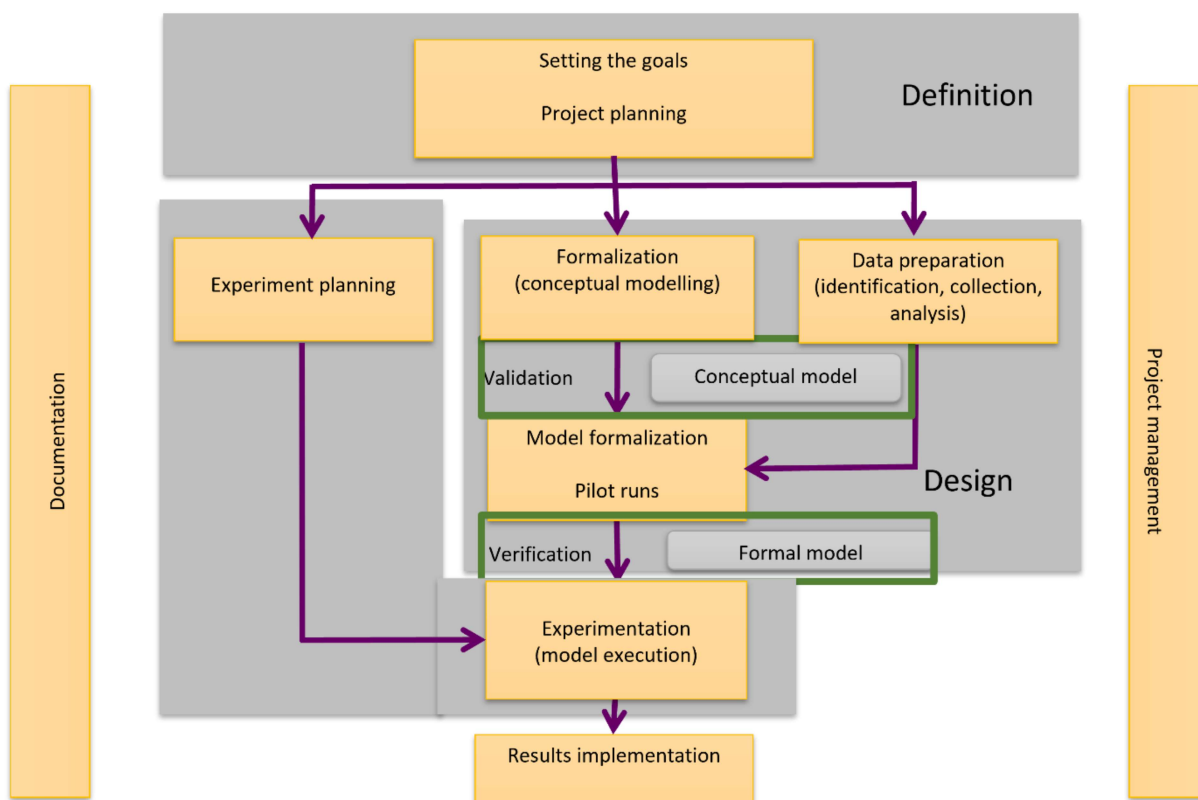
- Načrtovanje: opredelitev sistema in ciljev.
- Izvedba: oblikovanje simulacijskega modela.
- Analiza: eksperimentiranje s simulacijskim modelom in ocenjevanje alternativ.
- Ukrep: uporaba rezultatov simulacije za izvajanje izboljšav.

Vsak projekt logistične simulacije (slika 4.6) je sestavljen iz sedmih faz:

1. Strateški načrt: analiza obstoječih in predlaganih virov in procesov.



2. Konceptualni model: opredelitev abstraktnega modela sistema in predispozicij, zbiranje podatkov.
3. Logični model: diagram pretoka objektov, zalog in tokov ali mrežni diagram modela sistema.
4. Simulacijski model: razvoj ustreznega simulacijskega modela.
5. Preverjanje in potrjevanje simulacijskega modela: preverjanje doslednosti in skladnosti modela.
6. Analiza na podlagi simulacijskega modela: načrtovanje in izvedba poskusov.
7. Uporaba rezultatov simulacije za pripravo akcijskega načrta: projekcija izboljšav sistema.



Slika 4.6 Postopek simulacijskega modeliranja in analize (SMA).

## 4.7 Zaključek

V logistiki je SMA pomembna sestavina operacijskih raziskav (OR), ki omogoča optimizacijo procesov.

Sistemska dinamika (SD) je metodologija za analizo kompleksnih, dinamičnih in nelinearnih interakcij v sistemih, ki omogoča oblikovanje novih struktur in politik za izboljšanje obnašanja



sistema. Pri tem se obravnavajo fizični in informacijski tokovi, da bi se zmanjšala njihova zamuda, in nazadnje zaloge SC.

Druga priljubljena procesno usmerjena metodologija je simulacija diskretnih dogodkov (DES). To je eno od najbolj razširjenih in prilagodljivih analitičnih orodij v SMA proizvodnih sistemov. Uspešno obravnava negotovost in zagotavlja možnosti za primerjavo alternativnih načinov za skrajšanje dobavnega časa ter optimizacijo izkoriščenosti strojev in virov.

Uporabna metodologija za razumevanje vedenja organizacij in njihovih interakcij (npr. SC in njihovih entitet) je simulacija na podlagi agentov (ABS). Simulacija omrežja (NS), ki je posebna vrsta ABS, omogoča modeliranje in optimizacijo (prometnih) prekrivnih omrežij.

To vodi do zaključka, da celostni pristop k uporabi SMA v logistiki pomembno prispeva k odločitvam o oblikovanju kompleksnih sistemov, kjer je veliko spremenljivk, ki medsebojno vplivajo druga na drugo. Uporaben celostni pristop, ki vključuje metodologije SD, DES in ABS ter lahko količinsko opredeli delovne tokove na različnih ravneh oskrbovalne verige, je bil predstavljen v (Gumzej in Rakovska, 2020). Pri analizi in optimizaciji prometnih tokov metodologija NS zagotavlja potreben okvir glede spremljanja in natančnega prilagajanja ključnih kazalnikov uspešnosti (Šinko in Gumzej, 2021).

## LITERATURA POGLAVJE 4

- 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.