

Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima

Mataija, Marina

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:873432>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

MARINA MATAIJA

MODELIRANJE I SIMULACIJE ZASNOVANE NA
AGENTIMA

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

**MODELIRANJE I SIMULACIJE ZASNOVANE NA
AGENTIMA**

AGENT BASED MODELING AND SIMULATION

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Modeliranje i simulacije

Mentor: doc. dr. sc. Dario Ogrizović

Studentica: Marina Mataija

Studijski smjer: Logistika i menadžment u pomorstvu i prometu

JMBAG: 0112062537

Rijeka, Listopad 2020.

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom
Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima

izradila samostalno pod mentorstvom profesora
doc. dr. sc. Daria Ogrizovića

te komentorstvom asistentice
Valentine Šutalo, mag. ing. logist.

U radu sam primijenila metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasna sam s trajnom pohranom diplomskog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:

a) rad u otvorenom pristupu

Studentica

Marina Mataija



SAŽETAK

Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima (ABMS) novi je pristup sustavima za modeliranje koji se sastoje od autonomnih, interakcijskih agenata. Modeliranje zasnovano na agentima nudi načine za lakše modeliranje pojedinačnih ponašanja i kako to isto ponašanje uječe na druge. Postoji veliki interes za razvijanje modela zasnovanih na agentima kako bi se brže i efikasnije riješili problemi u modeliranju i simulacijama. Različite situacije i sustavi karakterizirani su prisutnošću autonomnih cjelina čija lokalna određuju evoluciju cjelokupnog sustava. Agencijski modeli posebno su prikladni za podršku definiranju modela takvih sustava, ali i za podršku dizajnu i implementaciji simulatora. Modeli zasnovani na agentima i sustavi s više agenata (MAS) usvojeni su kako bi simulirali vrlo različite vrste složenih sustava, od simulacije socio-ekonomskih sustava do razrade scenarija za optimizaciju logistike, od bioloških sustava do urbanog planiranja. Primjena ove metode modeliranja koristi se na tržištu dionica, opskrbnih lanaca i potrošačkih tržišta pa sve do predviđanja širenja epidemija, regulacije prometa i ostalo. Takav napredak otkriva potencijal ABMS-a i potiče na sve češće korištenje ove metode. Neki tvrde da je ABMS treći način bavljenja znanošću i da bi mogao uvećati tradicionalno deduktivno i induktivno zaključivanje kao metode otkrivanja.

Ključne riječi: modeliranje, simulacija, agenti, promet

SUMMARY

Agent-based modeling and simulations (ABMS) is a new approach to modeling systems consisting of autonomous, interacting agents. Agent-based modeling offers ways to more easily model individual behaviors and how that same behavior affects others. There is great interest in developing agent-based models to solve modeling and simulation problems more quickly and efficiently. Different situations and systems are characterized by the presence of autonomous entities whose local ones determine the evolution of the entire system. Agency models are particularly suitable for supporting the definition of models of such systems, but also for supporting the design and implementation of simulators. Agent-based models and multi-agent systems (MAS) have been adopted to simulate very different types of complex systems, from simulating socio-economic systems to developing scenarios for logistics optimization, from biological systems to urban planning. The application of this

modeling method is used in the stock market, supply chains and consumer markets, all the way to predicting the spread of epidemics, traffic regulation and more. Such progress reveals the potential of ABMS and encourages the increasing use of this method. Some argue that ABMS is a third way of engaging with science and could increase traditional deductive and inductive reasoning as methods of discovery.

Key words: modeling, simulation, agents, traffic

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	III
1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA	1
1.2. RADNA HIPOTEZA.....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.4. ZNANSTVENE METODE	2
1.5. STRUKTURA RADA	2
2. MODELIRANJE I SIMULACIJE	4
2.1. SVRHA SIMULACIJE.....	4
2.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI SIMULACIJE	5
2.3. SUSTAV I MODELI	8
2.3.1. Vrste sustava.....	8
2.3.2. Modeli i vrste modela.....	9
2.4. POJMOVI SIMULACIJE DISKRETNIH DOGAĐAJA	11
3. MODELIRANJE I SIMULACIJE ZASNOVANE NA AGENTIMA	14
3.1. POVIJESNI RAZVOJ I PODRUČJE PRIMJENE ABMS MODELA	16
3.2. POJAM AGENTA I KOMUNIKACIJA IZMEĐU AGENATA	21
3.2.1. Direktna/Izravna komunikacija među agentima.....	25
3.2.2. Indirektna/Neizravna komunikacija među agentima.....	26
3.3. PLATFORME ZA SIMULACIJU ZASNOVANU NA AGENTIMA.....	30
3.3.1. NetLogo.....	30
3.3.2. Repast i SimSesam	31
3.3.3. Swarm.....	33
4. PRIMJENA MODELIRANJA U PROMETU I TRANSPORTU	35
4.1. AGENCIJSKO MODELIRANJE PROMETNE SIMULACIJE	35
4.1.1. Protok prometa	36
4.1.2. Modeliranje i simulacija prometa.....	37
4.1.3. Prijedlog modela.....	39
4.2. MODELIRANJE I SIMULACIJE ZASNOVANE NA AGENTIMA ZA DIZAJN BUDUĆEG EUROPSKOG SUSTAVA UPRAVLJANJA ZRAČNIM PROMETOM NA PRIMJERU: CASSIOPEIA	43

4.2.1. Modeliranje izazova za dizajn budućih sustava za upravljanje zračnim prometom	44
4.2.2. Pristup zasnovan na agentima - Primjer CASSIOPEIA	46
4.2.3. Krajnji rezultati i zaključak provedenih studija	54
4.3. SIMULACIJA ZASNOVANA NA AGENTIMA U DOBAVNOM LANCU.....	55
5. SIMULACIJSKI MODUL ZASNOVAN NA AGENTIMA	58
5.1. PRIMJER 1 U FLEXSIMU	58
5.2. PRIMJER 2 U FLEXSIMU	63
6. PREDNOSTI I NEDOSTACI.....	70
6.1. PREDNOSTI.....	70
6.2. NEDOSTACI.....	71
7. ZAKLJUČAK	72
LITERATURA.....	75
KAZALO KRATICA	77
POPIS SLIKA	78
POPIS GRAFIKONA.....	79

1. UVOD

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Na osnovi relevantnih činjenica o problematici znanstvenoga istraživanja može se definirati **problem istraživanja**: Sve više se u praksi na različitim poljima primjenjuju modeliranje i simulacije. Razlog tome je brže rješenje određenog problema ili otkrivanje rješenja za potencijalne događaje u budućnosti. Relevantne spoznaje o problematici i problemu istraživanja predstavljaju znanstvenu podlogu za definiranje **predmeta istraživanja**: Modeliranje i simulacije mogu se izvoditi na više načina, a u ovom istraživanju bit će detaljnije objašnjena metoda zasnovana na agentima. Problem i predmet istraživanja odnose se na dva međusobno povezana **objekta istraživanja**, i to da su modeli zasnovani na agentima intuitivniji i realniji od matematičkih ili statičkih modela i zbog toga svoju primjenu sve češće pronalaze u različitim granama znanosti. U ovom radu fokus je na modeliranju i simulacijama zasnovanim na agentima općenito i na njihovoj primjeni u praksi.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Sukladno bitnim odrednicama problema, predmeta i objekta istraživanja postavljena je **radna hipoteza**: Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima noviji je pristup modeliranju koji se sastoji od više povezanih agenata ovim pristupom moguće je ostvariti dalekosežne učinke na način na koji znanstvenici koriste laboratorije za svoja istraživanja. Napredak tehnologije omogućio je sve veći broj modela izrađenih na temelju agenata u raznim područjima modeliranja. Na taj način ovom vrstom modeliranja olakšat će se brojna istraživanja i procesi.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i ciljevi istraživanja ovog diplomskog rada jesu prikazati kako funkcionira pristup modeliranja i simulacija zasnovanih na agentima, sve dobre i loše strane ovakvog pristupa

modeliranja i prikaz na različitim primjerima. Čitatelji će dobiti odgovore na sljedeća pitanja:

1. Koja je svrha simulacije?
2. Što je to modeliranje zasnovano na agentima?
3. Tko su to agenti i kako međusobno komuniciraju?
4. Koje se platforme koriste za simulacije zasnovane na agentima?
5. Na koji se način ova metoda provodi u prometu i transportu?
6. Koje su prednosti, a koji nedostaci ove metode?

1.4. ZNANSTVENE METODE

Prilikom pisanja ovog diplomskog rada korištena je kombinacija sljedećih znanstveno istraživačkih metoda: metoda indukcije i dedukcije, metoda deskripcije, metoda komparacije, statistička metoda te metoda dokazivanja i opovrgavanja.

1.5. STRUKTURA RADA

Rezultati istraživanja prikazani su u nekoliko međusobno povezanih cjelina.

U prvom dijelu rada, **Uvodu**, navedeni su problem, predmet i objekt istraživanja, obrazloženi su svrha i ciljevi istraživanja te su navedene znanstvene metode koje su korištene tijekom pisanja diplomskog rada.

Drugi dio rada nazvan je **Modeliranje i simulacije**. U tom dijelu rada detaljno je objašnjeno što je modeliranje i simulacije, koja je svrha simulacije, njezine prednosti i nedostatke. Objašnjene su i vrste sustava i modela te pojmovi simulacije diskretnih događaja.

U trećem dijelu rada naziva **Modeliranje zasnovano na agentima** analiziran je povijesni razvoj primjene ABMS modela, objašnjeno je i što su to agenti, kako oni međusobno komuniciraju te su objašnjene platforme koje se koriste za simulacije zasnovane na agentima.

Četvrta cijelina nazvana je **Primjena modeliranja u prometu i transportu**. Unutar cijeline detaljnije je objašnjeno agencijsko modeliranje prometne simulacije te je prikazan i

analiziran primjer za dizajn budućeg europskog sustava upravljanja zračnim prometom na primjeru Cassiopele.

U petoj cjelini naziva **Simulacijski modul zasnovan na agentima** prikazan je i analiziran simulacijski modul zasnovan na agentima izrađen u programu .

Prednosti i nedostaci ove metode navedeni su i opisani u cjelini šest.

U posljednjem dijelu, **Zaključku**, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazivana postavljena radna hipoteza.

2. MODELIRANJE I SIMULACIJE

Već desetljećima razvoj, analiza i eksperimentiranje s modelima bili su značajan dio istraživanja unutar različitih grana znanosti. Modeliranje je proces analize stvarnih problema te kreiranja matematičke reprezentacije u svrhu predviđanja ponašanja određenog sustava.

Simulacija je model određenog stvarnog sustava koji dopušta dinamičko izvršavanje i manipulaciju istoga. Postoje brojni udžbenici o modeliranju i simulacijama koji pružaju dobar uvod u modeliranje i simulacije općenito ili su pak pisani sa naglaskom na određena područja.

S obzirom da je ideja modeliranja i simulacije upotreba modela umjesto pravog sustava, najbolja moguća podudarnost između prethodnog i sljedećeg je od ključnog značaja. Prihvatljiv stupanj valjanosti naravno jasno ovisi o cilju modela i simulaciji.

Mogući ciljevi mogu biti povećanje razumijevanja izvornog sustava, njegovo optimiziranje ili predviđanje reakcije sustava na određene mjere.

Postoji nekoliko različitih pristupa za modeliranje koji koriste različite predstavničke formalizme i metode simulacije. Najbolji izbor paradigme za modeliranje ovisi o svojstvima sustava pod istragom i o ciljevima simulacijske studije. Različite paradigme mogu se karakterizirati temeljnim prikazom vremena (kontinuirano naspram diskretnog) ili zrnitosti elemenata modela (makroskopski, mikroskopski).

2.1. SVRHA SIMULACIJE

Simulacijsko modeliranje i analiza različitih tipova sustava provode se u svrhu dobivanja informacija bez da ometaju stvarni sustav, dobivanje uvida u rad sustava koji u određenim situacijama zna biti i problematičan, razvijanje resursa za poboljšanje performansi sustava kao i za testiranje novih sustava prije implementacije.

Korištenje simulacije u poslu je raznoliko i često se koristi kada je provođenje eksperimenata na stvarnom sustavu nemoguće ili nepraktično, često zbog troškova ili vremena.

Dobivanje informacija bez da se ometa stvarni sustav omogućava da se eksperimentiranje provodi bez da se prekida rad postojećih sustavi. U onim sustavima koji već postoje, testiranje nekih novih ideja može biti problematično u smislu da je provođenje testiranja jako

skupo, teške ili jednostavno nemoguće. Prvi korak bi trebao biti izrada željenih modifikacija i određivanje utjecaja koje one imaju na sustav, a tek onda donošenje odluka o primjeni promjena u stvarnom sustavu.

Simulacija omogućuje eksperimentiranje na valjanom digitalnom predstavljanju sustava. Za razliku od fizičkog modeliranja, poput izrade kopija zgrade u skali, simulacijsko modeliranje se temelji na računalu i koristi algoritme i jednadžbe. Softver za simulaciju pruža dinamično okruženje za analizu računalnih modela dok se oni pokreću, uključujući mogućnost pregleda u 2D ili 3D.¹

Neki od sustava su toliko složeni da je vrlo teško razumjeti interakcije i rad unutar sustava bez izrade dinamičkog modela. Kod razvoja procesa i resursa već postojeći sustavi žele se unaprijediti.

Postoje dva temeljna načina kako poboljšati postojeći sustav, a to su promjene u poslovanju koje mogu uključivati različite prioritete podjele poslova ili promjene u politikama resursa koje mogu uključivati raspored rada.

2.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI SIMULACIJE

Simulacijsko modeliranje rješava probleme u stvarnom svijetu sigurno i učinkovito. Pruža važnu metodu analize koja se lako provjerava, komunicira i razumije. U svim industrijama i disciplinama simulacijsko modeliranje nudi vrijedna rješenja pružajući jasan uvid u složene sustave, stoga simulacija kao takva ima više prednosti nego nedostataka.

Neke od prednosti su da simulacijsko modeliranje pruža siguran način testiranja i istraživanja različitih scenarija "*What if?*".²

Učinak promjene razine osoblja u postrojenju može se vidjeti bez izloženosti proizvodnji što stvara okruženje bez određenih rizika.

Virtualni eksperimenti sa simulacijskim modelima su jeftiniji i brže izvedivi nego eksperimenti sa stvarnom imovinom. Marketinške kampanje mogu izvoditi testiranje bez konkurencije ili nepotrebnog trošenja novca što je jedna od većih prednosti simulacije.

¹ Izvor: <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/> (15.07.2020.)

² Izvor: Ibidem

Za razliku od analitike temeljene na proračunskim tablicama, simulacijsko modeliranje omogućava promatranje ponašanja sustava tijekom vremena, na bilo kojoj razini detalja. Na primjer, provjera iskorištenosti skladišnog prostora u bilo kojem trenutku.

Simulacijski model može prikupiti puno više detalja od analitičkog modela, pružajući povećanu točnost i preciznije predviđanje. Također, eksperimentalne simulacije mogu se izvršiti u komprimiranom vremenu što znači i veliku uštedu vremena, pošto neki procesi znaju trajati mjesecima pa čak i godinama.

Iako simulacije imaju brojne prednosti primjene bitno je napomenuti da postoje i određeni nedostaci simulacija kojih je znatno manje, ipak stvaraju velike probleme. Da bi se određeni proces simulirao potrebno je temeljito razumijevanje i svijest o svim uključenim čimbenicima, bez toga je nemoguće stvoriti simulaciju.

Bez obzira koliko je model dobro napravljen i razvijen, kada su ulazni podaci u simulaciji netočni, simulacija ne može dati točne i ispravne rezultate. Stoga je iznimno važno znanje i razumijevanje. Čest problem je što se uzimaju stari podaci sumnjive kvalitete kako bi se uštedjelo vrijeme prikupljanja ulaznih podataka.

Još jedan nedostatak je taj da simulacija ne može dati jednostavan odgovor na složene probleme. Kada se model ide pojednostaviti na način da se zanemare kritični elementi sustava zaključci će u većini slučajeva biti netočni. Na slici 1 moguće je vidjeti grafički prikaz prednosti i nedostataka simulacije.



Slika 1 Prednosti i nedostaci simulacije

Izvor: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zvxp34j/revision/3> (15.07.2020.)

Iako neki smatraju da će simulacija modela i analiza podataka možda riješiti određeni problem, simulacija kao takva ne nudi rješenje problema već pruža potencijalna rješenja za rješavanje problema.

Izrada simulacijskog modela može zahtijevati specijaliziranu obuku što može biti jako složen zadatak jer se cjelokupni postupak obuke odnosi i na simulacijsko modeliranje i na analizu izlaznih podataka.

Prednost primjene simulacije je ušteda vremena i novca, ali nedostatak je u tome što razvoj složenog simulacijskog modela može biti vrlo dugotrajan i skup. Simulacijski softver kao takav ima vrlo visoku cijenu. Dugoročno gledajući isplati se uložiti u simulacijsko modeliranje s ciljem olakšavanja buduće primjene.

2.3. SUSTAV I MODELI

Sustav je skupina interaktivnih ili međusobno povezanih cjelina koje čine jedinstvenu cjelinu. Sustav je opisan svojim prostornim i vremenskim granicama, okružen i pod utjecajem njegove okoline, opisan strukturom i svrhom te izražen u svom funkcioniranju.³

Sustav se sastoji iz dijelova koji se nazivaju elementi ili komponente, gdje svaki element sustava djeluje na neki drugi element u sustavu. Svaki element sustava ima svoje atribute koji se opisuju s određenim vrijednostima. Elementi sustava dijele se na statički i dinamički.⁴

Schmidt i Taylor u svojoj su knjizi 1970. godine napisali da je sustav zbirka entiteta koji zajedno djeluju prema nekom kraju, a gdje su ti entiteti poruke, ljudi, dijelovi, serveri i drugi.⁵

2.3.1. Vrste sustava

Postoje dvije vrste sustava u modeliranju i simulacijama, a to su diskretni sustav i kontinuirani sustav.⁶

Kod diskretnog sustava statusne varijable mijenjaju se u odvojenim točkama u trenutnom vremenu. U tim trenucima se odvijaju događaji, pri čemu događaj predstavlja trenutno pojavljivanje koje može dovesti do promjene stanja sustava. U diskretnim modelima stanje sustava mijenja se samo u pojedinim točkama u vremenu (nema kontinuirane promjene stanja). Takve promjene nazivaju se događaji. Na primjer, u banci ili pošti promjena stanja javlja se samo onda kada klijent dolazi ili odlazi.

Od računalnih aplikacija za diskretnu simulaciju ističu se GPSS, Simula, ProModel, Arena, AnyLogic, SIMUL8 i druge.

Što se tiče kontinuiranog sustava, tu se stanje varijabli mijenja, kako i sam naziv kaže, kontinuirano u funkciji vremena. Za kontinuirane sustave karakteristično je da do promjene stanja sustava kao cjeline ili samo nekih njegovih elemenata može doći u bilo kojem trenutku, a promjene do kojih dolazi su blage odnosno, nisu skokovite. Preduvjet za kontinuiranu simulaciju je postojanje kontinuiranog toka vremena tijekom kojeg se

³ Izvor: <https://www.dictionary.com/browse/system> (15.07.2020.)

⁴ Izvor: https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/2008644/mod_resource/content/2/MiS1.pdf (15.07.2020.)

⁵ Izvor: Schmidt, J. W., Taylor, R. E. 1970., *Simulation and Analysis of Industrial Systems*, R. D. Irwin, p. 4

⁶ Izvor: https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/2008644/mod_resource/content/2/MiS1.pdf (17.07.2020.)

simulacija pokreće u određenim vremenskim koracima (stanje sustava se reevaluira u kratkim vremenskim intervalima).

Prava kontinuirana simulacija može se izvesti samo pomoću analognih računala, dok se pomoću računala može izvoditi samo približno kontinuirana simulacija odnosno aproksimira se tako da se formiraju dovoljno mali vremenski koraci da ne bi bilo tranzicija između stanja sustava od jednog do drugog koraka to jest, one se moraju aproksimirati skupom diskretnih vrijednosti. Predstavnici računalnih aplikacija za kontinuiranu simulaciju su: DYNAMO, Powersim, Vensim, STELLA (iThink) i dr.

Za primjer se mogu uzeti vožnja vlaka ili let zrakoplova, gdje se varijable kao što su brzina ili položaj kontinuirano mijenjaju. Također, postoje i sustavi koji su djelomično diskretni ili djelomično kontinuirani.

2.3.2. Modeli i vrste modela

Kako su model i sustav povezani i što je zapravo model? Model je način na koji čovjek može predočiti svoje iskustvo i znanje o sustavu koji se istražuje. Model se koristi za bolje razumijevanje strukture i ponašanje sustava. Njegova glavna funkcija je formuliranje novih ideja, ukoliko nema teorije model se uopće ne može izgraditi. U matematičkom smislu model možemo definirati kao približni opis nekih pojava ili objekata u stvarnom svijetu uz pomoć matematičke simbolike. Modeli se mogu podijeliti prema više različitih stajališta. Modeli se prema strukturi dijele na:⁷

1. fizički (koji se dalje dijele na ikoničke i analogne)
2. simbolički (apstraktni)

Prema ponašanju u vremenu oni su:

1. statički
2. dinamički

Prema načinu rješavanja modeli su:

1. konceptualni
2. matematički
3. simulacijski

⁷ Izvor: https://bib.irb.hr/datoteka/347082.modeliranje_i_simulacija_-_v2a2.pdf (17.07.2020.)

Prema posljednoj podjeli tri vrste modela su zapravo tri stupnja razvoja. Model je najprije prikazan konceptualno, na primjer shema ili opis riječima. Sljedeće se model formalizira u obliku matematičkog modela ili pak implementira kao program za elektroničko računalo kojim će se simulirati promjene realnog sustava tijekom vremena. Ovdje se radi o apstraktnim modelima. Zovu se tako jer su pojedini elementi tih modela prikazani simbolima ili brojčanim vrijednostima, odnosno apstraktnim pojmovima. Dinamički modeli tj. modeli sustava, mijenjaju se tijekom vremena i upravo te promjene je potrebno ispitivati simulacijom na računalu.

Postoje dva osnovna tipa podjele simulacijskih modela. Prvi se dijeli prema vrsti varijable u modelu, na taj način razlikujemo determinističke i stohastičke, dok se drugi dijele prema načinu na koji se stanje modela mijenja u vremenu. Razlikuju se diskretni, kontinuirani i kontinuirano diskretni modeli koji su prethodno u radu i opisani.

Kod determinističkih modela ponašanje je potpuno nepredvidivo, a novo stanje sustava u potpunosti je određeno prethodnim stanjem. Stohastički modeli su obrnuti, ponašanje se može unaprijed predvidjeti i moguće je odrediti vjerojatnost promjene stanja.

Veliku važnost u izradi dobrog modela imaju razumijevanje problema, sposobnost apstrakcije, sistematičnost, sposobnost razlikovanja bitnog od nebitnog i iskustvo. Upravo zbog toga tvrdnja da je modeliranje umijeće, a ne znanost ima savršenog smisla.

Slika 2 prikazuje dio računalnog modela. Računalni model je računalni program osmišljen da simulira što bi se moglo dogoditi ili što se dogodilo u nekoj situaciji. Zanimljivo je da se računalni modeli koriste u područjima kao što su simulacija performansi potresa ili izrada modela zgrada.⁸

⁸ Izvor: <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/explainer-what-computer-model> (17.07.2020.)



Slika 2 Računalni model

Izvor: <https://hr.flipperworld.org/pc/racunalni-model-je-koncept-stvaranje-i-primjeri-uporabe-racunalnih-modela> (17.07.2020.)

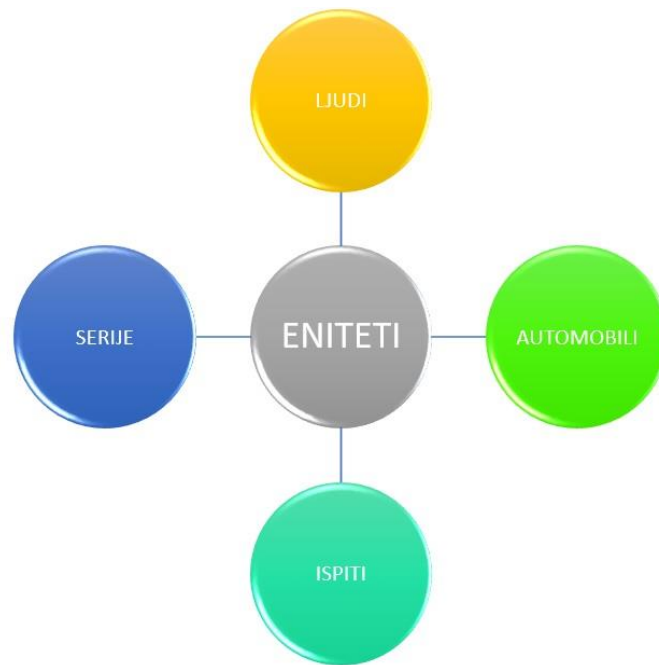
2.4. POJMOVI SIMULACIJE DISKRETNIH DOGAĐAJA

Osnovni pojmovi, odnosno komponente kod simulacije diskretnih događaja, su entiteti, redovi čekanja i resursi.⁹ Navedene tri komponente ne mogu funkcionirati zasebno i međusobno se povezuju.

Entiteti su zapravo ljudi ili objekti koji mijenja stanje određenog sustava. Na slici 3 prikazani su primjeri entiteta u sustavu. Broj entiteta koji pristižu u sustav u istom vremenu naziva se niz entiteta ili veličina serije. Vrijeme između dolazaka entiteta u sustav je recipročna vrijednost broja dolazaka. Atributi entiteta su varijable koje imaju vrijednosti jedinstvene za svaki pojedini entitet u sustavu.

Simulacijski programi također mogu koristiti globalne varijable. Globalne varijable ne treba miješati s atributima entiteta te se varijable razlikuju od atributa entiteta po tome što svaka globalna varijabla može imati samo jednu vrijednost u određenom vremenu. Tipična uporaba globalne varijable u simulacijskom programu je varijabla koja prati vrijeme izvođenja simulacije.

⁹ Izvor: op.cit. p. 30.



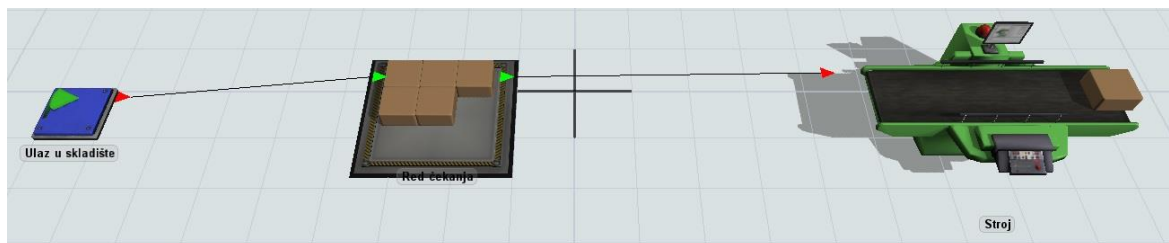
Slika 3 Primjeri entiteta

Izvor: Izradila studentica

Kada entiteti pristignu, obično odlaze u red čekanja. Jednostavni sustavi obično rade po principu FIFO (First In, First Out) gdje entiteti koji prvi uđu u red čekanja, prvi iz njega i izlaze te bivaju opsluženi. Karakteristika jednostavnih sustava je da kada entiteti uđu u sustav moraju ući i u red čekanja.

Nakon reda čekanja, entiteti odlaze prema resursima koji ih procesuiraju. Resursi mogu biti strojevi, radnici, serveri, agenti i slično. Kod jednostavnih modela, resursi mogu biti neaktivni ili zauzeti. Kada su resursi neaktivni to znači da nema više entiteta u redu čekanja, a kada su zauzeti znači da obrađuju neki entitet. Oni uzimaju određeno vrijeme za obradu entiteta.

Na slici 4 u programu Flexsim prikazan je ulaz, red čekanja i mjesto opsluživanja, u ovom slučaju stroj kao resurs, entitet koji prolazi kroz model pojavljuje se u obliku kutije.



Slika 4 Komponente sustava u programu Flexsim

Izvor: Izradila studentica

Osim pojmova, važno je objasniti i mjere izvedbe. Mjere izvedbe su izlazni podaci koji služe kako bi se mogla izvršiti usporedba sa alternativnim oblicima modela. Četiri su najčešće mjere izvedbe.¹⁰ *Vrijeme provedeno u sustavu* je ukupna količina vremena koje entitet provede u sustavu od trenutka kada stigne u sustav do trenutka izlaska iz sustava. *Vrijeme provedeno u redu čekanja* je slično prethodnoj mjeri no ovdje se računa samo ono vrijeme koje entitet provede u redu čekanja. *Prosječan broj entiteta u redu čekanja* je statistički podatak koji ovisi o vremenu, odnosno prosječan broj entiteta koji se može očekivati u redu čekanja u bilo kojem trenutku dok god je simulacija aktivna. Posljednja mjera je *iskoristivost resursa* koji je također vremenski ovisan statistički podatak gdje u bilo kojem trenutku neki resurs može biti neaktivan ili zauzet.

¹⁰ Izvor: Ibidem, p. 33.

3. MODELIRANJE I SIMULACIJE ZASNOVANE NA AGENTIMA

Model zasnovan na agentima je klasa računskih modela za simulaciju akcija i interakcija autonomnih agenata s ciljem procjene njihovih učinaka na sustav u cjelini. Ona kombinira elemente teorije igara, složenih sustava, nastajanja, računalne sociologije, sustava s više agenata i evolucijskog programiranja.¹¹

Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima (ABMS) jedan je od novijih pristupa u računalnoj simulaciji. Ova vrsta simulacije uglavnom se koristi za modeliranje složenih sustava, a temelji se na autonomnim agentima i njihovim međusobnim interakcijama. Agenti imaju svoje karakteristike, pravila donošenja odluka, sposobnost interakcije s drugim agentima u sustavu i okolini na temelju kojih mogu promijeniti i prilagoditi svoje ponašanje.

Ovim načinom modeliranja moraju se identificirati aktivni entiteti, poznatiji kao agenti i mora se definirati njihovo ponašanje. To mogu biti ljudi, kućanstva, vozila, oprema, proizvodi ili tvrtke, točnije bilo što, što je povezano sa sustavom.

Posljednjih godina ABMS ima primjenu u različitim znanstvenim granama, a najveću primjenu je našla u društvenim znanostima. Često se koristi za simulaciju fenomena u ekonomskim i tehničkim znanostima. Do pojave ovih modela modeliranje pojava u društvu najčešće se svodilo na pojednostavljenu prezentaciju društvenih pojava, a vrlo često su to bili samo verbalni modeli.

U ABMS modelima, kojima se modeliraju društvene pojave i procesi, agenti predstavljaju čovjeka, a kroz njihovu međusobnu komunikaciju i pravila ponašanja modeliraju se društveni procesi i socijalna komunikacija. Glavna pretpostavka je da se ljudi i njihove socijalne vještine mogu realno modelirati, ako ne u potpunosti onda na razumnom nivou apstrakcije.¹²

Simulacijski modeli u pravilu imaju velik broj ulaznih i izlaznih varijabli, a vrlo često su promatrani sustavi međusobno ovisni. Izlazne varijable iz jednog promatranog sustava predstavljaju ulazne varijable u drugi sustav. Jedan od najčešćih primjera u literaturi je deregulacija elektroprivrede gdje postoji velika međuovisnost podsustava (na primjer proizvodnja električne energije, eksploatacija i transport sirovina itd.). Neki sustavi su

¹¹ Izvor: Čavoški, S. (2016). *Simulacioni modeli zasnovani na agentima kao podrška odlučivanju u elektronskom poslovanju*, Doktorska disertacija, Beograd: Sveučilište u Beogradu

¹² Izvor: Ibid. p. 14.

oduvijek previše složeni da bi se mogli adekvatno modelirati. Takvi sustavi (na primjer modeliranje ekonomskog sustava) uvijek se modeliraju s određenim pretpostavkama, što smanjuje složenost modela, ali i utječe na krajnje rezultate simulacije.

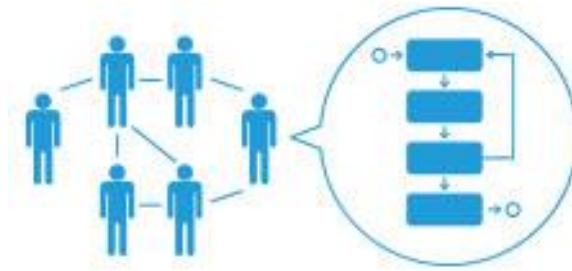
Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima pružaju realnije modele i dovode do novih mogućnosti u modeliranju i simulacijama. Agenti koji se koriste u ovim simulacijskim modelima potječu iz područja robotike i umjetne inteligencije. Danas, agenti ABMS više nisu vezani za dizajn i razumijevanje umjetne inteligencije. Osnovna primjena je u modeliranju ljudskog socijalnog ponašanja, društvenih pojava i individualnog odlučivanja.

Uz očite prednosti koje modeliranje i simulacije zasnovane na agentima donose, sve je veći broj simulacijskih modela različitih društvenih ponašanja, a omogućeni su zbog konstantnog napretka IT industrije, prije svega hardvera koji postaje sve brži i novih tehnologija koje olakšavaju modeliranje i pokretanje simulacijski eksperimenata općenito. Sada se može napraviti veliki broj mikro simulacija koje se nisu mogle napraviti prije samo nekoliko godina.

Putnici žele što prije napustiti aerodrom koji gori, a zračna luka im pokušava pronaći najkraći i najsigurniji put do izlaza koji također može biti ometen krhotinama i dimom.¹³ Ovo je jedan od primjera koji je okarakteriziran kao složeni adaptivni sustav koji se može istražiti pomoću modeliranja i simulacija zasnovanim na agentima. Osnovna ideja ovdje je korištenje simuliranih agenata za stvaranje fenomena koji će se analizirati, reproducirati ili predvidjeti. Ova generativna priroda modeliranja i simulacije odozdo prema gore pruža veliki potencijal za suočavanje sa problemima u kojima konvencionalne paradigme modeliranja i simulacije imaju poteškoće.

Na slici 5 prikazan je ABMS, točnije agenti u procesu i njihova međusobna povezanost.

¹³ Izvor: Klügl, F., Bazzan, A. (2012). Agent-Based Modeling and Simulation, *Ai Magazine*



Slika 5 ABMS – Agenti

Izvor: <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/agent-based-modeling/> (01.08.2020.)

3.1. POVIJESNI RAZVOJ I PODRUČJE PRIMJENE ABMS MODELA

Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima povezane su sa nizom znanstvenih područja, uključujući teoriju sustava, dinamiku sustava, IT tehnologiju, upravljanje, društvene znanosti i „tradicionalno“ modeliranje i simulacije. ABMS iz svih ovih područja uzima teorijski temelj, konceptualni svjetonazor i filozofiju i primjenjivost tehnika modeliranja. Izravni povijesni korijeni ABMS-a leže u složenim adaptivnim sustavima.

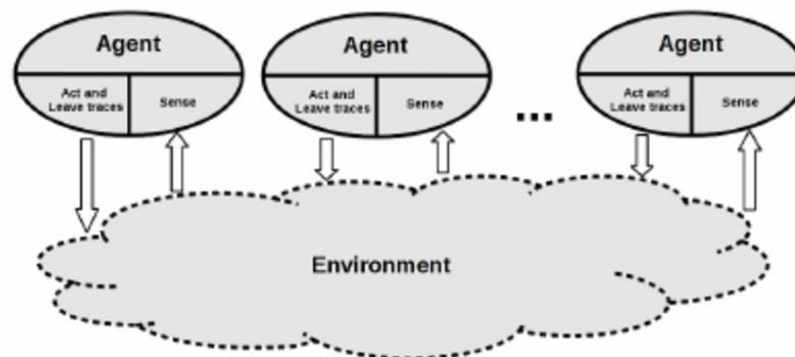
Istraživanja na tom području motivirana su razvojem područja složenih adaptivnih sustava prilagodba i nastanak bioloških sustava. Ovi sustavi imaju mogućnost samoorganiziranja i dinamičkog prepoznavanja komponenti sustava na način koji omogućava da opstane i napreduje u njihovom okruženju. Zanimljivo je da se ta prilagodljiva osobina pojavljuje u velikom broju slučajeva.

John Holland, definira zajednička svojstva i mehanizme svih adaptivnih sustava, a to su:¹⁴

1. *Grupiranje* – mogućnost formiranja više grupa
2. *Nelinearnost* – u tim sustavima nije moguća jednostavna ekstrapolacija (proširivanje zakonitosti utvrđene u jednom užem području na šire područje)
3. *Tokovi* – oni omogućuju prijenos i transformaciju resursa i informacija
4. *Raznolikost* – koja omogućava agentima da se ponašaju drugačije jedni od drugih, što sustav ne čini robusnim

¹⁴ Izvor: Macal, C., North, M. (2005). Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulations, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*

Kolonija mrava ili jato ptica obično su predstavljena u literaturi kao primjeri složenih adaptivnih sustava. Ti biološki sustavi nemaju jasnu hijerarhiju, nemaju vođu i stalno se prilagođavaju promjenama u okolini. Složenost kolonije mrava proizlazi iz jednostavnih lokalnih interakcija. Mravi ostavljaju svoj trag (feromon) koji drugi mravi slijede i na taj način se drže zajedno i pronalaze hranu. Dok se kreću, mravi mijenjaju svoje okruženje, što kasnije mijenja ponašanje drugih mrava. Taj neizravni utjecaj agenta (u ovom primjeru mrava) kroz promjene u okolini (okolina oko agenta) naziva se *stigmergy* odnosno stigmegrija. Stigmegrija predstavlja mehanizam neizravne koordinacije između agenata ili radnji. Princip je da „trag“ koji neka radnja ostavlja na svoju okolinu potiče izvršavanje sljedeće radnje istog ili drugog agenta. Kasniji se postupci oslanjaju i nadograđuju na prethodne, koji onda dovode do stvaranja spontanosti aktivnosti. Na slici 6 prikazana je stigmegrija na primjerima agenata i okoliša.



Slika 6 Stigmegrija

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/The-core-mechanism-of-stigmergy_fig1_280314681
(01.08.2020.)

Sljedeći primjer stigmegrija efekta je interakcija koja se razvila prilikom posjete internetske stranice za online kupnju knjiga i druge robe. Općenito korištenjem interneta, potrošači ostavljaju svoj trag (kao u prethodnom primjeru mravi feromon) kroz informacije o proizvodima i uslugama koje su kupili ili koristili. Te informacije dostupne su i svim drugim korisnicima na internetu i upravo to dovodi do stigmergije. Drugi potrošači na temelju tih informacija odlučuju kupiti ili koristiti iste usluge i proizvode kao i njihovi prethodnici. Popularni sadržaji na internetu dobivaju sve više publike kako se broj pregleda povećava i to nam objašnjava kako je neki sadržaj na internetu postao toliko popularan.

Emergence ili pojava je sljedeći fenomen vezan za složene adaptivne sustave. U filozofiji, teoriji sustava, znanosti i umjetnosti pojava se događa kada se opazi da entitet ima svojstva koja njihovi dijelovi nemaju. Ta svojstva ili ponašanja nastaju samo kada dijelovi djeluju u široj cjelini. Studija pojave na makro nivou može se svesti na razumijevanje posljedica agentskog ponašanja na mikro razini. Jedan od najpoznatijih primjera ovog fenomena je stvaranje alternativnog puta u parkovima. Naime, vrlo često u parkovima možemo vidjeti „staze“ koje ljudi formiraju kao alternativu već postojećim stazama. Te novoformirane staze su često kraći i praktičniji put od postojećih. Drugi primjer je stvaranje prometnih gužvi bez nekog očitog razloga.

Složeni prilagodljivi sustavi i pojave određuju ono što nazivamo „*bottom up process*“ točnije procesom odozdo prema gore. Klasične tehnike simulacije uglavnom se rade procesima odozgo prema dolje u kojima postoji jasna hijerarhijska struktura i precizne upute o tome što se treba napraviti kako bi se postigli ciljevi promatranog sustava. Takvi se sustavi najčešće mogu opisati nekim matematičkim modelom, koji se u kasnijim fazama modeliranja pretvara u simulacijski model.

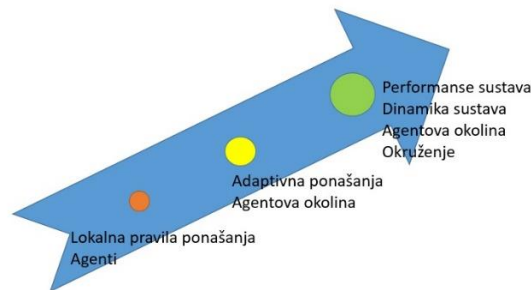
Povijest AMBS-a može se pratiti sve do 60-ih godina kada je John Vaughn Neumann dizajnirao i izgradio uređaj koji je kasnije nazvan stanični automat. U 70-im godinama John Conway razvio je igru života, odnosno dvodimenzionalni stanični automat. Stanica je imala dva stanja - živa i mrtva. Stanje stanice ovisilo je o stanju susjede u prethodnom vremenskom koraku.¹⁵

Sredinom 90-ih Joshua Epstein i Robert Axtell razvili su inteligentni sustav naziva *Sugarscape*¹⁶, koji je obuhvaćao osnovne pojmove društvenih znanosti. U modelu su praćeni agenti sa specifičnim metaboličkim potrebama, koje su zadovoljavali tako što su u svom kretanju pronalazili i jeli šećer. Ako se negdje ponestane zaliha šećera, agente se seli na novo mjesto (lokaciju) gdje ima dovoljno šećera kako bi zadovoljili svoje potrebe. Ovaj jednostavan sustav pravila doveo je do migracija. U daljnjem razvoju modela autori su dodali još jedan izvor hrane koji agenti mogu razmjenjivati. U sljedećem koraku dodali su sposobnost agenta da se razmnožavaju u slučaju da imaju dovoljno hrane što je dovelo do formiranja dobne piramide i razvoja drugih demografskih karakteristika. Ostala pravila koja su u međuvremenu dodana u sustav dovela su do ratova i drugih društvenih događanja. Ovaj

¹⁵ Izvor: Ibidem, p. 37.

¹⁶ Izvor: Ibidem, p. 38.

je sustav pokazao kako jednostavna pravila mogu stvoriti složeno društvo putem pristupa odozdo prema gore, slika 7.



Slika 7 Pristup odozdo prema gore u procesu modeliranja realnih sustava

Izvor: Izradila studentica

Na temelju jednostavnih pravila ponašanja i interakcije agenata, prirodni sustavi manifestiraju kolektivnu inteligenciju, čak i bez postojanja ili vođenja središnje vlasti. Prirodni sustavi ne samo da mogu preživjeti, nego se mogu i bolje prilagoditi okolišu, optimizirajući na taj način svoje vlastito ponašanje tijekom vremena. Kako je moguće da se kolonija mrava ili jato ptica može organizirati i provesti složene operacije, poput prikupljanja hrane, a istovremeno pokazati ogroman stupanj elastičnosti ako dođe do poremećaja u koloniji? Inteligencija jata potaknula je pojavu praktičnih tehnika optimizacije, poput optimizacije kolonije mrava koja se koristi u rješavanju praktičnih problema planiranja i usmjeravanja.

Na samom početku razvoja ABMSa, simulacijski modeli zasnovani na agentima koristili su se za modeliranje bioloških sustava. Danas se njihova primjena uvelike proširila te se sada najčešće koriste za modeliranje socijalnih procesa. Razlog sve veće upotrebe ovih modela u prvom redu leži u činjenici da oni lakše opisuju stvarne pojave koje postaju sve složenije. U primjeni modela zasnovanih na agentima na području društvenih procesa modeliraju se ljudi kao agenti, a njihove socijalne interakcije i društveni procesi modelirani su kao interakcije između agenata.

Glavna se pretpostavka ogleđa u činjenici da se ljudi i njihove društvene interakcije mogu vjerodostojno modelirati, ako ne u potpunosti onda u razumnoj razini apstrakcije. S aspekta ABMS modeliranja mogu se postaviti sljedeća pitanja:

- Koliko znamo o vjerodostojnom modeliranju ljudskog ponašanja?
- Koliko znamo o modeliranju socijalne interakcije ljudi?

Thomas Schelling zaslužan je za razvijanje prve socijalne simulacije temeljene na agentima u kojem agenti predstavljaju ljude, a interakcija između agenata predstavlja društveno relevantni postupak.¹⁷ Njegov je model dokazao da uzorci koji proizlaze iz ponašanja agenata ne moraju biti povezani s ciljevima pojedinih agenata. Ovo je bilo važno promatranje koje je privuklo pažnju javnosti i usmjerilo Schellinga prema području ABMS-a. Schellingovi originalni modeli nisu rađeni uz pomoć računala i računalnih simulacija već je on koristio novčiće koji su predstavljali agente i koje je pomicao po šahovskoj ploči.

Modeliranje zasnovano na agentima ima svoju primjenu i u ekonomiji. Neke od klasičnih pretpostavki standarne mikroekonomske teorije jesu:¹⁸

1. Agenti u ekonomiji su racionalni, što dovodi do toga da agenti imaju jasno definirane ciljeve i da su sposobni mijenjati svoje ponašanje što predstavlja osnovu za model racionalnog agenta.
2. Agenti u ekonomiji su homogeni, tj. agenti imaju identične karakteristike i pravila ponašanja.
3. Održavanje dugoročne ravnoteže stanja sustava.

Svaka od ovih pretpostavki olakšana je u primjeni ABMS-a na ekonomske sustave. Bihevioralna ekonomija, odnosno ekonomija ponašanja je relativno novo područje koje uključuje eksperimentalne zaključke dobivene iz psihologije o kognitivnim aspektima, koji su povezani sa agentovim donošenjem odluka, a s ciljem određivanja ekonomskog ponašanja stvarnih ljudi.

Antropolozi su također radili na razvoju modeliranja i simulacija zasnovanih na agentima i to na temu drevnih civilizacija kako bi objasnili njihove uspone i padove na temelju arheoloških podataka. ABMS se primjenjivao kako bi se bolje razumjeli socijalni i kulturni faktori.

¹⁷ Izvor: Schelling, Thomas C. (1971). Dynamic Models of Segregation, *Journal of Mathematical Sociology* 1:143-186.

¹⁸ Izvor: Macal, C., North, M. (2008). Agent-based modeling and simulation: ABMS examples, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*

Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima primjenjuju se i koriste još i u sociologiji, politici, fizici, biologiji i ostalim znanstvenim granama. U ovom radu detaljnije će biti objašnjena primjena ABMS-a u prometu, transportu i logistici općenito.

Sustavi u kojima modeliranje i simulacije zasnovane na agentima mogu pružiti kvalitetnije modele u odnosu na tradicionalne pristupe modeliranju su:¹⁹

- Kada promatranu prirodnu pojavu možemo predstaviti agentom,
- Kada postoje odluke i ponašanja koje se mogu definirati na diskretan način,
- Kada je nužno da se agenti prilagođavaju i mijenjaju svoje ponašanje,
- Kada je bitno da agenti uče,
- Kada je potrebno da agenti imaju dinamičke veze sa drugim agentima i da se iste slobodno formiraju i prekidaju,
- Kada je nužno da agenti formiraju organizacije,
- Kada prošlost ne određuje budućnost direktno,
- Kada je važno proširiti model do proizvoljne proporcije.

Dolazi se do zaključka da se praktično modeliranje i simulacija zasnovani na agentima aktivno primjenjuju u različitim znanstvenim granama. Primjena ABMS-a seže od primjene modeliranja u tržištu dionica, lancima opskrbe, logistike i transporta pa sve do modeliranja epidemije. Modeli zasnovani na agentima mogu biti minimalistički akademski modeli, ali i veliki sustav za podršku o odlučivanju velikih razmjera. Minimalistički modeli se baziraju na skupu idealiziranih pretpostavki, koji su osmišljeni da prikažu samo najbitnije karakteristike sustava. Modeli za podršku o odlučivanju su uglavnom velike aplikacije i dizajnirani su tako da daju odgovore na pitanja o trendovima u realnom svijetu.

3.2. POJAM AGENTA I KOMUNIKACIJA IZMEĐU AGENATA

Iako ne postoji točna i konkretna definicija agenta, različite definicije se u velikoj mjeri slažu jedna sa drugom. Agent je svaka vrsta neovisne komponente i to mogu biti entiteti, softveri ili modeli. Neki tvrde da se ponašanja tih agenata mogu razlikovati od osnovnih odluka pa sve do složenih adaptivnih ponašanja. Drugi inzistiraju na tome da ponašanje neke komponente mora biti prilagodljivo kako bi se uopće moglo smatrati agentom.

¹⁹ Izvor: op.cit. p. 40.

Agent mora imati ugrađeno „osnovno ponašanje“, kao i ponašanje „više razine“ odnosno „pravila koja nemaju pravila“. Osnovna pravila ponašanja odgovaraju promjenama iz okruženja dok se pravila koja mijenjaju pravila prilagođavaju promjenama u sustavu. Naziv „agent“ rezerviran je za komponente koje u određenom smislu mogu učiti iz svog okruženja i mijenjati svoja ponašanja kao odgovor na određeni problem.

Ove karakteristike i mogućnost donošenja neovisnih odluka bile su predmet brojnim istraživanjima.

Osnovne karakteristike agenta, prikazane i na slici 8 su sljedeće:²⁰

- Agent posjeduje skup karakteristika i pravila koja upravljaju njegovim ponašanjem i pružaju mu mogućnost da samostalno donosi odluke.
- Agent „živi“ u okruženju u kojem je u stalnoj interakciji sa drugim agentima na osnovu ugrađenih pravila ponašanja.
- Svaki agent ima ugrađene ciljeve koje treba postići u skladu sa svojim ponašanjem.
- Agent je samostalan i kao takav može samostalno funkcionirati u svom okruženju ukoliko je to potrebno.
- Agent je prilagodljiv i sposoban je učiti i mijenjati svoje ponašanje tijekom vremena u skladu sa prethodnik iskustvom.



Slika 8 Karakteristike agenata

Izvor: Izradila studentica

²⁰ Izvor: op.cit. p. 3.

Prema navedenoj podjeli možemo zaključiti da je osnovna osobina agenta ta da može samostalno donositi odluke reagirati na promjene u svom okruženju. Često se zna dogoditi da agenti nemaju sve osobine koje su modelima potrebne, a to prije svega ovisi o samoj prirodi i složenosti sustava koji se modelira. Pravila ponašanja agenata mogu biti manje ili više složena što ovisi o tome koliko agent ima informacija s kojima može upravljati i donositi odluke. Kompleksniji modeli mogu uključivati varijable iz okruženja agenta, uključujući i reakcije i ponašanja drugih agenata.

Interakcija je ključni aspekt upravljanja ABMS-om. Većina definicija agenta naglašava činjenicu da bi ova vrsta entiteta trebala biti u mogućnosti komunicirati sa svojim okruženjem i drugim entitetima kako bi riješila probleme ili jednostavno postigla svoje ciljeve u skladu s koordinacijom, suradnjom ili shemom natjecanja.²¹

Suština ABMS-a je činjenica da globalna dinamika sustava proizlazi iz lokalnog ponašanja i interakcija njegovih sastavnih dijelova. Strogo gledano, za neku vrstu ABMS-a globalna dinamika je samo zbroj lokalnih ponašanja i interakcija, tako da ne možemo uvijek govoriti o pojavnom ponašanju kada govorimo o ABMS-u. Međutim, pretpostavke koje stoje na temelju dizajna interakcijskog modela (ili izbor postojećeg za dizajn i provedbu određene aplikacije) toliko su važne da imaju dubok utjecaj na definiciju samih agenata. Stoga je gotovo očita posljedica da mehanizmi interakcije imaju ogroman utjecaj na modeliranje, dizajn i razvoj aplikacija temeljenih na specifičnoj vrsti modeliranja i simulacija zasnovanih na agentima, koja se pak temelji na određenom modelu interakcije. Stoga ne čudi da je značajan dio istraživanja provedenog na agentskom području bio fokusiran na ovaj aspekt.

Mnogo je mogućih dimenzija i aspekata modela interakcije agenata koji se mogu odabrati i usvojiti kako bi se definirala moguća taksonomija. Slika 9 prikazuje predloženu taksonomiju modela interakcije agenata.

²¹ Izvor: Bandini, S., Manzoni, S., Vizzari, G. (2009). Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*



Slika 9 Interakcija između agenata

Izvor: Izradila studentica

Prvi aspekt koji se ovdje razmatra za klasificiranje modela interakcije agenata povezan je s činjenicom da agenti komuniciraju izravno (na primjer, razmjenjuju poruke) pa model ne uključuje apstrakciju stvarnog komunikacijskog kanala ili postoji neki medij koji je smješten među komunikacijskim partnerima koji su izričito uključeni u model interakcije.

Iako je raniji pristup, koji se posebno odnosi na komunikacijski jezik agenata (ACL – *Agent Communication Language*)²² utemeljen na agentskom području, on ima svoje nedostatke. Na primjer, da bi učinkovito komunicirali agenti se moraju "poznavati" što znači da ih se mora okarakterizirati jedinstvenim nazivom koji ih označava u cjelokupnom sustavu. Nadalje, moraju se upoznati jedni s drugima te pronaći načine otkrivanja imena drugih agenata u sustavu. Način na koji se ACL-ovi modeli interakcije bave ovim pitanjem predmet je druge dimenzije taksonomije, pružanje izravnog a-priori upoznavanja agenata, usvajanje srednjih agenata radi otkrivanja informacija i razvoj složenijih modela poznanstva za rješavanje pitanja koja se odnose na zastupljenost i održavanje informacija o poznanstvu, ali i na robusnost i skalabilnost infrastrukture agenta.

Međutim, postoje i drugi modeli interakcije s agentima koji pružaju neizravnu komunikaciju među njima. Neki od tih pristupa omogućavaju stvaranje i iskorištavanje artefakata koji predstavljaju medij za interakciju agenata. Ostali modeli neizravnih interakcija više su usredotočeni na modeliranje okruženja agenta kao mjesta na kojem se odvijaju interakcije agenata, što utječe na interakcije, a time i na ponašanje agenta.

²² Izvor: Ibid.

3.2.1. Direktna/Izravna komunikacija među agentima

Prva i najčešće usvojena vrsta modela interakcije agenata pruža izravnu razmjenu informacija između komunikacijskih partnera. Ovaj pristup ignorira detalje povezane s komunikacijskim kanalom koji omogućava interakciju i ne uključuje ga kao element apstraktnog modela interakcije. Općenito, povezani mehanizmi pružaju protokol prijenosa poruke od točke do točke koji regulira razmjenu poruka između agenata. Postoje različiti aspekti komunikacijskog čina koji se moraju modelirati, u rasponu od niskih tehničkih razmatranja o formatu poruke pa sve do konceptualnih pitanja vezanih za formalnu semantiku poruka i razgovora. Općenito ovaj pristup daje definiciju prikladnih jezika koji će ih pokriti aspektima. Iako je ovaj pristup dobro shvaćen i može se provesti na učinkovit način, pogotovo jer se uvelike temelji na velikom iskustvu protokola računalnih mreža, u kontekstu agenta zahtijeva posebna arhitektonska i konceptualna rješenja za rješavanje pitanja koja su povezana s poznavanjima odnosno otkrićima agenata kao i ontološka pitanja.

Intuitivno komunikacijski jezik agenata (ACL) pruža agentima sredstva za razmjenu informacija i znanja. Ova nejasna definicija svojstveno uključuje aspekt koncepcije pojma agent, gdje se pretpostavlja da je agent inteligentna autonomna cjelina čije značajke uključuju neku vrstu društvene sposobnosti. Prema nekim pristupima, ova značajka je jedina koja u konačnici definira agenciju u suštini.

Ostavljajući po strani diskusiju o definiciji i koncepciji agencije, ova će se cjelina usredotočiti na ono što izraz "socijalna sposobnost" zapravo znači. Da bi se to ostvarilo ukratko se uspoređuje što komunikacijski jezik agenata dijeli s onim pristupima koji omogućuju razmjenu informacija između distribuiranih komponenti s obzirom na definiciju komunikacijskog kanala koji omogućava pouzdanu razmjenu poruka preko računalne mreže. Ono što razlikuje komunikacijski jezik agenata od takvih sustava su objekti diskursa i njihova semantička složenost.

U praksi postoje dva aspekta s kojima se distribuirani računalni protokoli i arhitekture ne moraju baviti, a to su:²³

1. *Autonomija interaktivnih komponenti*: sastavni dijelovi modernih sustava, iako mogu biti prilično složeni i mogu se smatrati samodovoljnim u odnosu na pružanje

²³ Izvor: Ibid.

određene usluge imaju niži stupanj autonomije od onog koji se obično povezuje s agentima

2. Informacije prenesene u porukama općenito ne zahtijevaju sveobuhvatan ontološki pristup, jer se strukture i kategorije mogu smatrati dijeljenim komponentama sustava

Što se tiče autonomije, dok tradicionalne softverske komponente nude usluge i obično izvode potrebne radnje kao reakcija na vanjske zahtjeve, agenti mogu odlučiti da ne izvršavaju zadatak koji je zahtijevao neki drugi subjekt. Nadalje, agenti se smatraju općenito vremenski kontinuiranim i proaktivnim, dok to općenito ne vrijedi za uobičajene softverske komponente.

Što se tiče druge točke, komponente imaju specifična sučelja koja pretpostavljaju dogovor o skupu zajedničkih struktura podataka. Semantika srodnih informacija i semantika poruka ili zahtjeva za uslugu dati su u nekom (više ili manje formalno specificiranom) jeziku modeliranja, ali usko su povezani s implementacijom komponenata. Za interakciju agenata mora se navesti jasniji i sveobuhvatniji pogled na koncepte domene. Da bi mogli učinkovito razmjenjivati znanje, agenti moraju dijeliti ontologiju. Ontologija predstavlja prikaz skupa kategorija objekata, koncepata, entiteta, svojstava i odnosa među njima. Drugim riječima, isti koncept, objekt ili cjelina moraju imati jednolično značenje i skup svojstava u cijelom sustavu.

3.2.2. Indirektna/Neizravna komunikacija među agentima

Sa strogo tehničkog stajališta, komunikacija s agentima je uglavnom neizravna, čak i kod modela izravnih posrednika. U stvari, većina ovih pristupa prihvaća neku vrstu komunikacijske infrastrukture pružajući pouzdan mehanizam za slanje cjelovitih poruka. Unatoč tome, usvajanje konceptualno izravnog modela interakcije agenata donosi sa sobom i specifična pitanja koja su ranije tumačena.

Ovaj dio rada fokusiran je na modele koji osiguravaju prisustvo entiteta koji djeluje kao posrednik (omogućava i regulira) u interakciji agenata. Ova komunikacijska apstrakcija nije samo detalj implementacije na niskoj razini, već je prvoklasni koncept modela.

Modeli interakcije agenata koji pružaju neizravne mehanizme komunikacije bit će razvrstani u artefakt posredovane i prostorno uzemljene modele. Razlikovanje se temelji na inspiraciji i metafori na kojima su ovi modeli ukorijenjeni. Prvi pružaju dizajn i primjenu artefakta koji oponaša konkretne predmete iz okoline agenata čiji je cilj komuniciranje autonomnih

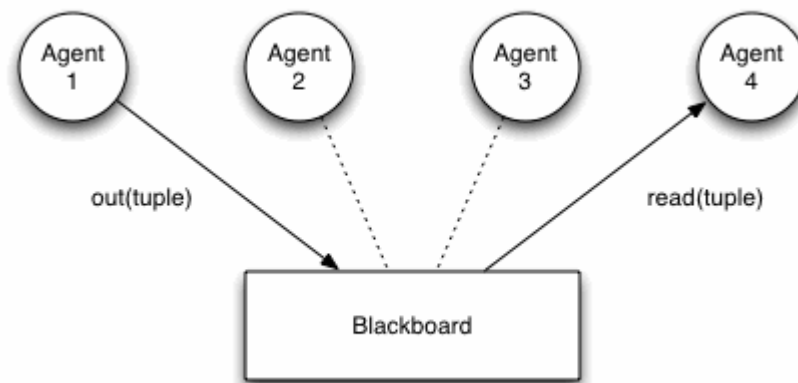
entiteta. Prostorno utemeljeni modeli interakcije agenta dovode do krajnosti metaforu okruženja agensa za modeliranje, uviđajući da postoje situacije u kojima prostorne značajke i informacije predstavljaju ključni faktor i ne mogu se zanemariti u analizi i modeliranju sustava.

Oba ova pristupa pružaju mehanizme interakcije koji su daleko drugačiji od razmjene poruke od točke do točke među entitetima. U stvari, mediji koji omogućuju međusobnu interakciju predstavljaju kontekst koji utječe na komunikaciju agenta.

U stvarnom svijetu, broj fizičkih agenata interaktivno dijeli resurse tako što ima natjecateljski pristup (npr. Automobili na ulicama i raskrižjima), ali i surađuje kako bi izvršavao zadatke koje pojedinačni subjekti ne mogu obavljati sami, zbog nedovoljnih kompetencija ili sposobnosti (npr. ljudi koji zajedno nose vrlo težak teret). Vrlo često, kako bismo regulirali interakcije povezane s tim resursima, gradimo konkretne artefakte, poput semafora na ulicama ili uredno postavljene ručke na velikim teškim kutijama. Koristeći ovu metaforu, neki pristupi interakcije agenata imaju tendenciju da modeliraju i provode apstrakcije, omogućujući suradnju entiteta kroz zajednički resurs čiji je pristup reguliran prema točno definiranim pravilima.

Na slici 10 prikazan je prvi primjer ove vrste modela gdje su arhitekture temeljene na ploči. „Blackboard“ je zajedničko spremište podataka koje omogućuje suradničkim softverskim modulima da komuniciraju na neizravni i anonimni način. Konkretno, koncept prostora u obliku torke, prvi put predstavljen u Lindi (Gelernter 1985), predstavlja raširenu modifikaciju osnovnog modela ploče.²⁴

²⁴ Izvor: Ibid.



Slika 10 Prvi model temeljen na ploči

Izvor: Bandini, S., Manzoni, S., Vizzari, G. (2009). Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*

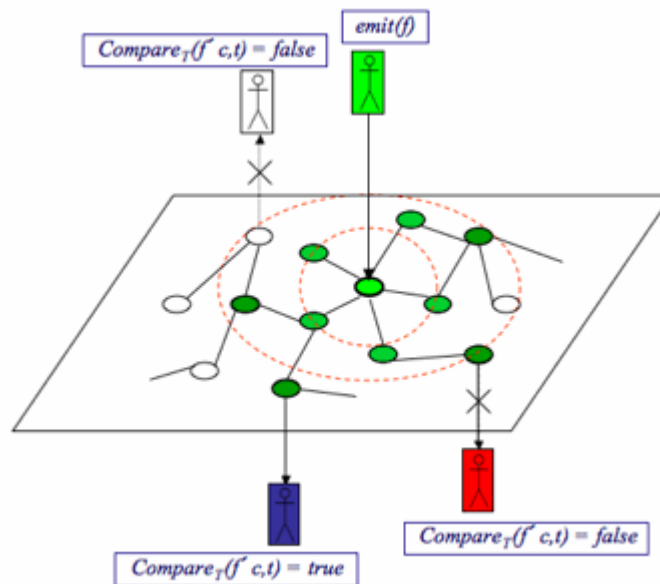
Linda (Gelernter 1985) jezik koordinacije koji vjerojatno predstavlja najrelevantniji model temeljen na ploči. Temelji se na konceptu prostora u obliku koplja, odnosno asocijativne ploče koja omogućuje agentima razmjenu i dohvaćanje podataka kroz neki mehanizam za usklađivanje podataka (poput podudaranja uzoraka ili objedinjavanja) integriranih u ploču. Linda također specificira vrlo jednostavan jezik koji definira mehanizme za pristup prostoru.²⁵

Obrazloženje ovog pristupa je da se računski i koordinacijski konteksti razdvoje što je više moguće, pružajući specifične apstrakcije za interakciju agenata. Što se tiče modela izravne interakcije, dio tereta koordinacije zapravo se prebacuje s agenta na infrastrukturu. Evolucija ovog pristupa u osnovi slijedila je dva smjera:

1. Proširenje koordinacijskog jezika i infrastrukture radi povećanja njegove ekspresivnosti ili upotrebljivosti i
2. Modeliranje i primjenu raspodijeljenih prostora u obliku koplja.

Slika 11 predstavlja shemu uzoraka koja ilustrira oblik interakcije posredovan u okruženju u kojoj prostorna struktura okoliša ima središnju ulogu u određivanju percepcije agenata i njihove mogućnosti interakcije.

²⁵ Izvor: Ibid.



Slika 11 Shema uzoraka

Izvor: Bandini, S., Manzoni, S., Vizzari, G. (2009). Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*

Dok prethodno opisani neizravni pristupi definiraju artefakte za interakciju agenata, uzimajući inspiraciju iz konkretnih predmeta stvarnog svijeta, drugi pristupi dovode do krajnosti metaforu agentovog okoliša uzimajući u obzir njegove prostorne značajke.

U tim su pristupima agenti smješteni u okruženju čija su prostorna obilježja eksplicitno prikazana i utječu na njihovu percepciju, interakciju i samim time na njihovo ponašanje. Koncept percepcije, koji je stvarno apstraktan i metaforičan u modelima izravne interakcije i nema nimalo veze s fizičkim svijetom (agenti percipiraju njihovo stanje uma, što uključuje učinak primljenih poruka, poput novih činjenica). Povezano je s izravnijim modeliranjem onoga što se često naziva "lokalno gledište". Navedeni pristupi pružaju primjenu infrastrukture za komunikaciju s agentima koja im omogućava uočavanje stanja okoliša na svom položaju i na obližnjim mjestima. Također mogu uzrokovati lokalne izmjene stanja okoliša, uglavnom emisijom signala, oponašanjem neke fizičke pojave ili jednostavnim promatranjem djelovanja drugih agenata i reagiranjem na tu percepciju, u shemi "Bihevioralne implicitne komunikacije".²⁶

²⁶ Izvor: Ibid.

U svim tim slučajevima, struktura okoliša je centralna jer ona zapravo definira što agent može uočiti u svom trenutnom položaju i na koji način zapravo može modificirati okoliš, kao i u kojoj mjeri njegove radnje mogu primjetiti drugi agenti i na taj način komunicirati sa njima.

3.3. PLATFORME ZA SIMULACIJU ZASNOVANU NA AGENTIMA

Uzimajući u obzir raširenu difuziju i prihvaćanje agencijskih pristupa modeliranju i simulaciji, nije iznenađujuće da raste interes za softverske okvire posebno usmjerene na podršku realizaciji simulacijskih sustava zasnovanih na agentima. Postoje mnoge različite platforme za modeliranje i simulacije zasnovane na agentima, a u ovoj cjelini biti će objašnjene neke najpoznatije u svijetu IT-a.

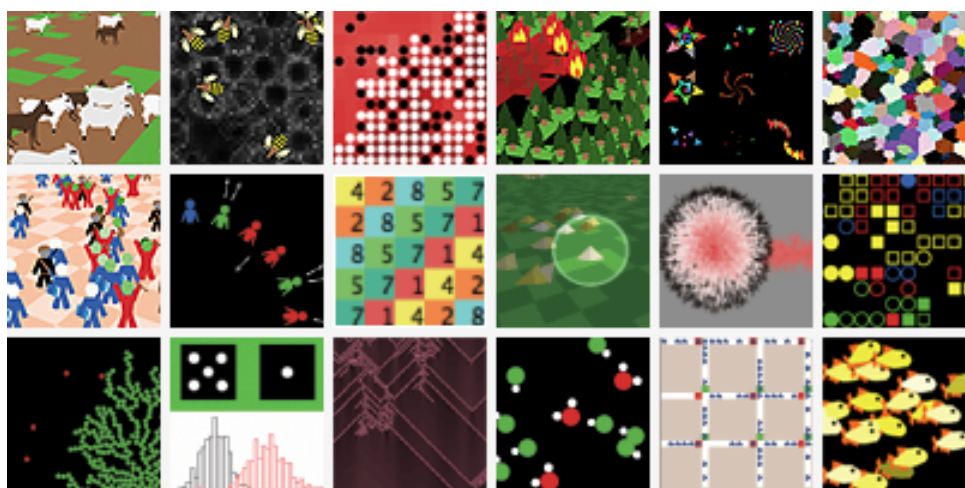
Ove vrste alata često pružaju apstrakcije i mehanizme za definiranje agenata i njihovog okruženja kao podršku njihovoj interakciji, ali i dodatne funkcionalnosti poput upravljanja simulacijom, njezinu vizualizaciju, nadgledanje i stjecanje podataka o simuliranoj dinamici. Cilj ove cjeline nije pružiti detaljan pregled trenutnog stanja tehnike u ovom sektoru, već opisati neke klase instrumenata koji su korišteni za podršku realizacije simulacija zasnovanih na agentima i pružiti skup referenci na odgovarajuće primjere platformi koje olakšavaju razvoj simulacija zasnovanih na agentima.

3.3.1. NetLogo

Prva kategorija platforme ovih instrumenata pruža okvire opće namjene u kojima agenti uglavnom predstavljaju pasivne apstrakcije, vrste podatkovnih struktura kojima se upravlja ukupnim simulacijskim procesom. Mjerodavan primjer takvih alata je *NetLogo*, dijalekt logotipa posebno usmjeren na modeliranje pojava koje karakterizira decentralizirana, međusobno povezana priroda. NetLogo čak ne prihvaća termin agent za označavanje pojedinaca, već ih naziva kornjačama. Tipična simulacija sastoji se od ciklusa koji bira i provodi radnju za svaku kornjaču (agenta), s obzirom na njezinu trenutnu situaciju i stanje. Valja napomenuti da uzimajući u obzir neke od ranije spomenutih definicija autonomnog agenta, kornjaču ne treba smatrati agentom zbog gotovo odsutne autonomije ovih entiteta. Izbor vrlo jednostavnog programskog jezika za koji nije potrebna pozadina znanja informatike, mogućnost implementacije simulacija u obliku Java appleta na vrlo jednostavan način te dostupnosti jednostavnih, ali učinkovitih alata za vizualizaciju učinili su NetLogo izuzetno popularnim. Treba napomenuti da postoje i druge platforme i alati koji se temelje

na jeziku logotipa (npr. StarLogo, StarLogoT), ali ne predstavljaju relevantne razlike s gledišta ove klasifikacije.²⁷

NetLogo dizajniran je za krajnjeg korisnika, u osnovi se sastoji od tri sučelja. Prvo sučelje je vrsta programa za uređivanje samog modela gdje jezik podsjeća na Starlogo. Drugo sučelje NetLoga omogućuje vizualizaciju okoliša i njegovih parametara, a korisniku omogućuje igru s parametrima modela pomoću klizača. Treće sučelje sadrži strukturiranu dokumentaciju. NetLogo postaje sve popularniji zbog svoje opsežne dokumentacije, različitih tutoriala i velike baze (zbirke) postojećih modela od kojih su neki prikazani na slici 12.



Slika 12 Zbirka uzoraka modela u programu NetLogo

Izvor: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (17.08.2020.)

3.3.2. Repast i SimSesam

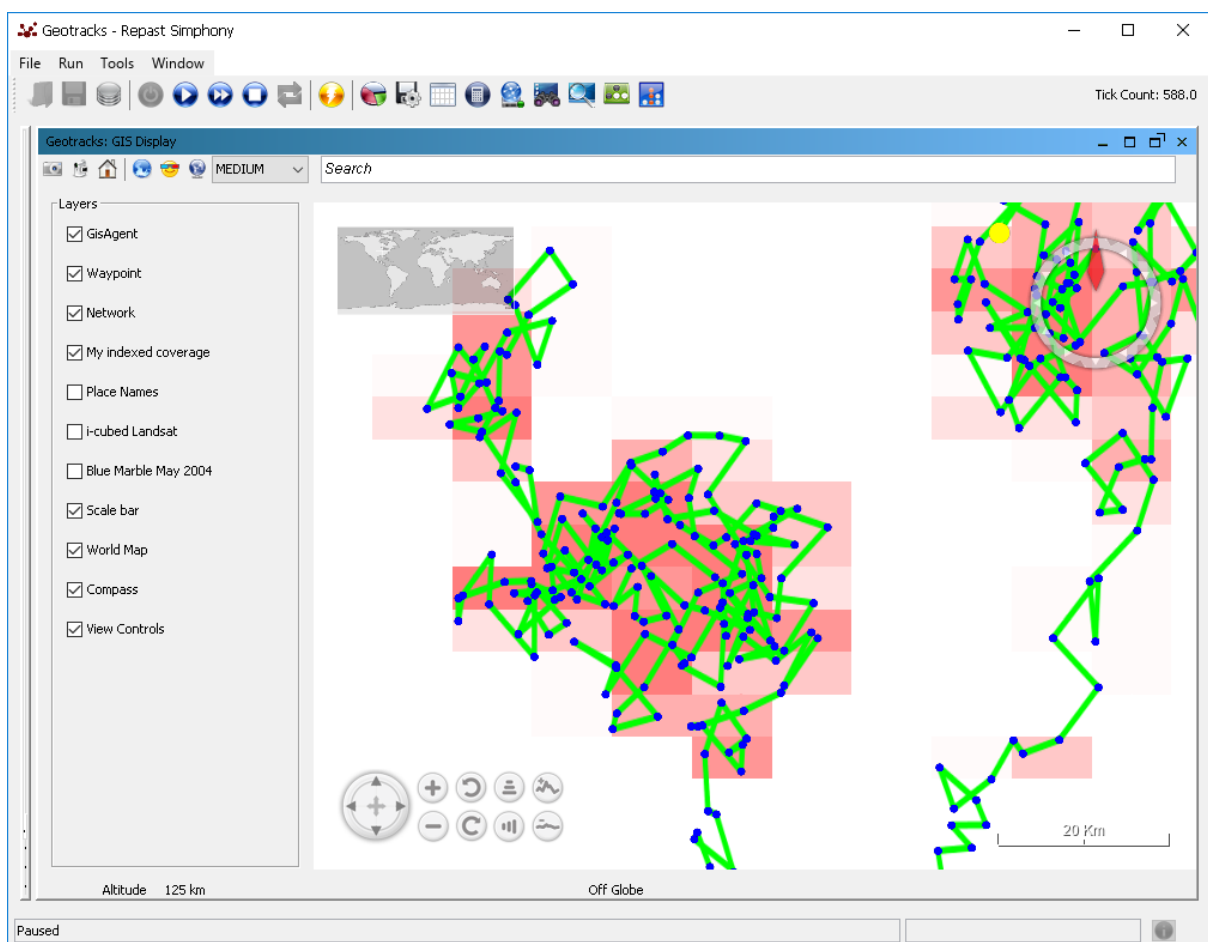
Druga kategorija platformi pruža okvire koji su razvijeni sa sličnim obrazloženjem, pružajući vrlo slične alate za podršku, ali ti se instrumenti temelje na programskim jezicima opće namjene i nazivaju se Repast. Repast je naziv za *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit* što bi u doslovnom prijevodu značilo rekurzivni porozni agencijski simulacijski priručnik.²⁸ Repast predstavlja široko korištenu simulacijsku platforma utemeljenu na Java jeziku.

²⁷ Izvor: Ibid.

²⁸ Izvor: Op.cit. p. 33.

Objektno orijentirana priroda temeljnog programskog jezika podržava definiranje računalnih elemenata koji čine ove agente autonomnijima, također i bližim uobičajenim definicijama agenata, podržavajući ekapsulaciju stanja, djelovanja i mehanizma za odabir radnji u klasi agenta. Izbor prihvaćanja programskog jezika opće namjene s jedne strane čini primjenu ovih instrumenata težima kod modeliranja bez podrijetla informatike dok s druge strane pojednostavljuje integraciju s vanjskim i postojećim zbirkama modela.²⁹

Repast se u svojoj trenutnoj verziji može lako povezati s instrumentima za statističku analizu, vizualizaciju podataka, izvještavanje i geografskim informacijskim sustavima (slika 13).



Slika 13 GIS praćenje agenata

Izvor: <https://repast.github.io/screenshots.html> (20.08.2020.)

²⁹ Izvor: Bandini, S., Manzoni, S., Vizzari, G. (2009). Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*

Početni fokus Repasta bila je društvena znanost. Repast je dizajniran za društvene znanstvenike, ali nije ograničen samo na njih. Primjeri korištenja Repast-a navedeni su u nastavku:

1. Politika – teritorij uspona i padova
2. Ekonomija – bankovne strategije, evolucija poduzeća, dinamika između poduzeća, tržišta električne energije
3. Segregacija, pješačko modeliranje, prijenost, bolesti
4. Fizičko okruženje – modeliranje vodostaja
5. Urbanizacija

Treća kategorija platformi predstavlja pokušaj pružanja jezične podrške više razine, pokušavajući smanjiti udaljenost između modela zasnovanih na agentima i njihovih implementacija.

Na primjer, najnoviju inačicu Repast-a karakterizira prisustvo sučelja na visokoj razini za definiranje ponašanja agenta koje se temelji na skupu primitivnih funkcija za specificiranje radnji agenta. *SimSesam* definira skup primitivnih funkcija kao osnovne elemente za opisivanje ponašanja agenata, a također nudi vizualne alate koji podržavaju implementaciju modela.

3.3.3. Swarm

Jedan od najranijih alata za implementaciju ABMS-a i složenih sustava koji u doslovnom prijevodu predstavlja „roj“. Swarm je platforma za modele zasnovane na agentima koja uključuje:

1. Konceptualni okvir za projektiranje,
2. opis i provođenje eksperimenata na modelima,
3. softver koji implementira taj okvir i pruža mnoge praktične alate i
4. zajednicu korisnika i programera koji dijele svoje ideje, softver i iskustva.

Swarm se sastoji od zbirke koje pružaju jezgru iz koje programeri mogu ugraditi svoje ABMS sustave. Programeri iz ovih jezgri također mogu i prikupljati i analizirati podatke te omogućiti prikaze kontrolnih parametara modela. Izvorne zbirke temeljile su se na programu *Objective-C*, ali trenutno se koristi Java. Iako su zbirke osigurane, korisnik koji nema

vještine programiranja u Swarmu morati će provesti određeno vrijeme na edukaciji o kodiranju.

4. PRIMJENA MODELIRANJA U PROMETU I TRANSPORTU

Modeliranje je moćan alat koji omogućuje promatranje uzročno-posljedičnih odnosa u pojavama koje se događaju presporo ili prebrzo da bi se vidjele. Uključuju opasnosti ili sigurnosna pitanja, pojavljuju se na skali koja je prevelika ili premala za proučavanje, nisu česta pojava ili se jednostavno ne mogu realizirati u stvarnom okruženju sa stvarnim entitetima. Na taj način modeliranje svoju primjenu pronalazi u prometu i transportu.

4.1. AGENCIJSKO MODELIRANJE PROMETNE SIMULACIJE

Studije o tome kako promet teče ključne su za oblikovanje boljih cestovnih mreža. Ukoliko bi se prometni tok mogao u potpunosti razumjeti tada bi se mogle predvidjeti razine prometa i izbjeći zagušenja. Prometna zagušenja glavni su problem mnogih vozača i to dovodi do izgubljenog vremena i povećanog pritiska. Na primjer, kašnjenja na posao ili fakultet što za neke ljude može rezultirati čak i otkazom. Jednako tako emisija štetnih plinova i buka koja uzrokuju prometna sredstva mogu utjecati na okoliš i zdravlje lokalnog stanovništva.

Najobičniji zastoje u prometu nastaje kada obujam prometa premaši kapacitet ceste. To se odnosi na većinu percipiranih uzroka gužve. Na primjer, nesreće, kvarovi i radovi na cestama smanjuju raspoloživi kapacitet ceste, dok povećan promet uzrokovan odlaskom u školu i tijekom praznika povećava obujam prometa. Gužva za mnoge ljude smanjuje kvalitetu života i potrebno ju je riješiti kako bi normalan prijevoz bez zastoja bio dostupan svima, u tom kontekstu razmatra se modeliranje zasnovano na agentima.

Da bi se definirao ovaj model, vozač se smatra autonomnim agentom čije se ponašanje temelji na aktivnostima odlučivanja u njegovom okruženju. Promet koji nastaje rezultat je interakcije svakog agenta s propisima, cestovnom infrastrukturom i ostalim sudionicima u prometu. Svrha ove cjeline je pokazati da modeliranje simulacije prometa zasnovano na agentima predstavlja vrijedan alat za inženjere u prometu koji ocjenjuju alternativne sheme. Cilj je razviti jedinstveni sustav simulacije prometa koji se može koristiti za proučavanje teorije prometa, procjenu mrežne infrastrukture i kontrolu promjena. Glavni ciljevi uključuju razumijevanje teorije prometa, učenje glavnih značajki i problema simulacije prometa i ocjenu modeliranja temeljenog na agentima kao sredstva za simulaciju prometa.

Ovaj cjelina dijeliti će se u 3 podcjeline. Podcjelina 4.1.1. ispituje protok prometa. Podcjelina 4.1.2. detaljno razmatra dizajnerske značajke sustava za modeliranje i simulaciju prometa dok podcjelina 4.1.3. predstavlja prijedlog modela u prometu.

4.1.1. Protok prometa

Ekonomski utjecaj upravljanja prometom raste svakim danom. Dobro dizajnirani i dobro vođeni sustavi autocesta smanjuju troškove prijevoza robe, smanjuju potrošnju energije i štede velik broj sati vožnje automobilom. Da bi smanjile zagušenje mnoge zemlje ulažu velike novce u izgradnju cesta, ali i u poboljšanje sustava kontrole prometa. Da bi pojava protoka prometabilna razumljiva, potrebno je započeti sa pregledom onoga što se već događa na cestama. Ankete o prometu koriste se za mjerenje trenutne situacije i uključuju prebrojavanje broja vozila koji u određenom iznosu prijeđu određenu točku u određeno vrijeme. Međutim, jednostavno poznavanje protoka nije previše korisno. Gustoća prometa opisuje broj vozila na određenoj cesti, a za proračun je potrebna i brzina vozila uz protok prometa. Gustoća se obično mjeri u vozilima po km, po voznom traku. Optimalna gustoća na standardnoj cesti trebala bi biti oko 40 vozila po km, po traku.³⁰

Poboljšanje infrastrukture je skupo, stoga se za svaki takav projekt mora pomno procijeniti njegov utjecaj na promet. Računalni simulacijski modeli mogu predstavljati vrijedan alat za izradu takvih procjena na isplativ način. Takvi se modeli mogu koristiti za ocjenu modifikacija ne samo pod nominalnim uvjetima, već i pod hipotetskim scenarijima koji bi se u stvarnom svijetu mogli vrlo teško promatrati.

Fizičari pokušavaju opisati pojave prometa najmanje pola stoljeća. 1950-ih godina James Lighthill, stručnjak za fiziku protoka tekućine, sugerirao je da je protok prometa na cesti sličan struji tekućine u cijevi. Ova teorija sa modelom *Lighthill-Whitham-Richards* predstavljala je protok prometa u potpunosti matematičkim jednadžbama te zanemarila pojedine vozače.³¹ Ova vrsta modela naziva se makroskopska i često može dati realne rezultate, ali nedostaje složenosti u modeliranju realističnih ponašanja vozača.

Sljedeći pristup bio je tretirati vozila kao pojedinačne jedinice umjesto neprekidnog protoka i vidjeti kakvo se ponašanje pojavljuje kada se vozilima daju jednostavna pravila koja moraju slijediti. Svako vozilo kretalo bi odgovaralo njegovoj brzini, a da pritom održava sigurnu

³⁰ Izvor: Benhamza, K., Ellagoune, S., Seridi, H., Akdag, H. (2012). Agent-Based Modeling for Traffic Simulation, *Courrier du Savoir*, p. 51-56

³¹ Izvor: Ibid. p. 52.

udaljenost između automobila. Ovo je vrsta mikroskopskog modela koji može varirati po složenosti ovisno o ciljevima simulacije. Jedan poznati model je stanični model automata koji su osmislili Nagel i Schreckenberg.³²

Rezultati ovih modela i prometnih studija pokazuju da su protok i gustoća prometa na zanimljiv način povezani. Normalno, protok raste kako raste gustoća, a tada je više vozila na putu. Međutim, kada gustoća dosegne takozvanu "*kritičnu gustoću*", protok se počinje smanjivati i promet postaje zagušen. Na slici 14 prikazana je jedan tipičan prometni zastoј u velikim gradovima.



Slika 14 Prometni zastoј

Izvor: <http://adigaskell.org/2017/06/20/how-autonomous-vehicles-could-improve-road-safety/> (20.08.2020.)

4.1.2. Modeliranje i simulacija prometa

Definiranje modela jedna je od prvih faza izrade simulacije prometa. To uključuje odlučivanje kako predstaviti objekte (npr. vozila, vozače, semafore) u simulaciji i koje će

³² Izvor: Ibid. p. 52.

parametre svaki objekt zahtijevati. Također uključuje utvrđivanje načina predstavljanja okoliša (npr. ceste, prometne trake i raskrižja), kao i učinaka koji ima na ostale objekte.

U simulaciji bi se vozila i vozači najvjerojatnije modelirali kao isti entitet. Međutim, u stvarnom svijetu to nisu pa pri odlučivanju o tome kako ih modelirati potrebno ih je promatrati kao zasebne entitete. Modeliranje vozila prilično je jednostavno, nekoliko parametara može opisivati njegove značajke i ponašanje, a to su: najveća brzina, maksimalno ubrzanje i usporavanje vozila. Ubrzanje je osobito važno jer utječe na brzinu praznjenja reda čekanja. Dimenzije se često primjenjuju, omogućujući razlikovanje kamiona i autobusa od automobila. Tijekom simulacije potrebni su trenutni položaj i smjer u okruženju da bi se pratilo trenutno stanje.

Neki istraživači sugeriraju da se odluke koje vozači moraju donijeti mogu podijeliti na mikro i makro ciljeve. Makro ciljevi su određeni i preuzeta ruta, dok mikro ciljevi uključuju odluke u svakom trenutku u interesu postizanja makro cilja. Makro cilj uključuje svakodnevno planiranje i generiranje funkcija ruta, često ulaznih podataka iz podataka o podrijetlu i određeni. Mikro ciljevi su odluke koje uključuju kontrolu vozila, poput željene brzine, pretjecanja i skretanja. Svi vozači imaju različite stilove vožnje koji su regulirani njihovim individualnim karakteristikama, poput agresivnosti, samopouzdanja i vozačkog iskustva.

U simulaciji prometa, okruženje u kojem voze vozila predstavlja cestovna mreža koja se sastoji od segmenata veza (čvorovi i raskrižja) i upravljačkih značajki koje su obično dio čvora. Svaka veza može imati jednu ili više traka i može raditi u jednom ili oba smjera. Veze imaju svojstva kao što su duljina, broj traka, ograničenje brzine itd.

Modeli (vozila, vozači i okoliš) nisu od koristi ako se njima ne može manipulirati tijekom simulacije. Simulacija uključuje korištenje pravila ponašanja kako bi se modeli s vremenom mogli promijeniti. To uključuje pomicanje svakog vozila na temelju njegovih parametara i odluka vozača. Simulirati pojedinačni automobil na dugoj ravnoj cesti je prilično jednostavno, jer bi vozilo samo došlo do željene brzine za vozača. To isto vozilo postaje sve složenije jer se drugim vozilima uvodi više traka i cesta, a da bi se riješili ovi problemi koriste se modeli za praćenje vozila i mijenjanje traka.³³

Promet se može promatrati kao složen sustav. Razvoj makro modela jedan je od glavnih pristupa modeliranju složenih sustava. Makro modeli slijede pristup odozgo prema dolje, u

³³ Izvor: Ibid. p. 53.

kojoj simulacija za prednost ima to što vrijeme trčanja može biti prilično kratko i dovoljno je samo grubo predviđanje uvjeta kako bi bilo od koristi. Mikro modeliranje koje potencijalno može rezultirati boljom kvalitetom je pristup odozdo prema gore. Složeni sustav promatra se kao veliki skup malih, međusobno povezanih komponenti. Problemi s mikro simulacijom su računski rad, troškovi i razvoj softvera. Mikro simulacije provode se na vrlo detaljnoj razini, oponašajući ponašanje svakog pojedinog entiteta u sustavu, pa su računalno vrlo intenzivne. Mikroskopski modeli prometnog prometa usredotočeni su na proučavanje interakcije između vozila i istraživanje sintetskih karakteristika složenih prometnih pojava.

Postoji nekoliko različitih vrsta simulacija prometa, a to su modeli koji prate vozila, stanični modeli i sustavi sa više agenata (*Multi-Agent System = MAS*).³⁴ Modeli koji prate vozila temelje se na Newtonovoj dinamici. Stanični modeli su dodatno proučavani posljednjih desetljeća, ali ne uključuju realno ponašanje vozača i vozila. Vozila su modelirana kao čestice koje imaju nerealnu brzinu ubrzanja i usporavanja.

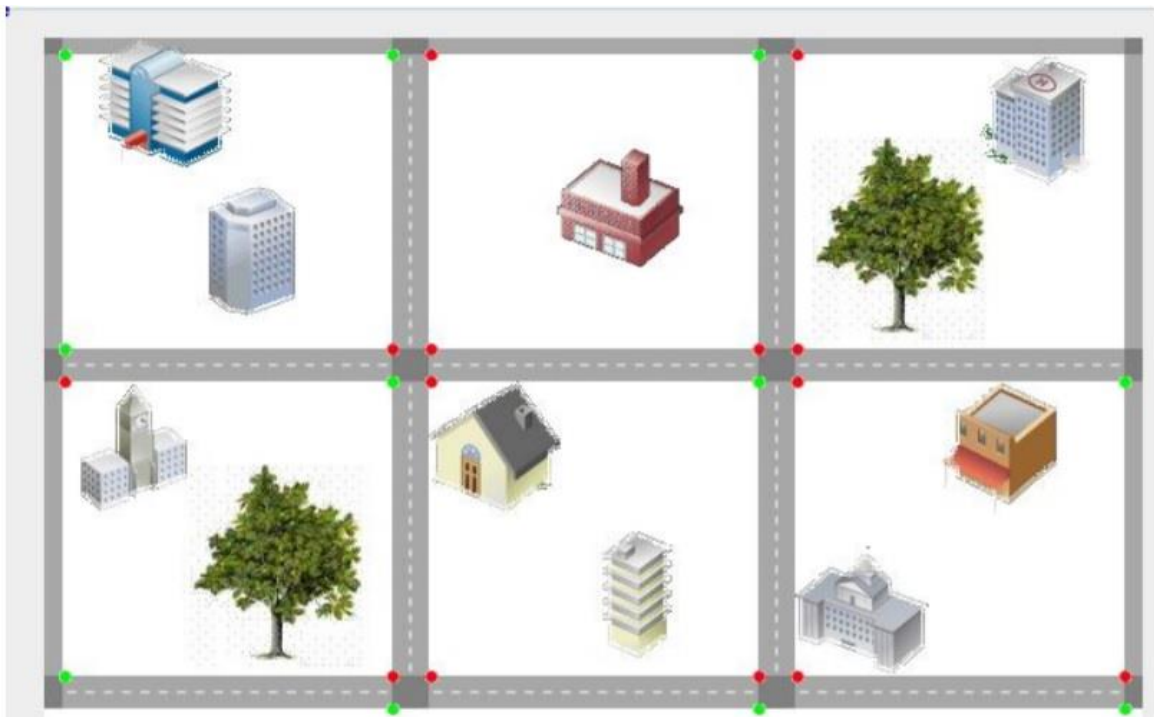
Metafora agenta pokazala se kao obećavajući izbor za izgradnju složenih i adaptivnih softverskih aplikacija jer se bavi ključnim pitanjima za postavljanje složenosti na već konceptualnoj razini. Agentska tehnologija je područje istraživanja koje se brzo razvija i ima potencijal da potakne i doprinese širokom rasponu znanstvenih područja. Sustavi s više agenata nude alternativno tumačenje klasičnih modela protoka prometa kao i razvoj općenitijih i učinkovitijih okvira za modeliranje ponašanja vozača na kognitivnoj razini. MAS modeli dobili su sve veću pažnju u upravljanju prometom, kontroli signala, usmjeravanju rute i sl. Također sustavi sa više agenata nude određene prednosti. To su: brži odziv, veća fleksibilnost, robusnost, dijeljenje resursa, graciozna degradacija i bolja prilagodljivost integriranja postojećih i samostalnih sustava.

4.1.3. Prijedlog modela

Prijedlog modela napravila je tvrtka *Carrefour*, francuska multinacionalna korporacija specijalizirana za maloprodaju. Na ovom primjeru implementirani su glavni subjekti u simulatoru prometa, a to su vozila, segmenti ceste, raskrižja i semafori koji su modelirani kao agenti i objekti. Predloženi model koristi reaktivna sredstva. Agent vozila sadrži fizičke attribute vozila kao što su duljina, ubrzanje i tip. Također uključuje ponašanje automobila

³⁴ Izvor: Ibid. p. 53.

koji slijedi i mijenja trake. U provođenju tih ponašanja, agent mora kontinuirano komunicirati s vozilima oko sebe i s okolinom. Reaktivni agenti koriste pravila stimuliranja kako bi reagirali na trenutno stanje okoliša koje opažaju njihovi senzori. Čisti reaktivni agenti nemaju reprezentativan ili simbolički model svog okruženja i nisu u mogućnosti predvidjeti što će se dogoditi. Glavna prednost reaktivnih agenata je u tome što su robusni i imaju brzo vrijeme reakcije te pokazuju brzo ponašanje s jednostavnim pravilom: inteligentnim ponašanjem. Na slici 15 prikazano je okruženje simulacije.



Slika 15 Okruženje simulacije

Izvor: Benhamza, K., Ellagoune, S., Seridi, H., Akdag, H. (2012). Agent-Based Modeling for Traffic Simulation, *Courrier du Savoir*, p. 54.

Zadatak vožnje agenta podijeljen je u nekoliko podvrsta koje su automatizirane pravilima neovisnog ponašanja. Na ovaj način funkcija agenta može se lako proširiti bez ikakvih modifikacija postojećeg ponašanja. Pravila korištenog ponašanja u velikoj mjeri ovise o okruženju agenta. Potrebno je imati na umu da dizajn agenta u ovom primjeru ima sposobnost vožnje u drugim sredinama. Postoji mogućnost da će agent svoja ponašanja

trebati proširiti ili promijeniti. Za okruženja u ovom primjeru dizajnirana su sljedeća pravila ponašanja:³⁵

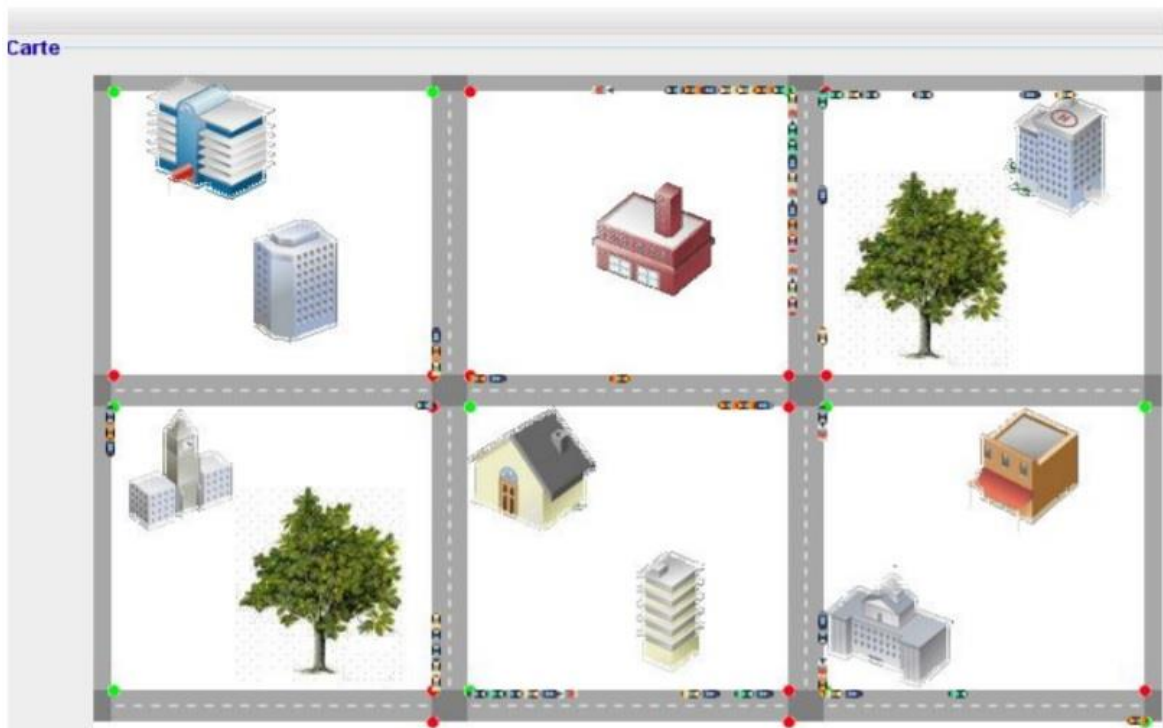
1. *Potrebno je slijediti ceste (put)* – Za održavanje sigurnog prijevoza odgovorno je ponašanje koje agent ima dok slijedi cestu. Osim kontrole bočnog položaja agentova vozila (postavljeno na temelju udaljenosti od ruba ceste i traka) ponašanje agenta na putu također ima utjecaj na njegovu brzinu. Na taj način agent osigurava usporavanje u zavojima dok na ravnim cestama ubrzava do željene brzine, odnosno one brzine koja je postavljena u parametrima ponašanja.
2. *Križanje/mijenjanje smjerova* – Ako se agent približi raskrižju, smanjuje se njegova brzina, te se kreću primjenjivati pravila prioriteta, gdje agent odabire jednu od sporednih cesta. Ovaj se smjer bira nasumično i ponašanje u smjeru može se podijeliti na nekoliko pod-ponašanja, po jedno za svaku vrstu raskrižja.
3. *Semafori* – Semafor, kao i u stvarnom svijetu, služi kako bi se agent zaustavio ili krenuo. Ponašanje semafora osigurava da se agent zaustavi na crvenim semaforima, odnosno provjerava da li osjetilo semafora regulira trenutnu traku agenta i usporava li agent vozilo.
4. *Potrebno je slijediti automobil* – Ponašanje automobila osigurava da agent ne naleti na neko drugo vozilo po putu i ne izazove sudar. Ako drugo vozilo vozi ispred agenta njegova brzina se postepeno prilagođava brzini vozila ispred. Precizno kočenje ovisi o razlici brzine između vozila i drugog agenta vozila i udaljenosti između njih.

Na ovom primjeru izrađen je prototip programa simulatora prometa kako bi se testirao dizajn vozila. Programski jezik koji je korišten za izradu simulatora je Java. Java je jednostavan i zagonetni jezik, vrlo pogodan za brzo prototipiranje.

Program simulatora otprilike se sastoji od četiri elementa: korisničko sučelje namijenjeno za pružanje vizualnih povratnih informacija, simulacijski kontroler, okruženje koje sadrži simulirane predmete i model voznog sredstva. Zadatak simulacijskog kontrolera je pokrenuti, pauzirati ili zaustaviti pokretanje simulacije i pratiti vrijeme trajanja procesa.³⁶ Na slici 16 prikazana je simulacija.

³⁵ Izvor: Ibid. p. 54.

³⁶ Izvor: Ibid. p. 54.



Slika 16 Prikaz simulacije

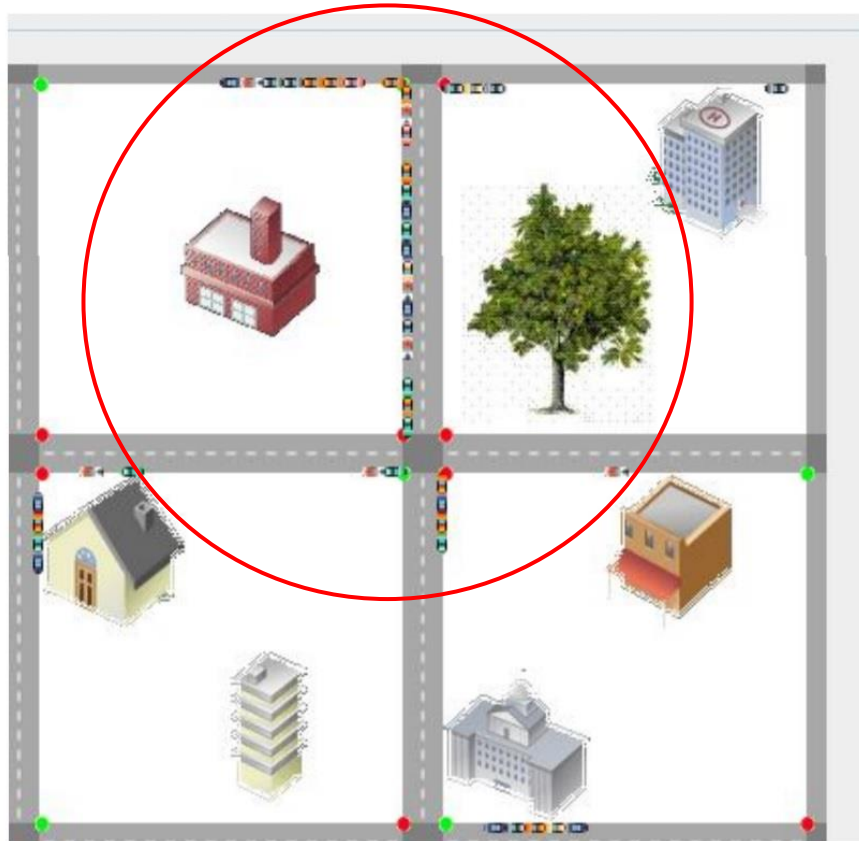
Izvor: Ibid. p. 54

Prikazan je model reaktivnog voznog sredstva koji se može koristiti za upravljanje vozilima na mikroskopskom prometnom simulatoru. Preliminarni eksperimenti na ovom primjeru pokazali su da primijenjeni agent pokazuje ljudsko ponašanje u vožnji. Na temelju istraživanja slijede rezultati eksperimenta sa sljedećim parametrima simulacije:³⁷

- Broj vozila = 70
- Broj sporog vozila = 10
- Broj vozila s prioritetom (agresivno) = 10

S ovim postavkama parametara postoji zastoje u prometu na jednom od Carrefour-ovih primjera što se jasno vidi na slici 17.

³⁷ Izvor: Ibid. p. 55.



Slika 17 Zastoj u prometu

Izvor: Ibid. p. 55.

4.2. MODELIRANJE I SIMULACIJE ZASNOVANE NA AGENTIMA ZA DIZAJN BUDUĆEG EUROPSKOG SUSTAVA UPRAVLJANJA ZRAČNIM PROMETOM NA PRIMJERU: CASSIOPEIA

Upravljanje zračnim prometom (Air Traffic Management = ATM) primjer je složenog sustava s velikim brojem interaktivnih, heterogenih pojedinaca (npr. zrakoplovne tvrtke, kontrolora zračnog prometa, regulatorna tijela, putnici itd.) koji djeluju u zamršenom i ograničenom okruženju (npr. zračne rute, vremenski raspored, međunarodni propisi itd.). Proučavanje ponašanja ATM sustava važno je za razvoj novih metoda poboljšanja aspekata izvedbe zračnog prometa kao što su sigurnost, transportni kapacitet, ekonomičnost i briga za okoliš. Modeliranje i simulacije zasnovane na agentima uspješno se primijenjena na velikom broju ATM sustava. Posljednjih godina razvijene su važne inicijative za modernizaciju upravljanja zračnim prometom. Na primjer, SESAR (Single European Sky ATM Re-search) ambiciozan je program koji služi za istraživanje i razvoj, a financiran je od strane Europske Unije i Europske organizacije za sigurnost zračne plovidbe. Krajnji cilj SESAR-a je razviti

budući sustav ATM-a za Europu, osiguravajući sigurnost i fluidnost zračnog prometa u sljedećih trideset godina, čineći letove ekološki prihvatljivijim i smanjujući troškove upravljanja zračnim prometom.³⁸

Svrha ove cjeline je predstaviti rezultate istraživačkog rada u okviru projekta CASSIOPEIA (Kompleksni adaptivni sustavi za optimizaciju performansi u ATM-u) koji je razvijen u kontekstu SESAR programa. Prvo su identificirani novi izazovi modeliranja zasnovanih na agentima za dizajn budućih ATM sustava, a naknadno je predstavljen pristup zasnovan na agentima koji je i osmišljen za te izazove. Koristeći ovaj pristup, istraživači su razvili rješenje za simulaciju novih strategija suradnje dionika na ATM-u u velikim geografskim područjima na nivou apstrakcije koji je između mikroskopske i makroskopske razine. Istraživački pristup je razvijen kao praktično sredstvo koje je otvoreno i ponovno se koristi za različite probleme s ATM-om, a uspješno je primijenjeno u tri različite ATM studije.

4.2.1. Modeliranje izazova za dizajn budućih sustava za upravljanje zračnim prometom

Prema Europskoj organizaciji za sigurnost zračne plovidbe, upravljanje zračnim prometom odnosi se na procese, postupke i resurse koji su uključeni u osiguravanje sigurnog vođenja zrakoplova od svog mjesta polaska pa sve do svoje destinacije. ATM sustav sastoji se od tri glavna komplementarna podsustava, a to su: upravljanje zračnim prostorom (AM), koji uspostavlja najbolje zračne rute za sve veći broj letova, upravljanje protokom zračnog prometa (ATFM) koji usklađuje letove s raspoloživim kapacitetom i kontrolom zračnog prometa (ATC) koja upravlja zrakoplovima dok lete i kreću se u zračnim lukama.

Općenito, ATM je složen, društveno-tehnički sustav u kojem različiti dionici kao što su kontrolori prometa zračne luke, koordinatori utora i pružatelji usluga zračne plovidbe komuniciraju s tehničkim sustavima (navigacijska pomagala, piste itd.) koji stvaraju socijalni kontekst u sustavu u kojem djeluje. Suvremeni sustavi za upravljanje zračnim prometom su složeniji jer nova pravila organizacije i mehanizmi komunikacije stvaraju nove, geografski raštrkane procese donošenja odluka u suradnji i uključuju nekoliko dionika s vlastitim setom poslovnog ponašanja (vođeno osobnim interesima i djelomičnim odgovornostima). Raspodijeljene odluke postoje na više razina (strateška, taktička i

³⁸ Izvor: Molina, M., Carrasco, S., Martin, J., (2014). Agent-Based Modeling and Simulation for the Design of the Future European Air Traffic Management System: The Experience of CASSIOPEIA, *Communications in Computer and Information Science*, p. 22-33

operativna) koje slijede različite vremenske i prostorne razmjere. Osim toga, sustavi za upravljanje zračnim prometom djeluju kao adaptivni sustavi, koji se mogu samoorganizirati kad se promijene vanjski uvjeti (npr. zračne luke i zrakoplovne tvrtke mogu mijenjati prometne rute tijekom poremećaja u prometu). Europski sustav upravljanja zračnim prometom u 2014. godini upravljao je dnevno sa oko 26 000 letova u složenoj mreži. Od 1989. zračni promet povećao se za 33%, a očekuje se da će se gotovo udvostručiti u sljedećih 20 godina.³⁹

Proučavanje ponašanja ATM sustava pomoću alata za modeliranje i simulacije može pomoći u razvoju novih metoda poboljšanja performansi zračnog prometa. Zbog njihove značajne složenosti, teško je razumjeti i predvidjeti ponašanje ATM sustava na makroskopskoj razini. Pristup zasnovan na agentima uspješno je primijenjen kao rješenje za razvoj modela koji bilježe odluke i interakcije u zračnom prometu s odgovarajućom razinom detalja. Nakon što su provedene početne studije o strategijama suradnje za izbjegavanje sudara i kontrolu prometa u stvarnom vremenu, modeli zasnovani na agentima stekli su popularnost kao učinkovit pristup modeliranju i simulaciji specifične dinamike ATM sustava.

U studijama o ATM-u primijenjeni su različiti pristupi koji se odnose na kontolu zračnog prometa (ATC). Modeli zasnovani na agentima predstavljaju procese zračnog prometa kao što su putanje vozila, izbjegavanje sudara, rad aerodroma itd. U ovoj kategoriji modela možemo spomenuti Air MIDAS, ACES, AgentFly i alate kao što su AirTop i CAST.⁴⁰ Ovi pristupi mogu simulirati kako kontrolori zračnog prometa upravljaju avionima dok lete i kreću se u zračnim lukama s visokom razinom detalja. Na primjer, Air MIDAS simulira ponašanje konačnog pristupa zrakoplova u terminalnom zračnom prostoru i njihovu interakciju između pilota i kontrolora leta radi procjene rizika.

Istraživanja o ATM-u koja se odnose na upravljanje protokom zračnog prometa (ATFM) izvedena su koristeći i pristup zasnovan na agentima. Općenito, oni simuliraju ATFM na dan leta. Na primjer, IMPACT simulira odluke zrakoplovnih kompanija kada meteorološki uvjeti utječu na planiranje leta, a ti uvjeti ograničavaju kapacitet nekih zračnih luka. Međutim, studije za buduće ATM sustave moraju uzeti u obzir i nove ATFM procese (npr. daleko prije dana leta). Ove studije obično zahtijevaju primjenu novih algoritama za zajedničko ljudsko odlučivanje u vezi s planiranjem i zakazivanjem.

³⁹ Izvor: Ibid. p. 23.

⁴⁰ Izvor: Ibid. p. 24.

Modeli ATM studija zasnovani na agentima pokrivaju različita vremenska i zemljopisna proširenja. Općenito, postojeći modeli pokrivaju mali broj sati ili jedan dan leta u ograničenom broju zračnih luka (pet ili deset zračnih luka, najviše nekoliko desetaka). Modeli su definirani na mikroskopskoj razini i uzimaju u obzir detalje kao što su zrakoplovni pristup, piste, taksiji, kretanje zrakoplova i povremeno kretanja autobusa, ponašanje putnika tijekom prijave itd. Stoga se razvijaju modeli za velika područja s ovakvom razinom detalja koja zahtijeva značajan napor i značajne količine podataka koji ponekad nisu dostupni. Za dizajn novog ATM sustava u Europi važno je razumjeti uzročno-posljedične veze između političkih odluka i njihovog utjecaja u velikoj mjeri. Stoga je potrebno koristiti nove prikaze s manje detalja za modeliranje i učinkovito simuliranje područja s većim proširenjima, uzimajući u obzir djelomičnu dostupnost podataka.

Dizajn budućeg ATM sustava zahtijeva aktivno sudjelovanje istraživačke zajednice u provođenju nekoliko različitih studija o ATM-u. Da bi se to uspješno promoviralo, važno je osigurati praktične alate (npr. softverske alate) koji su jednostavni za uporabu i otvoreni za zajednicu. Niz postojećih pristupa dizajniran je i korišten kao opći, višekratni alati za različite studije (ACES, AirTop i CAST).⁴¹ Ti alati omogućuju ponovnu uporabu sustavima za upravljanje zračnim prometom agentskih klasa (ACES) ili korisničkim sučeljima za model konfiguracije koristeći vrijednosti parametara (AirTop i CAST). Pored ove vrste alata, također je važno razviti praktičnija (otvorena i višekratna) rješenja koja smanjuju napor i troškove studija.

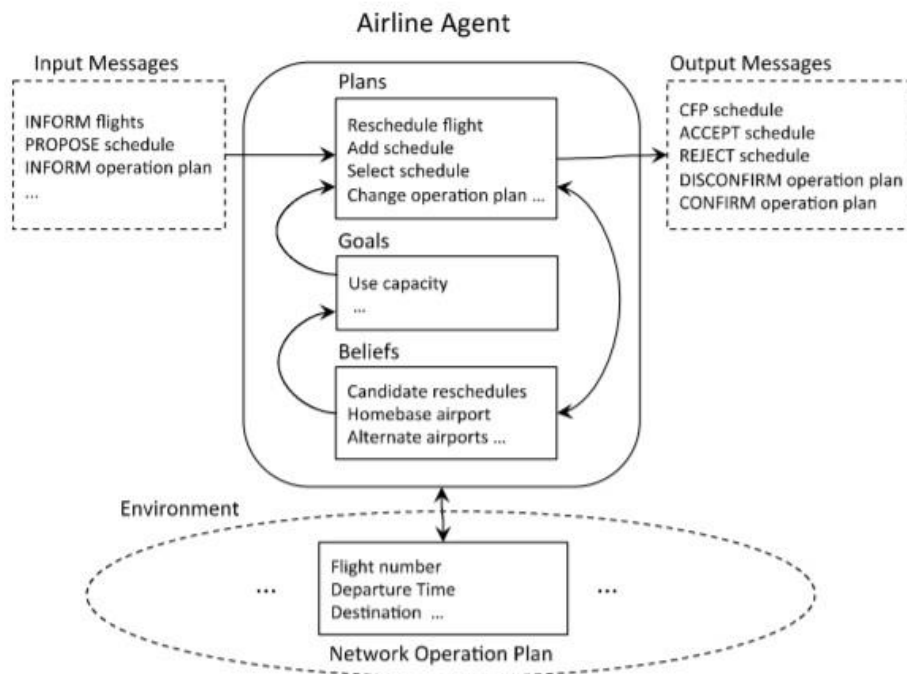
4.2.2. Pristup zasnovan na agentima - Primjer CASSIOPEIA

CASSIOPEIA (složeni prilagodljivi sustavi za optimizaciju performansi u ATM-u) projekt je Europske organizacije za sigurnost zračne plovidbe programa SESAR (Istraživanje jedinstvenog europskog neba o ATM-u). Opći cilj projekta CASSIOPEIA je predlaganje pristupa modeliranju, koristeći tehnike složenih sustava i paradigmi informatike, koji kreatorima politika mogu pružiti sredstva za razumijevanje i istraživanje inicijativa koje utječu na složene ATM mreže, omogućujući im da testiraju potencijal koncepata, propisa i mehanizama za upravljanje širenjem kašnjenja, ograničenjima kapaciteta, zagušenjima mreže i drugim pojavama ATM-a. Projekt je zamišljen kao rješenje kako bi se olakšalo razumijevanje uzročno-posljedične veze između odluka politike u različitim sektorima

⁴¹ Izvor: Ibid. p. 24.

zrakoplovstva i performansi zračnog prometa za različite domete i razmjere primjene propisa. Kao rezultat projekta dizajniran je pristup modeliranja zasnovan na agentima i uspješno je primijenjen u nekoliko studija o različitim propisima u kontekstu europskog sustava za upravljanje zračnim prometom. U nastavku će biti opisane karakteristike CASSIOPEIA modela zasnovanog na agentima.

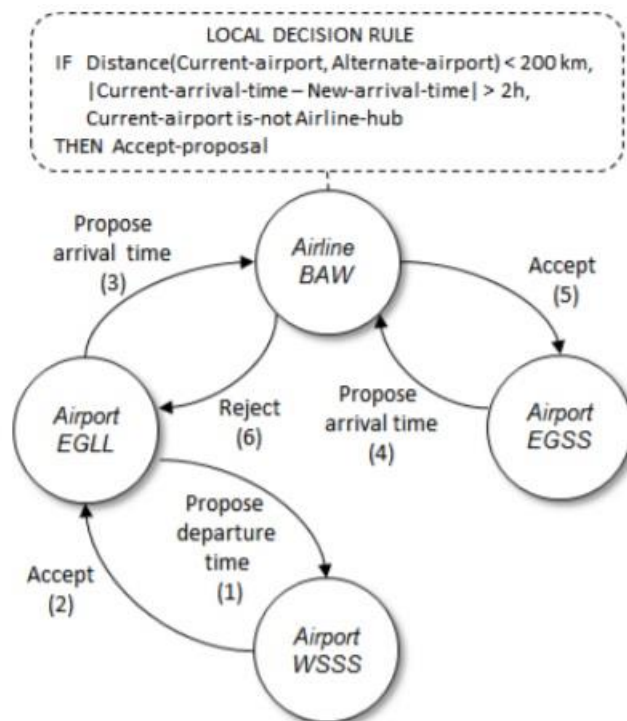
Model CASSIOPEIA uključuje agente koji odgovaraju različitim dioničarima u ATM-u. Na primjer, postoje agenti poput upravitelja mreža, zrakoplovnih tvrtki (s agentovim podklasama: mrežna zrakoplovna kompanija, teretna zrakoplovna kompanija, niskobudžetna zrakoplovna kompanija itd.), zračne luke (s informacijama poput zemljopisnog položaja, kategorije itd.) i zrakoplova (s podacima kao što su model, kapacitet, emisija CO, težina itd.). Model također uključuje predmete koji se odnose na okoliš i opće procese donošenja odluka poput planova leta, vremenskih intervala i zemljopisnog sektora. Agencijski modeli slijede BDI pristup, s vjerovanjima, ciljevima i planovima. Na slici 18 prikazan je djelomični primjer modela zračnog prijevoznika, gdje su vidljive komponente povezane s reprogramiranjem plana rada mreže.



Slika 18 Sažetak modela zračnog prijevoznika (povezan s rasporedom letova)

Izvor: Ibid. p. 26.

U ovom su modelu implementirani algoritmi za zajednički odabir proces koji odgovaraju budućim ATM sustavima. Na primjer, simulirano je na koji način zračne luke stupaju u interakciju sa zrakoplovnim kompanijama i drugim zračnim lukama kako bi predložili nove rasporede letova (novo vrijeme dolaska ili novo odredište). Zrakoplovni agent može primiti ulazne poruke od ostalih agenata (aerodrom koji predlaže novi raspored letova) i zrakoplovnih tvrtki koje koriste lokalna pravila odlučivanja za odabir najboljih prijedloga. Slika 19 prikazuje sažetak jednog primjera interakcije radi uspostavljanja novog vremena polaska na kojoj brojevi u zagradama opisuju vremenski redoslijed poruka. Prvo, zračna luka EGLL stupa u interakciju sa zračnom lukom WSSS kako bi odredila novo vrijeme polaska za let koji mora biti odgođen. Zatim, zrakoplovna kompanija BAW dobiva novo vrijeme dolaska koje su predložile zračna luka EGLL i EGSS. Konačno, zrakoplovna tvrtka prihvaća jedan od prijedloga, a drugi odbija.



Slika 19 Primjer interakcije agenata tijekom kolaborativnog donošenja odluka

Izvor: Ibid. p. 26.

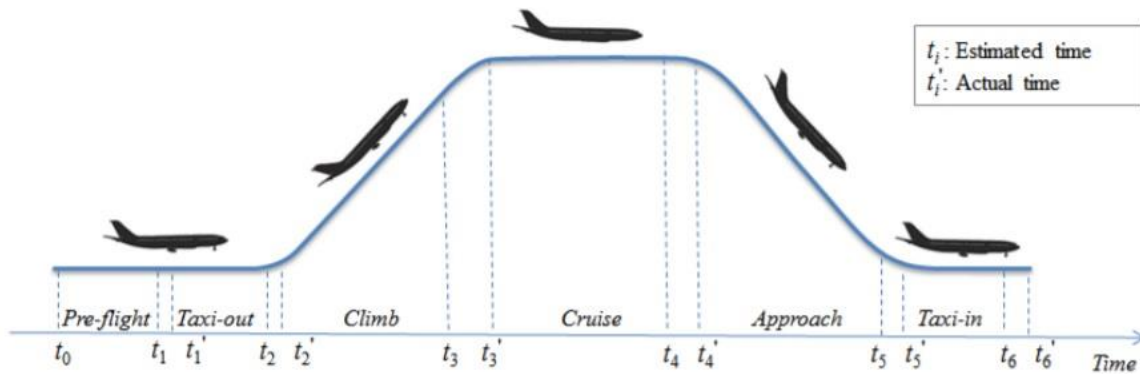
U modelu CASSIOPEIA implementirani su i algoritmi koji simuliraju način na koji aviokompanije komuniciraju kako bi licitirale i prodale utore za zračni promet u svrhu odgode plana leta s nižim troškovima. Provede su različite strategije licitiranja i prodaje na temelju novih studija koordinacije. Zrakoplovne tvrtke koriste lokalne skupove pravila za odlučivanje prihvaćanja ili odbijanja ponude.

Primjer pravila je ako je $[trošak(sp) - q \cdot k] < trošak(sr)$, zatim *prihvati* (b), gdje je sp ponuđeni utor od strane ponuditelja, sr je traženi termin od strane prodavača, q je iznos novca kojeg osigurava ponuditelj, $trošak(x)$ je procijenjeni trošak, k je konstanta između 0 i 1 čija vrijednost ovisi o odabranoj strategiji, a b je prijedlog ponude.⁴²

CASSIOPEIA je uvela algoritme za simulaciju određenih procesa zračnog prometa nakon srednje razine apstrakcije koristeći stohastički pristup. Umjesto modeliranja svih preciznih detalja, što iz praktičnih razloga nije moguće, niz komponenata nije izričito modeliran, a pomoću rezultata moguće je procijeniti samo ishode distribucije vjerojatnosti. Na primjer, slijedi se ovaj pristup kako bi se simuliralo na koji način aviokompanije koordiniraju zrakoplove u prisutnosti kašnjenja. Model zračnog prijevoznika uključuje i određene planove, koristeći pravila odlučivanja, kako bi se utvrdilo na koji način je moguće promijeniti ponašanje zrakoplova, a da se povrate kašnjenja. Primjerice, zrakoplovna kompanija odluči da avion s kašnjenjem od 23 minute, mora smanjiti na 10 minuta.⁴³ Da bi se to postiglo, zrakoplovna kompanija izračunava novi indeks troškova za zrakoplov (broj koji zrakoplov koristi za prilagodbu svoje brzine tijekom leta) i šalje zrakoplovu poruku s novim indeksom troškova. Simulira se kretanje zrakoplova između zračnih luka koristeći stohastički pristup koji je prikazan na slici 20.

⁴² Izvor: Ibid. p. 27.

⁴³ Izvor: Ibid. p. 27



Slika 20 Simulirani događaji koji odgovaraju različitim fazama leta

Izvor: Ibid. p. 27.

Model zrakoplovnog agenta uključuje plan koji simulira različite faze letova. Faze su predstavljene kao skup događaja $E = \{\text{prije leta, izlazak iz taksija, uspon, krstarenje, prilaz, ulazak u taksij}\}$. Prema ovom planu, stvarno vrijeme za događaj generira se kao $t_i = t_i + \Delta t_i^d + \Delta t_i^n$ gdje je t_i predviđeno planirano vrijeme događaja e_i , Δt_i^d je akumulacijsko odgađanje događaja e_i , Δt_i^n je vrijednost buke. Vrijednost za Δt_i^n generira se automatski kao slučajni broj nakon distribucije vjerojatnosti $N[0, [\alpha(t_i - t_{i-1})] 2]$, gdje je α konstantna vrijednost (na primjer, $\alpha = 0,015$). Primjenjuje se i stohastički pristup kako bi se simulirali ostali procesi u zračnom prometu (npr. trajanje određene faze leta pomoću logičke distribucije vjerojatnosti LnN).⁴⁴

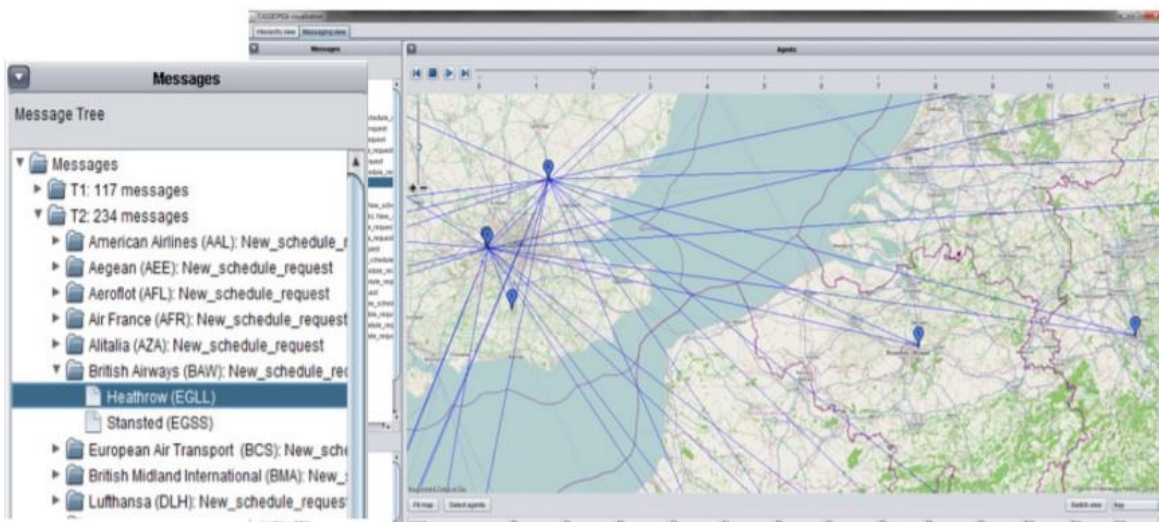
Arhitektura u CASSIOPEIA-i dizajnirana je tako da bude općeniti (otvoren i za višekratnu uporabu) alat za primjenu u raznim studijama ATM sustava. Arhitektura integrira *open-source* komponente za olakšavanje ponovne upotrebe uz smanjene troškove. Opći alat za modeliranje zasnovan na agentima – *Jadex* koristio se za formalizaciju agenata i kontrolu simulacije zajedno s relacijskom bazom podataka za pohranjivanje instanci agenata i rezultata simulacije.

Modeli agenata specificirani su korištenjem deklarativnog jezika *XML*, zajedno s algoritmima implementiranim u jeziku *Java* za planove agenata, sa zbirakama klasa za višekratnu upotrebu. Arhitektura uključuje alat za vizualizaciju razvijen u ovom projektu kako bi se vizualizirale složene interakcije agenata s velikim brojem poruka. Ovaj alat

⁴⁴ Izvor: Ibid. p. 27.

usklađuje informacije koristeći različite dimenzije (prostorne, vremenske, vrste poruka, vrste agenata itd.) i prikazuje informacije koristeći animacije na geografskim kartama (koristeći *OpenStreetMaps*) i određene vrste hijerarhije i tablice.

U lijevom dijelu slike 21 lijevo prikazano je stablo poruka između zrakoplovnih kompanija i zračnih luka združenih uzastopnim vremenskim točkama dok je s desne strane prikazana zemljopisna karta sa porukama koje odgovaraju određenom vremenu simulacije.



Slika 21 Alat za vizualizaciju koji prikazuje poruke interakcije agenata

Izvor: Ibid. p. 28.

Pristup temeljen na agentima u u projektu CASSIOPEIA korišten je u tri različite studije:

1. Studija 1 – analizirati učinke novih propisa o okolišu (npr. ograničenje noćnog prometa u određenim zračnim lukama radi smanjenja zagađenja štetnih plinova i bukom)
2. Studija 2 – analizirati učinak ograničenja kapaciteta uzimajući u obzir da nova strategija kojom zrakoplovne tvrtke može razmjenjivati utore u prometu
3. Studija 3 – analizirati učinak novih metoda prilagodbe brzine zrakoplova na temelju okoliša kao uvjeta

Za ove studije koristili su se podaci o zračnom prijevozu u Europi iz više izvora. Većina podataka prikupljena je od Europske organizacije za sigurnost zračne plovidbe i one uključuju informacije o putanjama za sve letove koji su prelazili europski zračni prostor od 1. ožujka do 31. prosinca 2011. U tom periodu bilo je 10.3 milijuna letova. Podaci su

navedeni u velikoj tekstualnoj datoteci (više od 350 Gb) i bilo ih je potrebno na odgovarajući način očistiti, filtrirati, potvrditi i pohraniti u bazu podataka. Također, koristili su se i podaci iz drugih izvora za nadopunu ovih skupova podataka s dodatnim informacijama (zemljopisna imena, vremenske zone...).⁴⁵

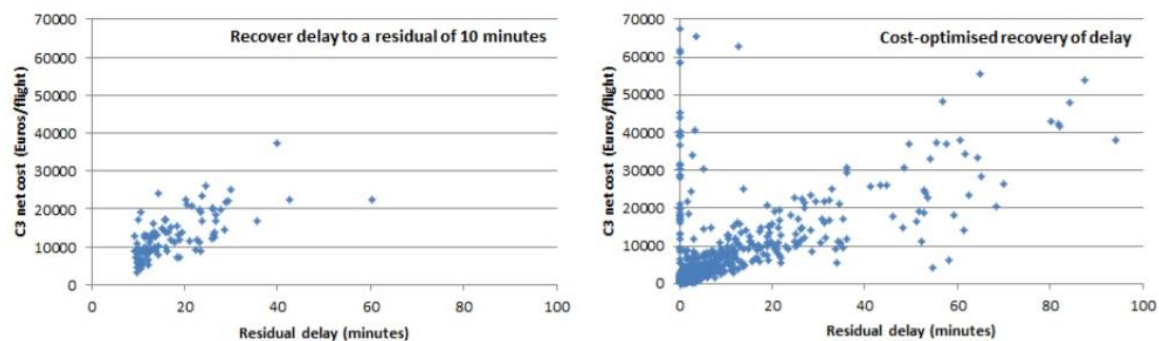
Ovi podaci korišteni su kao ulazni podaci za ove studije. Svaka je studija uključivala nekoliko simulacija s različitim ulaznim podacima koji odgovaraju različitim scenarijima. Na primjer, za studiju 1 CASSIOPEIA je koristila podatke sa 79 852 letova, 838 zračnih luka i 84 zrakoplovne tvrtke i generirali su otprilike 4 500 poruka o interakciji (tijekom jedne od simulacije). Za studija 2, koristili su podatke sa 20 529 letova i 272 zrakoplovne tvrtke i generirali su 4 938 interaktivnih poruka; a za studiju 3 koristili su podatke sa 676 letova, 114 zračnih luka i generirali su otprilike 2 000 poruka. Arhitektura softvera CASSIOPEIA korištena je za razvoj modela agenta za tri studije. Ponovno su iskoristili 78% specifikacije agenta na XML jeziku, 72% Java koda i 91% dizajna baze podataka.⁴⁶

Podaci su također korišteni za procjenu određenih zajedničkih kvantitativnih parametara za različite scenarije, to je učinjeno ručno i jednostavnim statističkim postupcima. Nisu se koristili ovi podaci za vrednovanje rezultata simulacije. Umjesto toga, simulirali su određene scenarije za sustave upravljanja zračnim prometom koji su bili slični scenarijima korištenim u drugim studijama o ATM-u, a eksperti za domenu potvrdili su da su stvorili slične rezultate simulacije.

Na slici 22 prikazani su rezultati simulacije, uspoređujući dvije različite strategije za oporavak odgode: 1 – oporaviti kašnjenje na preostalim 10 minuta i 2 – optimalna strategija troškova.

⁴⁵ Izvor: Ibid. p. 28.

⁴⁶ Izvor: Ibid. p. 29.



Slika 22 Usporedba dvije strategije

Izvor: Ibid. p. 29.

Analizom rezultata dobiveni su zaključci koji se odnose na uzročno-posljedične veze u ATM sustavima. Primjeri zaključaka koje su utvrdili stručnjaci za domene su sljedeći: prometna ograničenja u jutarnjim satima imaju lošije ekonomske učinke nego noću (studija 1), izravno trgovanje na automatima između zrakoplovnih kompanija može smanjiti troškove za otprilike 30% (studija 2), a smanjenje kašnjenja dobiva se pri novom letu zrakoplovne tvrtke i zrakoplovi primjenjuju strategiju prilagodbe brzine (dinamični trošak indeksna strategija) (studija 3). Rezultati su općenito pokazali simulirane učinke povezane sa složenim adaptivnim sustavom ponašanja poput prilagodbe sustava, ponašanja u nastajanju i efekata varanja. Ovi slučajevi simuliraju kako se sustav ATM-a uspio prilagoditi ograničenjima okoliša koristeći se samoorganizacijom. Na primjer, uvela su se ograničenja prometa na određenim zračnim lukama u studiji 1. Simulacija je pokazala kako aviokompanije i zračne luke mogu surađivati na prilagođavanju navedenim ograničenjima pronalaženjem alternative staze i novim voznim redom te reprogramiranjem planova leta. Određena ponašanja sustava na makroskopskoj razini, koja su bila teško dostupna stručnjacima za domenu na ovoj razini apstrakcije, pojavile su se kao rezultat interakcije između agenata i njihove okoline. Na primjer, u studiji 1 učinak nastao u vezi sa akumuliranjem prometa u blizini granica ograničenih vremenskih intervala, koja su bila jača u jutarnjim satima. Još jedan primjer ponašanja u nastajanju je globalni učinak lokalnih strategija odlučivanja u vezi s povratom kašnjenja. Slika 21 pokazuje da je globalno kašnjenje letova znatno manje kada se primijeni strategija kašnjenja za oporavak na preostalih 10 minuta, umjesto optimalne strategije troškova. Simulacije su također pokazale valove efekata. Primjerice, u studiji 1, promatralo se kako se ograničenja prometa na određenim zračnim lukama šire na druge zračne luke i

njihove rasporede letova. Primjena u područjima velikih razmjera za simulaciju bilo je od iznimne važnosti za analizu ove vrste učinka.

4.2.3. Krajnji rezultati i zaključak provedenih studija

U kontekstu europskog programa SESAR, važno je osigurati politiku proizvođača sa sredstvima za analizu inicijativa koje utječu na buduće mreže sustava za upravljanje zračnim prometom na multinacionalnoj ljestvici u Europi. U projektu CASSIOPEIA cilj istraživanja bio je pokazati kako modeliranje i simulacija na bazi agenata mogu pomoći u tom pogledu. U ovom projektu je pristup zasnovan na agentu gdje agent koristi nove metode zajedničkog ljudskog odlučivanja u upravljanju protokom zračnog prometa. Uvedene su i metode temeljene na novim modelima koordinacije u ATM-u koja se temeljila na novim i okretnijim mehanizmima komunikacije između dionika.

U projektu CASSIOPEIA slijedi se srednja razina apstrakcije (mezoskopska razina, između mikroskopske i makroskopske). Brojni zračni prometni procesi su apstrahirani stohastičkim pristupom. Ova razina zastupljenosti bila je korisna za simulaciju većih geografskih područja (koja sadrže stotine zračnih luka) i većih vremenskih intervala, koristeći dostupne djelomične podatke. Simulacije korištenjem ovog pristupa generirale su novonastala ponašanja koja su stručnjaci domena na makroskopskoj razini teško mogli predvidjeti.

U zračnom prometu teško je prikupiti podatke iz stvarnog svijeta za studije ATM-a iz više različitih razloga. Problem predstavljaju velike količine podataka kada su velike studije u pitanju, tajne informacije koje su teško dostupne, visoki troškovi prikupljanja podataka i mnoge druge. U CASSIOPEIA-i su se kroz istraživanje susreli sa nekim od tih problema i zbog toga su imali kašnjenje u dobivanju podataka što je naravno utjecalo na vrijeme istraživanja. Ono što je svakako bilo korisno kod istraživanja je pribavljanje dodatnih podataka iz otvorenih izvora kao što su *OpenFlights*, *OurAirports* i *Geonames*. U budućnosti se svakako očekuje da se prikupljanje podataka za ovakvu vrstu istraživanja pojednostavi, odnosno da ti podaci postanu pristupačniji uz pomoć inicijativa poput otvorenih podataka (*open data*) i povezanih podataka s eksplicitnim standardnim metapodacima.⁴⁷

Važno je isto tako imati i praktične alate (otvorenije i za ponovnu upotrebu) i metodologije koje olakšavaju razvoj modela za razne studije upravljanja zračnim prometom. U ovom istraživanju su implementirali softversku arhitekturu slijedeći otvoreni koncept s

⁴⁷ Izvor: Ibid. p. 30-31.

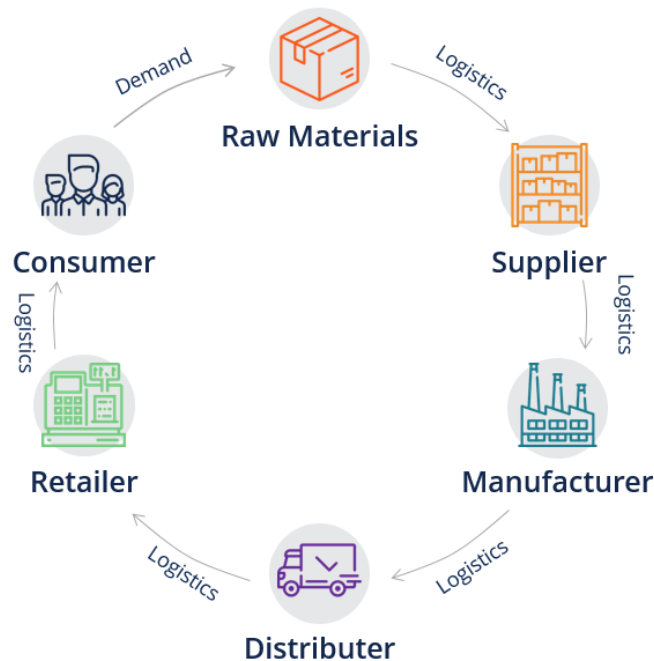
deklarativnim prikazima za ATM agente i alate otvorenog koda. Koristili su se i XML jezikom za formuliranje eksplicitne deklarativne definicije za agente (npr. zrakoplovne tvrtke, zračne luke itd.) koje su onda ponovno korištene u raznim studijama o upravljanju zračnim prometom. U ovom projektu su osmislili i implementirali alat za vizualizaciju koji je namijenjen da pomogne u analizama složenih interakcija agenata koje sadrže tisuće poruka.

Modeliranje i simulacija zasnovana na agentima uspješno je korištena za studije ATM-a (npr. za probleme kontrole zračnog prometa). Međutim, dizajn budućih ATM sustava kakav je definiran programom SESAR u Europi, predstavlja nove izazove kao što je modeliranje nove razine strateških odluka, razvijanje novih metoda zastupanja za velike razmjere simulacija korištenjem djelomičnih podataka i stvaranje praktičnijih alata koji će olakšati razvoj studija za istraživačku zajednicu. U budućnosti CASSIOPEIA planira nastaviti istraživanja kako bi pružili dodatna rješenja za ATM izazove koristeći pritom nove pristupe zasnovane na agentima s praktičnim softverskim alatima i metodologijama.⁴⁸

4.3. SIMULACIJA ZASNOVANA NA AGENTIMA U DOBAVNOM LANCU

Dobavni lanci su okosnica svake trgovine. To je cijeli sustav proizvodnje i isporuke proizvoda ili usluge, od samog početka isporuke sirovina do konačne isporuke proizvoda ili usluge krajnjim korisnicima. Dobavni lanac sadrži sve aspekte proizvodnog procesa, uključujući aktivnosti uključene u svakoj fazi, informacije koje se komuniciraju, prirodne resurse koji se pretvaraju u korisne materijale, ljudske resurse i druge komponente koje ulaze u gotov proizvod ili uslugu. Slika 23 prikazuje tijek dobavnog lanca i sudionike u njemu.

⁴⁸ Izvor: Ibid. p. 32.



Slika 23 Dobavni lanac

Izvor: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/strategy/supply-chain/> (23.08.2020.)

Logistika dobavnog lanca često koristi različite prometne koridore u svrhu rada. Prometni koridori međunarodnih dobavnih lanaca uključuju različite infrastrukturne elemente (npr. vaga, oprema za rukovanje itd.). U ovoj cjelini biti će prikazano kako upotreba simulacije zasnovane na više agenata utječe na aspekte prijevoznih koridora.

Model zasnovan na više agenata pruža način modeliranja odnosa između dionica kako bi se omogućila koordinacija u okruženju prometnog koridora. Simulacije troškova ukrcaja i iskrcaja kontejnera te vremena čekanja u redu provedeno je korištenjem skupova prikupljenih podataka. Rezultati simulacije daju potencijalne smjernice u donošenju odluka o optimalnoj raspodjeli resursa za usluge u dobavnom lancu trgovine.

Dobavni lanac uglavnom se formira kao mreža dobavljača, tvornica, skladišta, distribucijskih centara i prodavača putem kojih se kupljene sirovine transformiraju i isporučuju kupcima. Dobavni lanac koristi operativne prakse koje osiguravaju učinkovitu integraciju dobavljača i kupaca. Zbog toga se kupljena roba proizvodi i distribuira u pravim količinama, na pravim mjestima i u pravo vrijeme kako bi se optimizirali troškovi u cijelom sustavu. Konkretno planiranje prijevoza dobavnog lanca je složen zadatak, jer samo nekoliko

rukovoditelja ima prikladne vještine i alate za rukovanje i shvaćanje kako različite strategije utječu na ovaj zahtjevan društveno-tehnički problem nesmetanog rada prometnog koridora.

Sve je veća pozornost od strane akademika i praktičara posvećena prometnim koridorima i njihovom utjecaju na rad dobavnog lanca. Osobito se to odnosi na povećanje broja kontejnera za pomorski prijevoz.

Posljednjih godina u istraživanju logistike i transporta koriste se agentske tehnologije. Inteligentni agenti predstavljaju organizacije unutar transportnog područja dobavnog lanca i modeliraju svoje logističke funkcije, procese, stručnost i interakcije s drugim organizacijama. Zbog sličnosti u karakteristikama između inteligentnih agenata i organizacija, agentska tehnologija je odgovarajući izbor za modeliranje u dobavnom lancu i istraživanju transporta. Neka istraživanja povezana sa agentima simuliraju korisnike koji su uključeni u promet. Dok se ostali simuliraju pomoću prijevoznih subjekata (automobili, kamioni, brodovi, zrakoplovi) ili elemenata iz prometne infrastrukture. Pristupi zasnovani na više agenata vrlo su pogodni za domene koje zahtijevaju integraciju i interakciju sa više izvora, rješavaju probleme sukoba interesa ili imaju vremenski ograničenu obradu podataka.

Kada se uspoređi sa matematičkim modeliranjem, modeliranje i simulacija zasnovana na agentima u dobavnom lancu ima sljedeće prednosti:⁴⁹

1. Bazira se na temelju logičkih pravila
2. Snima dinamiku simuliranog sustava
3. Mogu se koristiti centralizirani ili decentralizirani pristupi
4. Pruža realnu sliku dobavnog lanca
5. Potrebno je razviti učinkovite strategije optimizacije između agenata

⁴⁹ Izvor: Pal, K. (2015). Agent-Based Simulation for Supply Chain Transport Corridors, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Information Engineering*, p. 1677 - 1681

5. SIMULACIJSKI MODUL ZASNOVAN NA AGENTIMA

Sustav agenata sastoji se od:

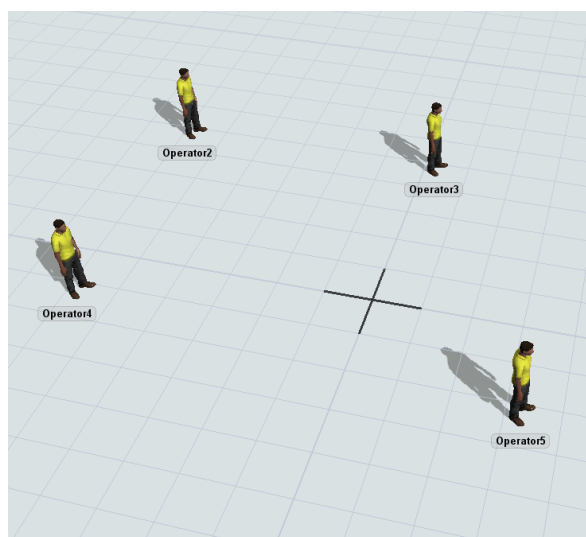
- Skupa objekata ili agenata
- Skupa ponašanja

Sustav agenata održava odnose blizine (eng. proximity) između agenata i svaki agent može imati aktivirano jedno ili više ponašanja (eng. behaviors) u bilo kojem trenutku. Ova ponašanja omogućuju agentima da donose odluke na temelju drugih agenata u njihovoj blizini. Sustav agenata pruža skalabilnu i prostornu komponentu opće namjene za svijest agenta o okolini. Sustav agenata održava ograničenu hijerarhiju svih lokacija svojih agenata. Ovom strukturom podataka omogućuje se skalabilnije otkrivanje susjednih agenata unutar prostorne blizine objekta u odnosu na usporedbu mjesta objekta sa svim ostalim objektima u cijelom modelu što postaje računski neizvedivo kad broj agenata dosegne tisuće.

U nastavku ovog poglavlja biti će prikazan način rada u FlexSimu pomoću Agent System Tool-a. Primjeri su napravljeni u verziji FlexSim 20.2.2.

5.1. PRIMJER 1 U FLEXSIMU

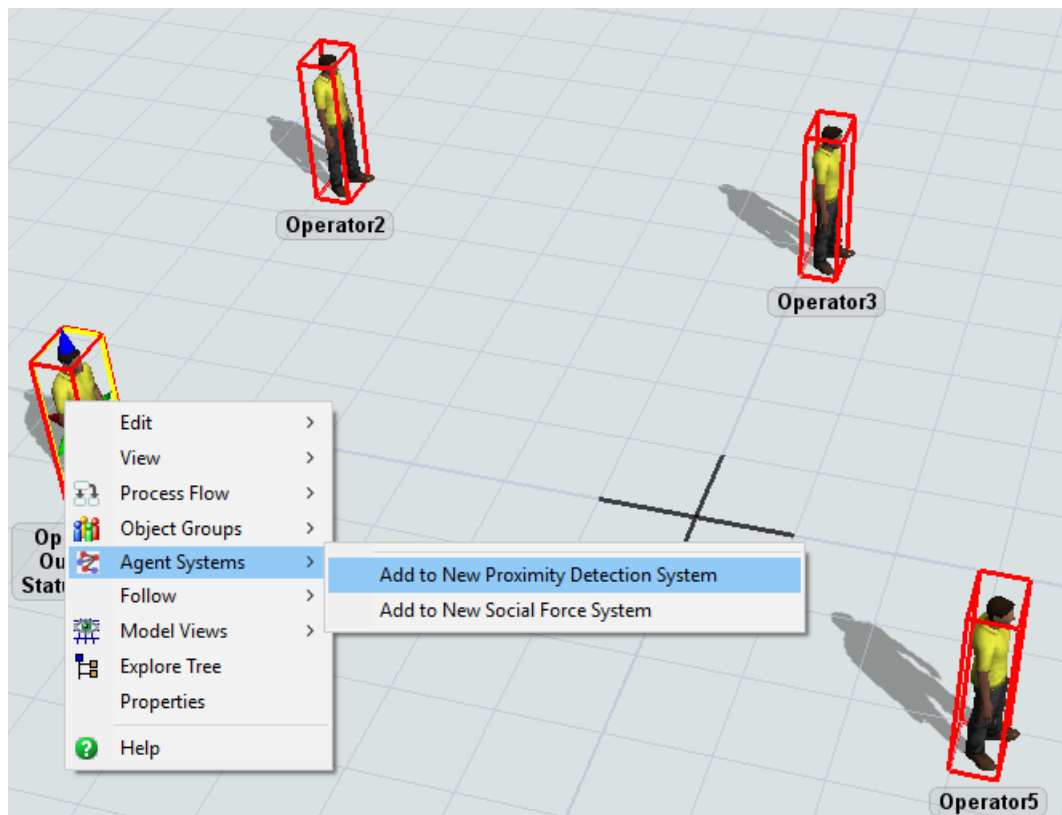
Nakon pokretanja FlexSim-a, prvi korak je postaviti objekte, u ovom primjeru to će biti 4 operatora. Prikaz na slici 24.



Slika 24 Operatori kao objekti

Izvor: izradila studentica

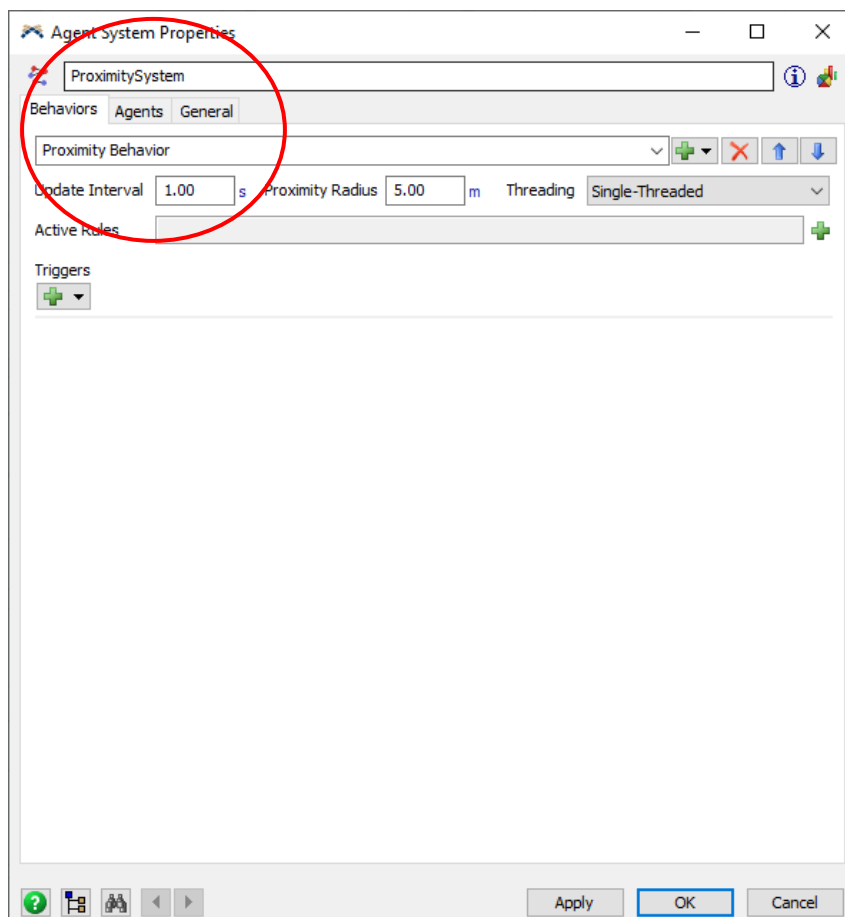
U drugom koraku potrebno je sve objekte označiti i sa desnim klikom miša otvoriti će se izbornik u kojem će se nuditi mogućnost odabira Agent System (slika 25). Biti će ponuđene dvije mogućnosti, a u ovom primjeru odabrana je prva mogućnost (Proximity Detection System). To bi bio sustav koji na temelju odabira ponašanja omogućava agentima da među više agenata pronadu svoje susjede sa istim ponašanjem.



Slika 25 Agent System mogućnosti

Izvor: Ibid.

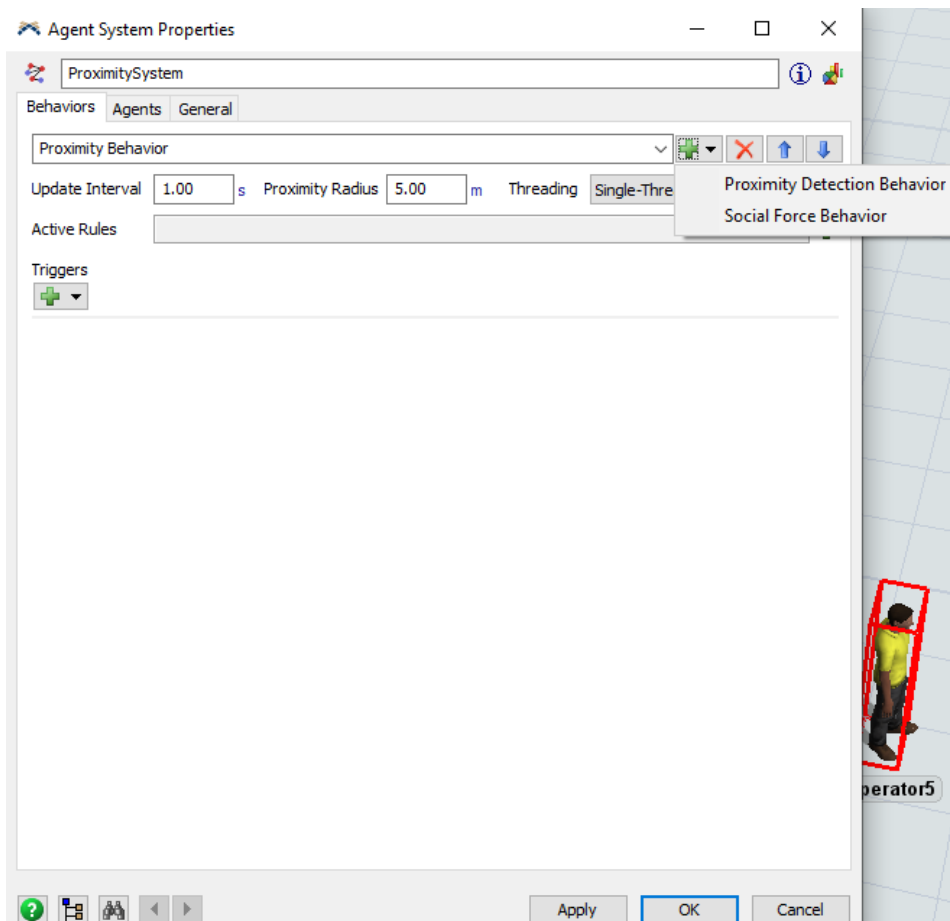
U trećem koraku otvara se izbornik sustava agenata u kojem su prikazani agenti (u ovom slučaju 4 operatora) i njihova ponašanja, odnosno izbornik za postavljanje određenih ponašanja agenata. Agenti mogu imati jedno ili više ponašanja. (slika 26)



Slika 26 Svojstva

Izvor: Ibid.

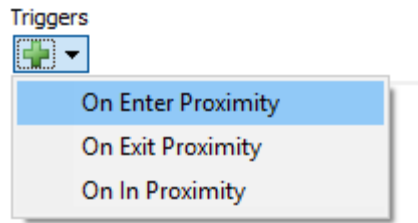
Ponašanje agenata kroz sustav može se aktivirati ili deaktivirati. Dva su moguća ponašanja agenata. Ponašanje u blizini i ponašanje socijalne sile (Proximity Behavior i Social Force Behavior) prikazane na slici 27. U ovom primjeru agenti rade na princip ponašanja u blizini.



Slika 27 Ponašanje agenata

Izvor: Ibid.

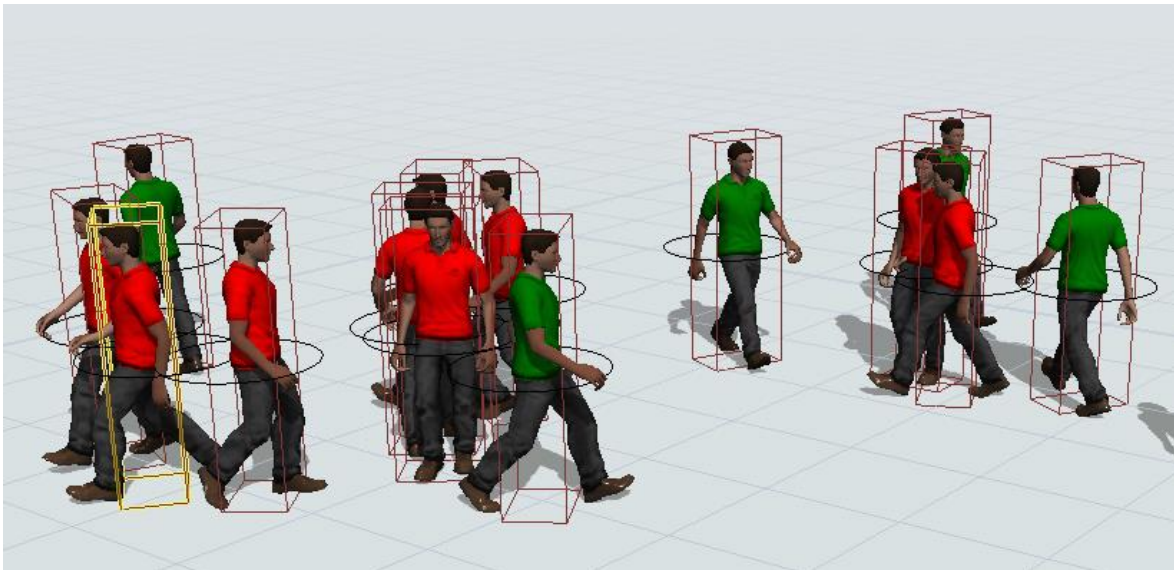
Svako ponašanje ima interval ažuriranja u kojem će se u određenom vremenu ažurirati svi agenti na temelju određenih pravila. Također se postavlja i polumjer blizine na osnovu kojeg se agenti međusobno prepoznaju. Prikazano na slici 27. Ponašanje u blizini simulaciji omogućava da otkrije blizinu između različitih agenata. Na taj način agenti u sustavu dolaze do svojih susjednih agenata koji imaju podešeno ponašanje jednako kao i oni. Kada ga agent pronade, tada će ući u blizinu sa tim agentom. Aktivirat će se u tom događaju, a zatim za svakog susjeda koji je neki agent u blizini, on će aktivirati događaj iz blizine i na svakom vremenskom intervalu ažuriranja. Kada napusti blizinu, odnosno kada izađe iz blizine određenog susjeda, aktivirat će događaj izlaza iz blizine. Sve prikazano na slici 28.



Slika 28 Događaji kako se agenti aktiviraju

Izvor: Ibid.

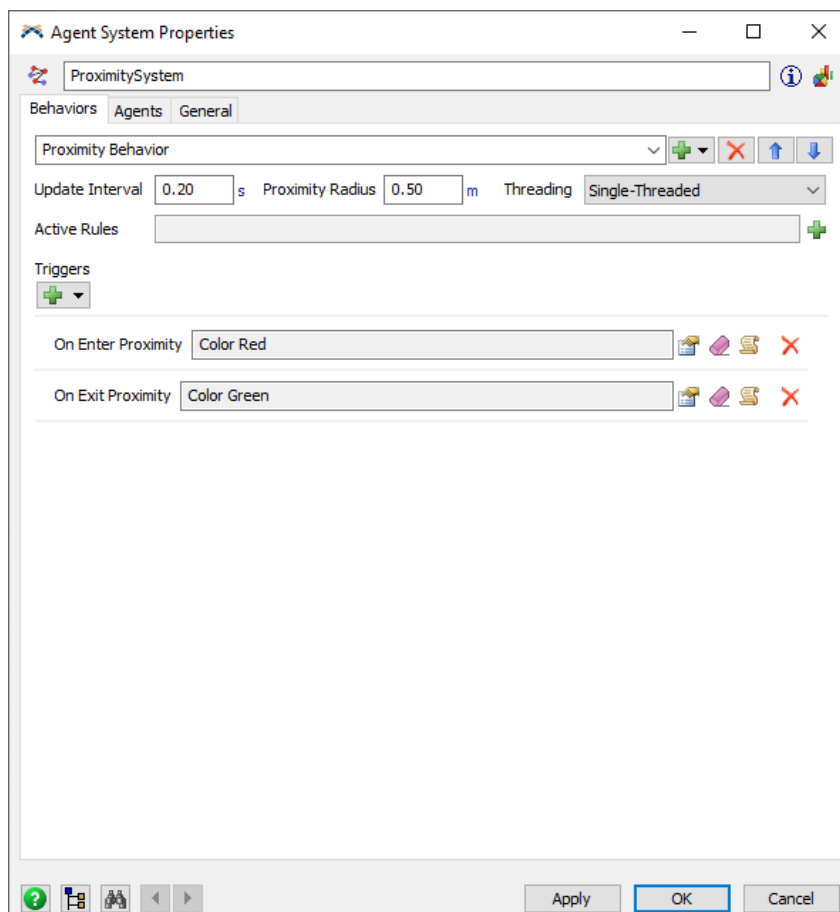
Na primjeru simulacije u programu FlexSim agenti su obojani u zelenu boju. Kada se model pokrene, objekti su postavljeni da se nasumično kreću i hodaju jedni oko drugih. Kada agenti dođu u blizinu jedni sa drugima postanu crveni, a kada napuste blizinu jedni drugih postanu ponovno zeleni. Prikaz na slici 29.



Slika 29 Prikaz agenata u modelu

Izvor: Ibid.

Interval ažuriranja postavljen je na 0.2 sekunde, a polumjer blizine na 0.5 metara. Slika 30.



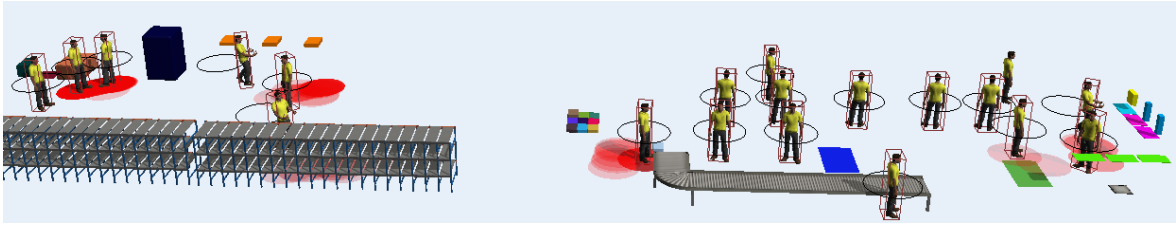
Slika 30 Svojstva agenata u modelu

Izvor: Ibid.

U većini jednostavnih modela ovaj način modeliranja zasnovan na agentima trebao bi biti dovoljan ukoliko se radi o simulaciji samo za detektiranje tko je u blizini i ako se na osnovu toga prikupljaju podaci ili donose neke odluke, ažuriraju se određena stanja ili vrijednosti.

5.2. PRIMJER 2 U FLEXSIMU

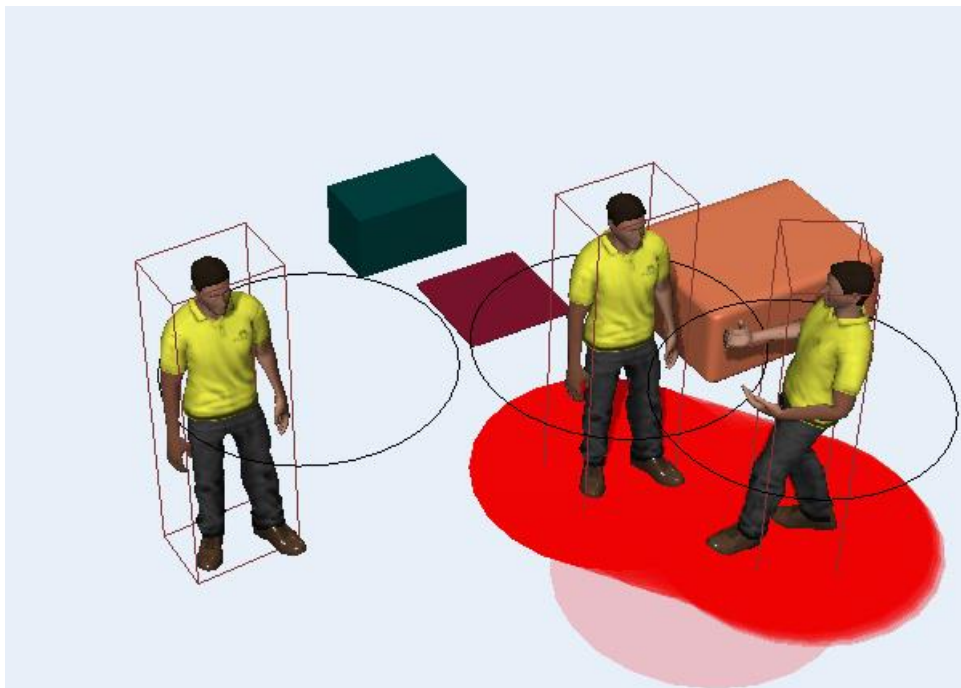
Na osnovu prošlog modela napravljen je model za socijalnu distancu u kojem poradi lakšeg uočavanja kontakta između objekata koristi se metoda vizualizacije „intenzitetom topline“ (eng. heat map) odnosno crtaju se crvene točke, različitog intenziteta, gdje se događaju blizinski kontakti, slika 31.



Slika 31 Model za socijalnu distancu

Izvor: Ibid.

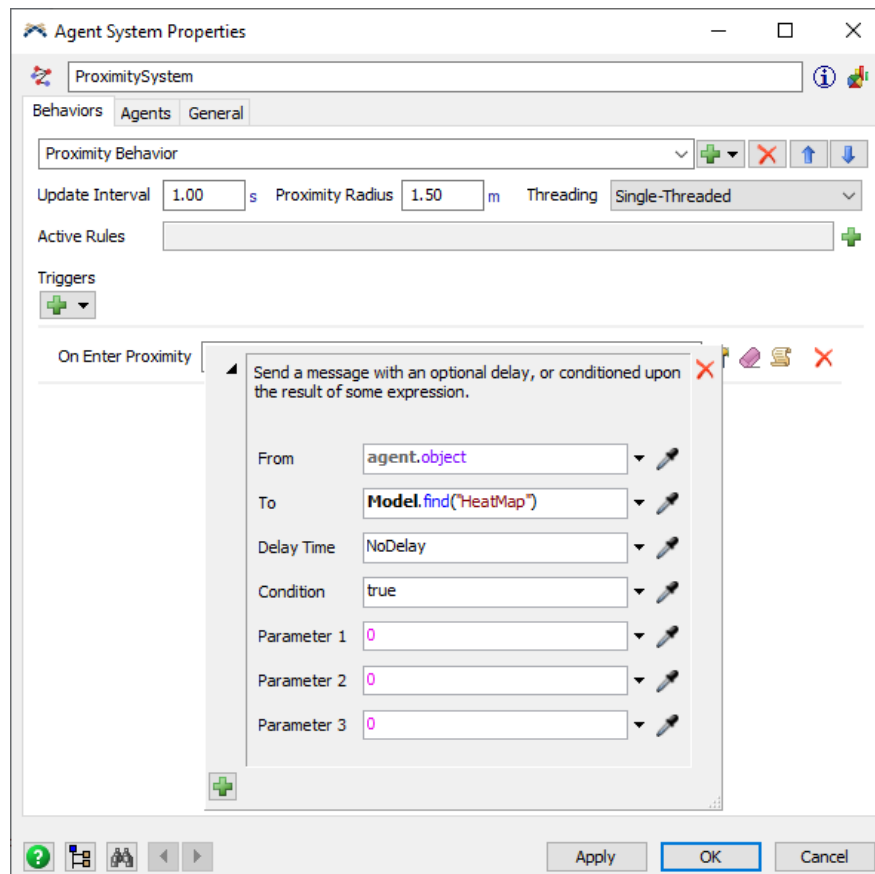
Ako se objektu pošalje poruka, dodati će se crvena točka na mjestu objekta koji šalje poruku, slika 32. Implementirani su okidači objekta OnReset, OnMessage i OnDraw kako bi se dobila navedena funkcionalnost.



Slika 32 Model za socijalnu distancu - kontakt

Izvor: Ibid.

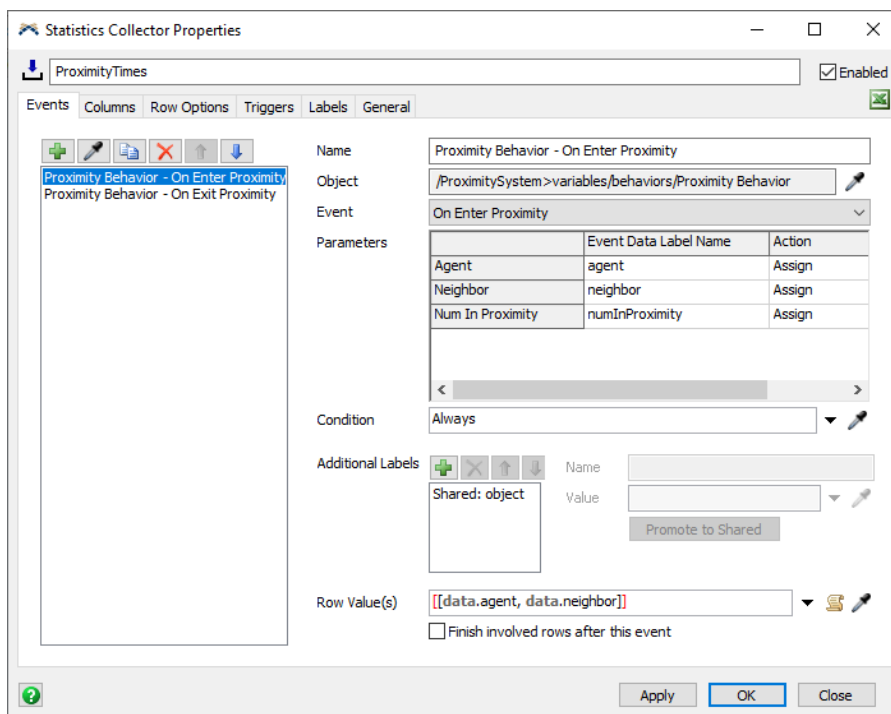
Jednom kad se ostvari kontakt, sustav blizine (eng. proximity system) šalje poruku od uključenog objekta kao dio okidača OnEnterProximity.



Slika 33 Okidač OnEnterProximity

Izvor: Ibid.

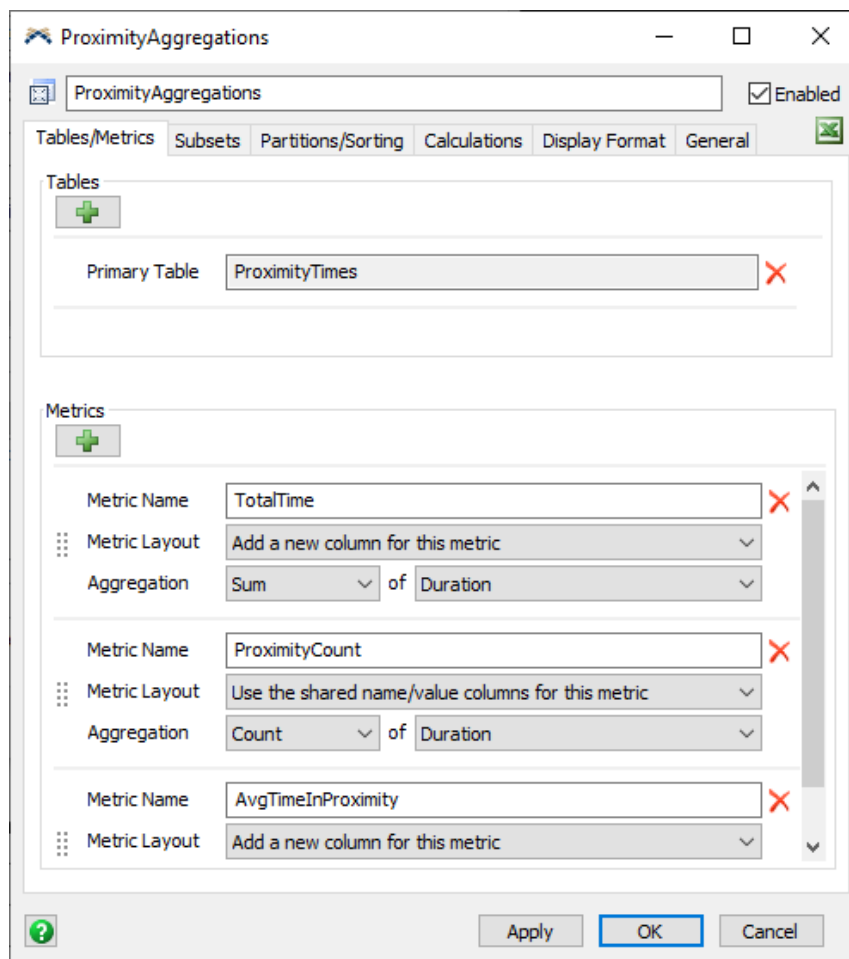
Statistička analiza se radi pomoću sakupljača (eng. statistics collector) nazvanog ProximityTimes koji preslušava događaje OnEnterProximity i OnExitProximity iz sustava blizine objekata i u skladu s tim prikuplja podatke.



Slika 34 Sakupljač ProximityTimes

Izvor: Ibid.

Sakupljač ProximityTimes prikuplja pojedinačna vremena na osnovu kojeg je stvoren grafikon 1 Vrijeme provedeno u kontaktu. Za ostale grafikone izračunata je tablica za združivanje vrijednosti. Tablica ProximityAggregates, slika 35, objedinjuje podatke potrebne za grafikon 2 Ukupno vrijeme u kontaktu, grafikon 3 Broj kontakata i grafikon 4 Prosječno vrijeme u kontaktu.

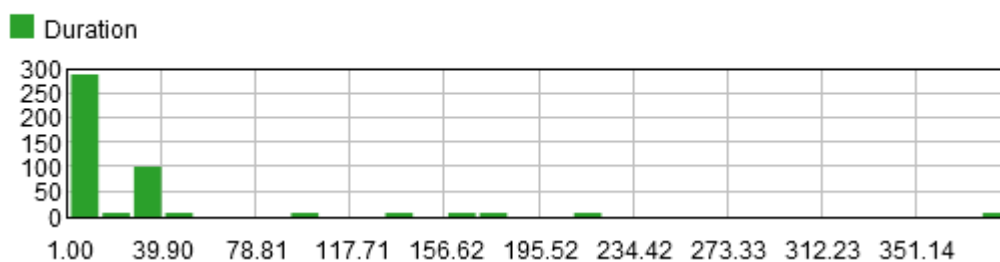


Slika 35 Tablica ProximityAggregates

Izvor: Ibid.

Nakon izvođenja simulacije u ukupnom vremenu od 3600 sekundi dobiveni su slijedeći grafikoni.

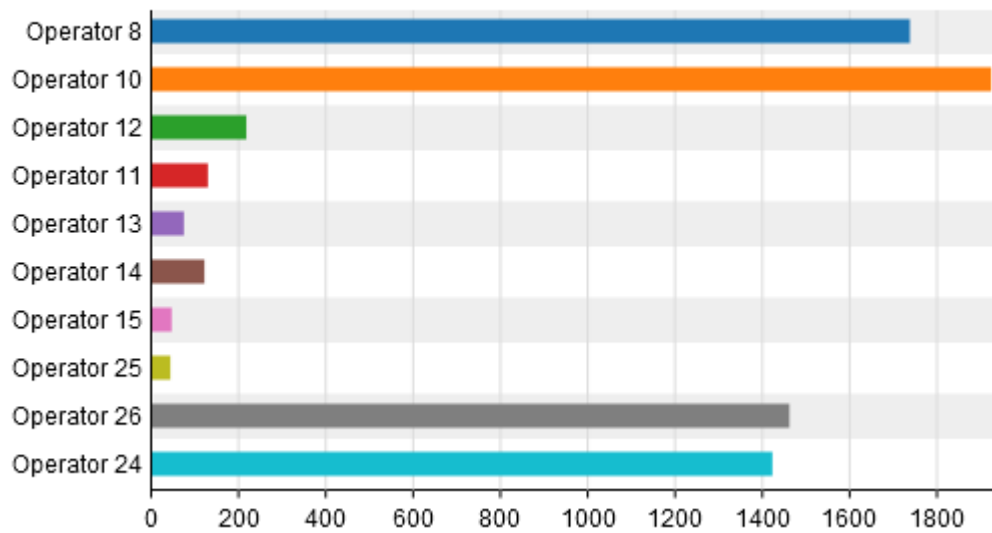
Vrijeme provedeno u kontaktu



Grafikon 1 Vrijeme provedeno u kontaktu

Izvor: Ibid.

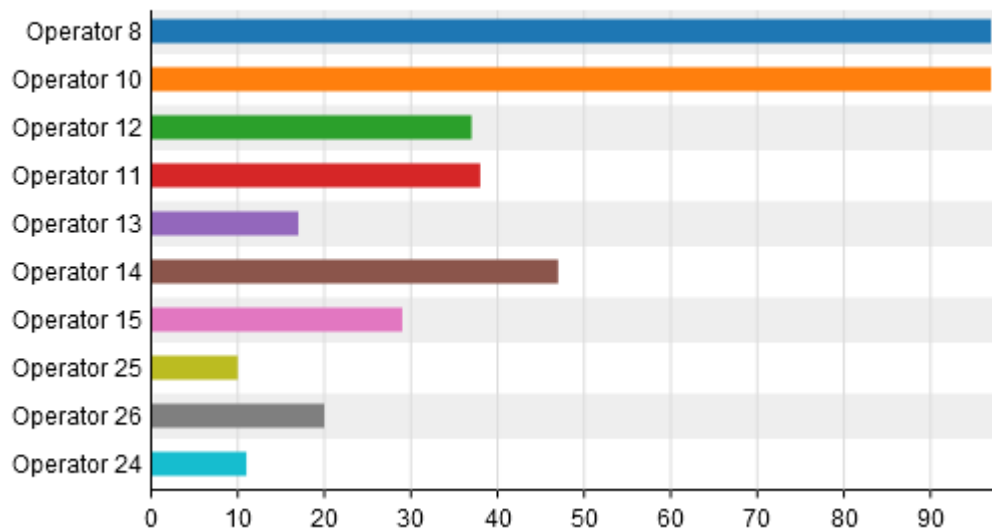
Ukupno vrijeme u kontaktu



Grafikon 2 Ukupno vrijeme u kontaktu

Izvor: Ibid.

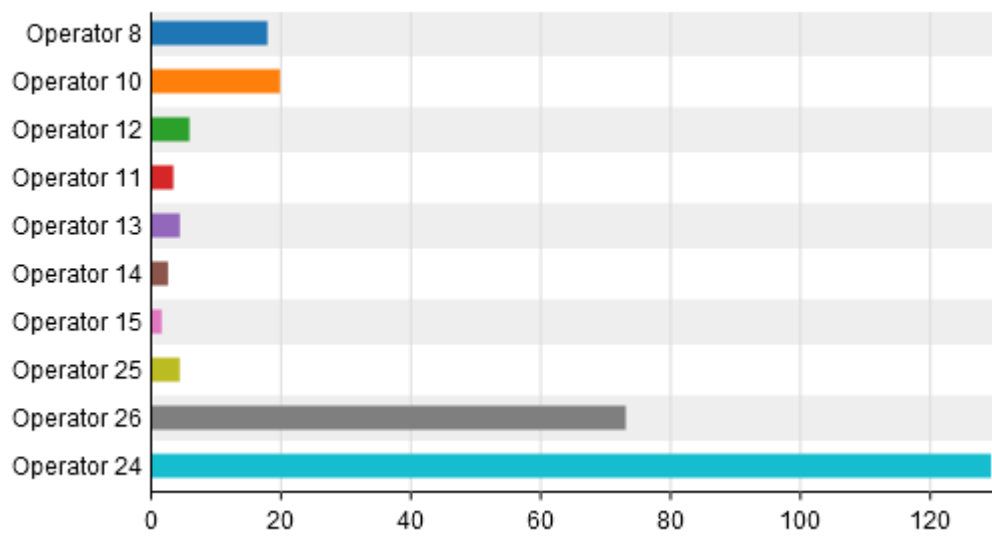
Broj kontakata



Grafikon 3 Broj kontakata

Izvor: Ibid.

Prosječno vrijeme u kontaktu



Grafikon 4 Prosječno vrijeme u kontaktu

Izvor: Ibid.

6. PREDNOSTI I NEDOSTACI

6.1. PREDNOSTI

Prednosti modeliranja i simulacije zasnovane na agentima u usporedbi sa drugim metodama modeliranja (npr. matematička) mogu se iskazati u četiri izjave:⁵⁰

1. ABMS bilježi pojave u nastajanju
2. ABMS pruža realan opis sustava
3. ABMS je fleksibilan
4. ABMS ima niske troškove i štedi vrijeme

Sposobnost ove metode modeliranja da se bavi novim pojavama je upravo ono što pokreće ostale prednosti.

Pojave nastaju međusobnim interakcijama pojedinačnih entiteta. Primjerice, zastoje u prometu koji se pojavljuju kao rezultat ponašanja i interakcije između vozača, koji se potencijalno mogu kretati u smjeru nasuprot automobilima koji ga uzrokuju. Ove karakteristike za nastale pojave teško je razumjeti i predvidjeti, a modeliranje zasnovano na agentima upravo takve situacije znatno olakšava.

U mnogim je slučajevima ABMS pristup modeliranja najrealniji i najprirodniji za opisivanje i simuliranje sustava sastavljenih od „bihevioralnih“ entiteta. Bilo da se radilo o prometnom zastoju, burzi, glasačima ili poslovanju određene organizacije ova metoda modele čini realnijima, odnosno sličnija onima u stvarnom svijetu. Na primjer, prirodnije je opisati kako će se vozila kretati trakom, nego osmišljavati jednadžbe koje upravljaju dinamikom gustoće vozila.

Fleksibilnost ovog načina modeliranja može se promatrati uz višestruke dimenzije. Primjerice vrlo je jednostavno dodati više agenata u proces modeliranja. ABMS također pruža prirodni okvir za podešavanje složenosti agenata kao što su ponašanje, stupanj racionalnosti, sposobnost učenja, a također se razvijaju i pravila interakcija. Još jedan primjer fleksibilnosti kod ovog načina modeliranja je sposobnost promjene razine opisa i združivanje sa okolinom ili drugim agentima.

⁵⁰ Izvor: Bazghandi, A. (2012.) Techniques, Advantages and Problems of Agent Based Modeling for Traffic Simulation, *International Journal of Computer Science Issues*, p. 115-119

Simulacija se opisuje kao učinkovit alat koji se koristi za reprodukciju i analizu široke raznolikosti složenih problema koje je teško proučavati kroz druge načine modeliranja koji mogu biti jako skupi, ali i opasni. Promet se promatra kao složen sustav pa je simulacija pogodan alat za analiziranje prometnih sustava. Simulacija prometa najsvremenija je metoda koja se koristi za procjenu i ocjenu shema prijevoza za smanjenje zagušenja. Ekonomski utjecaj prometnog sustava raste iz dana u dan. Dobro dizajniran model sustava autoceste zasnovan na agentima smanjuje troškove prijevoza robe, potrošnju energije i štedi bezbroj sati nepotrebne vožnje.

6.2. NEDOSTACI

Prvi problem u simulaciji prometnih sustava predstavlja priroda društvenih pojava s previše složenih čimbenika. Na primjer, u prometnom sustavu ponašanje vozača znatno se razlikuje ovisno o zemljopisnom položaju, osim toga to ponašanje s vremenom se i mijenja. U stvarnosti su najčešće uključeni ljudski agenti s potencijalno iracionalnim ponašanjem, subjektivnim odabirom i složenim psihologijama. Naravno, bolje je da ovaj problem smatramo karakterističnim za društvene pojave. Iako je ovoj metodi modeliranja posvećeno puno akademske pažnje postoji vrlo malo prometnih aplikacija koje bi potencijalno mogle olakšati prometni sustav. Pretpostavlja se da je to tako radi poteškoća koje se događaju kod prikupljanja podataka za mjerenje parametara. Socijalna simulacija prometa do sada nije bila vrlo uspješna jer je fokus bio na korištenju alata za predviđanje umjesto alata za učenje. Na primjer, inženjer prometa može bolje razumjeti zagušenja u prometu na način da ih simulira pomoću agenata.

Jedan problem povezan sa primjenom ABMS-a u prometnoj simulaciji zajednički je svim metodama modeliranja, a radi se o tome da model mora služiti svrsi jer model opće namjene nije funkcionalan. Model mora biti izgrađen na pravoj razini opisa, s pravom količinom detalja koja služi svojoj svrsi.

Još jedan problem je taj što alati koji se primjenjuju u modeliranju i simulacijama zasnovanim na agentima u prometu uključuju veliki broj ograničenja performansi. Primjerice, s velikim brojem agenata, brzina izvršenja znatno opada. Obično ovi alati nisu dizajnirani za opsežne simulacije.

7. ZAKLJUČAK

Primjena ABMS metode modeliranja i simulacije ima svoje prednosti koje uvelike olakšavaju i pomažu kod rješavanja određenih problema. Ova metoda primjenjuje se u raznim područjima pa tako i u prometu. U simulaciji povezanoj s prometom, prednost ABMS-a je višestruki. U stanju je uhvatiti sve potrebne detalje na entitetskoj razini, kao i za reprodukciju modela odozdo prema gore u kojoj uspijeva stvoriti realne situacije kao kod stvarnih sudionika u prometu. Također omogućuje modeliranje složenog odlučivanja s obzirom na višestruke čimbenike i dinamičke informacije. ABMS metoda omogućava prikaz ponašanja pojedinačnih vozača ili tijeka vozila koji se mogu vizualizirati, nadzirati i provjeriti, olakšavajući tako testiranje i otklanjanje pogrešaka. Jedna od glavnih prednosti ABMS-a je njegova sposobnost da riješi heterogenost ili određene neobične osobine na razini pojedinih agenata. Takvo što koristi se na primjer za modeliranje ponašanja pojedinih vozača. Posebice u scenarijima izbora rute putovanja gdje svaki vozač ima strategiju za izbor najboljeg puta. Međutim, putovanje na posao sve više ovisi o emitiranju informacija, što može imati ozbiljan utjecaj na stabilnost prometnih uvjeta. Baš iz tog razloga ABMS je važan alat u razumijevanju takvih utjecaja. S druge strane simulacija prometa predstavlja zanimljiv izazov modeliranju i simulacijama zasnovanim na agentima, a koji se tiču modeliranja i dizajniranja interakcije između autonomnih agenata koji donose odluke i između agenta i njegovog okruženja. Simulacija prometa također je zanimljiva s metodološkog stajališta baveći se potrebnom razinom detalja i potrebnim znanjem te integriranjem različitih razina apstrakcija prisutnih u prometnim sustavima.

Modeliranje i simulacija zasnovana na agentima može se i kombinirati sa drugim metodama modeliranja. ABMS pruža sveobuhvatni okvir za komponente modela zasnovane ne drugim tehnikama i metodama modeliranja. Također može pružiti modele agenata koji su već ugrađeni u većim sustavima. Svi trenutno korišteni pristupi modeliranju izvorno su razvijeni za rješavanje određenih vrsta problema. Neki od problema su primjerice optimizacija za pronalaženje najboljeg rješenja određenog problema, diskretna simulacija događaja za razumijevanje učinaka nesigurnosti u procesu i dinamika sustava za razumijevanje međusobne povezanosti sustava.

Standardizacija postupaka za izgradnju i analizu modela temeljenog na agentima kritično je pitanje samo po sebi. Unatoč razvoju platformi za izgradnju i analizu simulacije temeljene na agentima, istraživači na ovom polju našli su se uglavnom u istoj poziciji kao i ona koja je

karakterizirala upotrebu statističkih metoda u društvenim znanostima do izgleda softverskih paketa, razdoblje u kojem je istraživač morao napisati vlastiti računalni kod implementirajući potrebne algoritme. Ova je situacija dijelom posljedica prirode same simulacije zasnovane na agentima. Budući da zahtijeva formalizaciju mehanizama sposobnu generirati zadanu pravilnost, vrstu računalnog koda potrebnog za implementaciju prikaz tih mehanizama uvelike ovisi o promatranom fenomenu hipoteze kojima se želi formalizirati.

Postoje neka pitanja u vezi s primjenom ABMS-a na društvene, političke i ekonomske znanosti. Jedno je pitanje zajedničko svim tehnikama modeliranja, a to je da model mora služiti svrsi. Model mora biti izgrađen na pravoj razini opisa, s točno onom količinom detalja koji služe svojoj svrsi. Drugo je pitanje povezano sa samom prirodom sustava koji se modelira s ABMS-om u društvenim znanostima. Oni najčešće uključuju ljudske agente, s potencijalno iracionalnim ponašanjem, subjektivnim izborima i složenom psihologijom koje je ponekad teško kvantificirati, kalibrirati i opravdati.

Opseg ABMS-a nastavlja se širiti i primjenjivati u različitim situacijama. Svoju je primjenu pronašao prvenstveno u rješavanju praktičnih problema i unapređivanju različitih istraživanja. Zašto se uopće bavimo modeliranjem i simulacijama zasnovanim na agentima? Agenti nam omogućuju da razmišljamo izvan okvira sadašnjeg vremena. Simulacija agenta može se koristiti za proučavanje toga kako se uzorci i organizacije pojavljuju i kako otkrivaju oblikovanje strukture na razini sustava koje inače nisu vidljive iz ponašanja pojedinih agenata.

Kako bi se nosili sa složenošću logističkih sustava u stvarnom životu, postoji sve veća potražnja za preciznijim i većim simulacijskim modelima. Primjena modeliranja zasnovana na agentima iz tog se razloga sve više primjenjuje. Da bi se modeli zasnovani na agentima pretvorili u stvarnost, potrebne su velike količine skupova podataka za unos i empirijsku provjeru valjanosti. Stoga se nove tehnike za prikupljanje takvih podataka moraju izraditi i primijeniti. Na primjer, u slučaju simulacije prometa, to počinje biti stvarnost s GPS-om i drugim mobilnim uređajima za praćenje rute. Također, participativni simulacijski pristupi koji uključuju dionike i stručnjake u trajnu simulaciju mogu se dalje razvijati prema novim tehnikama provjere valjanosti što rezultira pouzdanijim i nevjerojatnijim modelima. Sve se više istraživača sa područja softverskog inženjerstva usmjerenog na agente zanima za simulacijske aplikacije, u budućnosti se očekuje i metodološki napredak metode modeliranja i simulacije zasnovane na agentima. To uključuje sve korake, od precizne formulacije cilja

simulacije do automatskog generiranja dokumentacije modela. Međutim, da bi se zaista mogla pružiti korisna metodološka potpora, postupak modeliranja sam po sebi mora se bolje razumjeti. Podučavanje ABMS-a ne bi se trebalo ograničiti na podučavanje korištenja posebnog alata ili programa na određenom jeziku. Iz tog razloga stručnjaci na ovom području rade na identifikaciji dostupnosti jednostavnih alata kao jedan od ključnih izazova u sljedećih 15 godina.

LITERATURA

KNJIGE:

1. Schmidt, J. W., Taylor, R. E. 1970., *Simulation and Analysis of Industrial Systems*, R. D. Irwin

ČLANCI:

1. Klügl, F., Bazzan, A. (2012). Agent-Based Modeling and Simulation, *Ai Magazine*, p. 29-40, [Online]. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/286394862_Agent-Based_Modeling_and_Simulation
2. Macal, C., North, M. (2005). Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulations, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference* [Online]. Dostupno na: <https://www.informs-sim.org/wsc05papers/002.pdf>
3. Macal, C., North, M. (2008). Agent-based modeling and simulation: ABMS examples, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, p. 101-112. [Online]. Dostupno na: <http://simulation.su/uploads/files/default/2008-macal-north.pdf>
4. Schelling, Thomas C. (1971). Dynamic Models of Segregation, *Journal of Mathematical Sociology*, p. 143-186.
5. Bandini, S., Manzoni, S., Vizzari, G. (2009). Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [Online]. Dostupno na: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/4.html>
6. Benhamza, K., Ellagoune, S., Seridi, H., Akdag, H. (2012). Agent-Based Modeling for Traffic Simulation, *Courrier du Savoir*, p. 51-56, [Online]. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/228778032_Agent-based_modeling_for_traffic_simulation
7. Molina, M., Carrasco, S., Martin, J. (2014). Agent-Based Modeling and Simulation for the Design of the Future European Air Traffic Management System: The Experience of CASSIOPEIA, *Communications in Computer and Information Science*, p. 22-33, [Online]. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/279911549_Agent-Based_Modeling_and_Simulation_for_the_Design_of_the_Future_European_Air_Traffic_Management_System_The_Experience_of_CASSIOPEIA

8. Pal, K. (2015). Agent-Based Simulation for Supply Chain Transport Corridors, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Information Engineering*, p. 1677 – 1681
9. Izvor: Bazghandi, A. (2012.) Techniques, Advantages and Problems of Agent Based Modeling for Traffic Simulation, *International Journal of Computer Science Issues*, p. 115-119

DOKTORSKA DISERTACIJA:

1. Čavoški, S. (2016). *Simulacioni modeli zasnovani na agentima kao podrška odlučivanju u elektronskom poslovanju*, Doktorska disertacija, Beograd: Sveučilište u Beogradu

INTERNETSKI IZVORI:

1. <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/> (15.07.2020.)
2. <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zvxp34j/revision/3> (15.07.2020.)
3. <https://www.dictionary.com/browse/system> (15.07.2020.)
4. https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/2008644/mod_resource/content/2/MiS1.pdf (15.07.2020.)
5. https://bib.irb.hr/datoteka/347082.modeliranje_i_simulacija_-_v2a2.pdf (17.07.2020.)
6. <https://hr.flipperworld.org/pc/racunalni-model-je-koncept-stvaranje-i-primjeri-uporabe-racunalih-modela> (17.07.2020.)
7. <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/explainer-what-computer-model> (17.07.2020.)
8. <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/agent-based-modeling/> (01.08.2020.)
9. https://www.researchgate.net/figure/The-core-mechanism-of-stigmergy_fig1_280314681 (01.08.2020.)
10. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (17.08.2020.)
11. <https://repast.github.io/screenshots.html> (20.08.2020.)
12. <http://adigaskell.org/2017/06/20/how-autonomous-vehicles-could-improve-road-safety/> (20.08.2020.)
13. <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/strategy/supply-chain/> (23.08.2020.)
14. <https://www.youtube.com/watch?v=aF3TaeMaIQM> (23.08.2020.)

KAZALO KRATICA

ABMS, engl. Agent Based Modeling and Simulation, modeliranje i simulacija zasnovana na agentima

MAS, engl. Multi-Agent System, sustavi s više agenata

2D, engl. Two Dimensional, dvodimenzionalni

3D, engl. Three Dimensional, trodimenzionalni

GPSS, engl. General Purpose Simulation System, simulacijski sustav opće namjene

FIFO, engl. First In, First Out, prvi unutra, prvi van

IT, engl. Information technology, informacijske tehnologije

ACL, engl. Agent Communication Language, komunikacijski jezik agenata

REPAST, engl. Recursive Porous Agent Simulation Toolkit, rekurzivni porozni agencijski simulacijski priručnik

GIS, engl. Geographic Information System, geografski informacijski sustav

ATM, engl. Air Traffic Management, upravljanje zračnim prometom

ATFM, engl. Air Traffic Flow Management, upravljanje protokom zračnog prometa

ATC, engl. Air Traffic Control, kontrola zračnog prometa

ACES, engl. Airport Capacity Enhancement Simulator, simulator povećanja aerodromskog kapaciteta

BDI, engl. Baltic Dry Indeks, Baltički indeks suhosti

POPIS SLIKA

Slika 1 Prednosti i nedostaci simulacije	7
Slika 2 Računalni model.....	11
Slika 3 Primjeri entiteta	12
Slika 4 Komponente sustava u programu Flexsim	13
Slika 5 ABMS – Agenti.....	16
Slika 6 Stigmegrija	17
Slika 7 Pristup odozdo prema gore u procesu modeliranja realnih sustava	19
Slika 8 Karakteristike agenata	22
Slika 9 Interakcija između agenata.....	24
Slika 10 Prvi model temeljen na ploči.....	28
Slika 11 Shema uzoraka	29
Slika 12 Zbirka uzoraka modela u programu NetLogo	31
Slika 13 GIS praćenje agenata.....	32
Slika 14 Prometni zastoje	37
Slika 15 Okruženje simulacije.....	40
Slika 16 Prikaz simulacije	42
Slika 17 Zastoj u prometu.....	43
Slika 18 Sažetak modela zračnog prijevoznika (povezan s rasporedom letova).....	47
Slika 19 Primjer interakcije agenata tijekom kolaborativnog donošenja odluka	48
Slika 20 Simulirani događaji koji odgovaraju različitim fazama leta	50
Slika 21 Alat za vizualizaciju koji prikazuje poruke interakcije agenata.....	51
Slika 22 Usporedba dvije strategije	53
Slika 23 Dobavni lanac.....	56
Slika 24 Operatori kao objekti.....	58
Slika 25 Agent System mogućnosti.....	59
Slika 26 Svojstva	60
Slika 27 Ponašanje agenata.....	61
Slika 28 Događaji kako se agenti aktiviraju	62
Slika 29 Prikaz agenata u modelu.....	62
Slika 30 Svojstva agenata u modelu	63
Slika 31 Model za socijalnu distancu	64
Slika 32 Model za socijalnu distancu - kontakt.....	64
Slika 33 Okidač OnEnterProximity	65
Slika 34 Sakupljač ProximityTimes	66
Slika 35 Tablica ProximityAggregates.....	67

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1 Vrijeme provedeno u kontaktu.....	67
Grafikon 2 Ukupno vrijeme u kontaktu.....	68
Grafikon 3 Broj kontakata	68
Grafikon 4 Prosječno vrijeme u kontaktu.....	69