

Višeagentski sustav za simulaciju utjecaja električnih vozila na prometnu infrastrukturu

Sergo, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:222472>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 692

**VIŠEAGENTSKI SUSTAV ZA SIMULACIJU UTJECAJA
ELEKTRIČNIH VOZILA NA PROMETNU INFRASTRUKTURU**

Mateo Sergio

Zagreb, veljača 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 692

**VIŠEAGENTSKI SUSTAV ZA SIMULACIJU UTJECAJA
ELEKTRIČNIH VOZILA NA PROMETNU INFRASTRUKTURU**

Mateo Sergio

Zagreb, veljača 2025.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 692

Pristupnik: **Mateo Sergio (0036524199)**

Studij: Računarstvo

Profil: Znanost o mrežama

Mentor: prof. dr. sc. Gordan Ježić

Zadatak: **Višeagentski sustav za simulaciju utjecaja električnih vozila na prometnu infrastrukturu**

Opis zadatka:

Razvoj električnih vozila (engl. electric vehicles, EV) značajno utječe na transformaciju prometne infrastrukture, dok klasična vozila na fosilna goriva i dalje zahtijevaju podršku postojećih benzinskih stanica. Time se nameće potreba za optimizacijom raspodjele električnih punionica i benzinskih stanica te za procjenom utjecaja različitih scenarija prelaska na električna vozila na postojeću infrastrukturu. Vaš zadatak je razviti višeagentski sustav koji će simulirati prometnu mrežu i distribuciju infrastrukture u urbanim sredinama. Sustav treba analizirati učinke prometnih gužvi, udaljenosti i vremenskih ograničenja na potražnju za električnim punionicama i benzinskim stanicama, uzimajući u obzir različite obrasce ponašanja vozača, poput dnevnih migracija i povremenih putovanja. Na temelju rezultata simulacije, potrebno je omogućiti vizualnu i kvantitativnu analizu optimalne raspodjele benzinskih stanica i električnih punionica te predložiti preporuke za potrebne infrastrukturne prilagodbe, s obzirom na omjer električnih i klasičnih vozila u urbanim područjima. Svu potrebnu literaturu osigurat će Vam Zavod za telekomunikacije.

Rok za predaju rada: 14. veljače 2025.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Gordanu Ježiću i asistentici dr. sc. tech. Katarini Mandarić na pruženom povjerenju i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Pregled električnih vozila i problematike elektrifikacije prometa	5
2.1. Povijest	5
2.2. Tehničke karakteristike	7
2.3. Prednosti i mane	7
2.4. Prihvaćenost električnih vozila	8
2.5. Problematika elektrifikacije i optimizacija infrastrukture	10
3. Idejno rješenje i specifikacija okruženja	12
3.1. Opis okruženja	12
3.1.1. Brojnost i lokacije električnih punionica i benzinskih stanica	12
3.1.2. Tipovi vozila i njihova distribucija	13
3.1.3. Vremenski aspekti i ponašanja vozača	14
3.1.4. Važna prometna čvorišta	15
3.2. Fokus idejnog rješenja	16
3.2.1. Optimizacija infrastrukture	16
3.2.2. Održivost i utjecaj na okoliš	17
3.2.3. Digitalizacija	17
4. Implementacija modela i simulacije	20
4.1. Višeagentski sustavi	20
4.1.1. Programski agenti i njihova svojstva	20
4.1.2. Primjena višeagentskih sustava	21

4.2.	AnyLogic softver	22
4.3.	Opis modela	24
4.3.1.	Agent <i>Main</i> i GIS mapa	24
4.3.2.	Agenti vozila	26
4.3.3.	Agenti benzinskih stanica i električnih punionica	28
4.3.4.	Logika agenta vozila	30
4.3.5.	Logika agenata benzinske stanice i električne punionice	34
4.3.6.	Skripte za generiranje podataka	40
4.3.7.	Problemi tijekom razvoja i rješenja	40
4.3.8.	Simulacija modela	41
5.	Rezultati i analiza	44
5.1.	Usporedba rezultata na temelju promjene lokacija benzinskih stanica i električnih punionica	44
5.2.	Usporedba rezultata na temelju promjene broja benzinskih stanica i električnih punionica	46
5.3.	Diskusija	48
6.	Zaključak	51
	Literatura	52
	Sažetak	54
	Abstract	55

1. Uvod

U današnje vrijeme čovječanstvo se suočava s mnogim globalnim izazovima kao što su klimatske promjene, zagađenje zraka i nekontrolirana potrošnja fosilnih goriva. Kao odgovor na to, javlja se pojačana potreba za elektrifikacijom i preraspodjelom energetske resursa u prometnoj infrastrukturi. Električna vozila postaju ključni element u smanjenju negativnog utjecaja cestovnog prometa na okoliš te u povećanju stupnja održivog razvoja. Smanjenje emisija CO₂, smanjenje razina buke i sigurnost u prometu samo su neke od pogodnosti koje elektrifikacija prometa donosi. Iz tog razloga, vozila na električni pogon postaju dominantni faktor u oblikovanju budućnosti prometa, a to za posljedicu ima utjecaj na način na koji se projektira i koristi prometna infrastruktura. Iako bitan korak prema održivosti i očuvanju okoliša, integracija električnih vozila u postojeći prometni sustav predstavlja veliki izazov za inženjere koji rade na planiranju postojeće i buduće infrastrukture da bi spomenuta integracija bila što efikasnija i jednostavnija. Ovaj diplomski rad razrađuje tematiku utjecaja električnih vozila na prometnu infrastrukturu i problematiku prije spomenutih izazova pri integraciji. U radu je objašnjeno kako osim ekoloških koristi, električna vozila donose i značajnu promjenu u potrošnji energije, što ima utjecaja na raspodjelu opterećenja u elektroenergetskom sustavu, ali i na ekonomiju društva. U kontekstu takvog okruženja simulacije višeagentskih sustava mogu pomoći u optimizaciji prometne infrastrukture i energetske mreže te osigurati puno lakšu i sigurniju elektrifikaciju prometa. Cilj rada bio je izraditi simulacijski model koji analizira utjecaj električnih vozila na postojeću prometnu infrastrukturu na primjeru dijela grada Zagreba. Poseban naglasak stavljen je na obrasce ponašanja vozača, energetske zahtjeve, stvaranje gužvi na benzinskim postajama i električnim punionicama i kako na to utječu njihova raspodjela, njihovi kapaciteti te vremena punjenja vozila. U obzir su uzeti parametri i okolnosti koje se pojavljuju u stvarnom svijetu kako bi konačni rezultati bili što vjerniji. Model može služiti kao podloga budućih programskih

rješenja za planiranje nove ili za prilagodbu postojeće prometne infrastrukture urbanih i suburbanih područja. Realiziran je u programskom alatu AnyLogic koji, između ostalog, služi za simulacije višeagentskih sustava, a detaljnije je opisan u dijelu o samom softveru.

2. Pregled električnih vozila i problematike elektrifikacije prometa

Za potrebe shvaćanja važnosti i ciljeva ovog rada, u nastavku je objašnjen teorijski okvir u kojemu je opisana povijest električnih vozila, njihove karakteristike, načini upravljanja te njihovog utjecaja na prometnu infrastrukturu. Ideja električnih vozila jako dobro se uklapa u budućnost prometa i transporta u kontekstu svakidašnje evolucije spomenutih područja. S obzirom da je većina vozila proteklog stoljeća, pa i danas, pogonjena fosilnim gorivima i s obzirom na utjecaj ispušnih plinova na atmosferu, razvila se jača svijest oko pojma zagađenja okoliša. Velike emisije CO₂ i ostalih štetnih plinova znatno doprinose onečišćenju okoliša i oštećenju ozonskog omotača. Kao alternativa izgaranju fosilnih goriva predstavlja se upotreba električne energije koja, ne samo da ima pozitivan utjecaj na okoliš, već je i financijski isplativija.

2.1. Povijest

Električna vozila zapravo su povijesno prethodila izumu motora s unutarnjim izgaranjem iako se smatraju novijom tehnologijom. Međutim, tek u posljednjih dva desetljeća vidi se izuzetan napredak na tom području te u učestalosti pojavljivanja električnih vozila na prometnicama u razvijenim zemljama. Njihova popularnost znatno se mijenjala kroz njihovu dugu povijest, a najviše je ovisila o dostupnosti energetske resursa, troškovima održavanja i o pitanjima koja se tiču okoliša.

Prvi električni automobili izrađeni su u 30-im godinama 19. stoljeća odmah po izumu električnog motora. Iako su u periodu koji je slijedio izrađena brojna vozila, nije bilo značajnog napretka i integracije u prijevoz [1]. Tek krajem 90-ih godina 19. stoljeća električna vozila prvi put dobivaju na važnosti kada postaju dio voznog parka osobnih vozila. U to vrijeme njihova upotreba izjednačila se s upotrebom vozila na fosilna goriva

i vozila pogonjena parnim strojem. Takav trend javlja se najviše u sjeveroistočnom dijelu SAD-a, najgušće naseljenom i razvijenom dijelu zemlje [2]. U tom razdoblju, električna vozila bila su ponajviše zastupljena u urbanim područjima, a predstavljana su kao prigodno sekundarno prijevozno sredstvo imućnih obitelji iz predgrađa. Iako su već tada smatrana superiornijom alternativom vozilima pogonjenim fosilnim gorivima, krajem 10-ih godina 20. stoljeća popularnost vozila s električnim pogonom ponovno pada, a glavni razlog bili su preveliki troškovi održavanja samih vozila i potrebne infrastrukture za prosječno kućanstvo srednje klase u odnosu na troškove vezane uz konvencionalna vozila [2]. Štoviše, izumom pokretne trake u proizvodnji koju je uveo Henry Ford, pokrenuta je masovna proizvodnja vozila pogonjenih fosilnim gorivima što im je dalo veliku prednost nad njihovim električnim rivalima. Također, u to vrijeme otkrivene su goleme zalihe nafte čime su konvencionalna vozila postala puno prihvatljivija cijenom i jednostavnija za upotrebu. Time je upotreba električnih vozila u potpunosti marginalizirana kroz dobru većinu 20. stoljeća.

Interes za elektrifikaciju prijevoznih sredstava ponovno se javlja 70-ih godina 20. stoljeća inspiriran velikom naftnom krizom kada se svijet suočio s iznimno promjenjivim cijenama naftnih derivata što je uzrokovalo društvenu nesigurnost u postojanost energetske resursa. Međutim, u to vrijeme, ograničena i skupa tehnologija izrade baterija utjecala je na još jedan neuspješan pokušaj plasmana električnih vozila na svjetsko tržište i moralo je proći još 30-ak godina do značajnijih promjena u kontekstu njihove široke primjene. Napokon, u ranim godinama 21. stoljeća vidi se znatan napredak po pitanju cijena proizvodnje, održavanja električnih vozila i infrastrukture potrebne za njihovu upotrebu. Razvoj tehnologije i procesa izrade litij-ionskih baterija te svijest o utjecaju štetnih plinova na okoliš otvorili su put masovnoj proizvodnji električnih vozila koja postaju sve dostupnija cjenovno pa se polako i po tome izjednačavaju s vozilima pogonjenim fosilnim gorivima. Danas se velike količine sredstava konstantno ulažu u razvoj i poboljšanja svakog aspekta električnih vozila s konačnim ciljem da u potpunosti zamjene vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem.

2.2. Tehničke karakteristike

Glavna razlika električnih vozila i vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem je u vrsti pogona i energije kojom se te vrste vozila služe. Kao što je već gore spomenuto, napredak u tehnologiji izrade litij-ionskih baterija uvelike je olakšao proizvodnju električnih vozila, a može se čak reći da je to ključni faktor prekretnice u njihovoj primjeni. Razlog zašto su te baterije tako bitne je što imaju daleko veći kapacitet koji se postiže većom gustoćom spremnika energije, značajno duži životni vijek i puno kraće vrijeme punjenja u usporedbi sa starim baterijskim tehnologijama. Trenutačna istraživanja usmjerena su na poboljšanja važnih karakteristika i zahtjeva koje baterije moraju zadovoljavati, a to su gustoća energije, cijena, brzina punjenja, snaga, životni vijek, performanse i sigurnost. Što se tiče sigurnosti, najvažnije je da je baterija stabilna tj. da je osigurana od samozapaljenja, eksplozije i rupture. Životni vijek baterije trebao bi biti od 15 godina pa na više kako bi se zahtjev smatrao zadovoljenim, a za brzinu punjenja se cilja na 80% kapaciteta unutar 15 minuta. Ovi parametri tj. njihove kvalitativne vrijednosti u međusobnom su sukobu ako govorimo o tome da se pokušava postići što optimalnija verzija baterije. Iz tog razloga trenutačno je izuzetno teško izraditi bateriju koja zadovoljava sve aspekte i važno je dobro upravljati kompromisima [3]. Najveća briga korisnika električnih vozila svakako je bila i ostala domet koji se s godinama povećava, a u 2024. godini su, za serijske automobile, najveći dometi dosegнули oko 600 kilometara [4]. Činjenica je da su baterije ključan faktor u postizanju većih dometa pa se trenutno istražuju druge vrste i tehnologije baterija kao što su litij-sumporne, litij-zrak i magnezij-ionske baterije. Međutim, te alternative imaju druge probleme koji se tiču sigurnosti pa još uvijek nisu spremne za integraciju u električna vozila [3].

2.3. Prednosti i mane

Iako su tehnologija i razvoj na planu električnih vozila do sada dogurali poprilično daleko, njihova najveća mana do danas ostaje kapacitet baterija i posljedično maksimalan doseg. Vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem imaju češće puno veći doseg s jednim punjenjem što znači da spremnik goriva koji zauzima manje prostora od baterije sadrži veću količinu energije u obliku fosilnih goriva. Ovdje je također bitno spomenuti i aspekt brzine punjenja gdje je vrijeme punjenja vozila pogonjenog bilo kojim fosilnim

gorivom daleko kraće u odnosu na vrijeme punjenja električnih vozila, a i punionice nisu bile toliko učestala pojava unazad par godina. Dakle, u tom slučaju vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem su daleko pogodnija i jednostavnija za korištenje.

S druge strane, kada govorimo o pogodnostima koje električna vozila pružaju onda je možda najvažnije spomenuti da su njihovi motori mnogostruko efikasniji u pretvaranju energije od bilo kojeg motora s unutarnjim izgaranjem [1]. Čak oko 80% električne energije sadržane u litij-ionskim baterijama pretvara se u kretanje [5] za razliku od korisnosti motora s unutarnjim izgaranjem koja varira između 16% i 25% [6]. Isto tako, što se tiče manjeg dosega električnih vozila, to postaje manje važno kada su brzine vožnje manje kao na primjer u urbanim sredinama. Pri takvim brzinama potrebno je puno više vremena da se baterija isprazni. Još jedna prednost električnih vozila je što su izuzetno tiha, a to doprinosi sveukupnom smanjenju buke u prometu. Također, kao što je već spomenuto, njihovom upotrebom značajno se smanjuje emisija štetnih plinova u atmosferu, primarno ugljikovog dioksida i ugljikovog monoksida. Prema izvješću Europske agencije za okoliš, cestovni promet bio je odgovoran za 71,7% emisija CO₂ uzrokovanih prometom, a sektor prometa bio je odgovoran za otprilike četvrtinu ukupnih emisija CO₂ u EU u 2019. godini [7]. Nastojanja Europske unije da se smanje emisije CO₂ i mjere koje se nameću vezane za proizvodnju u automobilskoj industriji polako potiču korisnike osobnih automobila na prelazak na električna vozila, a o tome govore podaci u kojima ona čine 17,8% svih novo registriranih osobnih vozila u 2021. godini [7]. Nadalje, gledano iz ekonomske perspektive, električna energija je daleko jeftinija od fosilnih goriva pa se smatra da je dugoročno bolje inicijalno uložiti nešto više sredstava i koristiti se pogodnošću niske cijene punjenja što u konačnici rezultira brзом isplativošću u odnosu na klasična vozila.

2.4. Prihvaćenost električnih vozila

Zbog sve rigoroznijih pravila i zahtjeva Europske unije, ali i onih na globalnoj razini, plan je da se u dogledno vrijeme u potpunosti ukine proizvodnja vozila pogonjenih fosilnim gorivima. Cilj je preraspodijeliti potrošnju energetske resursa prelaskom na obnovljive izvore energije u vidu očuvanja okoliša i povećanja energetske učinkovitosti do 2030. godine [8].

Posljednjih godina električna vozila postala su popularna tema u raspravama o kupnji novog automobila pa su zbog svojih značajki i pripadne tehnologije koja ima mnogo potencijala i sve češći izbor kupaca. Međutim, postoje određene prepreke koje mogu utjecati na njihovu opću prihvaćenost među potrošačima, a njihovo razmatranje pomaže u identifikaciji područja koje zahtijevaju poboljšanje i daljnje ulaganje. Prije svega jedan od takvih faktora je onaj ekonomske prirode, a odnosi se na cijenu i poticaje. Većina onih potrošača koji se ne odluče na električno vozilo prilikom kupovine potaknuto je upravo visokom početnom cijenom koja je, iako u značajnom padu posljednjih nekoliko godina, i dalje veća u odnosu na konvencionalna vozila. Za mnoge je to velika prepreka iako su dugoročni troškovi posjedovanja električnog vozila puno manji. Dakle, prvi korak prema povećanju prihvaćenosti je pružanje poticaja od strane države ili primjerice Europske unije. Takvi poticaji mogu uključivati subvencioniranje cijene vozila, poticaje za instalacije električnih kućnih punionica, smanjenje troškova punjenja i druge smislene pogodnosti kao što su besplatno parkiranje na određenim gradskim parkinzima ili privilegirani pristup gradskim prometnim površinama.

Što se tiče ekološke osviještenosti, glavni problem koji se javlja kod upotrebe električnih vozila je zbrinjavanje starih baterija. Očekuje se da će do 2030. godine iskorištene tj. neupotrebljive litij-ionske baterije prijeći brojku od 5 milijuna tona [9] što znači da je potrebno osigurati sredstva i odrediti mjere za odlaganje toksičnih materijala od kojih su baterije izražene. Istovremeno ti materijali su vrijedni i mogu ponovno biti od koristi ako se potakne njihovo recikliranje. Tako se stvara kružni ekonomski model kojim se smanjuje ukupni utjecaj baterija na okoliš i ovisnost o mineralnim rudama [9]. Nadalje, samim odabirom korištenja električnog vozila umjesto konvencionalnog potencijalno se smanjuje emisija ugljičnog dioksida za čak 50% [10]. Sukladno tome potrebno je provoditi obrazovne kampanje kojima će se proširiti znanje o takvim temama u svim generacijskim skupinama jer, iako su mladi skloniji prihvaćanju novih tehnologija i shvaćanju njihovog potencijala, isto se ne može reći za starije generacije koje često ostaju skeptične prema novinama. Prihvaćenost električnih vozila ovisi i o ponašanju i stavovima potrošača prema tehnologiji i mobilnosti. Neki ljudi naviknuti su na percepciju automobila kao statusnog simbola ili načina života, dok drugi na to gledaju kao prijevozno sredstvo te žele efikasnost i udobnost. Zbog toga nisu svi jednako voljni prihvatiti promjene koje zahtijevaju značajne prilagodbe i može se zaključiti da su društvene norme važan faktor

u sagledavanju čimbenika koji utječu na ovu problematiku. Tržište električnih vozila mora se razvijati u skladu s potrebama potrošača i skladno tome osigurati širok izbor modela i cjenovnih kategorija osiguravajući veću pristupačnost, a to je moguće uz odgovarajuće planiranje i ulaganje u daljnji razvoj tehnologija na kojima se električna vozila temelje.

2.5. Problematika elektrifikacije i optimizacija infrastrukture

Integracija električnih vozila u postojeću prometnu infrastrukturu predstavlja mnoge izazove, a ključne prepreke uključuju razvoj adekvatne infrastrukture za punjenje, optimizaciju korištenja energije te prilagodbu urbanih, suburbanih i ruralnih sredina. Važno pitanje koje se postavlja je kako osigurati dovoljan broj električnih punionica za sva električna vozila na nekom području na optimalan način i pripremiti tu infrastrukturu za daljnji razvoj sukladno potrebama rastuće brojnosti električnih vozila na prometnicama.

Broj punionica je u stalnom porastu, međutim njihova raspodjela i kapaciteti nisu na zadovoljavajućim razinama, barem što se tiče ruralnih i slabije naseljenih područja. Neka od idejnih rješenja uključuju implementaciju inteligentnih sustava za praćenje i upravljanje energetske resursima i optimizaciju vremena punjenja. Punionice s takvim sustavima potrebno je postaviti na ključnim prometnim čvorištima, autocestama i gradskim zonama. Neka od popularnih mjesta za njihove lokacije su parkirališta, shopping centri te okolica poslovnih objekata upravo zato što su to praktična mjesta na kojima se omogućava svakodnevno punjenje korisnicima takvih objekata. Nadalje, povećanjem stupnja elektrifikacije prometa stavlja se dodatno opterećenje na energetske mreže te ju je potrebno prilagoditi tako da je u stanju podnijeti povećani broj vozila koje zahtijevaju punjenje. Posljedica toga je i potreba za većim kapacitetima i boljim upravljanjem opterećenjima pa se tako dolazi do problema održivosti, ali i ekološke prihvatljivosti.

Kako bi se što efektivnije zadovoljili zahtjevi predstavljeni navedenim promjenama potrebno je razmisliti o integraciji obnovljivih izvora energije čijom se upotrebom značajno smanjuje ugljični otisak i povećava energetska neovisnost cijele infrastrukture. Sljedeći izazov kojeg je važno spomenuti je standardizacija opreme i tehnologije punje-

nja s obzirom na to da različiti proizvođači električnih vozila koriste različite standarde i priključke. Uvođenjem univerzalno određenih propisa za priključke i tehnologije punjenja te osiguranjem kompatibilnosti između vozila i punionica napravio bi se veliki korak ka jednostavnijem i sveukupno prihvaćenijem korištenju infrastrukture i samih električnih vozila. Ono što igra ključnu ulogu u takvoj cjelini je digitalizacija i njena primjena u optimizaciji korištenja infrastrukture. Razvoj mobilnih aplikacija i njihova integracija u postojeće aplikacije i sustave bitna je stavka u povećanju korisničkog zadovoljstva, pojednostavljenju procesa služenja cijelim sustavom i ubrzanju prihvaćanja električnih vozila na globalnoj razini.

3. Idejno rješenje i specifikacija okruženja

U ovom poglavlju predstavljeno je idejno rješenje po uzoru na koje je implementiran i sam model te su sagledani gradivni elementi infrastrukture i aspekti iz realnog svijeta koje je potrebno uzeti u obzir pri modeliranju složenih prometnih sustava.

3.1. Opis okruženja

Cjelokupni razmatrani sustav je poprilično velik i sastavljen je od mnogobrojnih složenih procesa. U teoriji, može biti modeliran s pomoću sva tri osnovna oblika modeliranja što podrazumijeva modeliranje temeljeno na agentima, simulaciju diskretnih događaja i modeliranje s pomoću dinamike sustava. Svaki od tih načina predstavlja svoju točku gledišta u odnosu na sustav i određuje svojstvene parametre koji se prate tijekom simulacije. Na temelju toga može se provesti analiza kretanja sustava i pripadajućih varijabli. Konkretno, za sustav opisan modelom važno je pratiti broj električnih punionica i benzinskih postaja te njihove lokacije. Isto vrijedi i za sama električna vozila i ona pogonjena fosilnim gorivima te je bitno pratiti kojeg su tipa ta vozila. Važan aspekt su glavna prometna čvorišta tj. njihova lokacija, kapacitet i prometni tok koji se na njima ostvaruje i na koji način su navedeni elementi povezani s dnevnim migracijama, vremenskim udaljenostima između polazišta i odredišta te ponašanjem i navikama vozača.

3.1.1. Brojnost i lokacije električnih punionica i benzinskih stanica

S obzirom na to da je broj električnih vozila na prometnicama u stalnom porastu, skladno tome raste i broj električnih punionica. Taj trend je posebno izražen u urbanim sredinama s visokim intenzitetom prometa poput glavnih gradova te u gradovima u kojima velik dio prihoda dolazi iz turizma i sektora uslužnih djelatnosti.

U ovom radu geografski fokus stavljen je na grad Zagreb, koji služi kao dobar primjer kompleksne i razvijene prometne mreže. Prema dostupnim podacima u gradu Zagrebu je izražen porast broja električnih punionica, međutim glavnu prepreku predstavlja kapacitet elektrodistribucijske mreže i potreba za punionicama je sve veća [11]. Česte lokacije punionica su u blizini javnih parkinga, trgovačkih centara, poslovnih zona, javnih garaža i drugih prometnih čvorišta čime se pokušava postići optimalna distribucija i dostupnost za vozače. S druge strane, benzinske postaje smještene su češće na ulazima i izlazima iz grada, glavnim prometnim koridorima i u blizini gusto naseljenih četvrti.

Iako je grad Zagreb ovdje uzet kao primjer, idejno rješenje, ali i ono praktično, zanemaruje postojeće punionice i stanice te u potpunosti stvara njihovu novu raspodjelu. Cilj ovakvog pristupa rješenju problema je pokušaj modeliranja situacije u kojoj se infrastruktura gradi iz temelja. Na taj način omogućava se analiza potencijalnog ponašanja sustava u idealnim uvjetima i identifikacija ključnih faktora koji utječu na funkcionalnost mreže.

Omjer navedenih objekata značajno utječe na prometni tok na čvorištima, dostupnost resursa te ponašanje vozača. U slučaju loše raspodjele ili nedovoljnog broja samih objekata lakše dolazi do prometnih zastoja i gužvi. Nadalje, pravilna distribucija osigurava vozačima brz i jednostavan pristup potrebnoj infrastrukturi istovremeno smanjujući stres i povećavajući zadovoljstvo kod vozača. Također, obrasci ponašanja vozača postaju više predvidljivi s optimalnim planiranjem lokacija što u konačnici uvelike olakšava upravljanje sustavom i povećava njegovu pouzdanost.

3.1.2. Tipovi vozila i njihova distribucija

Tipova vozila na prometnicama ima mnogo, ali najjednostavnije je podijeliti ih u kategorije te imati to na umu pri određivanju njihovih parametara i zahtjeva. Kako bi se lakše napravila podjela, sva električna vozila svrstana su u jednu kategoriju, a ostala vozila spadaju u kategoriju pogona na fosilna goriva. Unutar svake kategorije postoji nekoliko potkategorija koje obuhvaćaju različite vrste vozila prema njihovoj namjeni, veličini i funkciji.

Električna vozila uključuju osobne automobile, skutere, romobile, bicikle, dostavne kombije i autobuse. Posebno su popularna u urbanim sredinama gdje se stavlja naglasak na smanjenje emisija štetnih plinova i efikasniju mobilnost. Rastući trend prisutan u

većini gradova u kojima se nudi usluga raznih platformi za naručivanje hrane, kao što su Glovo i Wolt, je preferenca električnih skutera i sličnih električnih vozila za dostavu u odnosu na konvencionalna vozila. Razlog tome je upravo ekonomičnost i jednostavnost kretanja u gradskim zonama pa takvu praksu počinju koristiti sve više i ostale lokalne dostavne službe i distribucijski centri.

Vozila pogonjena fosilnim gorivima s druge strane uključuju osobne automobile, motocikle, kombi vozila i male kamione, autobuse te velike kamione i teretna vozila. Iako većina vozila na prometnicama i dalje koristi fosilna goriva, brojnost vozila ove kategorije posebno dominira u suburbanim područjima s lošije razvijenom infrastrukturom za električna vozila. Također, kada je riječ o teretnim vozilima i velikim kamionima, oni najčešće moraju prelaziti velike udaljenosti u kratkim periodima, a s obzirom na teret koji prevoze moraju imati i mnogo pogonske snage i spremničkog kapaciteta te je očekivano da je u toj kategoriji vozila i dalje dominantan dizelski pogon.

3.1.3. Vremenski aspekti i ponašanja vozača

Ponašanje vozača u prometu odnosi se na niz obrazaca koji su uglavnom slični kod većine ljudi, ali opet dovoljno različiti da unesu element nepredvidivosti u funkcioniranje sustava. Konkretno, najveći broj ljudi putuje na posao između sedam i devet sati ujutro te se vraća kući između tri i pet sati popodne. Iako uvijek ima drugih vozila u prometu, a pogotovo kada se radi o javnom prijevozu, navedena razdoblja u danu su definitivno obilježena značajnim porastom prometnog toka i zagušenjem prometnih čvorišta.

Osim navedenih glavnih dnevnih migracija, one također uključuju povremena putovanja vozilom zbog određenih obveza poput odlaska u trgovinu, posjeta ili rekreativnih aktivnosti obično u večernjim satima pa je to još jedna stavka koja se uzima u obzir. U prosjeku, ljudi u Hrvatskoj provedu gotovo sat vremena u vozilu na dnevnoj razini pritom prelazeći 26 kilometara [12]. Te brojke mogu značajno varirati u slučaju većih gradova poput Zagreba gdje samo putovanje od mjesta stanovanja do radnog mjesta u jednom smjeru ponekad traje i više od sat vremena. Takva statistika jasno ukazuje na potrebu optimizacije infrastrukture zbog smanjenja zastoja i povećanja učinkovitosti sustava.

Što se tiče navika vezanih uz nadopunu spremnika goriva ili punjenje baterija električnih vozila, ljudi imaju različite obrasce ponašanja pa je kao referenta točka uzet prag

od četvrtine spremnika. Nadalje, većina ljudi toči gorivo u popodnevnim ili večernjim satima ako je riječ o radnom danu, dok ljudi koji posjeduju električno vozilo pune baterije za vrijeme posla u slučaju kada se u blizini njihovog radnog mjesta nalazi električna punionica, a u protivnom moraju češće i pomnije planirati vrijeme i mjesto punjenja baterija.

Kako popularnost električnih vozila raste, tako i velike tvrtke prepoznaju važnost nuđenja usluge električnih punionica za svoje zaposlenike na pripadajućim parkinzima. Ovakav pristup korisnicima električnih vozila uvelike olakšava cijeli proces koji se tiče punjenja baterija, a istovremeno i potiče održivu mobilnost među zaposlenicima.

3.1.4. Važna prometna čvorišta

Ključan dio svake prometne infrastrukture su velika prometna čvorišta. Ona na neki način određuju smjer kretanja sustava, a sama su određena mrežnom topologijom infrastrukture. Predstavljaju ključne točke u prometnoj mreži gdje se preklapaju različiti oblici prometa, poput cestovnog, željezničkog ili javnog prijevoza. Zbog toga imaju kritičnu ulogu u procesima optimizacije protočnosti prometa i integracije električnih vozila u promet.

Najčešća čvorišta pojavljuju se u obliku gradskih zona s visokom gustoćom prometa, prigradskih parkirališta te odmorišta na autocestama i glavnim prometnicama s dostupnim punionicama i benzinskim postajama. Njihova važnost određena je brojem povezanih ruta, učestalošću korištenja i kapacitetom upravljanja prometom. Dakle, glavni parametri koji se prate su intenzitet prometa, kapacitet, lokacija, dostupnost infrastrukture i povezanost.

U urbanim područjima, prometna čvorišta često uključuju integraciju s javnim prijevozom kao što su autobusi, tramvaji i metro. U takvom kontekstu, distribucija benzinskih stanica i električnih punionica mora uzeti u obzir visoku frekvenciju vozila u prometu, smanjene površine slobodnog prostora te potrebu za bržim uslugama zbog minimizacije utjecaja na prometni tok. Kada je riječ o suburbanim područjima, takva čvorišta obično se nalaze na glavnim prilazima gradova ili regionalnim prometnim koridorima. Tu je važno osigurati kontinuitet vozačima koji dolaze iz udaljenijih dijelova regije glavnim prometnim rutama i ne zalaze u grad.

S druge strane, čvorišta na autocestama imaju prvenstveno ulogu odmorišta i mjesta gdje vozači mogu nadotočiti gorivo ili napuniti bateriju električnog vozila. Posebno je važno razmotriti aspekt kapaciteta takvih lokacija zbog izbjegavanja gužvi, a pogotovo u vrijeme turističke sezone kada je frekvencija prometa na autocestama višestruko veća. U takvoj situaciji moguće je osigurati fleksibilnost korisnicima kombinacijom brzih punionica za električna vozila te većim kapacitetom benzinskih postaja i parkinga na odmorištu.

3.2. Fokus idejnog rješenja

U samom fokusu rješenja je kako optimizirati cjelokupnu infrastrukturu i pripremiti unificirani proces koji se može primijeniti u raznim situacijama i uz to osigurati održivost sustava te smanjiti negativan utjecaj na okoliš. U nastavku su objašnjene pojedinosti o navedenim ciljevima i na koji način ih se može postići.

3.2.1. Optimizacija infrastrukture

Ključna točka u razvoju idejnog rješenja je upravo optimizacija prometne infrastrukture. Cilj je stvaranje funkcionalnog sustava koji je energetski učinkovit i ekološki održiv uz potrebne prilagodbe za urbana i suburbana područja.

Prvi korak prema ostvarenju cilja je provođenje detaljne geografske i demografske analize i strateškog planiranja lokacija. Strateške lokacije benzinskih postaja i punionica mogu se odrediti na temelju intenziteta prometa, demografskih čimbenika i blizine trgovačkih zona i turističkih atrakcija. Za određivanje točnih lokacija mogu se koristiti geografski informacijski sustavi (GIS) u kojima je moguće precizno mapirati navedene podatke i generirati planove distribucije objekata.

Kako bi se maksimalno iskoristile dostupne površine, jedan od prijedloga je integracija benzinskih postaja i električnih punionica u zajedničke hibridne objekte. Osim što se bolje iskorištava prostor, tako se i dodatno smanjuju troškovi infrastrukture. Takvi hibridni objekti trebali bi sadržavati brze punionice za električna vozila s kapacitetom dovoljnim za istovremeno punjenje većeg broja vozila, osiguran veći broj parkirnih mjesta te trgovine, s malim restoranima i sanitarnim čvorovima zbog poticanja dodatnih pri-

hoda i povećanja zadovoljstva korisnika koji na taj način imaju gdje provesti vrijeme dok se njihovo vozilo puni.

Što se tiče dizajna objekata, ideja je da se implementira modularna struktura koja bi omogućila jednostavno dodavanje novih punionica ili micanje postojećih po potrebi. Na taj način postiže se ekonomska održivost i smanjuje kompleksnost izvođenja radova. O svemu tome potrebno je educirati korisnike, provesti kampanje i izraditi digitalne informativne sadržaje zbog povećanja svjesnosti vozača o dostupnosti usluga i poticanja na korištenje novih rješenja.

3.2.2. Održivost i utjecaj na okoliš

U kontekstu prometne infrastrukture i distribucije objekata u njoj, održivost rješenja odnosi se na smanjenje emisija štetnih plinova, učinkovito korištenje energije i resursa uz korištenje zelenih tehnologija. S obzirom na to da je promet jedan od ključnih uzročnika stakleničkih plinova s udjelom od 25% u ukupnim emisijama na razini Europe u 2021. godini [7], prijelaz na obnovljive izvore energije donosi velike promjene u kontekstu očuvanja okoliša i atmosfere.

Prijelaz na obnovljive izvore energije podrazumijeva promjene u implementaciji i konstrukciji električnih punionica pa se kao jedna od ideja predstavlja postavljanje solarnih panela na same punionice. Osim što se na taj način omogućuje izravno korištenje čiste energije, smanjuje se i opterećenje energetske mreže te potiče učinkovito korištenje resursa. Slično se mogu koristiti i drugi oblici obnovljivih izvora energije pa u taj kontekst spadaju i vjetroelektrane, farme solarnih panela te hidroelektrane. Ovdje je važno napomenuti da planiranje lokacija objekata treba uzeti u obzir očuvanje prirodnih staništa i resursa.

3.2.3. Digitalizacija

Primjena digitalnih pogodnosti u današnje vrijeme jedan je od važnijih aspekata integracije električnih punionica i električnih vozila u prometnu infrastrukturu. Predstavlja ključan korak k modernizaciji prometne infrastrukture i načina njenog korištenja.

Povezivanje punionica s energetske sustavom može se implementirati s pomoću pa-

metnih mreža. Smart grids ili inteligentne mreže za distribuciju električne energije su mreže koje integriraju nove tehnologije kako bi poboljšale praćenje i kontrolu električnih sustava, a specifično u proizvodnji električne energije i njenoj distribuciji [13]. Navedena tehnologija pomaže u balansiranju opterećenja mreže, a posebno tijekom vršnih sati potrošnje. Još jedna tehnološka inovacija čija implementacija može poboljšati performanse mreže je dvosmjerno punjenje tj. vehicle-to-grid punjenje. Ovaj koncept temelji se na ideji baterije električnog vozila kao generatora ili spremnika energije u određenim periodima kada je to potrebno za funkcioniranje sustava i ekonomičnije održavanje njegovih funkcionalnosti [14]. Drugim riječima, vozila priključena na mrežu mogu vraćati višak energije natrag u mrežu kao podršku ostatku sustava na mjestima gdje je to potrebno što čini cijeli sustav daleko fleksibilnijim.

Navedene tehnologije moraju imati svoju infrastrukturnu podlogu koja podržava sve prethodno navedeno i tu je važno spomenuti Internet stvari ili kraće, IoT. To je koncept koji omogućuje povezivanje uređaja s ciljem prikupljanja podataka i njihove analize. Pod fizički dio spadaju razni senzori koji prate stanja opreme tj. statuse punionica u stvarnom vremenu, prikupljaju podatke o intenzitetu prometa i obrascima korištenja različitih elemenata infrastrukture te u suradnji s agentima i aktuatorima mogu biti dio procesa koji rade na uštedi energije kao što je automatizacija rasvjete ili ventilacije.

Sljedeći važan aspekt rješenja u kontekstu digitalizacije prometne infrastrukture je razvoj mobilnih aplikacija i digitalnih platformi za korisnike. Takve usluge omogućavaju vozačima lakši pristup informacijama i uslugama što može uključivati rezervaciju punionica, praćenje dostupnosti i digitalno plaćanje. Nadalje, integracijom umjetne inteligencije i njenom primjenom u digitalnoj analitici omogućava se dubinska obrada podataka na temelju čega se mogu predvidjeti buduće potrebe za punionicama i postajama te implementirati procesi dinamičkog upravljanja cijenama. Posljedično, cijene resursa se prilagođavaju u stvarnom vremenu te na taj način direktno utječu na ponudu i potražnju objekata i usluga.

Jedan od problema koji se javlja u kontekstu primjene navedenih rješenja je sigurnost i zaštita podataka. S obzirom na to da su IoT sustavi iznimno dinamični, konstantno se mijenjaju zbog mobilnosti i ne postoje jasno definirane restrikcije u smislu zaštite uređaja, teško je zajamčiti kibernetičku sigurnost. Štoviše, takvi sustavi su poprilično

heterogeni u pogledu korištenja mnogih komunikacijskih kanala i medija, protokola, platformi i uređaja, a uz to je prisutan i manjak standardizacije svega navedenoga [15]. Prijedlog rješenja ove problematike leži u potrebi standardizacije svih elemenata infrastrukture počevši od digitalnih platformi i protokola pa sve do krajnjih uređaja.

4. Implementacija modela i simulacije

U ovom poglavlju opisani su gradivni elementi modela i simulacija, objašnjen je tijek rada na samom projektu, kako reproducirati simulacije te predstavljeni izazovi i njihova rješenja. Za potrebe shvaćanja osnovnih pojmova, opisani su i višeagentski sustavi te programski alat u kojem je model izrađen.

4.1. Višeagentski sustavi

Višeagentski sustavi temelje se na međusobnoj interakciji programskih agenata i njihovoj suradnji u svrhu postizanja nekog zajedničkog cilja ili stanja sustava. Gradivni elementi takvih sustava su dakle programski agenti koji imaju svoja svojstva, parametre i jedinstvene funkcionalnosti.

4.1.1. Programski agenti i njihova svojstva

Programski agent može se shvatiti kao dio programskog koda koji ima određenu interakciju s okolinom. Najčešće služe upravo kao posrednici između korisnika i okoline te u korisnikovo ime obavljaju zadane zadatke u dinamičnom i kompleksnom okruženju. Često se radi o skupini agenata koji međusobnom suradnjom pokušavaju zadržati već postojeće stanje sustava ili postići neki zajednički cilj postavljen od strane korisnika.

Programski agenti mogu samostalno donositi odluke i prilagođavati svoje ponašanje u skladu s promjenama u okolini. Kako bi mogli funkcionirati zajedno, moraju imati sposobnost komunikacije s ostalim agentima u sustavu. Postoje određeni procesi koji opisuju na koje načine sve agenti mogu biti u interakciji i koje taktike pregovaranja koriste kako bi postigli dogovor među sobom. Većina ih posjeduje i sposobnost reaktivnosti koje podrazumijeva da agent prima informacije iz okoline i reagira na njih sukladno že-

ljenom cilju. Ako agent posjeduje sposobnost učenja, onda se smatra inteligentnim programskim agentom. Takvi agenti prate promjene u stanju okoline, stvaraju bazu znanja temeljenu na tome i uče iz iskustva što u konačnici rezultira efikasnijim donošenjem odluka i boljim procjenama daljnjih akcija. Dakle, može se reći da prema kompleksnosti, programski agenti variraju od jednostavnih reaktivnih koji samo reagiraju na informacije iz okoline do složenijih kognitivnih koji koriste napredne algoritme umjetne inteligencije za donošenje odluka.

4.1.2. Primjena višeagentskih sustava

Iako na prvu možda apstraktan pojam, programski agenti i višeagentski sustavi imaju široku primjenu kada je riječ o optimizaciji procesa ili upravljanju resursima, a svoje mjesto pronalaze u domeni pametnih domova, medicine, zaštite od požara, poljoprivredi, pomorstvu i još mnogim drugim. Često se integriraju u svakodnevne uređaje gdje u interakciji s drugim entitetima sustava upravljaju radom tih uređaja. Jedan jednostavan primjer koji spada u taj kontekst bio bi programski agent koji djeluje na integriranoj pločici u suradnji sa sensorima i aktuatorima na primjeru regulacije funkcionalnosti klima uređaja. Dakle, senzori prikupljaju podatke o temperaturi, vlažnosti i tlaku zraka i prosljeđuju te podatke programskom agentu koji ih onda procesira i uspoređuje s postavljenim parametrima. Na temelju analize donosi odluku i šalje signal aktuatoru s akcijom koju je potrebno izvršiti. Konkretno, možemo pretpostaviti da je ljetno vrijeme i da su temperature relativno visoke te je korisnik postavio željenu temperaturu i vlažnost zraka u prostoriji. U tom slučaju, senzori prate te parametre u određenim vremenskim razmacima, a programski agent uspoređuje zadano i trenutačno stanje i ako je temperatura u prostoriji previsoka, signalizira aktuatoru da treba smanjiti temperaturu.

Čestu primjenu programski agenti pronalaze u području distribuiranog upravljanja, primjerice u industrijskim postrojenjima ili pametnim gradovima. Stvarni primjeri takve primjene mogu se vidjeti u energetski učinkovitim zgradama gdje agenti koordiniraju sustav grijanja, ventilacije i rasvjete kako bi optimizirali potrošnju energije. Slično tome, koriste se i u logistici gdje pojednostavljaju organizaciju složenih isporuka robe, upravljanje zalihama i rutama isporuke. Još jedan primjer primjene višeagentskih sustava je u prometnim sustavima gdje agenti mogu upravljati tzv. pametnim semaforima koji optimiziraju protok vozila u realnom vremenu. Konkretnije, senzori na raskrižjima detekti-

raju prisutnost vozila i predaju te informacije agentima koji onda komuniciraju s ostalim agentima i koordiniraju svjetla na semaforima radi bržeg protoka vozila na raskrižju.

Relevantnost primjene višeagentskih sustava za ovaj rad veže se uz činjenicu da su pogodni za simulacije kompleksnih sustava. S obzirom da se ponašanje svakog agenta može pojedinačno modelirati zajedno s njegovim parametrima, moguće je stvoriti simulacijske modele koji na vjeran način mogu prikazati razne scenarije pritom pomažući u shvaćanju kritičnih točaka sustava i njegova kretanja kroz vrijeme. Korištenjem višeagentskih sustava omogućava se fleksibilnost i skalabilnost što znači da se novi agenti mogu jednostavno dodavati u postojeći sustav bez značajnog remećenja njegove strukture. Najveća prednost njihove primjene u simulacijama je što se sve komponente sustava mogu simulirati i što u stvari nema potrebe za njihovom fizičkom implementacijom kako bi se mogli testirati kompleksni procesi što je jako često i vremenski i financijski skupo, a ponekad neizvedivo. Primjerice simulacije prirodnih katastrofa i analiza kretanja ljudi u takvoj situaciji te identifikacija ključnih točaka infrastrukture koje utječu na ishod samog događaja. Upravo zbog takvih razloga su potrebne simulacije, a višeagentski sustavi se pokazuju kao iznimno dobra platforma za modeliranje istih.

4.2. AnyLogic softver

AnyLogic jedan je od vodećih softvera za simulacije i koristi se danas širom svijeta u akademskim i poslovnim okruženjima. Besplatan je za pojedince koji ga koriste u svrhe učenja ili poučavanja ili u vlastite svrhe, a za komercijalnu i znanstvenu upotrebu potrebna je neka vrsta licence koja ovisi o potrebama korisnika. Iznimno je učinkovit alat koji se koristi za opisivanje složenih procesa, a takvi procesi i infrastruktura koja je potrebna za njihovu realizaciju mogu biti jako skupi pa je od samog početka poprilično važno napraviti detaljnu analizu cijelog sustava. U tome su od velike pomoći simulacije koje daju uvid u ponašanje i kretanje sustava.

AnyLogic omogućuje kombiniranje svih osnovnih pristupa simulacijskim metodama što uključuje simulacije diskretnih događaja, višeagentskih sustava i dinamičkih sustava. Takvo svojstvo omogućuje dizajniranje složenih procesa u brojnim područjima poput logistike, prometa, zdravstva, financija i poslovnog planiranja, ekologije, masovne proizvodnje i urbanog razvoja. Osim kombinacije različitih paradigmi u kontekstu simula-

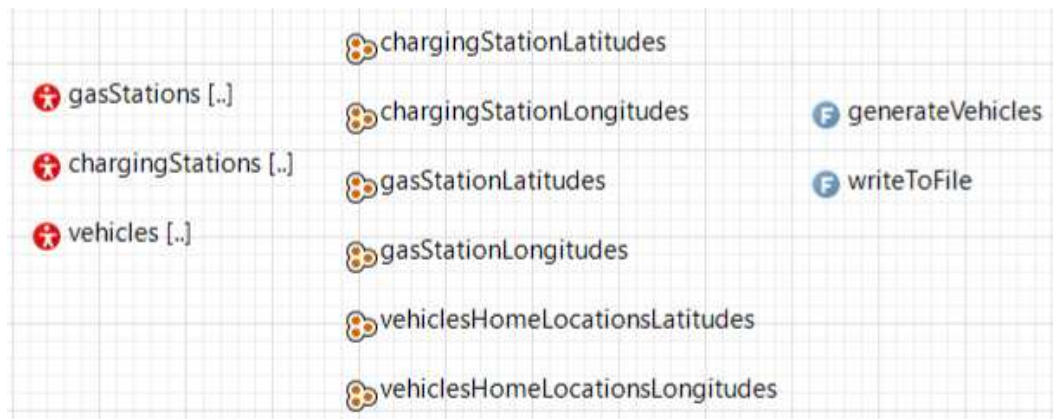
cijskih metoda, AnyLogic nudi brojne mogućnosti vizualizacije, uključujući 2D i 3D prikaze, omogućuje integraciju s vanjskim bazama podataka, sustavima upravljanja, drugim aplikacijama i drugim softverima za simulacije te podržava prilagođene programske metode specifično izrađene za opisivanje višeagentskih modela.

Korisničko sučelje za razvoj modela jako je slično onome koje se nalazi u Eclipseu, integriranom razvojnom okruženju namijenjenom razvoju aplikacija u programskom jeziku Java, pa je nekome tko se već susreo s time prije, korištenje AnyLogic softvera poprilično intuitivno. Iako je modele moguće realizirati i bez poznavanja Jave i znanja u programiranju, za neke složenije implementacije poznavanje dobrih praksi programiranja, samog koda i sintakse je poželjno ako ne i obavezno. Iz tog razloga korisnici bez iskustva u programiranju mogu naići na teškoće tijekom razvijanja modela.

Osim predznanja, softver AnyLogic zahtjevan je i po pitanju korištenja računalnih resursa, a pogotovo kada je riječ o složenijim modelima koji sadrže mnoštvo agenata i simuliraju njihove međusobne interakcije. Zbog toga je jako važno konstantno raditi na optimizaciji procesa, obratiti pažnju na način odvijanja internih procesa u AnyLogicu i paziti na fizička ograničenja hardvera na kojem se simulacije odvijaju. Ponekad to može biti poprilično zahtjevno, ali je pogodno za korisnika jer mu se tada pruža dodatna mogućnost učenja i rješavanja realnih izazova koji su stavljeni pred njega.

Glavni elementi u AnyLogic modelima uglavnom su agenti. Oni mogu predstavljati bilo kakve entitete koji imaju interakciju s okolinom ili drugim agentima tj. mogu biti osobe, vozila, punionice, benzinske postaje, proizvodna postrojenja, elektrane i slično. Svaki od tih agenata ima svojstvene parametre koji ga određuju te ponašanje koje može biti definirano funkcijama, varijablama, automatima stanja i raznim procesima. Općenito, automati stanja su odličan izbor za modeliranje ponašanja agenata jer je njima moguće modelirati bilo kakav realan proces ili diskretne događaje. Agenti se dodaju u glavni agent nazvan *Main*, a mogu se dodati kao pojedinačni agent, populacija agenata ili samo kao tip agenta.

U kontekstu prometnih sustava, softver nudi mnoštvo funkcionalnosti sadržanih u biblioteci *Road Traffic Library* za izradu cijele prometne mreže i definiranje prometnog toka što se odnosi na ponašanje agenata vozila na prometnicama i raskrižjima. Na ovaj



Slika 4.1. Populacije, liste i funkcije u agentu *Main*

način može se izraditi iznimno detaljna simulacija prometa. Osim navedene biblioteke, postoji i drugi način za izvedbu sličnog scenarija, a to je pomoću GIS mape. To je prilično koristan element unutar kategorije prostornih oznaka kojim se omogućuju kretanje agenata po realnoj mapi odabranog područja na karti svijeta po definiranim rutama dobivenih od strane odabranog servera. U ovom slučaju ne postoji ugrađena mogućnost definiranja ponašanja agenata na raskrižjima i prometnicama, već se oni samo kreću po ucrtanim cestama.

4.3. Opis modela

Ovo potpoglavlje opisuje sve elemente praktičnog dijela rada koji su potrebni za izgradnju predloženog modela, tijek rada i probleme koji su se pojavili tijekom samog procesa modeliranja.

4.3.1. Agent *Main* i GIS mapa

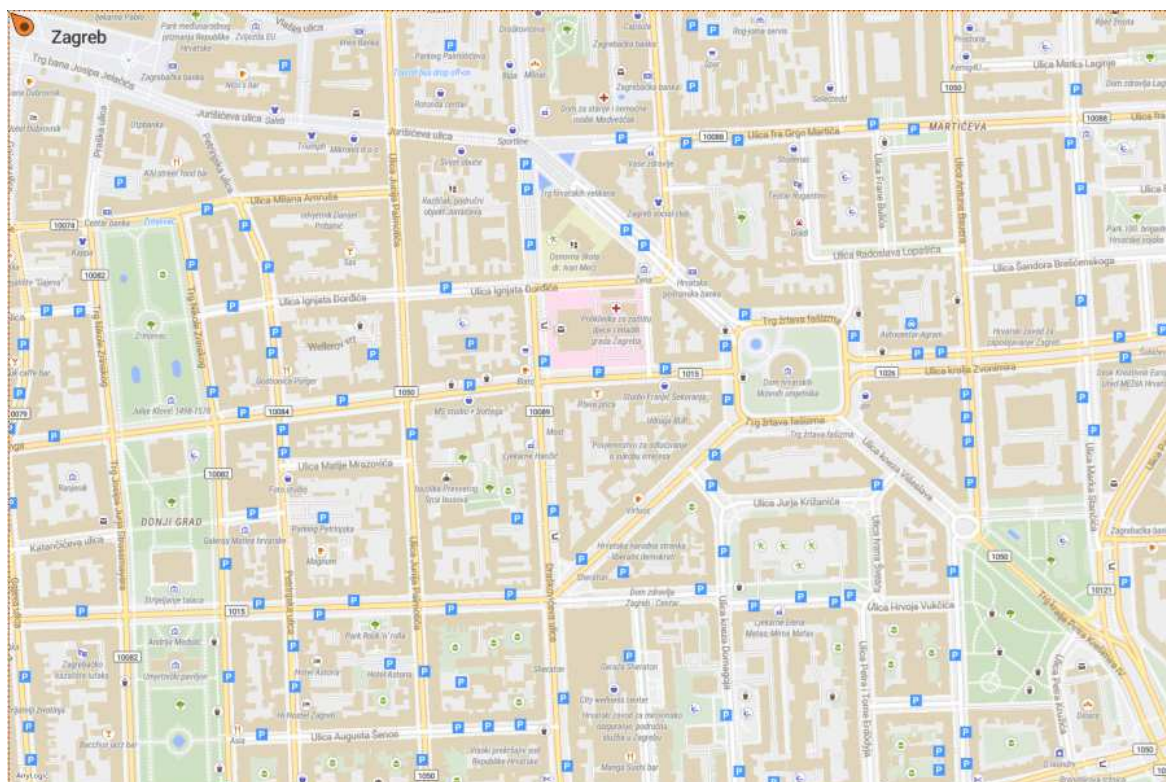
Svi agenti koji se nalaze u modelu moraju se pozicionirati u agenta *Main*. Može postojati situacija da se jedan agent nalazi u drugom, ali korijenski čvor u hijerarhiji agenata je uvijek *Main* te se u njemu inicijalizira sve što je globalno potrebno u cijelom modelu. Konkretno u praktičnom dijelu ovog rada, u agentu *Main* inicijaliziraju se populacije vozila, benzinskih stanica i električnih punionica s određenim parametrima 4.1. te GIS mapa na kojoj su agenti smješteni.

Pri inicijalizaciji modela u simulaciji stvaraju se populacije benzinskih stanica i električnih punionica pomoću ugrađenih funkcionalnosti AnyLogica, a populacija vozila

kreira se pomoću funkcije *generateVehicles()* i u toj funkciji postavljaju se neki početni parametri što je objašnjeno u dijelu o agentima vozila. Trajne lokacije benzinskih stanica i električnih stanica te početne lokacije vozila dobivaju se iz lista *gasStationLatitudes*, *gasStationLongitudes*, *chargingStationLatitudes*, *chargingStationLongitudes* odnosno *vehiclesHomeLocationLatitudes* i *vehiclesHomeLocationLongitudes*. Ove liste predstavljaju geografske širine i dužine koje su određene granicama vidljivog početnog prozora s mapom modela, a vrijednosti u njima dobivaju se iz uvezenih datoteka s pomoću ugrađenih funkcija AnyLogica za baze podataka. Više o uvezenim datotekama opisano je u dijelu koji se tiče skripti za generiranje podataka. Na kraju simulacije poziva se funkcija *writeToFile()* i ta funkcija je zadužena za prikupljanje podataka iz simulacije potrebnih za analizu modela i zapisivanje tih podataka u datoteke.

Kao što je već gore spomenuto, jedan od načina izvedbe prometnog sustava je s pomoću GIS mape, element u AnyLogicu na kojem se temelji cjelokupna modelirana infrastruktura. Navedeni element može se vidjeti prikazan na slici 4.2. Vidljivo je da su ucrtane glavne ceste, ali i manje ulice te lokacije parkirališta i nekih značajnijih objekata. Ovaj gradivni element modela omogućava osnovne funkcije agenata u kontekstu njihovog kretanja u prostoru po već ucrtanim trasama dobivenih iz stvarnih prometnih karata.

Mapa se može dohvatiti iz raznih izvora od kojih je početno postavljen AnyLogic, a drugi ponuđeni su *OSM classic*, *OSM german* i *OSM Humanitarian*. U postavkama mape postoji i nekoliko načina izgradnje ruta između dviju točaka od kojih je početno postavljen onaj gdje se rute dohvaćaju s OSM servera. Ovaj pristup je u redu u slučaju kad se u modelu ne kreira jako velik broj agenata koji se moraju kretati nasumično, ali više o tome u potpoglavlju o problemima tijekom razvoja. Drugi pristup je da se rute iscrtavaju jednostavno kao ravne linije od polazišta do odredišta i treći, onaj odabrani u ovom radu, je preuzimanje ruta iz postojeće mape u kojoj su sadržane datoteke s upisanim svim potrebnim podacima za izgradnju grafa usmjeravanja. Graf usmjeravanja preuzet je s [16] stranice koja je bila preporučena u jednoj od službenih lekcija na web stranicama AnyLogica kao dobar izvor za preuzimanje datoteka za integraciju s tipovima objekata kao što je GIS mapa.



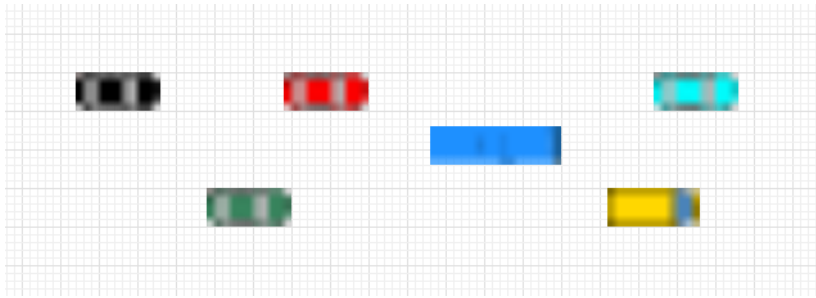
Slika 4.2. GIS mapa

4.3.2. Agenti vozila

Agenti koji predstavljaju vozila su jedina populacija agenata koji se kreću po mapi. U nastavku je dan pregled parametara koji opisuju ovog agenta i vrijednosti koje mogu poprimiti.

Osnovni parametar u opisu vozila je *vehicleType* koji može poprimiti vrijednosti *CLASSIC*, *ELECTRIC*, *LORRY* i *BUS*. Pri određivanju broja pojedinog tipa vozila u modelu u obzir je uzeto stvarno stanje omjera vozila po kategorijama u gradu Zagrebu 2022. godine [17] s time da je broj električnih vozila u modelu uvećan zbog prirode testiranja kroz simulacije. Što se tiče konkretnog omjera tipova vozila, u modelu je prikazano otprilike 51% vozila tipa *CLASSIC*, 14% tipa *ELECTRIC*, 26% tipa *LORRY* i 9% tipa *BUS*.

Prikaz agenta vozila ovisi o parametru *vehicleType*, a sve varijante vozila vidljive su na slici 4.3. Crvenom, crnom i zelenom bojom prikazana su vozila tipa *CLASSIC*, tip *LORRY* je obojen žutom bojom, tip *BUS* je zamjetno veći od drugih i obojen je tamno plavom bojom, a električna vozila tipa *ELECTRIC* su prikazana svjetlo plavom tj. tirkiznom bojom.

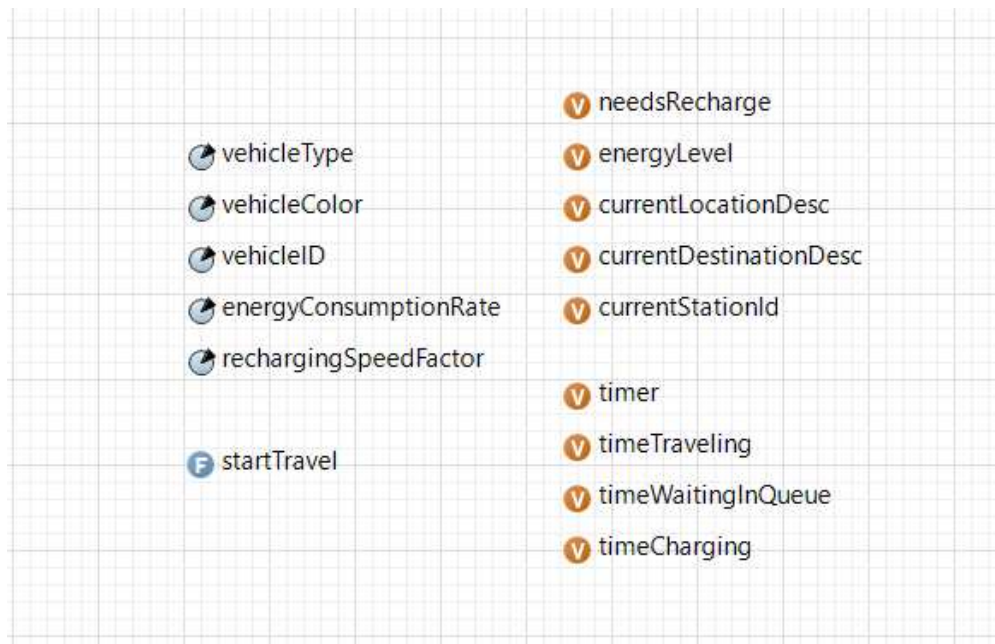


Slika 4.3. Varijante prikaza vozila

Parametri i varijable agenta vozila vidljivi su na slici 4.4. Svaki agent vozila ima jedinstveni identifikator predstavljen parametrom *vehicleID* koji se dodjeljuje prilikom inicijalizacije, a poprima vrijednosti po rednim brojevima unutar populacije vozila. Parametri *energyConsumptionRate* i *rechargingSpeedFactor* postavljaju se također pri inicijalizaciji, a ovise o tipu vozila. Prvi parametar služi za manipulaciju brzine pražnjenja spremnika ili baterije vozila, a drugi služi za određivanje brzine tj. trajanja punjenja vozila na benzinskoj stanici ili električnoj punionici.

Varijabla *energyLevel* služi za praćenje razine goriva ili baterije, a ovisi o parametru *energyConsumptionRate*. O toj varijabli ovisi u kojem trenutku će agent vozila odlučiti otići nadopuniti spremnik goriva odnosno bateriju. Sljedeće dvije varijable *currentLocationDesc* i *currentDestinationDesc* služe za određivanje trenutne pozicije vozila tj. njegovog polazišta i planiranog odredišta. Također, koriste se u funkciji *startTravel()* koja je osnovni dio mobilnosti vozila i ustvari započinje njihovo kretanje. Sva kretanja u modelu implementirana su pomoću dvije ugrađene funkcije, *moveTo()* koja kao parametre prima vrijednosti geografske širine i dužine tipa *double* i druge funkcije *moveToNearestAgent()* koja kao parametar prima populaciju agenata, odabire agenta koji je najbliži agentu u kojem se poziva funkcija te započinje kretanje prema odabranom agentu. Varijabla *currentStationId* služi za praćenje trenutne pozicije vozila kada stigne do nekog od agenata benzinskih stanica ili električnih punionica tako da čuva njihov identifikacijski broj.

Sljedeće opisane varijable važne su za dobivanje krajnjih podataka tj. rezultata simulacije. Varijabla *timeTraveling* odnosi se na ukupno vrijeme koje je agent vozila proveo putujući, *timeWaitingInQueue* sadrži količinu vremena koje je vozilo provelo čekajući u redu čekanja na benzinskoj stanici ili električnoj punionici, a *timeCharging* sadrži količinu vremena koje je vozilo provelo na benzinskoj stanici ili električnoj punionici koris-



Slika 4.4. Parametri i varijable vozila

teći usluge punjenja drugim riječima, u stanju *Charging*. Varijabla *timer* koristi se kao privremena varijabla za izračunavanje prethodno navedenih.

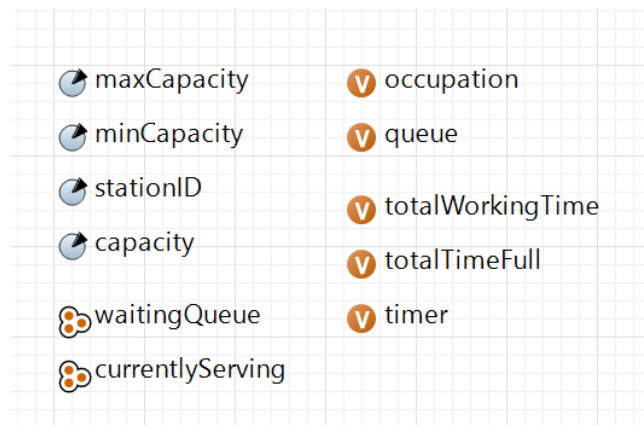
4.3.3. Agenti benzinskih stanica i električnih punionica

Struktura agenata koji predstavljaju benzinske stanice i električne punionice je zapravo ista, a ti agenti se razlikuju u nekim vrijednostima parametara koji ih opisuju i po tipu vozila kojima pružaju usluge.

Svi parametri i varijable korištene za agente benzinskih stanica i električnih punionica vide se na slici 4.5. Kapacitet stanice ili punionice tj. *capacity* je parametar koji određuje koliko se vozila istovremeno može puniti, a izračunava se s pomoću funkcije ugrađene u AnyLogic *uniformdiscr()* koja kao parametre prima minimalnu i maksimalnu vrijednost te vraća slučajno generiran cijeli broj dobiven iz uniformne razdiobe.

Svaka benzinska stanica i električna punionica ima svoj jedinstveni identifikacijski broj *stationID* unutar populacije agenata koji je ustvari redni broj objekta unutar liste agenata dodijeljen pri njihovoj inicijalizaciji.

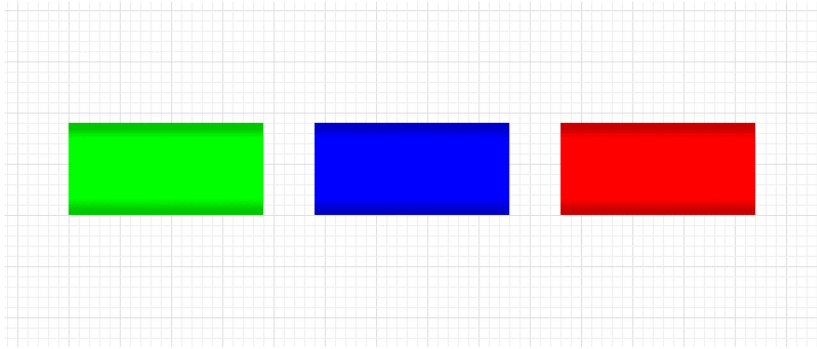
Suprotno od parametara koji su statični tj. čije se vrijednosti ne mijenjaju tijekom simulacije, koriste se i razne varijable čije su vrijednosti promjenjive i koje ovise o do-



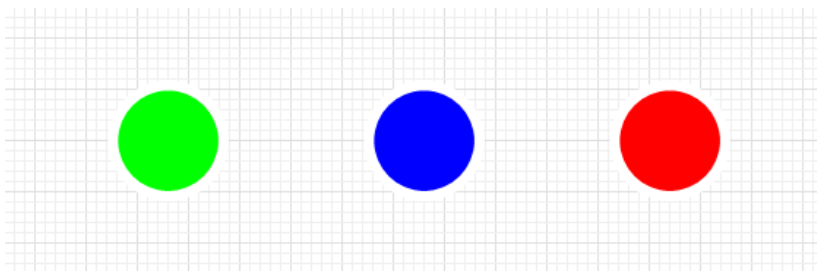
Slika 4.5. Parametri i varijable benzinske stanice i električne punionice

gađajima u simulaciji, a istovremeno određeni događaji ovise o njima. Varijabla *occupation* služi kao brojač vozila koja se pune u datom trenutku, dok varijabla *queue* služi kao brojač vozila koja čekaju u redu u slučaju kad je stanica ili punionica puna. Liste *currentlyServing* i *waitingQueue* koriste se za čuvanje identifikacijskih brojeva vozila od kojih prva sadrži brojeve vozila koja se pune u tom trenutku, a druga brojeve vozila koja se nalaze u redu čekanja. Važno je da se u njima čuva redosljed dodavanja brojeva zbog daljnje logike obrade.

Nadalje, varijable *totalWorkingTime*, *totalTimeFull* i *timer* koriste se za prikupljanje podataka iz simulacije. Prva navedena varijabla označava koliko vremena, u minutama, je stanica ili punionica radila što znači da je barem jedno vozilo u tom periodu bilo na njoj. U sljedećoj varijabli, *totalTimeFull*, zapisano je koliko je stanica ili punionica bila kompletno zauzeta tj. kapacitet joj je u tom periodu bio pun. Kako bi se mogle dobiti vrijednosti koje se dodaju u navedene varijable, potrebna je još jedna, a to je *timer*. Tijekom simulacije koristi se za izračunavanje vremena koje je benzinska stanica ili električna punionica provela u pojedinom stanju. To je omogućeno tako da se u tu varijablu spremi trenutno vrijeme u simulaciji kada agent uđe u neko stanje te kada agent izađe iz tog stanja uzima se razlika novog trenutnog vremena i stare vrijednosti spremljene u varijablu *timer*. Primjer je dan u isječku programskog koda 4.1.



Slika 4.6. Varijante prikaza benzinske stanice



Slika 4.7. Varijante prikaza električne punionice

Isječak programskog koda 4.1. Primjer upotrebe varijable *timer*

```
// State entry action
timer = time(MINUTE);

// State exit action
totalWorkingTime += (time(MINUTE) - timer);
```

Što se tiče vizualnog aspekta benzinske stanice, njezin prikaz ovisi o zauzetosti. U početnom stanju kada se nijedan agent vozila ne nalazi na njoj obojena je u zelenu boju. Kada je kapacitet stanice pun onda poprima crvenu boju kao znak zauzetosti ili plavu boju kada se nalazi barem jedno vozilo na njoj, ali kapacitet nije pun što je sve prikazano na slici 4.6. Sve isto vrijedi i za agenta električne punionice, ali se od agenta benzinske stanice razlikuje u obliku zbog lakše distinkcije na GIS mapi 4.7.

4.3.4. Logika agenta vozila

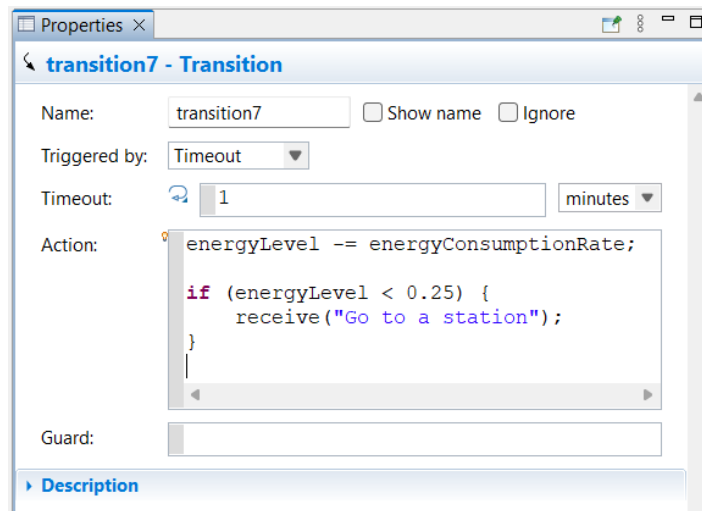
Za implementaciju logike funkcioniranja modela korišteni su automati stanja koji su vidljivi na slikama 4.10. i 4.9. Kada se model inicijalizira svi agenti su u početnom stanju *Idle*. Za vozila to znači da su u stanju mirovanja te se zapravo u tom stanju i ne prikazuju

na mapi. U slučaju benzinskih postaja i električnih punionica to znači da se nijedno vozilo u tom trenutku ne nalazi na njima. Ostatak automata je u cijelosti različit kod vozila i stanica odnosno punionica pa je u nastavku najprije opisan automat vozila.

U agentu vozila prijelaz iz stanja *Idle* u stanje *Traveling* događa se primitkom poruke s tekstom „*Start travel*“, a logika slanja poruka agentima vozila opisana je kasnije u dijelu koji opisuje simulaciju modela 4.3.8. Također, pri izvršavanju tranzicije inicijalizira se kretanje agenta prije spomenutom funkcijom *startTravel()* i postavlja se varijabla *timer* na trenutno vrijeme u simulaciji modela. Prijelaz iz stanja *Traveling* natrag u stanje *Idle* događa se kada agent stigne na lokaciju postavljenu u funkciji *moveTo()* i to je specifičan uvjet u AnyLogicu koji omogućava prijelaze iz stanja u stanje ovisno o kretanju agenta.

Nadalje, postoji tranzicija tj. povratna veza iz stanja *Traveling* natrag u to isto stanje, a ona specifično služi za regulaciju razine goriva tj. baterije u vozilu. Funkcionira tako da se ta tranzicija izvršava u intervalima odnosno kada istekne zadano vrijeme u postavkama tranzicije od varijable *energyLevel* oduzima se varijabla *energyConsumptionRate* i nakon toga u dijelu za akcije provjerava se ako je varijabla *energyLevel* ispod neke postavljene razine, u ovom slučaju 0.25 tj. četvrtina spremnika. Ako je uvjet zadovoljen onda agent prima poruku preko funkcije *receive()* 4.8. Navedena funkcija i poruka tj. objekt *Message* su ugrađeni mehanizmi AnyLogica za okidanje tranzicija koje ovise o primitku takvog objekta. Konkretno, primitak poruke „*Go to a station*“ okida tranziciju 4.11. i događa se prijelaz u stanje *TravelingToStation*. U ovom primjeru može se vidjeti korištenje prije opisane funkcije *moveToNearestAgent()* tako da električna vozila započinju kretanje prema električnim punionicama, a sva ostala vozila prema benzinskim stanicama.

Stanje *TravelingToStation* služi samo kao prijelazno stanje dok vozilo putuje do stanice ili punionice, ali i iz tog stanja postoji povratna tranzicija koja periodički smanjuje vrijednost varijable *energyLevel* na isti način kako je prije opisano. Dolaskom do određnog agenta iz populacije stanica ili punionica, agent vozila prelazi u stanje *AtTheStation*. Ulaskom u navedeno stanje ažurira se varijabla *timeTraveling*, postavlja se vrijednost varijable *currentStationId* i šalje se poruka agentu benzinske stanice ili električne punionice do kojeg je vozilo stiglo s pomoću objekta klase *CustomMessage* 4.2.



Slika 4.8. Primjer postavki tranzicije

Isječak programskog koda 4.2. Akcija koja se izvršava kada agent vozila stigne do agenta stanice ili punionice

```

timeTraveling += (time(MINUTE) - timer);

if(this.vehicleType == "ELECTRIC") {
    currentStationId = getNearestAgent(main.chargingStations)
        .stationID;
    CustomMessage message = new CustomMessage(
        vehicleID,
        currentStationId,
        "New vehicle arrived"
    );
    send(message, main.chargingStations.get(currentStationId));
} else {
    currentStationId = getNearestAgent(main.gasStations)
        .stationID;
    CustomMessage message = new CustomMessage(
        vehicleID,
        currentStationId,
        "New vehicle arrived"
    );
    send(message, main.gasStations.get(currentStationId));
}

```

CustomMessage je klasa napravljena za potrebe slanja određenih vrijednosti i informacija između agenata, a sadrži tri varijable *stationID*, *vehicleID* i *value* koje sadrže vrijednosti identifikacijskih brojeva stanice ili punionice i vozila te tekst poruke koja se šalje.

Ovisno o tome koju vrijednost vozilo primi natrag od stanice ili punionice, prelazi u odgovarajuće stanje. Ako vozilo primi natrag poruku „*Wait*“ onda prelazi u stanje *InQueue*, a ako primi poruku „*Start charging*“ prelazi u stanje *Charging*. Ulaskom u stanje *InQueue* ponovno se postavi varijabla *timer* zbog računanja vremena u redu čekanja. Kada u istom stanju vozilo primi poruku „*Start charging*“, prelazi u stanje *Charging* i ažurira se varijabla *timeWaitingInQueue* koja će biti važna na kraju izvršavanja simulacije.

Kada vozilo uđe u stanje *Charging* ponovno se postavi varijabla *timer* po uzoru na isječak programskog koda 4.1. koja će također biti značajan podatak u analizi. Vozilo izlazi iz stanja *Charging* po isteku vremena koje se računa prema formuli u kodu 4.3. i vraća se u stanje *Traveling*. U akciji te tranzicije postavlja se varijabla *energyLevel* na vrijednost 1.0 što znači da je vozilo puno i ponovno započinje kretanje agenta prema odredištu koje je bilo definirano prije nego što je morao krenuti na benzinsku stanicu odnosno električnu punionicu. Međutim, prije nego što se izvrši tranzicija tj. po izlasku iz stanja ažurira se vrijednost varijable *timeCharging* i ponovno resetira varijabla *timer*. Također, agent vozila šalje poruku preko objekta klase *CustomMessage* stanici ili punionici na kojoj se nalazio do sada kako bi potvrdio svoj odlazak 4.4.

Isječak programskog koda 4.3. Formula za računanje vremena u stanju *Charging*

```
(1.0 - energyLevel) * rechargingSpeedFactor
```

Isječak programskog koda 4.4. Akcija pri izlasku iz stanja *Charging*

```
timeCharging += (time(MINUTE) - timer);  
timer = time(MINUTE);  
  
CustomMessage message = new CustomMessage(  
    vehicleID,  
    currentStationId,  
    "Vehicle charged");
```

```
if (vehicleType == "ELECTRIC") {
    send(message, main.chargingStations.get(currentStationId));
} else {
    send(message, main.gasStations.get(currentStationId));
}
```

4.3.5. Logika agenata benzinske stanice i električne punionice

Kao što je prije rečeno, svi agenti su odmah nakon inicijalizacije u početnom stanju *Idle* i to za stanice i punionice znači da se niti jedan agent vozila ne nalazi na njima.

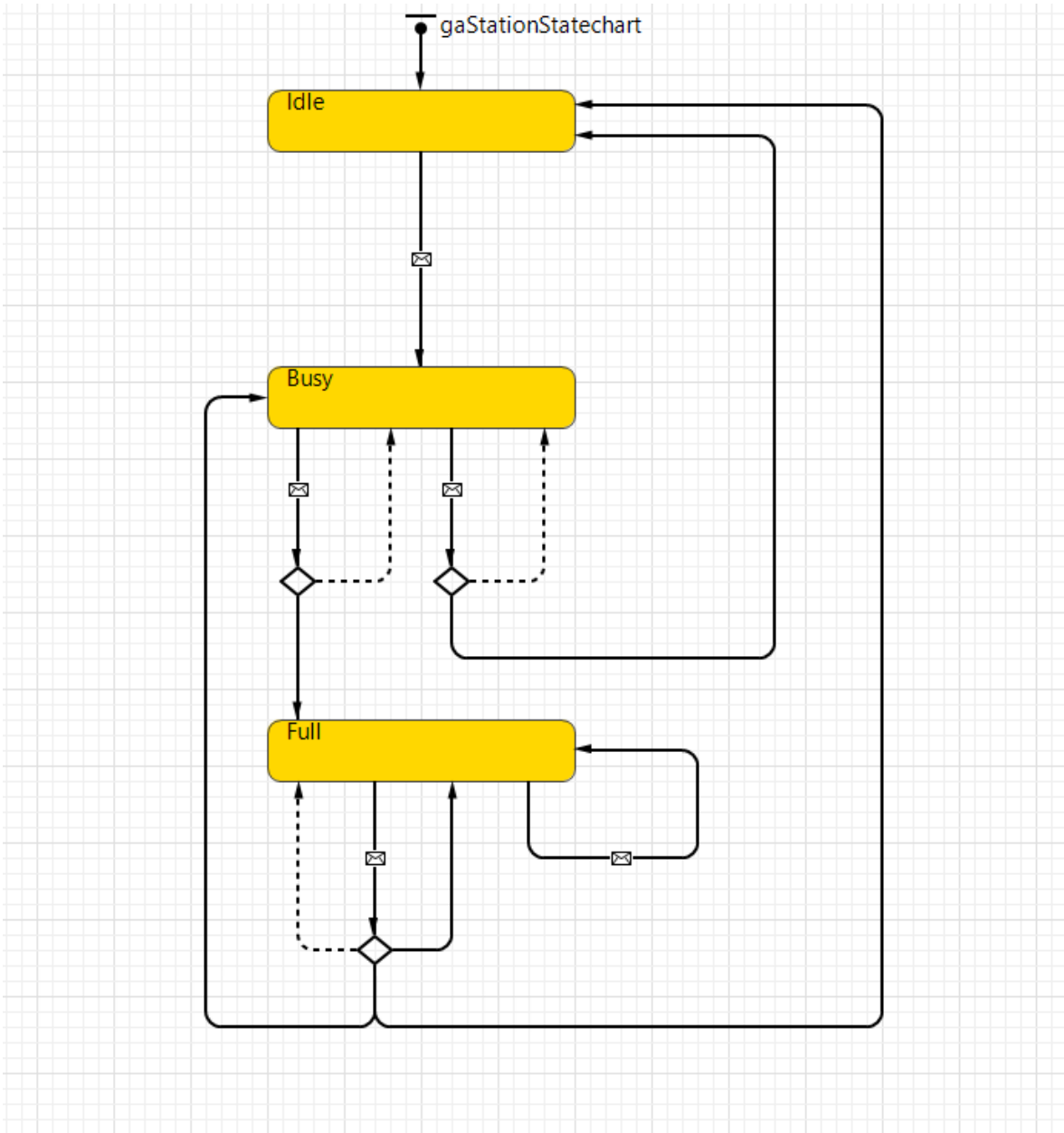
Kada vozilo stigne do stanice ili punionice ti agenti primaju poruku „*New vehicle arrived*“ od vozila i prelaze u stanje *Busy*. Prije ulaska u stanje *Busy* šalje se poruka „*Start charging*“ opet preko objekta prije opisane klase *CustomMessage* istom agentu vozila koji je inicijalno započeo komunikaciju. U akciji te tranzicije se također uvećava vrijednost varijable *occupation* za 1 kao naznaka prisutnosti vozila i dodaje se identifikacijski broj vozila dobiven iz primljene poruke u listu *currentlyServing* da se vodi računa o tome koje vozilo se trenutno poslužuje 4.5. Ulaskom u stanje *Busy* postavlja se varijabla *timer*, a izlaskom iz stanja ažurira se varijabla *totalWorkingTime*.

Isječak programskog koda 4.5. Akcija prijelaza is stanja *Idle* u stanje *Busy*

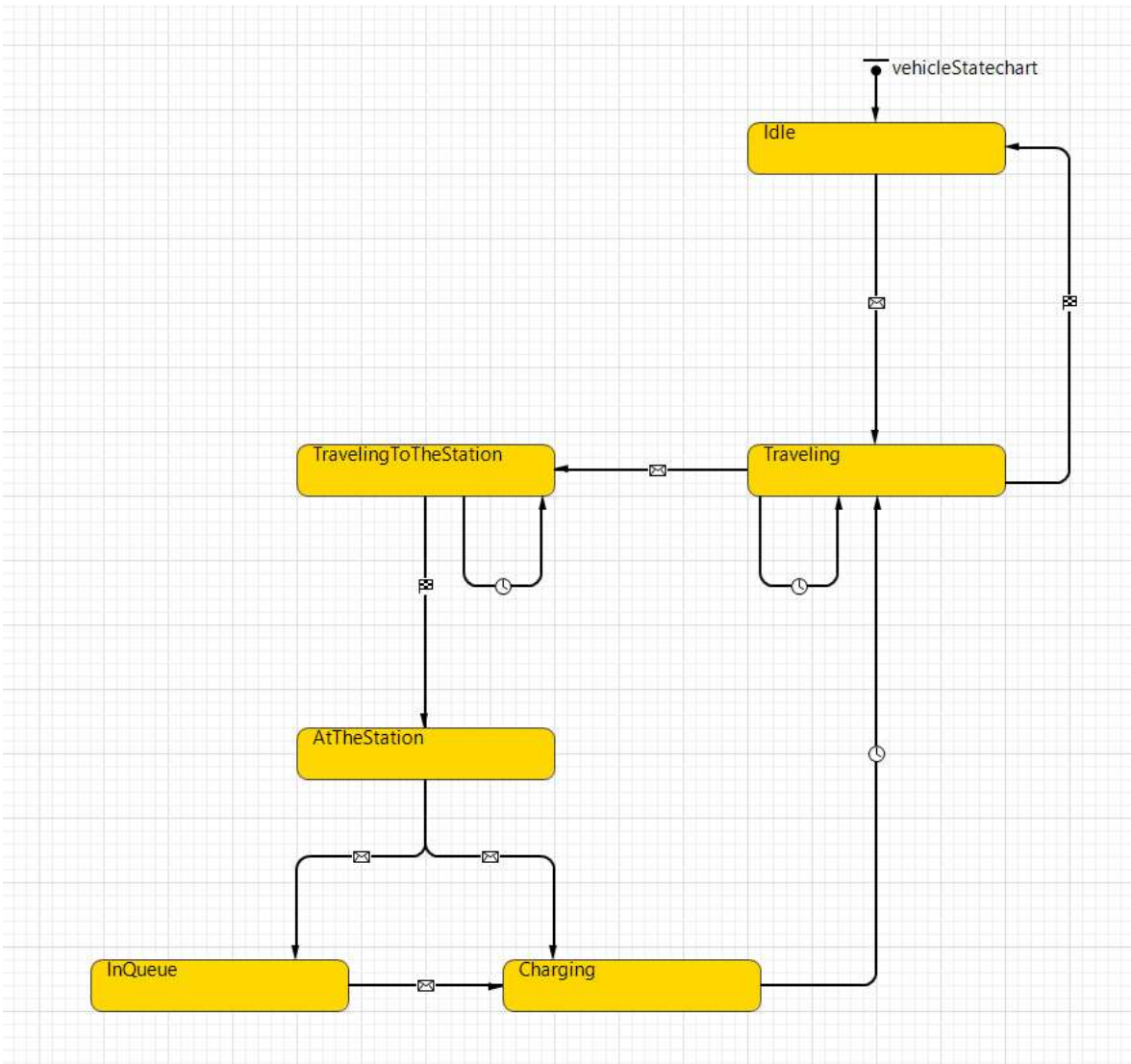
```
int vehicleID = msg.getVehicleID();
occupation++;
currentlyServing.add(vehicleID);

CustomMessage response = new CustomMessage(
    vehicleID,
    stationID,
    "Start charging");
send(response, main.vehicles.get(vehicleID));
```

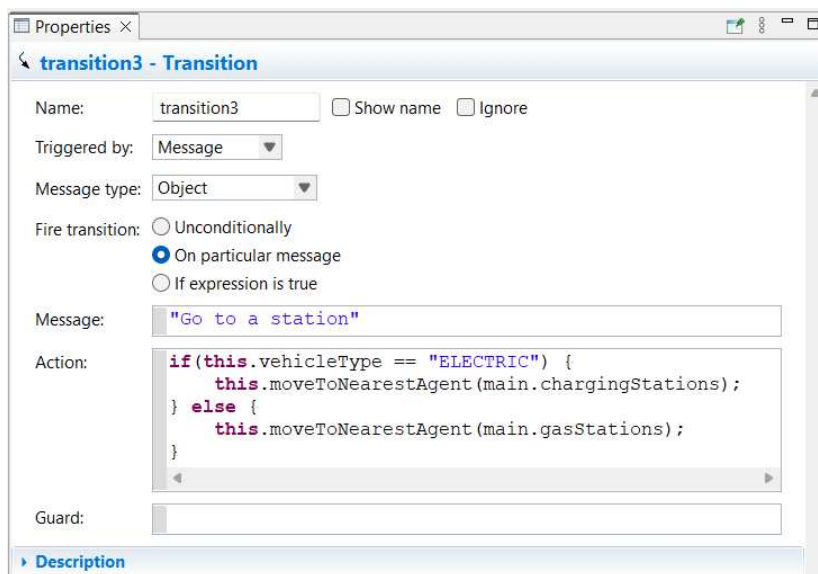
Postoje dva načina izlaska iz stanja *Busy*, a oba se odnose na primanje poruke s određenim tekstom. Ako agent primi poruku s tekstom „*New vehicle arrived*“ onda šalje odgovor s tekstom „*Start charging*“ agentu vozila od kojeg je inicijalno primljena poruka. Nadalje, kao i u prethodno opisanoj tranziciji, uvećava se vrijednost varijable *occupation*



Slika 4.9. Automat stanja benzinske stanice i električne punionice



Slika 4.10. Automat stanja vozila



Slika 4.11. Postavke tranzicije za prijelaz u stanje *TravelingToStation*

i dodaje se identifikacijski broj vozila u listu *currentlyServing* 4.6. , a ako je vrijednost varijable *occupation* dosegla vrijednost varijable *capacity*, izvršava se prijelaz u stanje *Full*. U slučaju da posljednji uvjet nije zadovoljen, agent se vraća u stanje *Busy*.

Isječak programskog koda 4.6. Akcija prijelaza iz stanja *Busy* u stanje *Full*

```
int vehicleID = msg.getVehicleID();
occupation++;
currentlyServing.add(vehicleID);

CustomMessage message = new CustomMessage(
    vehicleID,
    stationID,
    "Start charging");
send(message, main.vehicles.get(vehicleID));
```

Drugi način izlaska iz stanja *Busy* je kada agent primi poruku „*Vehicle charged*“. U tom slučaju iz liste *currentlyServing* miče se identifikacijski broj vozila od kojeg je primljena poruka i smanjuje se vrijednost varijable *occupation* za 1 4.7. Ako je nova vrijednost varijable *occupation* jednaka 0 i nema reda čekanja što znači da su sva vozila napustila stanicu odnosno punionicu, izvršava se prijelaz u stanje *Idle*, a u suprotnom agent se vraća u stanje *Busy*.

Isječak programskog koda 4.7. Akcija tranzicije okinute dolaskom poruke „*Vehicle charged*“

```
int vehicleId = msg.getVehicleID();
currentlyServing.remove(currentlyServing.indexOf(vehicleId));
occupation--;
```

Ulaskom u stanje *Full* ponovno se postavlja varijabla *timer*, a izlaskom iz tog stanja ažurira se varijabla *totalTimeFull*. Iz stanja *Full* postoji povratna tranzicija koja se izvršava po primitku poruke s tekstom „*New vehicle arrived*“. U akciji te tranzicije u listu *waitingQueue* dodaje se identifikacijski broj vozila koje je poslalo poruku, uvećava se vrijednost varijable *queue* za 1 i šalje se odgovor istom vozilu s tekstom poruke „*Wait*“ što znači da su trenutno sva mjesta za punjenje zauzeta te se vozilo stavlja u red čekanja 4.8.

Isječak programskog koda 4.8. Akcija povratne tranzicije u stanje *Full*

```
int vehicleID = msg.getVehicleID();
waitingQueue.add(vehicleID);
queue++;

CustomMessage message = new CustomMessage(
    vehicleID,
    stationID,
    "Wait");
send(message, main.vehicles.get(vehicleID));
```

Druga tranzicija iz stanja *Full* događa se po primitku poruke s tekstom „*Vehicle charged*“ i tada se iz liste *currentlyServing* miče identifikacijski broj vozila od kojeg je poruka primljena i umanjuje vrijednost varijable *occupation* za 1. Izvršavanjem te tranzicije ulazi se u granu grafa iz koje se uvjetno može izvršiti nekoliko prijelaza.

U slučaju da u redu čekanja postoji još vozila tj. vrijednost varijable *queue* je veća od 0, iz liste *waitingQueue* dohvaća se i nakon toga miče prvi element koji zapravo označava identifikacijski broj prvog vozila smještenog u listu kako bi se održao redoslijed dolaska i posluživanja po principu *FIFO* (*first in first out*). Isto vozilo tj. broj koji ga označava dodaje se u listu *currentlyServing*, uvećava se vrijednost varijable *occupation* za 1 i šalje se poruka tom vozilu s tekstom „*Start charging*“ što daje dotičnom agentu znak da krene s punjenjem 4.9.

Isječak programskog koda 4.9. Akcija povratne tranzicije iz stanja *Full* kada je vrijednost *queue* veća od 0

```
int vehicleID = waitingQueue.get(0);
waitingQueue.remove(0);
queue--;

occupation++;
currentlyServing.add(vehicleID);

CustomMessage message = new CustomMessage(
    vehicleID,
    stationID,
    "Start charging");
```

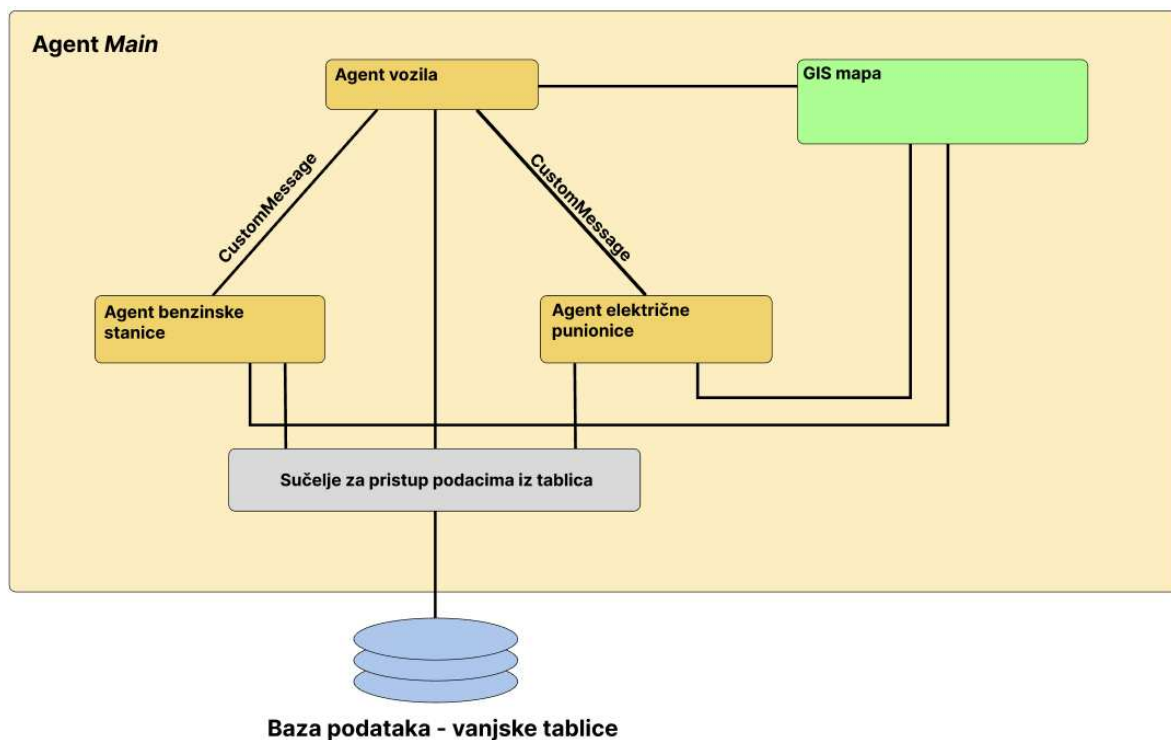
```
send(message, main.vehicles.get(vehicleID));
```

Drugi slučaj je prijelaz u stanje *Busy* koji se izvršava u slučaju kada u redu čekanja nema više vozila, ali ima još vozila koje se poslužuju tj. vrijednost varijable *queue* je 0, a vrijednost varijable *occupation* je veća od 0 i manje od vrijednosti parametra *capacity*.

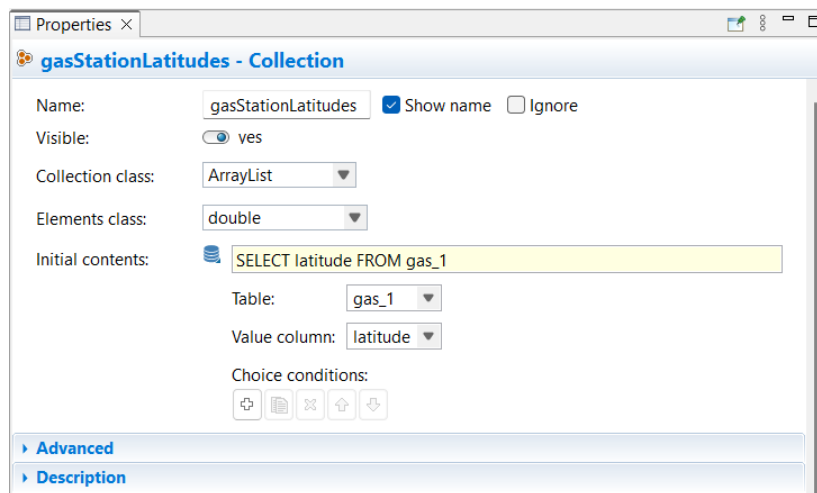
Treći slučaj je kada u redu čekanja nema više vozila i nema više vozila koje se poslužuju tj. vrijednosti varijabli *occupation* i *queue* su jednake 0, a prelazi se u stanje *Idle*. Ovaj prijelaz se ne bi trebao nikada izvršiti, ali služi kao mehanizam sigurnosti u slučaju da dođe do poremećaja u radu internih procesa u AnyLogicu.

Zadnji slučaj je prijelaz natrag u stanje *Full* koji se izvršava u slučaju da niti jedan od navedenih uvjeta nije zadovoljen i taj prijelaz se također nikada ne bi trebao izvršiti, ali mora postojati takva tranzicija također kao sigurnosni mehanizam. Kada niti jedan uvjet ne bi bio zadovoljen i ne bi postojala takva tranzicija dogodila bi se greška tj. *Runtime error*.

Struktura cijelog višeagentskog sustava prikazana je na slici 4.12., a određena je opisanim međusobnim odnosima agenata i procesima u njima.



Slika 4.12. Struktura višeagentskog sustava



Slika 4.13. Primjer pridruživanja vrijednosti iz uvezene tablice

4.3.6. Skripte za generiranje podataka

Za generiranje podataka korištene su skripte pisane u programskom jeziku Javascript. Ideja je da se pripremljenim skriptama smanji opterećenje resursa tijekom simulacija pa su iz tog razloga početne pozicije vozila i trajne pozicije benzinskih stanica i električnih punionica slučajno generirane prije pokretanja simulacija i uvezene u obliku formata *.xlsx* s pomoću funkcija AnyLogica za interakciju s bazama podataka. Ovo je moguće ostvariti desnim klikom na karticu *Database* u strukturi projekta u izborniku *Projects*. Nakon toga odabire se opcija *Import database tables...* i u prozoru koji se pojavi može se odabrati datoteka koja se želi uvesti i u kojem formatu je tablica. Nakon što je tablica uvezena u projekt moguće je referencirati ju unutar postavki parametara ili varijabli s pomoću SQL funkcija kao što je vidljivo na slici 4.13. Navedenim skriptama generirano je po 10 datoteka za agente benzinskih stanica i električnih punionica kako bi se dobila raznolikost u distribuciji agenata na mapi.

4.3.7. Problemi tijekom razvoja i rješenja

Kao prvobitno rješenje za modeliranje infrastrukture pokazalo se korištenje prije spomenute AnyLogicove biblioteke *Road Traffic Library*. Međutim, iako je navedena biblioteka bila uzeta u obzir pri izradi projekta, ispostavilo se da je proces ucrtavanja prometnica i raskrižja te opisivanje ponašanja vozila na svakom raskrižju jako dugotrajan proces i nije bio nužan za izvedbu projekta. Postoji i opcija da se u GIS mapu uveze dodatna datoteka u formatu *.osm* s ucrtanim prometnicama koje simuliraju funkcionalnosti navedene bi-

blioteke, međutim ta opcija ne izvršava proces savršeno i ponovno je potrebno ispraviti većinu elemenata koji se ucrtavaju na mapu.

Drugi problem pojavio se pri pokušaju generiranja većeg broja agenata vozila, konkretno 500 ili više. Simulacija je bila jako usporena i agenti se nisu skoro ni kretali iako se u prozoru simulacije moglo vidjeti da je potrošnja resursa tj. memorije jako mala. Problem je zapravo bio taj da se pri svakom kretanju vozila ruta preuzimala sa servera što je zagušilo mrežni promet i značajno utjecalo na brzinu izvođenja simulacije.

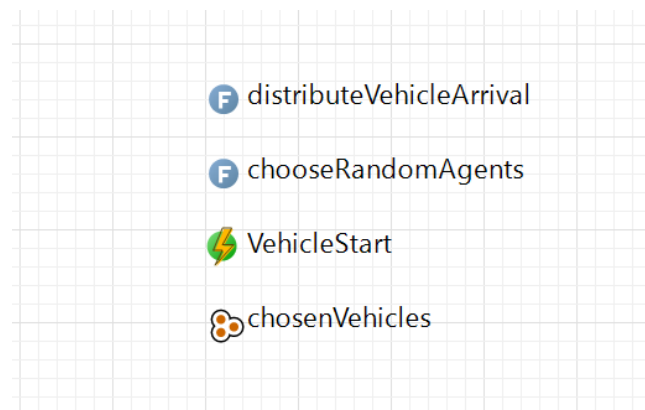
Rješenje za oba problema je pronađeno u implementaciji jednostavne GIS mape i preuzimanju grafa usmjeravanja za područje Hrvatske kako se pri svakom novom kretanju vozila ne bi ruta od polazišta do odredišta trebala ispočetka preuzimati sa servera. Na taj način smanjilo se vrijeme izračunavanja rute i opterećenje mreže te isključila potreba za internetskom vezom.

4.3.8. Simulacija modela

Za svaku simulaciju mijenja se broj agenata benzinskih stanica, električnih punionica i vozila koji se inicijalno generira te se mijenjaju datoteke iz kojih se podaci o njihovim lokacijama izvlače. Na kraju svake simulacije poziva se funkcija *writeToFile()* definirana u agentu *Main* koja prikuplja podatke od svih agenata koji su sudjelovali u simulaciji i zapisuje ih u nove datoteke.

Za potrebe simulacija dodane su još neke funkcionalnosti tj. elementi vidljivi na slici 4.14. Funkcija *distributeVehicleArrival()* 4.10. ima ulogu distribucije vozila u periodima dana tj. određuje vrijeme u danu kada se vozila kreću. S obzirom na to da je najveće zagušenje prometa u jutarnjim i popodnevnim satima upravo kada ljudi idu na posao i s posla, funkcija je definirana na način da prati takav trend. Funkcija radi tako da odabire određen postotak vozila iz ukupne populacije agenata vozila koji će se kretati u određenom periodu dana pa shodno tome vrijedi da se u udarnim periodima između 7:00h i 9:00h te između 15:00h i 17:00h može očekivati 90% od ukupnog broja agenata vozila na prometnicama. Nadalje, od 00:00h do 7:00h postavljeno je da se kreće 20% vozila kao i u periodu između 9:00h i 15:00h, a između 17:00h i 24:00h može se očekivati 35% od cjelokupne populacije vozila. Vozila koja se kreću u predviđenim periodima izabrana su s pomoću funkcije *chooseRandomAgents()* koja kao argument prima postotak vozila

koji se bira tipa `double`. Na početku, funkcija uzima sve indekse iz liste agenata, izmiješa njihov poredak i u listu koju vraća stavlja onaj broj agenata koji se dobije množenjem postotka i veličine liste agenata vozila. Nakon odabira agenata, funkcija `distributeVehicleArrival()` za svako vozilo iz vraćene liste generira varijablu `timeout` koja je dobivena iz uniformne razdiobe čiji su minimum i maksimum određeni granicama perioda i kreira novi dinamički `event` koji se izvršava po isteku vremena određenog netom dobivene vrijednosti varijable `timeout`. `Event` je nazvan `VehicleStart` i kao argument prima objekt klase `Vehicle` i jednostavno šalje poruku tom agentu vozila s tekстом „*Start travel*“ što daje signal agentu da izađe iz stanja `Idle`. Cijeli proces je ponovljen za svaki period dana naveden iznad.



Slika 4.14. Elementi potrebni za izvođenje simulacija

Isječak programskog koda 4.10. Funkcija `distributeVehicleArrival()`

```
// 0-7h
chosenVehicles = chooseRandomAgents(0.2);

for(int i = 0; i < chosenVehicles.size(); i++) {
    double timeout = (double) uniform_discr(0, 7);
    create_VehicleStart(timeout, HOUR, chosenVehicles.get(i));
}

// 7-9H
chosenVehicles.clear();
chosenVehicles = chooseRandomAgents(0.9);

for(int i = 0; i < chosenVehicles.size(); i++) {
    double timeout = (double) uniform_discr(7, 9);
    create_VehicleStart(timeout, HOUR, chosenVehicles.get(i));
}
```

```
}

// 9-15h
chosenVehicles.clear();
chosenVehicles = chooseRandomAgents(0.2);

for(int i = 0; i < chosenVehicles.size(); i++) {
    double timeout = (double) uniform_discr(9, 15);
    create_VehicleStart(timeout, HOUR, chosenVehicles.get(i));
}

// 15-17h
chosenVehicles.clear();
chosenVehicles = chooseRandomAgents(0.9);

for(int i = 0; i < chosenVehicles.size(); i++) {
    double timeout = (double) uniform_discr(15, 17);
    create_VehicleStart(timeout, HOUR, chosenVehicles.get(i));
}

// 17-23h
chosenVehicles.clear();
chosenVehicles = chooseRandomAgents(0.35);

for(int i = 0; i < chosenVehicles.size(); i++) {
    double timeout = (double) uniform_discr(17, 23);
    create_VehicleStart(timeout, HOUR, chosenVehicles.get(i));
}



---


```


5. Rezultati i analiza

Simulacije su provedene u nekoliko različitih scenarija u kojima su mijenjane lokacije benzinskih stanica i električnih punionica i njihov broj. Za svaku skupinu simulacija dan je pregled rezultata kroz tablice i grafove.

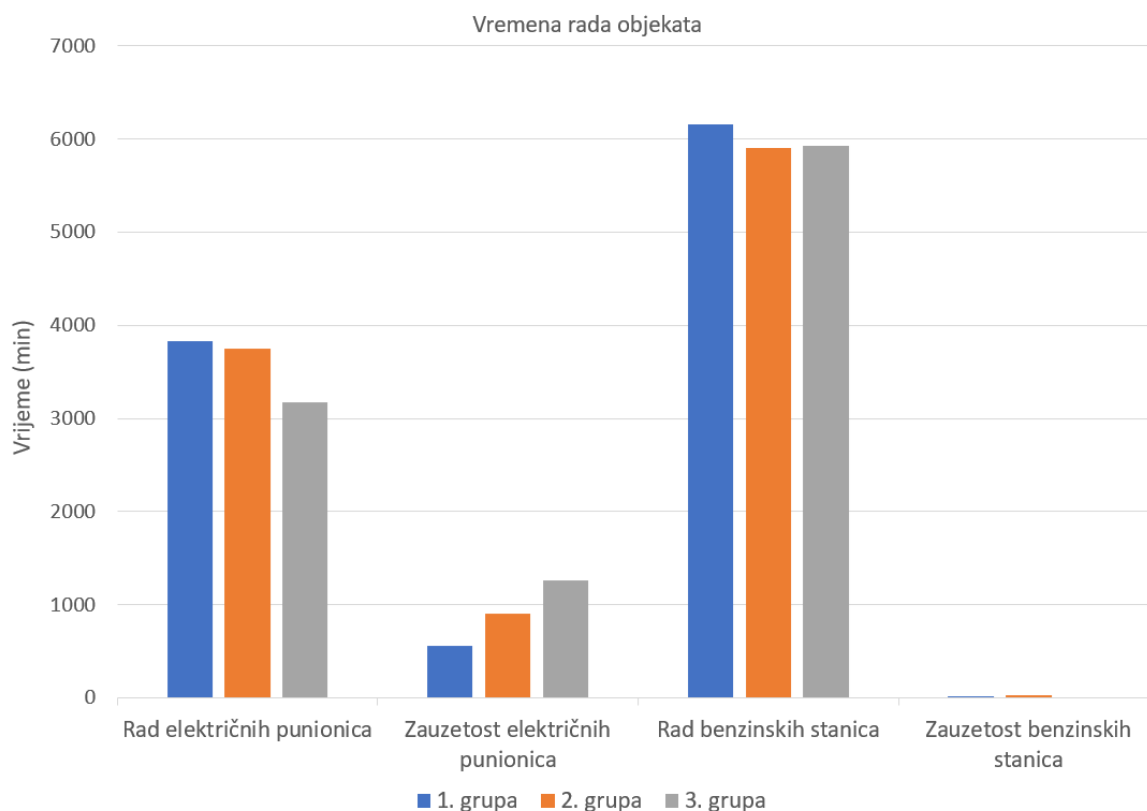
5.1. Usporedba rezultata na temelju promjene lokacija benzinskih stanica i električnih punionica

Za ovu skupinu simulacija od skupa datoteka iz kojih su dohvaćeni podaci o lokacijama objekata izvršeno je ukupno 15 simulacija. Lokacije objekata mijenjane su tri puta što znači da su rezultati grupirani u tri skupine po pet simulacija i za te simulacije broj vozila je fiksiran na 1000 s obzirom da u tom slučaju simulacije ne traju predugo, a istovremeno se generiraju vjerodostojni rezultati. Sukladno tome brojnost stanica i punionica je nešto manja nego što bi bila u stvarnom okruženju, međutim rezultati se mogu skalirati. Nadalje, u svakoj iteraciji unutar grupe mijenjani su brojevi stanica i punionica, ali tako da u istoj iteraciji po redu po svim grupama ti brojevi budu isti da bi se dobili točni rezultati, a korištene vrijednosti mogu se vidjeti u tablici 5.1. Cilj ove skupine simulacija bio je analizirati utječe li raspored objekata u infrastrukturi na performanse sustava i kako.

Tablica 5.1. Korištene vrijednosti parametara za prvu skupinu simulacija

Parametri	1.	2.	3.	4.	5.
Broj vozila	1000	1000	1000	1000	1000
Broj benzinskih stanica	5	4	3	2	1
Broj električnih punionica	10	7	2	3	4

Na grafu 5.1. su prikazani rezultati simulacija sortirani po grupama, a sve vrijednosti



Slika 5.1. Usporedba vremena rada objekata po grupama

Tablica 5.2. Usporedba rezultata agenata vozila

Parametri	1. grupa	2. grupa	3. grupa
Ukupno vrijeme punjenja (min)	15296,63	15617,5	15571,6
Ukupno vrijeme putovanja (min)	901067,4	912266,8	903224,4
Ukupno vrijeme čekanja u redu (min)	62,56	367,8	577,03

izražene su u minutama. Odmah na početku može se uočiti sličnost u podacima između svih grupa simulacija. U prvom stupcu prikazano je koliko vremena su električne punionice radile, a da pritom nije bio ispunjen kapacitet. Ovdje su najviše vremena u radnom stanju provele punionice prve grupe simulacija, a najmanje one iz treće grupe. Međutim, u drugom stupcu vidi se da je upravo manjak vremena u radnom stanju punionica treće grupe rezultirao povećanjem vremena u zauzetom stanju. S obzirom da jedno stanje isključuje drugo onda su ovakvi rezultati očekivani, iako ne nužni. Objašnjenje prethodnog leži u činjenici da su punionice treće grupe mogle biti na nedostupnijim mjestima i tako zgubiti na vrijednostima vremena i u prvom i drugom stupcu. Međutim, to nije slučaj i iz ovoga se može zaključiti da su punionice u trećoj grupi simulacija postavljene

na traženijim i dostupnijim lokacijama u odnosu na punionice iz prve i druge grupe simulacija.

Što se tiče podataka vezanih za benzinske stanice, njihova distribucija nije imala značajan utjecaj na rezultate. Iako su benzinske stanice prve grupe simulacija provele najviše vremena u radnom stanju, koje je definirano na isti način kao i kod električnih punionica, vrijednosti svih triju grupa kreću se oko 6000 minuta rada, dok su vremena koje su provele u stanju potpune zauzetosti skoro pa zanemariva i ne mogu se jasno iščitati s grafa. Razlog tomu može biti veći broj vozila s pogonom na fosilna goriva i veći kapaciteti samih benzinskih stanica u odnosu na električne punionice. Pretpostavka je da bi se značajnija razlika mogla vidjeti kada bi se u obzir uzelo veće područje i ciljano generirale lokacije stanica u suburbanom i urbanom području.

Podaci koji se tiču agenata vozila nisu prikazani grafom, već tabličnim prikazom 5.2. zbog velikog nerazmjera između vrijednosti parametara što bi uzrokovalo nečitljivost podataka u grafičkom prikazu. Iz tablice se može uočiti da prevladavaju relativno slične vrijednosti između grupa kada se uzme u obzir ukupno vrijeme punjenja i ukupno vrijeme putovanja. Ipak, između vrijednosti koje se odnose na ukupno vrijeme čekanja u redu dolazi do značajnijih razlika. Vozila treće grupe simulacija provela su skoro 10 puta više vremena u redu čekanja od vozila prve grupe, a od vozila druge grupe više za otprilike 55%. Između rezultata koji se tiču objekata i onih koji se tiču vozila može se povući poveznica koja se jasno vidi upravo u vremenu koje su električne punionice provele u stanju zauzetosti i vremenu koje su vozila provela u redu čekanja. Dakle, kod agenata vozila treće grupe postojala je veća potreba za električnim punionicama koje su ujedno bile dostupnije i bolje raspoređene u prostoru.

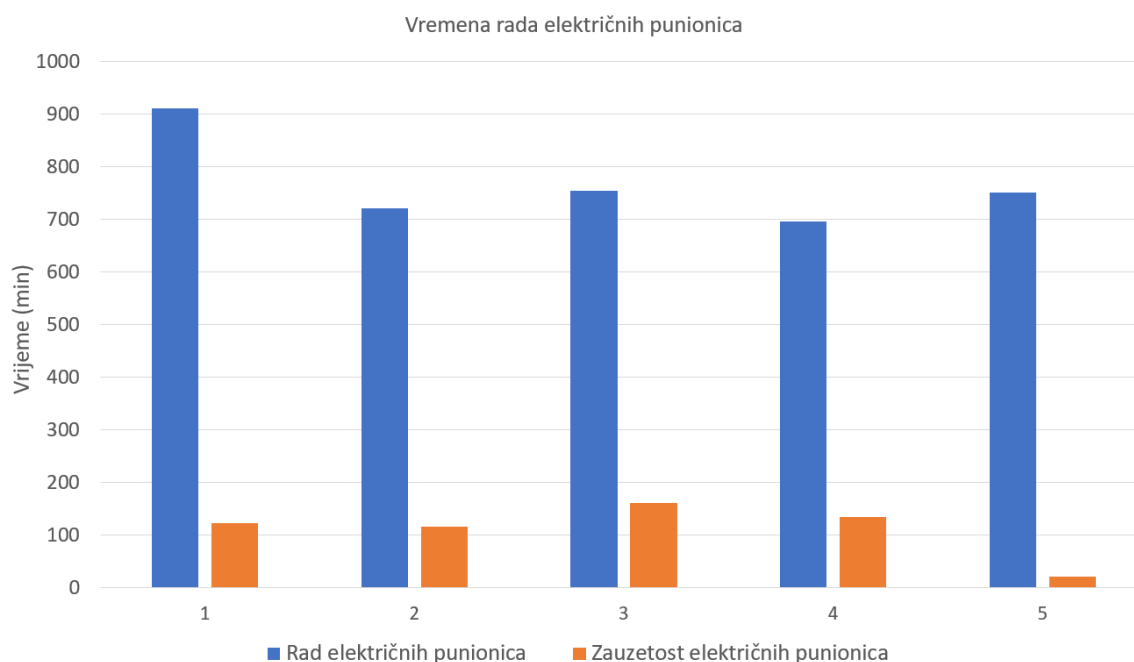
5.2. Usporedba rezultata na temelju promjene broja benzinskih stanica i električnih punionica

U ovoj skupini izvršeno je 5 simulacija u kojima su mijenjani brojevi benzinskih stanica i električnih punionica. Broj vozila je i u ovim simulacijama fiksiran na 1000 zbog istog razloga kao što je prije navedeno. Korištene vrijednosti u simulacijama za brojeve benzinskih stanica, električnih punionica i vozila iste su kao i u prvoj skupini simulacija i

moгу se vidjeti u tablici 5.1. Cilj ove skupine simulacija bio je istražiti kako na sustav utječe brojnost objekata.

Iz grafa 5.2. u kojem su podaci grupirani po rednim brojevima simulacija, može se vidjeti da su punionice najviše vremena u radnom stanju provele u prvoj simulaciji što je očekivano jer ih je u tom slučaju generirano najviše tj. 10. Međutim, ta razlika ipak nije toliko velika jer je u drugoj simulaciji generirano 7 punionica, a u drugoj samo 2 i pritom uzevši u obzir da se tijekom prve simulacije na jednoj punionici nije punilo niti jedno vozilo te je kapacitet kod samo 3 od preostalih 9 u nekom trenutku bio ispunjen. To znači da je barem jedna, a potencijalno i više punionica u ovakvom okruženju nepotrebno i uz to nepovoljno postavljeno u prostoru. Kod treće simulacije vidi se povećanje u vremenu zauzetosti punionica što je dobra naznaka u kontekstu iskorištenja objekta. Međutim, iz tablice 5.3. također se može vidjeti da je upravo u trećoj simulaciji vrijeme u redu čekanja vozila bilo najveće što upućuje na nedostupnost električnih punionica. Ipak, uzevši u obzir veliku razliku u broju punionica između prve, druge i treće simulacije, iznos vremena u redu čekanja u trećoj simulaciji nije toliko značajan, a zauzetosti punionica su ravnomjerno raspoređene između navedene dvije. U četvrtoj i petoj simulaciji generirane su redom 3 i 4 punionice, a vrijednosti vremena zauzetosti u rezultatima tih simulacija upućuju na manju iskorištenost objekata. Kada se tome doda činjenica da je vrijeme zauzetosti u obje simulacije dobiveno od samo 1 punionice, jasno je da to nisu optimalne brojke potrebnih punionica. Zaključak je da su u ovakvom kontekstu dovoljne samo 2 električne punionice ili eventualno 3, ali takve da su optimalno raspoređene u prostoru i manjeg kapaciteta kako bi se ravnomjerno rasporedilo opterećenje sustava.

U grafu 5.3. prikazani su rezultati o vremenima rada benzinskih stanica. Broj stanica je kroz simulacije postupno smanjivan za 1 krenuvši od 5 kako je vidljivo u tablici 5.1. Interesantno je primijetiti da se vrijeme rada benzinskih stanica smanjivalo kako je njihov broj u simulacijama padao. Zauzetosti benzinskih stanica su u svim simulacijama ove skupine zanemarive što se može pripisati prirodi procesa točenja goriva koji traje prilično kratko, dok su kapaciteti stanica relativno veliki i broj generiranih vozila relativno mali. Također, iz tablice 5.3. može se povući poveznica s brojem stanica u prostoru. Naime, što je manji broj generiranih stanica to su vozila više provela u stanju putovanja jer je i



Slika 5.2. Vremena rada električnih punionica

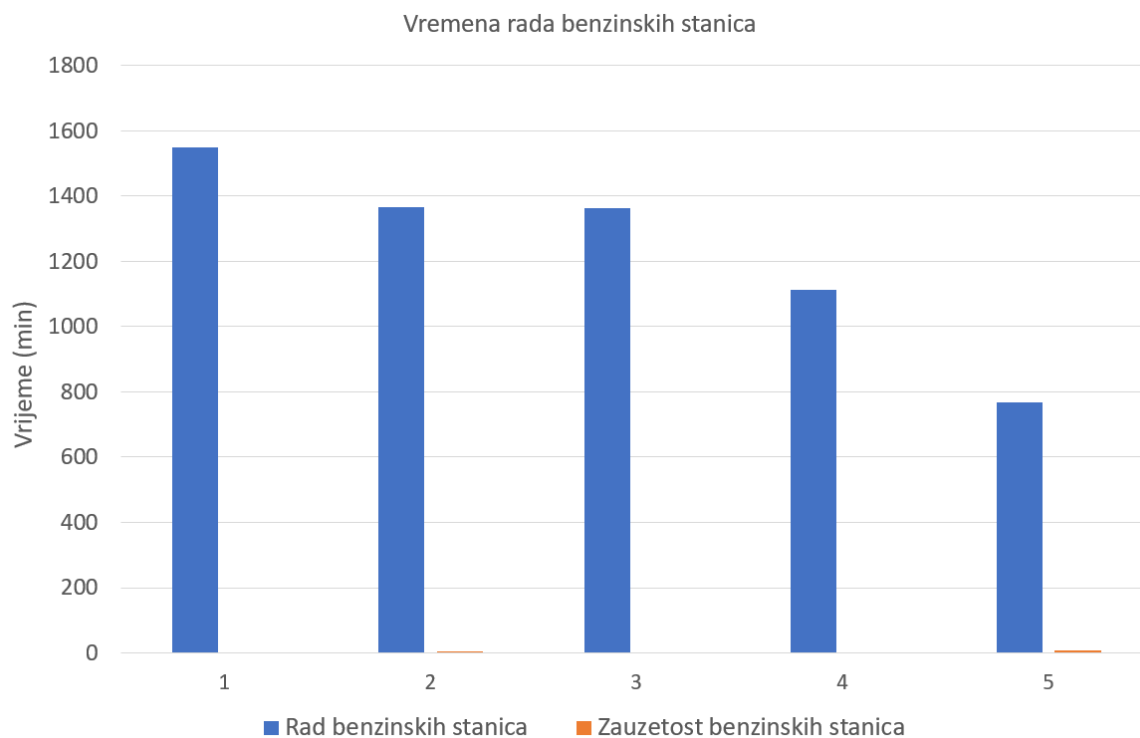
najbliža stanica vjerojatno bila udaljenija u usporedbi sa slučajem kada je broj stanica veći. Također, pregledom podataka o svakoj zasebnoj stanici za svaku simulaciju ustanovljeno je da su vremena punjenja uniformno raspodijeljena po stanicama što upućuje na kvalitetnu distribuciju u prostoru. U ovakvom slučaju teško je odrediti optimalan broj benzinskih stanica jer nema rezultata koji odskoču od ostalih. Zaključak je da je potrebno izvršiti dodatne simulacije s većim brojem agenata vozila na većem području.

Tablica 5.3. Usporedba rezultata agenata vozila

Parametri	1.	2.	3.	4.	5.
Ukupno vrijeme punjenja (min)	3236,25	2973,94	3228,55	2945,84	2912,05
Ukupno vrijeme putovanja (min)	173786,14	173348,18	176918,82	182758,32	194255,93
Ukupno vrijeme čekanja u redu (min)	21,6	0,83	25,32	13,34679103	1,47

5.3. Diskusija

Dobiveni rezultati simulacija dokazuju da je važno dobro isplanirati infrastrukturu i da je raspored energetske resursa u njoj bitan za optimalno funkcioniranje sustava. Detaljnim dorađivanjem i podešavanjem parametara agenata tj. njihovih vrijednosti mogu se dobro aproksimirati elementi prometne infrastrukture pa se model svakako može pri-



Slika 5.3. Vremena rada benzinskih stanica

mjeniti u prometnom planiranju kao optimizacijski alat. Rezultati također ukazuju na važnost načina izvođenja samih simulacija i ulaznih vrijednosti jer je u konačnici to ono o čemu rezultati dobrim dijelom ovise. Konkretni primjer je raspored kretanja vozila na prometnicama u različitim periodima dana. U simulacijama su ti periodi određeni vlastitim iskustvom autora proizvoljno i općenito su prihvaćeni kao točni za primjer grada Zagreba, dok u nekim drugim specifičnim situacijama isti periodi potencijalno ne bi bili dobre ulazne vrijednosti i time bi rezultati simulacija bili nevjerodostojni.

Jedna od slabih točaka modela je brzina izvođenja simulacija, a konkretno, izračunavanje ruta pri početku kretanja agenata vozila. Iako je ovaj aspekt uvelike poboljšan raznim metodama optimizacije, i dalje ima prostora za napredak. Nadalje, iako je u početku planirano modeliranje prometnica po uzoru na stvarno stanje s visokom razinom detalja i mogućnošću upravljanja svakim pojedinim raskrižjem, pokazalo se da to zbog kompleksnosti i trajanja procesa izlazi iz okvira rada. Međutim, takav pristup unio bi novu dimenziju detalja u rad i omogućio bolje upravljanje prometnom infrastrukturom u svim mogućim situacijama.

Za dobivanje što vjernijih rezultata, u simulacije je potrebno uključiti što više poda-

taka i čimbenika iz stvarnog svijeta koji se mogu dobiti jedino proučavanjem i analizom postojećih sustava i korištenjem aproksimativnih modela u sličnim scenarijima. Jedan od važnih čimbenika koji u praktičnom dijelu rada nije implementiran zbog kompleksnosti i nedostupnosti podataka je analiza elektrodistribucijske mreže. Kako bi se uopće omogućilo postavljanje električnih punionica potreban je pristup mreži i osiguranje dovoljne količine energije na dotičnim mjestima za opskrbu objekata. To podrazumijeva da se pri modeliranju u obzir uzimaju trase elektroenergetske mreže i postojeća čvorišta koja imaju dovoljne kapacitete ili potencijalna buduća čvorišta koja se planiraju osvariti. Navedeno je ostavljeno na razmišljanje s potencijalnom za buduće radove slične tematike ili šireg opsega.

6. Zaključak

Optimizacija prometne infrastrukture ključan je faktor u elektrifikaciji prometa i poboljšanja uvjeta na prometnicama. U ovom radu analizirani su različiti aspekti iz stvarnog svijeta koji utječu na distribuciju benzinskih stanica i električnih punionica te je opisano kako pristupiti problematici planiranja prometne infrastrukture, uzimajući istovremeno u obzir rastuće trendove i potrebu za digitalizacijom integracije električnih vozila.

U kontekstu ovog rada izrađeno je programsko rješenje u obliku AnyLogic modela prometne infrastrukture kojim se mogu dobiti vizualni i kvantitativni rezultati u kontekstu kvalitete distribucije benzinskih stanica i električnih punionica u urbanim i suburbanim sredinama. Ključan faktor za dobivanje tih rezultata su ponovljene simulacije u različitim scenarijima i s raznolikim vrijednostima parametara. Njihovim podešavanjem, što uključuje promjene lokacija i broja prije navedenih objekata te broja vozila na cestama, može se dobiti detaljan uvid u prometni sustav i njegove povezane elemente. To podrazumijeva odgovore na pitanja gdje su najčešća zagušenja, koje su najtraženije lokacije, koliko je ukupno vremena potrošeno na punjenje vozila i čekanje u redu. Ovakav pristup planiranju prometne infrastrukture može imati važnu ulogu u pravovremenoj identifikaciji ključnih točaka i problema koji pri spomenutim procesima mogu nastati.

Postoje mnogi načini i smjerovi u kojima se može krenuti dalje u razvoj ovog rješenja, a kao prvotno proširenje opsega projekta mogu se dodati agenti za upravljanje cijenama resursa na stanicama i punionicama zbog upravljanja procesima ponude i potražnje. U budućim istraživanjima također je preporučeno da se uzme veće područje u obzir s još više agenata i kompleksnijim procesima donošenja odluka te implementacija algoritama za optimizaciju upravljanja događajima i analizu podataka. Realizacija takvog rješenja na visokoj razini zahtijeva multidisciplinarni pristup i ozbiljno shvaćanje optimizacijske problematike.

Literatura

- [1] V. Iulia i S. Loránd, “A brief history of electric vehicles.” *Journal of Computer Science & Control Systems*, sv. 15, br. 1, 2022.
- [2] D. Santini, “Electric vehicle waves of history: lessons learned about market deployment of electric vehicles”, u *Electric vehicles-The benefits and barriers*. Citeseer, 2011.
- [3] J. Deng, C. Bae, A. Denlinger, i T. Miller, “Electric vehicles batteries: requirements and challenges”, *Joule*, sv. 4, br. 3, str. 511–515, 2020.
- [4] P. K., “15 električnih automobila s najvećim dometom (u 2024.)”, <https://postanivozac.com/blog/elektricni-automobili-s-najvecim-dometom>, 2024., [mrežno; stranica posjećena: prosinac 2024.].
- [5] “Round trip efficiency of battery energy systems worldwide 2023, by device”, <https://www.statista.com/statistics/1423012/efficiency-of-battery-energy-systems/#:~:text=The%20efficiency%20of%20lithium%2Dion,in%20the%20device%20is%20lost>, [mrežno; stranica posjećena: siječanj 2025.].
- [6] “Where the energy goes: Gasoline vehicles”, <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>, [mrežno; stranica posjećena: prosinac 2024.].
- [7] “Emisije co2 u prometu eu-a: Činjenice i brojke”, <https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20190313STO31218/emisije-co2-u-prometu-eu-a-cinjenice-i-brojke>, 2019., [mrežno; stranica posjećena: prosinac 2024.].
- [8] S. Vrbanus, “Europski zeleni plan predviđa klimatsku neutralnost 2050. godine, a aute bez emisija uvjetuje 2035.” <https://www.bug.hr/ekologija/europski-zeleni->

plan-predvidja-klimatsku-neutralnost-2050-godine-a-aute-bez-22365, 2021., [mrežno; stranica posjećena: siječanj 2025.].

- [9] A. Beaudet, F. Larouche, K. Amouzegar, P. Bouchard, i K. Zaghbi, “Key challenges and opportunities for recycling electric vehicle battery materials”, *Sustainability*, sv. 12, br. 14, str. 5837, 2020.
- [10] F. Leach, G. Kalghatgi, R. Stone, i P. Miles, “The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines”, *Transportation Engineering*, sv. 1, str. 100005, 2020.
- [11] D. Goreta, “Broj e-punonica raste, no ključni igrači priznaju probleme”, <https://hr.bloombergadria.com/green/zelena-tehnologija/61356/rast-broja-e-punonica-u-hrvatskoj-no-kljucni-igraci-suoceni-s-izazovima/news/>, 2024., [mrežno; stranica posjećena: listopad 2024.].
- [12] Poslovni.hr, “Hrvati dnevno provedu više od 24,3 minute u vožnji te prijeđu 9,3 kilometra”, <https://www.poslovni.hr/hrvatska/hrvati-dnevno-provedu-vise-od-243-minute-u-voznji-te-prijeju-93-kilometra-297206>, 2015., [mrežno; stranica posjećena: studeni 2024.].
- [13] J. J. Moreno Escobar, O. Morales Matamoros, R. Tejeida Padilla, I. Lina Reyes, i H. Quintana Espinosa, “A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities”, *Sensors*, sv. 21, br. 21, str. 6978, 2021.
- [14] C. Guille i G. Gross, “A conceptual framework for the vehicle-to-grid (v2g) implementation”, *Energy policy*, sv. 37, br. 11, str. 4379–4390, 2009.
- [15] E. Bertino, “Data security and privacy in the iot.” u *EDBT*, sv. 2016, 2016., str. 1–3.
- [16] <https://download.geofabrik.de/>, [mrežno; stranica posjećena: studeni 2024.].
- [17] https://www.zagreb.hr/UserDocsImages/001/SLJZG23_web.pdf, [mrežno; stranica posjećena: listopad 2024.].

Sažetak

Višeagentski sustav za simulaciju utjecaja električnih vozila na prometnu infrastrukturu

Mateo Sergio

U ovom radu predstavljen je koncept električnih vozila i porast u njihovoj popularnosti tijekom povijesti. Dan je kratki osvrt na njihov način rada i procese koji su potrebni za njihovu uspješnu integraciju u prometnu infrastrukturu. To uključuje planiranje i projektiranje infrastrukture u skladu s trendom porasta električnih vozila na prometnicama. Za navedeno je istraženo idejno rješenje koje u obzir uzima parametre iz stvarnog svijeta, a istovremeno vozače potiče na korištenje pogodnosti koje elektrifikacija prometa pruža. Kontekst rada uključuje i praktični projekt čiji je cilj bio izgraditi model temeljen na višeagentskom sustavu i čijom je simulacijom moguće analizirati i odrediti stratešku distribuciju lokacija benzinskih stanica i električnih punionica u urbanim i suburbanim područjima. Model i sve potrebno za njegovu implementaciju opisano je u poglavlju 4., a rezultati i analiza izneseni su u poglavlju 5.

Ključne riječi: električna vozila; prometna infrastruktura; višeagentski sustav; simulacija;

Abstract

Multi-agent system for simulating the impact of electric vehicles on traffic infrastructure

Mateo Sergio

This paper presents the concept of electric vehicles and the rise in their popularity throughout history. A brief review of their way of working and the processes required for their successful integration into the transport infrastructure is given. This includes planning and designing the infrastructure in accordance with the trend of increasing number of electric vehicles on the roads. For the aforementioned, a conceptual solution was researched that takes into account parameters from the real world, and at the same time encourages drivers to use the benefits that the electrification of traffic provides. The context of the work also includes a practical project whose goal was to build a model based on a multi-agent system and through whose simulation it is possible to analyze and determine the strategic distribution of the locations of gas stations and electric charging stations in urban and suburban areas. The model and everything necessary for its implementation is described in the chapter 4., and the results and analysis are presented in the chapter 5.

Keywords: electric vehicles; transport infrastructure; multi-agent system; simulation