

# Sistemska dinamika u funkciji unaprjeđenja održivog urbanog transporta

---

Jašić, Tea

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of economics Split / Sveučilište u Splitu, Ekonomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:124:121119>

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

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

Repository / Repozitorij:

[REFST - Repository of Economics faculty in Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
EKONOMSKI FAKULTET**

**DIPLOMSKI RAD**

**SISTEMSKA DINAMIKA U FUNKCIJI UNAPRJEĐENJA  
ODRŽIVOG URBANOG TRANSPORTA**

**Mentor:**

**izv. prof. dr. sc. Marko Hell**

**Studentica:**

**univ. bacc. oec. Tea Jašić**

**Split, rujan 2023.**

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

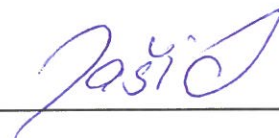
Ja, Tea Jašić,

(ime i prezime)

izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je navedeni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja na objavljenu literaturu, što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio navedenog rada nije napisan na nedozvoljeni način te da nijedan dio rada ne krši autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije korišten za bilo koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Split, 2023. godine

Vlastoručni potpis : \_\_\_\_\_



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Problem istraživanja.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Predmet istraživanja .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Ciljevi istraživanja .....</b>	<b>9</b>
<b>1.4. Hipoteze istraživanja.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. Metode istraživanja .....</b>	<b>10</b>
<b>1.6. Doprinos istraživanja .....</b>	<b>12</b>
<b>1.7. Struktura rada.....</b>	<b>12</b>
<b>2. URBANI TRANSPORTNI SUSTAV I ODRŽIVI RAZVOJ .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Održivi urbani razvoj.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Urbani transportni sustav .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Problematika urbanog transportnog sustava .....</b>	<b>18</b>
<b>3. URBANO PODRUČJE KAO KOMPLEKSNI ADAPTIVNI SUSTAVI.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. Simboli sistemske dinamike .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. Karakteristike kompleksnih adaptivnih sustava .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3. Sistemska dinamika i urbani transportni sustav.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4. Programski paket „Vensim“ .....</b>	<b>31</b>
<b>4. ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA TRANSPORTNOG SUSTAVA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. Elementi transportnog sustava .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. Pregled podataka o transportnom sustavu .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3. Identifikacija glavnih problema i izazova u vezi s održivim razvojem i transportom .....</b>	<b>43</b>
<b>5. RAZVOJ MODELA SISTEMSKE DINAMIKE .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1. Opis modela i identifikacija ključnih varijabli .....</b>	<b>46</b>
5.1.1. Ekonomski podsustav .....	47
5.1.2. Društveni podsustav .....	49
5.1.3. Podsustav okoliša .....	51
5.1.4. Podsustav transportne infrastrukture .....	53
<b>5.2. Izrada sistemsko dinamičkog modela urbanog transportnog sustava .....</b>	<b>55</b>
<b>6. ANALIZA I INTERPRETACIJA REZULTATA .....</b>	<b>58</b>
<b>6.1. Scenario analiza .....</b>	<b>58</b>
<b>6.2. Analiza utjecaja varijabli na transportni sustav i održivi razvoj .....</b>	<b>61</b>
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>63</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>64</b>

<b>POPIS GRAFIČKIH PRIKAZA .....</b>	<b>70</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>71</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>72</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>73</b>

# 1. UVOD

## 1.1. Problem istraživanja

S obzirom da sve veći udio svjetske populacije živi u gradovima, pitanja vezana uz urbani prijevoz su od sve veće važnosti za podršku mobilnosti putnika u velikim urbanim aglomeracijama. Prijevoz u urbanim područjima vrlo je složen zbog količine i raznolikosti prometa, kao i mnoštva polazišta i odredišta (Rodrigue, 2020). Globalni prijevoz povećava se svake godine i procjenjuje se da će porasti za 60% do 2050. (Centlweski i Warchol, 2022).

Ljudske aktivnosti rezultirale su ogromnim emisijama stakleničkih plinova i uzrokovale ozbiljne klimatske probleme. U te aktivnosti velikim dijelom spada i globalni prijevoz koji ima značajan udio u emisiji stakleničkih plinova. U travnju 2016. mnoge su zemlje diljem svijeta službeno potpisale Pariški sporazum, koji je razjasnio dugoročni cilj zadržavanja porasta globalne prosječne temperature ispod 2°C i nastojanja da se porast temperature ograniči na ispod 1,5°C. Kao glavno okupljalište industrijskih i gospodarskih aktivnosti, gradovi su odgovorni za 80% globalnih emisija stakleničkih plinova. Kontinuirano širenje razmjera urbanizacije rezultiralo je kontinuiranim rastom ljudske potražnje za energijom i resursima, što donosi socio-ekonomski razvoj i poboljšava životni standard stanovnika, ali također negativno utječe na klimu i okoliš. To pokazuje da je urbanizacija glavni pokretač emisije ugljika (Gao i Pan, 2022).

S druge strane, osim problema onečišćenja zraka uzrokovanim povećanim brojem vozila, veliki problem u urbanim aglomeracijama predstavlja i problem prometnih gužvi. Prometne gužve svakodnevica su u gradovima gdje broj osobnih vozila kontinuirano i naglo raste.

U usporedbi s osobnim vozilima, javni prijevoz ima očite prednosti uzimajući u obzir okupaciju cestovnih resursa po glavi stanovnika i potrošnju energije po glavi stanovnika. Javni transport postao je efektivno transportno sredstvo urbanizacije i održivog razvoja urbanog transportnog sustava (Jašić, 2021). Jedan od često spomenutog načina rješavanja problema u urbanom transportnom sustava jest stavljanje prioriteta na razvoj javnog prijevoza. Većina dostupne literature na temu održivog razvoja transportnih sustava naglasak stavlja upravo na fokusiranje na javni prijevoz. To se postiže značajnijim investicijama u cestovnu mrežu i cjelokupni javni prijevoz.

Postoji veliki broj istraživanja koja se bave problematikom održivog razvoja urbanog transporta. Fokus većine njih jesu upravo gore navedeni problemi, a koji se tiču emisije štetnih plinova, zagušenja cesta i nedovoljnog iskorištavanja javnog prijevoza. Rješavanjem tih problema unaprijeđuje se održivi razvoj urbanog transporta. U nastavku su navedeni radovi koji su obradili gore navedenu problematiku i koji su polazište za problem istraživanja Diplomskog rada.

U radu „*Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review*“

detaljno je istraženo djelovanje različitih vrsta vozila na emisiju štetnih plinova te količinu izloženosti onečišćenju zraka. Istraživanjem se došlo do zaključka kako osobni automobili imaju najveći utjecaj na zagađivanje zraka, kao i da putnici koji koriste osobne automobile imaju najveću izloženost onečišćenju zraka (Cepeda i sur., 2016). S druge strane, u knjizi „Reducing Air Pollution from Urban Transport“ detaljno se obrađuje problematika urbanog zagađenja okoliša uzrokovanog pretjeranom emisijom štetnih plinova iz vozila. U radu se evaluiraju različite opcije i mogućnosti smanjenja zagađenja okoliša jer se smatra da je smanjenje zagađenja okoliša ključno za održivi urbani razvoj (Gwilliam i sur., 2004).

Rad „*The sustainable mobility-congestion nexus: a co-benefits approach to finding win-win solutions*“ (Portugal-Periera i sur., 2013) istražuje različite opcije koje u vezu stavljaju zagušenje cesta i održivi razvoj transporta. Istraživanje je utemeljeno na evaluaciji mogućnosti koje stoje na raspolaganju za smanjenje zagušenja cesta kako bi se unaprijedio urbani razvoj transporta. Rad „*Ameliorating Urban Traffic Congestion for Sustainable Transportation*“ (Busari i sur., 2021) je procijenio učinke prometnih zagušenja, s fokusom na ekonomski i ekološki učinak. Dodatno su procijenjene dugoročne i kratkoročne mjere za smanjenje zagušenja cesta kako bi se došlo do unaprjeđenja održivog urbanog transporta.

Rad „*Public Transportation and Sustainability: A review*“ analizira odnos javnog prijevoza i održivog urbanog transporta. Povećanje korištenja javnog prijevoza vidi se kao rješenje u unaprjeđenju urbanog razvoja. U radu se nude sugestije za planiranje, izgradnju i istraživanje javnog prijevoza u svrhu poboljšanja urbanog transporta (Miller i sur., 2016). Rad „*Quality approach to the sustainability of public transport*“ (Susniene, 2011) proučava javni prijevoz u kontekstu nacionalnog, gospodarskog, društvenog i održivog razvoja koji može proizvesti pozitivne i negativne učinke na okoliš i kvalitetu života ovisno o stupnju razvoja i iskazanim preferencijama.

Na temelju prethodno spomenutih istraživanja definiran je problem istraživanja ovog rada, a koji polazi od nedovoljno razvijenog održivog urbanog transporta. Svaki grad u svijetu se u manjoj ili većoj mjeri suočava s gore navedenim i prethodno istraženim problemima. Ono što je bitno kod donošenja odluka u sferi problema urbanog transporta jest odgovarajući alat koji će pružiti detaljne i točne informacije koje mogu biti podloga za poduzimanje mjera. U Diplomskom radu će biti predstavljen model transportnog sustava, prikazan metodom sistemske dinamike, a koji će predstavljati gore spomenuti alat za donošenje strateških odluka u sferi urbanog transporta. Model će u radu proći kroz nekoliko scenario analiza koje pokazuju efekt potencijalnih promjena transportnog sustava na urbanu održivost. Problemi koji će se posebno obrađivati u ovom radu jesu negativan utjecaj trenutnog trenda povećanja broja osobnih vozila, kao i utjecaj nedovoljno razvijene infrastrukture javnog prijevoza urbanih područja na održivi urbani razvitak.

Sistemska dinamika jest metoda koja omogućava promatranje sustava kao cjeline kroz vremensku dinamiku. Ova metoda je pogodna za analizu transportnog sustava jer je transportni sustav, kako bi se uvidjeli uzroci problema, potrebno razmatrati kao cjelinu, sa svim podsustavima koji na njega utječu te svim uzročno posljedičnim vezama među sastavnim dijelovima transportnog sustava.

U radu će se korištenjem softverskog programa Vensim izraditi sistemsko dinamički model transportnog sustava koji će obuhvatiti četiri aspekta koja, temeljem prethodno analiziranih istraživanja, zajedno predstavljaju cjelinu urbanog transportnog sustava. Dakle, sistemskom dinamikom bit će predstavljen transportni sustav koji sadrži društveni aspekt, ekonomski aspekt, okolišni aspekt te aspekt korištenja transportne infrastrukture. Prikazom takvog modela omogućit će se uvid u realnu situaciju transportnog sustava i potencijalne ishode takve situacije kroz vremensku dinamiku. U radu će biti prikazano nekoliko scenarija koji mogu imati potencijalan utjecaj na promjenu aktualnih problema koji se tiču transportnog sustava. Ti problemi vezani su uz zasićenje cesta, povećan udio štetnih plinova u zraku, nerazvijenu cestovnu infrastrukturu, nedovoljne investicije u javni prijevoz i povećan broj osobnih vozila po glavi stanovnika. Svaki od scenarija bit će analiziran, a rezultati analize mogu poslužiti kao podloga za donošenje odluka u svrhu unaprjeđenja održivog urbanog transporta.

## **1.2. Predmet istraživanja**

U ovom Diplomskom radu potrebno je uključiti različite predmetne elemente koji će činiti strukturu rada. Ono što predstavlja bazu predmetne analize jest urbani održivi razvoj. Održivi urbani razvoj moguće je jednostavno definirati kao način iskorištavanja dostupnih resursa koji ima za cilj ostvarivanje ljudskih potreba, a uz istovremeno očuvanje okoliša. To za cilj ima ostvarivanje ljudskih potreba ne samo u sadašnjem vremenu, već i u budućnosti. Održivi urbani razvoj temelji se na tome da sve što je potrebno za preživljavanje i dobrobit direktno ili indirektno ovisi o našoj okolini (Smolčić, 2020).

Prema UCLA Sustainability Committe (2016) održivi urbani razvoj predstavlja integraciju zdravlja okoliša, socijalne jednakosti i ekonomske vitalnosti u svrhu stvaranja uspješnih, raznolikih i otpornih zajednica za sadašnje i buduće generacije.

Kao što je već definirano u problemu istraživanja, urbani promet s vremenom postaje sve složeniji. Ubrzano tempo razvoja gradova i složenost razvoja dovodi do brojnih komplikacija koje se tiču života u gradu (Ćosić, 2016).

Mobilnost i gradski prijevoz trenutno prolaze kroz dinamične promjene. U urbanim aglomeracijama nudi se veliki broj inovativnih usluga transporta. Međutim, potreba za zaštitom klime, promjene u demografskoj strukturi, promjene u vrijednostima i potrebama te tehnološke inovacije iz temelja mijenjaju urbane transportne sustave. Osigurati održiv i ekološki prihvatljiv urbani transportni sustav



predstavlja velike izazove za one koji imaju odgovornost za donošenje odluka koje se tiču urbanog prijevoza (Jakolin, 2022) . Komplikacije i problemi koji se sve češće pojavljuju u gradovima mogu se ublažiti fokusiranjem na prometnu politiku održivog razvoja prometa. Kako bi bilo moguće donijeti adekvatnu prometnu politiku veoma je važno pomno planirati i analizirati urbane transportne sustave.

Analizu urbanih transportnih sustava, koji svojom strukturom odgovaraju kompleksnim adaptivnim sustavom, moguće je odraditi korištenjem metode systemske dinamike. Systemska dinamika predstavlja metodu koja u obzir uključuje cjelokupan sustav, njegove varijable te odnose koje one imaju jedna na drugu. Tako je kod urbanog transportnog sustava potrebno obuhvatiti cijeli sustav te u obzir uzeti sve uzročno - posljedične veze koje čine strukturu ovog sustava. Urbani transportni sustav smatra se kompleksnim adaptivnim sustavom (CAS) jer se sastoji od velikog broja pojedinačnih dijelova. Također, ti pojedinačni dijelovi u sustavu slijede jednostavna pravila te ne postoji vođa ili pojedinac koji koordinira akcije drugih već se sustav prilagođava promjenama elemenata sustava. Prema Project Guts (2006) ono što se događa u interakciji između dijelova sustava predstavlja obrasce koji se pojavljuju.

Istražujući dostupnu literaturu, došlo se do zaključka da se kao jedan od najutjecajnijih faktora za onečišćenje zraka spominje se povećanje broja vozila na cestama.

Promatrajući statistiku vezanu globalni transportni sustav može se doći do sljedećih zaključaka:

- Vozilo koje u prosjeku prelazi 10 km/L i 20.000 km godišnje emitira otprilike 4.6 metričkih tona CO<sub>2</sub> godišnje.
- Posljednjih godina osobni automobili i kamioni uzrokuju više od 80 posto štetnih emisija plinova u prometu.
- U 2016. promet je nadmašio proizvodnju električne energije kao sektor koji najviše zagađuje okoliš.
- Smatra se da vozila proizvode oko jedne trećine ukupnog onečišćenja zraka u najrazvijenijim državama svijeta (Bazis, 2021).

S obzirom na gore navedene podatke, većina dosadašnjih istraživanja na temu održivog razvoja transportnog sustava predlaže smanjenje broja vozila kao potencijalno rješenje za smanjenje emisije stakleničkih plinova.

Brojna prethodna istraživanja na temu problema zasićenja urbanih cesta kao primarno rješenje tog problema ističu stavljanje prioriteta na javni prijevoz. Pretpostavka je da ukoliko se putnike motivira da koriste javni prijevoz češće od osobnih vozila da će doći do određenog oslobađanja cestovnog prometa (Tatra-Yug, 2021).

Ono u čemu javni prijevoz ima prednost u odnosu na korištenje osobnih vozila jest manja okupacija cestovnih resursa po glavi stanovnika i potrošnja energije po glavi stanovnika (Xue i sur., 2020). Upravo iz tih razloga postoji i pretpostavka o rješavanju problema zasićenja cesta stavljanjem prioriteta na korištenje javnog prijevoza od strane građana.

Sve češće se smatra da je jedan od najefikasnijih načina za poticanje građana na korištenje javnog prijevoza ulaganje u infrastrukturu (Kadyraliev i sur., 2022). Ova tematika je potaknula brojne autore na istraživanja koja su analizirala utjecaj količine investicija u urbani transport na stvarno korištenje javnog prijevoza od strane građana. Prema „The future is public transport“ (2021) pretpostavlja se da investicije u urbani transport svojim izravnim učinkom na javni prijevoz mogu riješiti i druge velike probleme urbanih aglomeracija, a koje se tiču transportnog sustava, poput zasićenja cesta i onečišćenja zraka. Upravo rješavanjem tih problema može se doći do željenog urbanog održivog razvoja.

Istraživanja na temu analize utjecaja investicija u konstrukciju cesta na zasićenost cesta su podijeljenog mišljenja. Neka su došla do zaključka da investicije u konstrukciju cesta smanjuju zasićenost cesta zbog veće površine cesta, dok druga istraživanja pokazuju da investicije u konstrukciju cesta dovode samo do povećane potražnje za transportom što samo povećava zasićenje cesta (Wang i sur., 2021).

U ovom Diplomskom radu predmetne elemente predstavljat će ključne varijable modela urbanog transportnog sustava. Te varijable navedene su u nastavku uz njihovo objašnjenje temeljeno na pregledu dostupne literature:

### **1) Rast urbane populacije**

U modelima transportnog sustava koji su dostupni u člancima „*A System Dynamics Analysis of Urban Development Paths under Carbon Peaking and Carbon Neutrality Targets: A Case Study of Shanghai*“, „*A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System*“ i „*A system dynamics model for urban sustainable transportation planning*“ može se primijetiti da rast populacije ima pozitivan utjecaj na rast BDP - a po glavi stanovnika te samim time i neizravan utjecaj na varijablu vlasništvo vozila koja će biti jedna od bitnijih varijabli u modelu s obzirom da o toj varijabli direktno ovisi emisija štetnih plinova, kao i postotak zasićenja cesta.

## **2) Stopa dijeljenja javnog prijevoza**

Javni prijevoz predstavljen je kao potencijalno rješenje problema urbanog transportnog prijevoza u većem broju članaka. Konkretno, u člancima „*Developing a system dynamics approach for CNG vehicles for low-carbon urban transport: a case study* „ i „*A review of system dynamics models applied in transportation*„ mogu se uočiti modeli sa svim mogućim opcijama urbanog prijevoza. Istaknuto je povećanje broja autobusa, željeznice i električnih taxi vozila kao varijable koje utječu na porast korištenja javnog prijevoza. Prema modelu iz članka „*A System Dynamics Analysis of Urban Development Paths under Carbon Peaking and Carbon Neutrality Targets: A Case Study of Shanghai*“ određeno je da povećanje broja autobusa, uzimajući u obzir smanjenje broja ostalih vozila, smanjuje zasićenje cesta.

## **3) BDP**

U modelima u člancima „*A review of system dynamics models applied in transportation*“ i „*System dynamics model of CO2 emissions from urban transportation in Chiang Mai city*“ uočljiva je direktna negativna veza između povećanja prometnih zagušenja/gužvi/zasićenja na stopu rasta BDP - a. S druge strane, stopa rasta BDP - a utječe na BDP koji ima pozitivnu vezu s BDP - om po glavi stanovnika, a koja potom ima djelovanje na prethodno spomenuto vlasništvo vozila i emisiju štetnih plinova i tako u krug. Na ovaj način obuhvaćene su sve varijable modela u jedan povezani sustav sa svim svojim uzročno posljedičnim vezama.

## **4) Cestovna kilometraža**

U članku „*System Dynamics Analysis of the Relationship between Transit Metropolis Construction and Sustainable Development of Urban Transportation - Case Study of Nanchang City, China*“ postoji varijabla koja prikazuje cestovnu kilometražu. Na nju utječu investicije u cestovnu mrežu koje su direktno ovisne o BDP - u. Cestovna kilometraža, odnosno duljina cestovne mreže preduvjet je za određivanje zasićenosti cesta. Ukoliko su investicije u cestovnu kilometražu male, i cestovna kilometraža bit će mala te će uzrokovati veće zasićenje cesta.

### 1.3. Ciljevi istraživanja

Temeljem prethodno elaboriranog problema i predmeta istraživanja postavljaju se sljedeći glavni istraživački ciljevi:

Objedinjavanjem prethodnih istraživanja, razviti sistemsko dinamički model sustava više razine koji će omogućiti sagledavanje ponašanja pojedinačnih podsustava uključujući i njihovu međusobnu interakciju, a sve u svrhu doprinosa održivog upravljanja urbanom cjelinom te omogućavanja adekvatnog alata za potporu odlučivanju.

U tu svrhu bit će potrebno ostvariti sljedeće podciljeve:

- Istražiti kako broj vozila po glavi stanovnika utječe na probleme onečišćenja zraka i prometnih gužvi.
- Istražiti koliki je utjecaj rasta BDP - a na investicije u urbani transport.
- Istražiti koliko javni prijevoz može rasteretiti cestovnu mrežu i poboljšati uvjete za održivi razvoj transportnog sustava.

### 1.4. Hipoteze istraživanja

Sukladno definiranom problemu, predmetu i ciljevima istraživanja, u ovom Diplomskom radu bit će predstavljen sistemsko - dinamički model utjecaja transportnog sustava na održivi urbani razvoj. Sistemskom dinamikom odradit će se analiza različitih scenarija, a koja će za cilj imati prihvaćanje ili odbacivanje hipoteza navedenih u nastavku.

*H1.: Primjena metodologije sistemske dinamike u kontekstu održivog razvoja urbanog transporta omogućit će izradu cjelovitog modela koji će dati nova saznanja o povratnim utjecajima među: ukupnog broja vozila, razine štetnih plinova, udjela investicija u urbanom transportu u BDP - u, razvijenosti cestovne mreže i zasićenosti cesta.*

Ukoliko se ukupan broj vozila u urbanim aglomeracijama smanji u odnosu na trenutno stanje, to će rezultirati pozitivnim promjenama vezanim za održivi urban razvoj. Korištenjem metode sistemske dinamike, može se dokazati da će smanjenje ukupnog broja vozila u urbanim aglomeracijama tijekom vremena dovesti do smanjenja emisije štetnih plinova u zraku. Nadalje, povećanje udjela BDP-a koji se ulaže u urbani transport ima pozitivan utjecaj na korištenje javnog prijevoza. Investicije u urbani transport poboljšavaju kvalitetu javnog prijevoza i osiguravaju dovoljnu dostupnost usluge u skladu s potražnjom.

Metodom sistemske dinamike moguće je dokazati da povećanje udjela investicija u urbani transport u regionalnom BDP-u pozitivno utječe na povećanje broja vozila koja se koriste za javni prijevoz, što rezultira povećanim korištenjem javnog prijevoza. Povećanje udjela BDP-a koji se ulaže u izgradnju cesta također ima pozitivan utjecaj na razvoj cestovne mreže. Investicije u izgradnju cesta potiču izgradnju novih cesta i povećanje ukupne cestovne kilometraže. Metodom sistemske dinamike moguće je dokazati da povećanje udjela investicija u izgradnju cesta u BDP-u povećava ukupnu cestovnu kilometražu. Povećanje cestovne kilometraže rasterećuje ceste i pozitivno utječe na smanjenje zasićenja cesta.

Sve gore navedeno sažeto je u postavljenoj hipotezi koja će biti dokazana kroz sljedeće metode istraživanja.

### **1.5. Metode istraživanja**

U ovom diplomskom radu koristit će se sljedeće metode.

- Metoda indukcije - Ova metoda predstavlja znanstvenu metodu koja se zasniva na analizi pojedinačnih činjenica kako bi se izveo sveobuhvatan zaključak. U Diplomskom radu ova metoda bit će zastupljena u analiziranju rezultata simuliranih scenarija modela urbanog transportnog sustava. Nakon što se na adekvatan način analiziraju rezultati simulacija i potvrde činjenice koje proizlaze iz te analize, bit će donesen zaključak koji obuhvaća sve te činjenice.
- Metoda dedukcije - Ova metoda predstavlja postupak raščlanjivanja složenih pojmova i zaključaka na manje i jednostavnije sastavne dijelove. U Diplomskom radu u prvom planu će biti model urbanog transportnog sustava koji se sastoji od velikog broja varijabli i kao takav predstavlja kompleksni adaptivni sustav. Ono što se ovim radom nastoji ostvariti jest raščlanjivanje tog složenog modela na podsustave koji su njegov sastavni dio kako bi se detaljnije analizirala različita područja koja čine jedan složeni sustav.
- Metoda analize - Ova metoda predstavlja postupak postupnog raščlanjivanja glavnog pojma na manje i jednostavnije dijelove u svrhu olakšavanja procesa istraživanja. U ovom Diplomskom radu ova će metoda biti korištena u raščlanjivanju pojmova koji se tiču urbanog transportnog sustava na manje dijelove koji su pogodni za analizu u svrhu rješavanja problema urbanog održivog razvoja.
- Metoda sinteze - Predstavlja postupak u kojem se od jednostavnijih misaonih činjenica dolazi do složenijih sudova i zaključaka. U ovom Diplomskom radu analizirati će se različiti problemi i

utjecajne varijable koje utječu na urbani transportni sustav. Spajanjem rezultata analiza tih problema moguće je riješiti glavni problem urbanog održivog razvoja.

- Metoda kompilacije - Predstavlja metodu kojom se preuzimaju sekundarni rezultati tuđih opažanja, stavova i zaključaka. U ovom Diplomskom radu koristit će se dostupna i adekvatna literatura koja obrađuje temu urbanog održivog razvoja i njegovog odnosa s urbanim transportnim sustavom. Fokus će biti na literaturi koja ima konkretne modele urbanih transportnih sustava izrađene metodom sistemske dinamike.
- Metoda deskripcije - Predstavlja metodu kojom se na jednostavan način opisuju različite činjenice, procesi i predmeti, bez znanstvenog tumačenja i objašnjavanja. Ova metoda će u Diplomskom radu biti korištena kod objašnjavanja uzročno - posljedičnih veza među varijablama. Te veze se mogu opisati samim pogledom na sustav te predstavljaju logičnu cjelinu.
- Metoda sistemske dinamike - Sistemska dinamika predstavlja metodu koja u obzir uključuje cjelokupan sustav, njegove varijable te odnose koje one imaju jedna na drugu (Zekić-Sušac, 2013). Najvažnija komponenta u korištenju sistemske dinamike jest vremenska komponenta koja ovu metodu čini jako korisnom za prediktivnu analitiku. Transportni sustav idealan je za modeliranje sistemskom dinamikom zbog složene konstrukcije te velikog broja među utjecajnih varijabli. U ovom diplomskom radu modelirat će se odnos urbanog transportnog sustava i održivog razvoja urbanog transporta.

## **1.6. Doprinos istraživanja**

Proučavajući dostupnu literaturu uočava se da je u određenoj mjeri zastupljena analiza utjecaja varijabli iz transportnog sustava na održivi razvoj primjenom metode systemske dinamike. Također, može se primijetiti da je dostupan veći broj radova koji diskutiraju o problemima urbanog prijevoza te varijablama koje su uključene u transportni sustav, kao i o njihovom međudjelovanju i utjecaju na urbani održivi razvoj. Ono što je manje pokriveno od radova koji se bave tematikom održivog razvoja transportnog sustava jest modeliranje cjelokupnog transportnog sustava koristeći systemsku dinamiku.

Ovaj diplomski rad, koji će za glavni cilj imati prikaz sistem dinamičkog modela transportnog sustava, bit će jedan od rijetkih istraživanja koja su na ovaj način obradila problematiku navedenu u prethodnim potpoglavljima. Rezultati dobiveni ovim istraživanjem mogu pomoći u znanstvenom pogledu u smislu ideje za provedbu istraživanja sa sličnom tematikom koristeći se drugim uzorkom. S druge strane, ovo istraživanje može biti korišteno kao pomoćni alat i potpora u donošenju strateških odluka u vezi problema sa urbanim transportnim sustavom. Također, bitno je naglasiti i društveni doprinos koji će ovaj rad imati. Obzirom da je u fokusu istraživanja ovog rada održivi razvoj, na temelju rezultata istraživanja pružit će se informacije koje za cilj imaju podizanje svijesti građana o potrebnim promjenama u svrhu unaprjeđenja održivog urbanog transporta.

## **1.7. Struktura rada**

Diplomski rad će se sastojati od 7 poglavlja. U prvom poglavlju bit će definirani problem i predmet istraživanja. Također, navest će se i ciljevi istraživanja, kao i istraživačke hipoteze koje će se u konačnici, nakon provedenog istraživanja, prihvatiti ili odbaciti. U uvodnom dijelu bit će navedene metode istraživanja korištene u radu te doprinos koji ovaj diplomski rad ima.

U drugom poglavlju predstaviti će se koncept i osnovni pojmovi vezani uz urbani transportni sustav i održivi razvoj. U ovom poglavlju, temeljeno na prethodnim istraživanjima, bit će predstavljena i aktualna problematika povezana sa urbanim transportnim sustavima i njihovim utjecajem na održivi razvoj.

U trećem poglavlju objasniti će se pojam metode systemske dinamike, od njezinih početaka pa sve do današnje primjene na stvarnim sustavima. Objasniti će se koncept i simboli metode systemske dinamike, kao i softverski paket „Vensim“ kojim se izrađuje model systemske dinamike u ovom diplomskom radu.

U četvrtom poglavlju napraviti će se osvrt na postojeće stanje urbanog transportnog sustava. Pregledati će se koji elementi predstavljaju sastavni dio urbanog transportnog sustava te će se izložiti aktualni podaci vezani uz relevantne elemente urbanog transportnog sustava. U konačnici, u ovom poglavlju iznijet će se

problemi u sferi transporta, a koji će biti baza za izradu modela systemske dinamike u softverskom paketu „Vensim“.

U petom poglavlju izraditi će se konkretan model u softverskom paketu „Vensim“. Model će biti detaljno opisan, uključujući sve njegove podsustave, varijable, uzročno - posljedične veze, metrike i formule.

U šestom poglavlju bit će obrađena analiza izvedenih simulacija modela predstavljenog u prethodnom poglavlju. U ovom poglavlju bit će analizirani scenariji koji mijenjaju stanje urbanog transportnog sustava te će se promatrati utjecaj važnih varijabli na transportni sustav i održivi razvoj. U ovom poglavlju bit će i prihvaćene ili odbačene hipoteze predstavljene u uvodnom poglavlju.



## 2. URBANI TRANSPORTNI SUSTAV I ODRŽIVI RAZVOJ

### 2.1. Održivi urbani razvoj

Održivost je veoma popularna riječ kada je u pitanju urbani razvoj. Razlog tome jest u tome što postoji zabrinutost da buduće generacije možda neće imati pristup istim resursima koji su dostupni sada. Održivost ima brojne definicije, a jedna od njih jest da je održivost održavanje zahtjeva sadašnjeg stanovništva bez ugrožavanja zahtjeva budućeg stanovništva (Ruggerio, 2021).

Prema „Study Smarter“ (2021) održivi urbani razvoj predstavlja gradsko korištenje resursa i prostora na način koji zadovoljava potrebe njegovih stanovnika u sadašnjosti bez negativnog utjecaja na potrebe stanovnika u budućnosti. Ova metoda urbanog razvoja ima za cilj minimizirati štetu okoliša uz očuvanje resursa u najvećoj mogućoj mjeri te uz prelazak na obnovljive izvore gdje je to moguće.

Glavne komponente održivog urbanog razvoja su ekološka, društvena i ekonomska. Karakteristike svake od ovih komponenti sastavljene su od jedinstvenih izazova i rješenja grada. Međutim, fokusiranjem na ove komponente, gradovi mogu postići održive uvjete.

Primarni razlog važnost održivog urbanog razvoja jest taj što gradovi i mjesta troše mnoge resurse, osobito ako doživljavaju brzu urbanizaciju i urbani rast. Zbog toga je ekološki otisak gradova vrlo visok. Veći ekološki otisak znači korištenje više resursa i veće emisije.

Trenutno, više od polovice stanovništva živi u gradovima i konzumira tri četvrtine od ukupnih svjetskih resursa. Mnoge suvremene prijestolnice koje igraju dominantnu ulogu u postojanju pojedinih zemalja mogu se nazvati gradovima od globalne važnosti, zbog svog odlučujućeg doprinosa političkom, gospodarskom i društvenom razvoju ne samo pojedinih zemalja, nego i cijelog svijeta. Očekuje se da će rast urbanog stanovništva predviđen u narednim desetljećima dovesti do porasta urbanih problema koji su međusobno povezani i složeni.

Među najvažnijim urbanim problemima su problemi urbane infrastrukture, koji pokrivaju glavne kritične sektore života: promet, energetiku, digitalizaciju, otpad, stanovanje i komunalne usluge. Relevantnost i složenost rješavanja problema vezanih uz stvaranje održive urbane infrastrukture često je posljedica složene prirode organizacijskih i ekonomskih odnosa koji nastaju tijekom funkcioniranja njezinih različitih elemenata (Panteleeva i Borozdina, 2022).

S povećanjem urbanih središta, povećavaju se i zahtjevi za stanovanjem, zdravstvenom skrbi, školama i drugim uslugama. Kako bi ublažili ovaj pritisak, gradovi su poticali širenje predgrađa ili suburbanizaciju, dizajn neograničenog rasta izvan velikih urbanih područja s odvojenim oznakama za stambene, komercijalne, zabavne i druge usluge. Rast predgrađa je brža alternativa za rješavanje pitanja urbanog

rasta i pristupačnog stanovanja. To je zato što je zemljište jeftinije izvan gradova, s manje ograničenja u izgradnji i dizajnu.

Međutim, veliki problemi nastaju s prevelikom suburbanizacijom. Budući da je većina kuća izgrađena izvan gradova i daleko od tvrtki i drugih usluga, vrijeme putovanja na posao se povećava. Visoka ovisnost o automobilu povezana je s većim onečišćenjem zraka jer se iz vozila ispuštaju ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) i druge čestice. Zbog nedostatka javnog prijevoza, pješaćenja ili vožnje biciklom, mnogi se ljudi oslanjaju isključivo na automobile za dovršenje čak i kratkih putovanja. Unatoč jeftinijim troškovima zemljišta za izgradnju domova, veća potrošnja energije, rasprostranjene autoceste i ceste te zagađenje pokazuju da nekontrolirana suburbanizacija nije održiv model urbanog dizajna.

Urbani rast, bilo unutar gradova ili u predgrađima, također može dovesti do gubitka parkova, poljoprivrednih polja i zelenih površina. Smanjenjem ovih mjesta mogu se pogoršati i učinci klimatskih promjena, osobito kada je riječ o velikim ekološkim katastrofama. Uklanjanjem vegetacije, područja nisu samo podložnija poplavama, već i izumiranju životinja i biljaka.

Uz veću koncentraciju stanovništva u gradovima, ekološki otisak gradova ostaje veći od manjih gradova ili ruralnih područja. Ekološki otisak je mjera utjecaja aktivnosti jedne osobe na prirodne resurse. Kombinirani ekološki otisci mogu pokazati koliko je resursa potrebno za podršku društvu i gospodarstvu. Naravno, s više ljudi na jednom mjestu, ukupni ekološki otisak može izgledati vrlo visok. Prema „Study smarter“ (2021), gledano pojedinačno (po stanovniku), gradski stanovnici emitiraju i troše manje od svojih prigradskih i ruralnih kolega. To je zato što gradski stanovnici imaju tendenciju da žive u manjim smještajima, manje se voze i dijele više resursa.

Inicijative urbane održivosti služe za rješavanje izazova s kojima se gradovi suočavaju. Inicijative urbane održivosti usmjerene su na poboljšanje ekonomskih, društvenih i okolišnih uvjeta za stanovnike na načine koji smanjuju negativne učinke na okoliš. To je prvenstveno potaknuto projektima urbanog razvoja i planiranja (Peštova, 2019).

Urbanističko planiranje je projektiranje i regulacija gradske infrastrukture i prometa. To se obično radi na lokalnoj političkoj razini, gdje planere i dizajnere angažiraju vlasti koje su izglasane. Planeri i projektanti moraju dati sve od sebe kako bi odražavali i uravnotežili političke, ekonomske i društvene interese grada u svojim projektima. Održivo urbano planiranje ili održivi urbanizam način je planiranja grada koji smanjuje širenje predgrađa; promiče aktivnu mobilnost i korištenje javnog prijevoza; te povećava zelene površine i korištenje obnovljivih izvora energije.

## 2.2. Urbani transportni sustav

Život u gradovima, tj. u organiziranim ljudskim naseljima, moguć je samo ako ljudi imaju svakodnevnu mobilnost, odnosno sposobnost kretanja kako bi mogli raditi ono što moraju raditi ili vole raditi. Jedna od karakteristika grada je da se sastoji od specijaliziranih, često grupiranih aktivnosti koje obavljaju diskretne funkcije. Stanovi su odvojeni od radnih mjesta, glavna trgovina je koncentrirana u prepoznatljivim centrima, a veći sadržaji za zabavu i opuštanje nalaze se na određenim lokacijama. Za razliku od sela, vrlo je malo ovih odredišta dostupno pješice, odnosno obično nisu unutar prikladne pješačke udaljenosti.

Veliki antički i srednjovjekovni gradovi zapravo su bili konglomerati četvrti u kojima se svakodnevni život mogao odvijati u kratkom radijusu. Samo je povremeno bilo potrebno dulje putovanje na veliki događaj. Industrijalizacija tijekom devetnaestog stoljeća izazvala je pravu urbanu revoluciju raščlanjivanjem malog uzorka na gradske strukture s jakim i intenzivnim proizvodnim i uslužnim zonama. Potpomognuti prijevoz postao je obavezan i doista je brzo izumljen - konjski automobili, parne željeznice, električni tramvaji i na kraju sustavi podzemne željeznice (električna teška željeznica). Dvadeseto stoljeće donijelo je daljnji razvoj željezničkih oblika i uvelo individualne motore (benzin i vozila s dizelskim motorom - autobusi i automobili). Potonji je zavladao područjem prijevoza, barem u Sjevernoj Americi, i raspršio urbani obrazac dalje u širenje. Ono što nije toliko očito jest da urbani život i prostorni obrasci ulaze u novo, postindustrijsko razdoblje, koje karakterizira pojava mnogih disperziranih centara posebne namjene, sveukupno niskih gustoće i kretanje u mnogo različitih smjerova u bilo koje vrijeme s različitim svrhama putovanja. Elektronički komunikacijski sustavi igraju sve veću ulogu. Sve to otežava učinkovito upravljanje tradicionalnim načinima prijevoza koji su dobro služili u strukturiranim uvjetima. Zbog ovih promjena zadatak pružanja odgovarajućih prijevoznih usluga sada je izazovniji (Grava, 2004).

Prema „McKinsey&Company“ (2018), činjenica je da gradovi i njihovo stanovništvo nisu homogeni u različitim dijelovima svijeta, čak ni unutar iste zemlje. Svaki grad ima komponente koje variraju u svojim prijevoznim očekivanjima od najudobnijih do najpristupačnijih. Postoje četvrti u afričkim gradovima koji očekuju i mogu platiti najnaprednije usluge, a postoje četvrti u američkim gradskim područjima koje se ne razlikuju mnogo od onih u zemljama Trećeg svijeta. Relativna veličina različitih skupina korisnika je, naravno, različita, ali su zahtjevi unutar njih prilično slični. Svaki grad ima svoj vlastiti transportni sustav koji definira funkcioniranje transporta u gradu i odgovore na transportne zahtjeve korisnika.

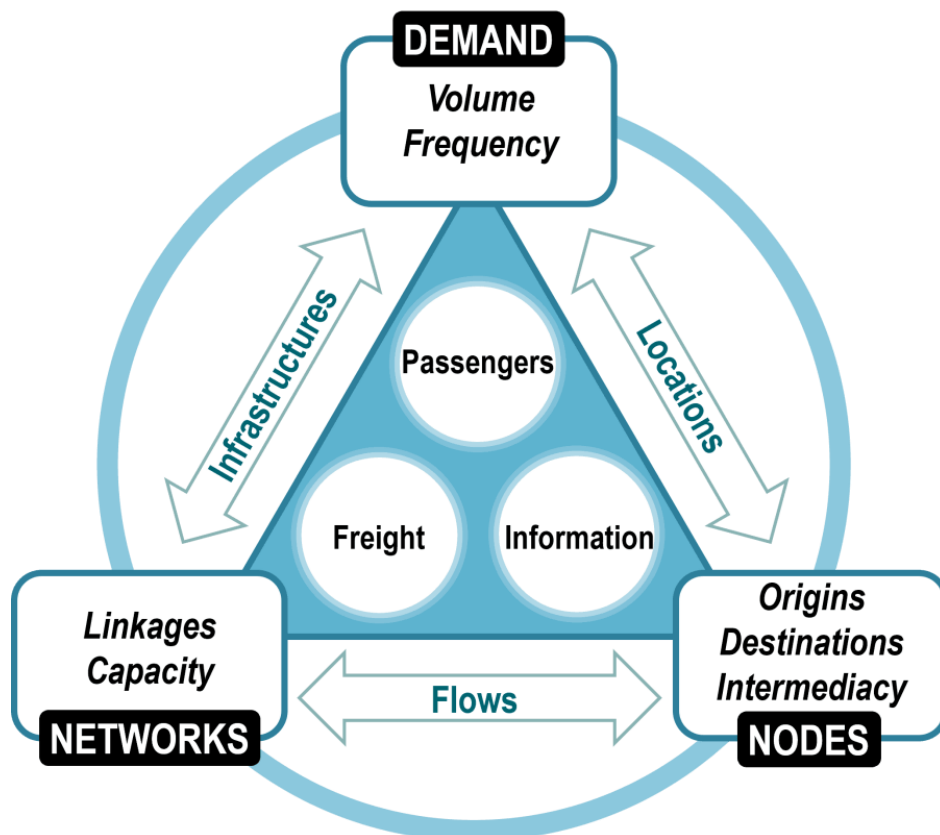
Transportni sustav može se konceptualizirati kao skup odnosa između čvorova, mreža i potražnje. Ovi odnosi uključuju lokacije koje prostorno izražavaju ovu potražnju, tokove između njih i infrastrukturu dizajniranu za upravljanje i povezivanje tih tokova. Sve komponente transportnog sustava dizajnirane su da olakšaju kretanje putnika, tereta i informacija, bilo kao zasebne ili zajedničke komponente.

Komponente urbanog transportnog sustava su sljedeće:

- Potražnja - Izvedena funkcija za mobilnost ljudi, tereta i informacija za razne socioekonomske aktivnosti.
- Čvorovi – Mjesta gdje kretanja počinju, završavaju i tranzitiraju (posredništvo), ulazne ili izlazne točke u transportnom sustavu. Razlikuju se ovisno o geografskoj skali koja se razmatra u rasponu od lokalnih čvorova (kao što je stanica podzemne željeznice) do globalnih čvorova (kao što su lučki ili zračni terminali).
- Mreže - Sastoji se od skupa veza koje izražavaju povezanost između mjesta i kapaciteta za rukovanje količinama putnika ili tereta.
- Lokacije - Čvorovi gdje je potražnja izražena kao polazište, odredište ili točka tranzita. Razina prostorne akumulacije socioekonomskih aktivnosti (proizvodnje i potrošnje) zajednički definira potražnju i gdje se ta potražnja odvija.
- Tokovi - Količina prometa preko mreže koja se sastoji od čvorova i veza.
- Infrastrukture - Prijevozna sredstva kao što su ceste i terminali izražavaju fizičku stvarnost mreže i dizajnirana su da podnose potražnju sa specifičnim karakteristikama volumena i frekvencije (Rodrigue, 2020).

## Grafički prikaz 1.

Urbani transportni sustav



Izvor: dostupno na: <https://transportgeography.org/contents/chapter1/what-is-transport-geography/transport-system-overview/> (pristupljeno 13.06.2023.)

### 2.3. Problematika urbanog transportnog sustava

Gradovi ne samo da pokreću ekonomiju i stvaranje vrijednosti i igraju vitalnu ulogu u mnogim ključnim društvenim pitanjima, već su i glavna poveznica između ljudskih i ekoloških sustava. Godine 1800. globalna stopa urbanizacije iznosila je samo 2%, a 2007. je prvi put dosegla 50,16%. Predviđa se da će 2050. biti čak 68,36%. Svake godine više od 20 milijuna ljudi diljem svijeta seli se iz ruralnih u urbana područja, što je jednako cjelokupnom stanovništvu Rumunjske 2020. Iako gradovi čine samo 3% svjetske kopnene površine, oni stvaraju oko 80% svjetskog bruto domaćeg proizvoda (BDP). Uloga grada, posebice u novoj gospodarskoj eri, postaje sve važnija. To nije samo središte proizvodnje, potrošnje, financija i usluga, već

i središte inovacija. Održivi razvoj gradova ključan je za postizanje globalne održivosti unutar ekološkog kapaciteta Zemlje. Stvaranje transportnih sustava najboljih u klasi zahtijeva značajna ulaganja: razvoj i održavanje cestovne i željezničke infrastrukture, obnovu voznog parka javnog prijevoza, ulaganja u inteligentne prometne sustave (ITS) i digitalizaciju. Funkcija i razvoj gradova neodvojivi su od gradskog prometa. Kao prijevoznik za ostvarivanje kretanja ljudi i roba, gradski promet se postupno promijenio od pratećeg objekta urbanog razvoja do važnog sredstva regulacije modela urbanog razvoja. Cesare Marchetti je prvotno otkrio da je prosječno dnevno vrijeme putovanja stanovnika, koje se naziva proračun vremena putovanja, oko 65-70 minuta na temelju istraživanja u velikim gradovima diljem svijeta. Ovo je "Marchettijeva konstanta". Izvan tog iznosa, putnici doživljavaju vrijeme provedeno putujući do i od svog odredišta (obično posla) izgubljenim ili manje vrijednim. Izvan tog iznosa, putnici doživljavaju vrijeme provedeno putujući do i od svog odredišta (obično posla) izgubljenim ili manje vrijednim. Prema "jednosatnom krugu putovanja", Newman i Kenworthy podijelili su gradove u kategorije "Hodajućeg grada" (prapovijesni do 1850-ih),

"Tranzitnog grada" (1850-e–1950-e) i "Automobilskog grada" (1950-e do danas). Trenutno, većina gradova sadrže elemente sva tri urbana oblika, diferencirana različitim modalnim podjelama i urbanim gustoćama. Čak i neki urbani centri još uvijek zadržavaju značajke pješačkog i tranzitnog grada, u Sjedinjenim Državama, "Automobilski grad" je tipičan model (Gao i Zhu, 2022).

Odnos prometa i korištenja zemljišta je dvosmjernan. S jedne strane, promet utječe na prirodu samog urbanog područja, budući da sudionici u gospodarstvu ne bi imali razloga locirati se blizu jedni drugima da je prijevoz jeftin ekonomski i vremenski. Način na koji se zemljište na određenim lokacijama koristi, vrste i gustoća zgrada koje ih zauzimaju te aktivnosti koje se tamo odvijaju među najvažnijim su čimbenicima koji utječu na odluke o putovanju. Na primjer, istraživanje je pokazalo da na vožnju javnim prijevozom u gradu više utječe broj radnih mjesta u središnjem gradskom području ("centru") nego gotovo bilo koji drugi čimbenik.

S druge strane, osiguranje prijevoza može biti izazov pod određenim namjenama zemljišta, ovisno o karakteristikama pojedinih područja. Naime, u užim gradskim područjima s velikom gustoćom izgrađenosti i naseljenosti može se dokazati da je teško osigurati učinkovite prometne veze i infrastrukturu, dok se u isto vrijeme osigurava visoka razina kvalitete života (npr. sigurnost, ekološka održivost itd.). Mnogi gradovi stoga razmatraju opciju preraspodjele cestovnog prostora između različitih skupina korisnika cesta (npr. daju više prostora javnom prijevozu i pješacima) kako bi riješili problem. Koncept koji se slijedi uglavnom ovisi o prioritetima grada u određenom vremenu, kao i o arhitektonskim percepcijama vremena.

Stoga se problemi s kojima se gradovi suočavaju u pogledu korištenja zemljišta mogu razlikovati na „makroskopske“ (visoke razine) i „mikroskopske“ (niske razine). Prvi se odnose na razmatranja, kao što su razvoj novih područja i njihova korištenja te osiguranje prijevoza u cilju promicanja određenih namjena zemljišta, dok se drugi odnose na prenamjenu cestovnog prostora s ciljem rješavanja potreba utvrđenih namjena zemljišta, koji nisu obuhvaćeni postojećom konfiguracijom infrastrukture.

Gužve su postale jedan od najvažnijih aspekata modernog života u velikim gradovima. Dimenzija problema može se shvatiti jednostavnim razmatranjem da se jedna trećina svih putovanja vozilima odvija u uvjetima gužve, u kojima je prosječna brzina polovica vrijednosti slobodnog protoka. Zagušenje nastaje kada transportna potražnja premašuje ponudu transporta u određenom dijelu prometnog sustava. U takvim okolnostima svako vozilo oštećuje mobilnost drugih.

Problem zagušenja identificiran je već 1960-ih, a njegov izvor je to što je rast gradskog prometa jako iskrivljen u korist cestovnog prometa, što dovodi do značajnog rasta zagušenja. Porast zagušenja povećava emisije i potrošnju energije po putniku/km, čineći korištenje cesta sve neodrživijim. Zagušenje također ima negativan ekonomski učinak, budući da se učinkovitost i propusni kapacitet zagušenog prometnog sustava znatno smanjuju. Nadalje, budući da vozila većinu vremena provode parkirana, motorizacija je povećala potražnju za parkirnim prostorom, što je stvorilo probleme s potrošnjom prostora, posebno u središnjim područjima. Prostorni otisak parkiranih vozila je značajan (Peixoto i sur., 2008).

U gradovima je iznimno značajan i problem ovisnosti o automobilu, koji je jedan od glavnih uzroka gužvi i zagađenja zraka. Danas je cilj većine gradova smanjiti ovisnost o automobilu i postići pomak s privatnog prijevoza na javni prijevoz, pješaćenje i vožnju biciklom.

Emisije i buka iz prometa primarni su uzroci pada kvalitete zraka u urbanim sredinama, a njihov doprinos postaje sve značajniji kako se korištenje automobila povećava zajedno s povećanjem količine prometa. Učinci potrošnje neobnovljivih energetske goriva na okoliš izazivaju daljnju zabrinutost oko održivosti i učinkovitosti postojećih prometnih sustava. Stoga je hitno da se gradovi pozabave pitanjima zaštite okoliša u pokušaju da svojim stanovnicima pruže bolju kvalitetu života implementacijom učinkovitog i održivog sustava gradskog prijevoza.

Osim gore navedenih problema urbanog transportnog sustava postoje i drugi problemi, različite prirode i manjeg opsega koji se mogu definirati samo u vlastitom kontekstu. To uglavnom uključuje političke poteškoće, sigurnost i ekonomski prosperitet (Zavistas i sur., 2010).

Prema „McKinsey&Company“ (2018) različiti gradovi imaju različite načine za rješavanje gore spomenutih problema urbanog transportnog sustava. Bitno je naglasiti da veliku ulogu ima iznos investicija koje grad namijeni za transportni sustav. U radu „*Elements of success: urban transportation systems of 24 global*

*cities*“ napravljeno je istraživanje u kojem je rangiran odnos urbanih transportnih sustava i BDP – a po glavi stanovnika. Istraživanje je pokazalo jasan trend: općenito, bogatiji gradovi imaju više mogućnosti za izgradnju impresivnih prometnih sustava, zahvaljujući svojim ogromnim resursima. Međutim, postoji uvjerljiviji uvid: bogatstvo ne ograničava razvoj prometnih sustava, niti jamči njegov uspjeh. U sve tri skupine gradova s komparativnim razinama bogatstva postoji isti obrazac: iako gradovi imaju slične resurse, rezultati su prilično različiti - delta u poretku u skupini gradova s relativno sličnim razinama bogatstva može doseći čak deset pozicija.

Iako bogatstvo i povijest grada definiraju opcije za razvoj prometnog sustava, fokus njegovih vlasti i predanost razvoju i provedbi jasne prometne strategije mogu značajno utjecati na ishod.



### 3. URBANO PODRUČJE KAO KOMPLEKSNI ADAPTIVNI SUSTAVI

#### 3.1. Simboli sistemske dinamike

Sistemska dinamika jest metoda koju je kreirao prof. Jay Forrester s MIT – a. Njegova ideja 1950 – ih godina bila je analizirati različita složena ponašanja u društvenim znanostima, posebice u menadžmentu, i to putem računalnih simulacija. Sistemska dinamika predstavlja metodologiju koja služi za analiziranje dinamičkog ponašanja sustava. Kao ključan pojam sistemske dinamike promatra se sustav, a sastoji se od grupiranih dijelova koji zajednički rade za zajednički cilj (Forrester, 1971).

Sustav se po Edwardu Deming - u definira kao mreža međuovisnih komponenata, a koje zajednički rade kako bi se postigao neki cilj sustava (Deming, 1994).

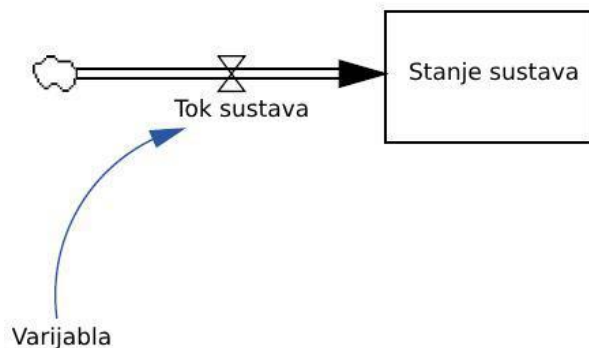
Poveznica ovih dviju definicija jesu gotovo iste ideje koje dijele iste ključne riječi, a to su: dijelovi koji su međusobno ovisni te zajednička svrha, odnosno cilj.

Jay Forrester je pokušavajući opisati dinamiku prethodno opisane definicije sustava, stvorio jezik dinamike, a koji sadrži 4 građevna elementa prikazana na grafičkom prikazu 1., odnosno:

- Stanje sustava (engl. Stock)
- Tok sustava (engl. Flow)
- Varijabla
- Informacijska strelica (engl. Information Arrow)

#### Grafički prikaz 2.

*Simboli sistemske dinamike*



Izvor: dostupno na: <https://repozitorij.efst.unist.hr/islandora/object/efst%3A2126/datastream/PDF/view>  
(pristupljeno 13.06.2023)

Sistemska dinamika koristi dvije vrste konceptualnih modela, a to su dijagrami uzročnih petlji i dijagrami toka. Dijagram uzročne petlje prikazuje uzročne odnose između elemenata sustava. Kod uzročnih dijagrama strelice označavaju smjer veza, a simboli "+" ili "-" uz strelice označavaju vrstu veze između elemenata sustava, koja može biti pozitivna ili negativna. Pozitivna veza je ona gdje povećanje uzroka dovodi do povećanja učinka, odnosno, vrijedi i obrnuto, smanjenje uzroka dovodi do smanjenja učinka. U slučaju negativne korelacije situacija je takva da se uzrok i posljedica mijenjaju u suprotnom smjeru, odnosno uzrok raste, a posljedica opada, ili uzrok opada, a posljedica raste. 2 ili više veza koje povezuju uzrok i posljedicu ili 2 ili više lančanih strelica u smjeru uzroka i posljedice koje tvore tzv. povratnu petlju zamjenjuju se kružnim strelicama označenim znakom "+" ili "-" u sredini. U petlji pozitivne povratne sprege, elementi u petlji djeluju na sebe u istom smjeru, uzrokujući kontinuirano povećanje ili smanjenje vrijednosti elementa. U slučaju negativne povratne sprege, element uzrokuje promjenu smjera svog djelovanja, pa se sustav kreće prema stanju ravnoteže. Koja će to vrsta povratne sprege biti ovisi uvelike o vrsti uzročnosti unutar petlje. Ako su svi uzročni odnosi u povratnoj petlji pozitivni, to znači da je cijela petlja pozitivna. Ako u petlji postoje negativne veze, tip petlje ovisi o tome je li ukupan broj negativnih veza paran ili neparan, tako da je petlja s parnim brojem negativnih veza petlja s pozitivnom povratnom spregom, a petlja s parnim brojem negativnih veza je negativna povratna sprega. Neparan broj negativnih veza je negativna povratna sprega. Ove činjenice su posljedica činjenice da se negativne veze međusobno poništavaju, tako da svaki par negativnih veza u petlji rezultira pozitivnom vezom, tj. mijenja smjer promjene u pozitivnu. Dijagrami uzročnih petlji pokazuju sljedeće karakteristike:

- Sadrže sve elemente s kojima se može opisati stanje sustava
- Sadrže funkcijske elemente upravljanja, a s kojima se može kontrolirati protok informacija
- Sadrže tokove između stanja sustava
- Sadrže informacijske kanale, a čija je uloga povezivanje stanja sustava s funkcijom upravljanja (Božikov, 2002)

U sistemske dinamici postoje 2 tipa tokova među elementima, a to su materijalni tokovi i informacijski tokovi. Materijalni tokovi se prikazuju punom linijom, a informacijski se tokovi prikazuju isprekidanom linijom.

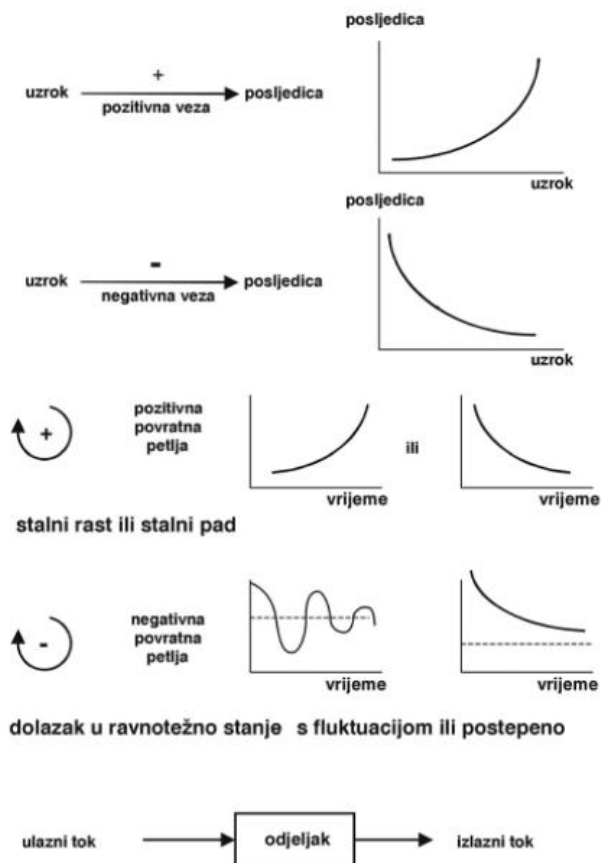
Postoje četiri karakteristična obrasca ponašanja sustava (prikazana na grafičkom prikazu 3.) čijom se kombinacijom opisuju ponašanja realnih sustava, a to su:

1. Eksponencijalni rast

2. Traženje cilja
3. S – oblik rasta
4. Oscilacija

**Grafički prikaz 3.**

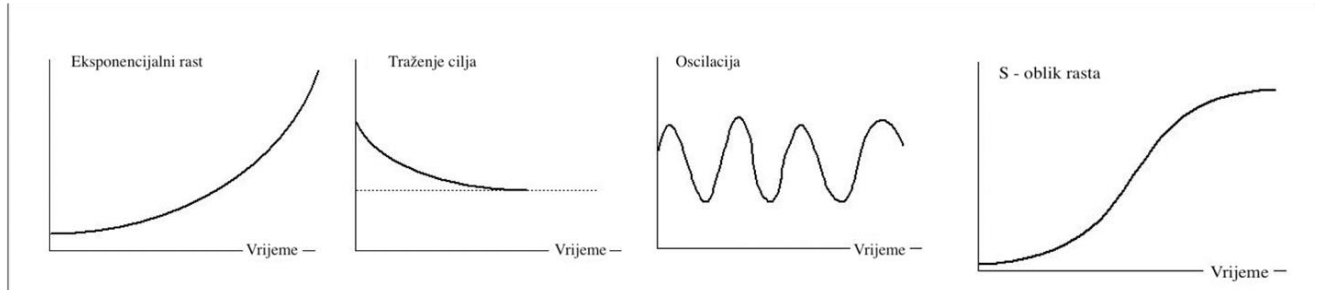
*Simboli koji se upotrebljavaju kod dijagrama uzročnih petlji*



Izvor: dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/347082.modeliranje\\_i\\_simulacija\\_-\\_v2a2.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/347082.modeliranje_i_simulacija_-_v2a2.pdf) (pristupljeno 14.06.2023)

## Grafički prikaz 4.

Četiri karakteristična obrasca ponašanja sustava



Izvor: dostupno na: [https://cyphynets.lums.edu.pk/images/SysDynamics\\_WIT\\_Lecture\\_2\\_Class\\_Slides.pdf](https://cyphynets.lums.edu.pk/images/SysDynamics_WIT_Lecture_2_Class_Slides.pdf)  
(pristupljeno 14.06.2023)

### 3.2. Karakteristike kompleksnih adaptivnih sustava

Kompleksni sustav je termin koji se koristi za opisivanje dinamičkih sustava sastavljenih od velikog broja jednostavnih dijelova koji se obično međusobno nelinearno interagiraju. Kompleksni adaptivni sustavi ili CAS su kompleksni sustavi čiji se dijelovi razvijaju i imaju sposobnost prilagođavanja stalno mijenjajućem okruženju. Teorija kompleksnih sustava skup je metoda i tehnika koje nam omogućuju razumijevanje ponašanja takvih sustava, a temelji se na pretpostavci da postoji fundamentalna sličnost između različitih kompleksnih adaptivnih sustava kao što su ekosustavi, mozgovi, društva itd.

Budući da praćenje i opis dinamike velikog broja entiteta koji čine sustav, uz stalno mijenjajuće obrasce interakcije, predstavlja izazov za postojeće matematičke alate, simulacijski modeli su osnovno sredstvo istraživanja kompleksnih adaptivnih sustava. Ovi modeli poznati su pod različitim nazivima, kao što su modeli s agentima, bottom-up modeli, umjetna društva itd. Osnovna ideja ovih modela je da se definiraju pravila koja opisuju međuinterakciju entiteta, a zatim se promatra vremenska evolucija sustava i njegova pojavna svojstva - svojstva koja ne postoje na razini pojedinačnih dijelova sustava, već se pojavljuju samo na razini cjeline (Škunca i Penzar, 2000).

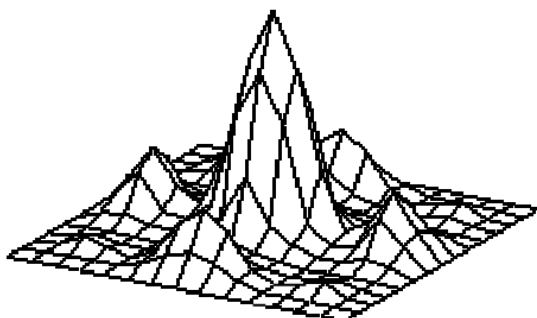
Definicija složenih adaptivnih sustava mijenja se s različitim pokušajima primjene. Kako bi se napravio dobar spoj između teško rješivog problema i kompleksnog pristupa, važno je razmotriti pokazuje li i kako

problem atribute složenog adaptivnog sustava. Istraživanja pokazuju da CAS ima niz karakteristika koje su opisane u nastavku:

- Distribuirana kontrola - Ne postoji jedinstveni centralizirani kontrolni mehanizam koji upravlja ponašanjem sustava. Iako međusobni odnosi između elemenata sustava stvaraju koherentnost, cjelokupno ponašanje obično se ne može objasniti samo kao zbroj pojedinačnih dijelova.
- Povezivost - Kao što je ranije navedeno, složenost proizlazi iz međuodnosa, međudjelovanja i međupovezanosti elemenata unutar sustava te između sustava i njegove okoline. To implicira da će odluka ili radnja jednog dijela unutar sustava utjecati na sve ostale povezane dijelove, ali ne na jedinstven način.
- Koevolucija - Uz koevoluciju, elementi u sustavu mogu se mijenjati na temelju međusobne interakcije i interakcije s okolinom. Osim toga, obrasci ponašanja mogu se mijenjati tijekom vremena. Godine 1993. Stuart Kauffman opisao je koevoluciju svojim konceptom fitness pejzaža. Fitness krajolik za određeni sustav, X, sastoji se od niza svih mogućih strategija preživljavanja koje su mu dostupne. Kao što je prikazano na grafičkom prikazu 1., krajolik se sastoji od mnogih vrhova i dolina. Što je vršna vrijednost veća, to veću sposobnost predstavlja. Evolucija X-a može se zamisliti kao putovanje fitness krajolikom s ciljem lociranja najvišeg vrha. X može zapeti na prvom vrhuncu kojem se približi ako je strategija postupno poboljšanje. Ako X promijeni svoju strategiju, drugi će međusobno povezani sustavi reagirati i krajolik će pretrpjeti određene promjene.

### Grafički prikaz 5.

*Fitness krajolik*



Izvor: dostupno na <https://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/Complex%20Adaptive%20Systems.pdf>  
(pristupljeno 14.06.2023)

- Osjetljiva ovisnost o početnim uvjetima - CAS su osjetljivi zbog svoje ovisnosti o početnim uvjetima. Promjene u ulaznim karakteristikama ili pravilima nisu u linearnoj korelaciji s ishodima. Male promjene mogu imati iznenađujuće dubok utjecaj na sveukupno ponašanje, ili obrnuto, veliki poremećaj sustava možda neće utjecati na njega.
- Pojavni red - Složenost u složenim adaptivnim sustavima odnosi se na potencijal pojavnog ponašanja u složenim i nepredvidivim pojavama. Primjeri složenih sustava prilagodbe uključuju gospodarstvo, ekosustave, ljudski mozak, embrije u razvoju i kolonije mrava. Svaki je sustav s mrežom mnogih agenata koji djeluju paralelno. U gospodarstvu, agenti mogu biti pojedinci ili kućanstva. U ekosustavu, uzročnici su vrste. U mozgu su uzročnici živčane stanice. U embriju uzročnici su stanice. U svakom sustavu, svaki agent nalazi se u okruženju koje proizvodi njegova interakcija s drugim agentima u sustavu. Postoji stalna akcija i reakcija na ono što drugi agenti rade, stoga ništa u okruženju nije bitno fiksno. Iz interakcije pojedinačnih agenata proizlazi neka vrsta globalnog svojstva ili uzorka, nešto što se nije moglo predvidjeti razumijevanjem svakog pojedinog agenta. Na primjer, u mozgu je svijest pojava koja dolazi iz međudjelovanja moždanih stanica. Globalna svojstva proizlaze iz ukupnog ponašanja pojedinaca. Nadalje, kontrola složenog sustava koji se razvija ima tendenciju da bude visoko raspršena. Ne postoji stanica unutar embrija u razvoju, niti glavni neuron u mozgu. Sveukupno promatrano ponašanje u gospodarstvu rezultat je bezbrojnih odluka koje su napravili milijuni pojedinačnih ljudi. Svako koherentno ponašanje u sustavu proizlazi iz natjecanja i suradnje između samih agenata.
- Daleko od ravnoteže - Godine 1989. Nicolis i Prigogine pokazali su da kada se fizički ili kemijski sustav gurne iz ravnoteže, on može preživjeti i napredovati. Ako sustav ostane u ravnoteži, on će umrijeti. Fenomen "daleko od ravnoteže" ilustrira kako će sustavi koji su prisiljeni istraživati svoj prostor mogućnosti stvoriti različite strukture i nove obrasce odnosa. Ovaj koncept se istražuje u medicinskoj kardiologiji, u proučavanju normalnih i abnormalnih uzoraka otkucaja srca. Ritmički otkucaji srca vrlo su uredni, ali postoji suptilna, ali očito temeljna nepravilnost. Razmak između otkucaja srca varira na neuredan i nepredvidiv način kod zdravih osoba, osobito kod male djece. Pravilnost intervala otkucaja srca je znak dingera – red u dinamici srca ukazuje na neosjetljivost i nefleksibilnost. Stoga se može reći da složeni adaptivni sustavi najbolje funkcioniraju kada u odgovarajućoj mjeri kombiniraju red i kaos.
- Stanje paradoksa - Druga istraživanja složenih prilagodljivih sustava ukazala su na dinamiku koja kombinira i red i kaos. Ovo pojačava ideju ograničene nestabilnosti ili ruba kaosa koji karakterizira stanje paradoksa: stabilnost i nestabilnost, natjecanje i suradnja, red i nered (Chan, 2001).

Transportni sustav po svojim karakteristikama se može smatrati kompleksnim adaptivnim sustavom. U nastavku su navedene karakteristike CAS koje se mogu prepoznati u transportnom sustavu:

- Prilagodljivost - Standardna karakteristika koju najbolje odražava koncept konkurencije gdje se transportna poduzeća prilagođavaju svojim konkurentima i drugim socioekonomskim promjenama (potražnja). Ulaganje u novu i proširenu infrastrukturu također je strategija prilagodbe koju slijede korporacije i vlade.
- Samoorganizacija - Usmjeravanje unutar prometne mreže predstavlja karakteristiku samoorganizacije jer je intermodalni slijed rezultat razmatranja svih odgovarajućih prednosti načina i terminala. Upravljanje opskrbnim lancem također je ilustrativno za samoorganizaciju kako se strategije nabave i distribucije mijenjaju kako bi odražavale složene ulazne i distribucijske troškove.
- Stabilnost - Predstavljaju stabilne komponente transportnog sustava koje dugoročno utječu na prirodu i opseg tokova. Korištenje zemljišta posebno je stabilna komponenta prostornih interakcija jer se njegove karakteristike sporo mijenjaju. Isto vrijedi i za transportne terminale koji su dugoročna mjesta u konvergenciji tokova.
- Kumulativnost - Zagušenje je dobar primjer nelinearne karakteristike prijevoza jer svaki stupanj dodatnog zagušenja rezultira eksponencijalnim kašnjenjima. Razni poremećaji u prometnim mrežama također su primjer nelinearnosti jer će relativno jednostavan događaj kao što je zatvaranje čvorišta zračne luke (npr. snježna oluja) izazvati nerazmjerne poremećaje u cijeloj mreži.
- Fazni prijelaz - Postoji nekoliko događaja koji mogu izazvati značajne promjene u prometnim sustavima. Jedna vrsta odnosi se na tehnološke (ili tehničke) inovacije koje su povijesno bile promjene paradigme za prometni sustav. Na primjer, kontejnerizacija je povezana s potpuno novim obrascima protoka, načinima i terminalima; stvorila je potpuno novi prometni sustav. Pitanja povezana s emisijama ugljika također se smatraju vrlo osjetljivim faktorom koji pokreće fazni prijelaz za prometne sustave 21. stoljeća (Rodrigue, 2020).

### **3.3. Sistemska dinamika i urbani transportni sustav**

Modeliranje urbanog transporta sustavan je projekt, a sam sustav javnog prijevoza također je složen sustav s višestrukim povratnim vezama, varijablama i nelinearnostima. Primarna motivacija za korištenje

sistemske dinamike (SD) kao metodologije u ovom Diplomskom radu je da istraživanje treba predstavljati istodobna i višestruka križanja među varijablama u različitim podsustavima. Pristup SD može omogućiti jednostavno razumijevanje i tumačenje interakcija među varijablama urbanog transportnog sustava. Nadalje, ključna snaga SD pristupa je to što može opisati dinamičke procese koji se razvijaju kontinuirano i s kašnjenjima ili vremenskim kašnjenjima. Ova sposobnost je važna jer moramo proučavati kumulativne utjecaje razvoja urbanog transportnog sustava tijekom godina. Konačno, SD model može opisati nelinearne odnose među varijablama. Nelinearne interakcije više čimbenika koji su dijelovi donošenja odluka i osnovne fizike sustava potencijalno će se zanemariti ako se nelinearni odnosi ne uzmu u obzir. Pristup SD može prikladno opisati kumulativne utjecaje i razvojne trendove modeliranja urbanih transportnih sustava. Štoviše, SD može odražavati varijabilnu strukturu složenog urbanog transportnog sustava i može predvidjeti trend i kumulativni učinak varijabli sustava tijekom vremena (Xue i sur., 2020). U procesu oblikovanja transportne politike, zbog složenosti, dinamičnosti i neizvjesnosti transportnog sustava, točna predviđanja i analize su teško izvedive i nepotrebne, a analiza trendova je potrebna. U usporedbi s tradicionalnim kvalitativnim i kvantitativnim metodama analize, SD metoda kvalitativno analizira interakcijske odnose među elementima sustava i također kvantificira te odnose kroz konstrukciju dinamičkih diferencijalnih jednadžbi, a koristi tehnologiju računalne simulacije za postizanje dinamike odnosa među transportnim elementima. Simulacija je korisna za odražavanje učinka provedbe politike. Očigledno je da je SD metoda jedna od najboljih metoda za analizu transportnog sustava i ocjenu prometne politike.

Trenutačno se SD obično koristi za sustavno proučavanje transportnih problema, uključujući transportne sustave, autoceste, politiku emisija štetnih plinova u cestovnom prometu, politiku zagušenja, teretni prijevoz itd. Mnogi su istraživači koristili SD pristup za analizu problema transportnog sustava. Wilsses i sur. smatraju prikladnim uhvatiti uzročnost varijabli gradskog prometnog sustava koristeći dinamiku sustava i analiziraju utjecaj nekih brazilskih politika na okoliš prometnog sustava, ekonomiju i varijable prijevoza. Proveli su testove ekstremnih uvjeta i testove pogrešaka integracije za validaciju modela putem softvera Vensim. Yongtao Tan i sur. koristili su Peking u Kini kao primjer za simulaciju održive izvedbe grada s modelom dinamike sustava. Kako bi se postigao održivi razvoj, Peking bi trebao usvojiti politiku urbanizacije niske brzine. Proveli su provjeru modela s povijesnim podacima kao što su ukupan broj stanovnika, vrijednost proizvodnje uslužnih djelatnosti, broj zdravstvenih radnika, ukupna godišnja potrošnja vode i površina poljoprivrednog zemljišta. Apsolutne stope pogreške bile su manje od 5%. SD pristup također se koristi za istraživanje problema autocesta. Gokhan i sur. koristili su metodu sistemske dinamike za proučavanje održivosti autocesta i simulirali tri potencijalne strategije za razvoj politike:



učinkovitost goriva, javni prijevoz i korištenje električnih vozila. Mješovita provedba strategija igrala je važnu ulogu u uspjehu kreiranja politike. U procesu validacije modela, vrijednosti emisije CO<sub>2</sub> dobivene iz SD modela uspoređene su sa stvarnim podacima, a korišten je i jednosmjerni ANOVA test statističke hipoteze za usporedbu simuliranog trenda i stvarnog trenda emisije. Dodatno, SD metoda se koristi za proučavanje politika emisija iz cestovnog prometa. Aiga Bariša i sur. koristili su model dinamike sustava za analizu politika smanjenja emisija CO<sub>2</sub> u cestovnom prometu. SD model može bolje razumjeti čimbenike iza emisija na cestama. Strukturni i bihevioralni validacijski testovi provedeni su za validaciju modela u istraživanju, koji je uspoređivao simulirane vrijednosti sa stvarnim vrijednostima i ispitivao osjetljivost ponašanja SD modela pod promijenjenim vrijednostima nekih glavnih parametara. Xue Liu predložio je SD pristup analizi scenarija za potrošnju energije i emisije CO<sub>2</sub> u gradskom putničkom prijevozu i izgradio model ugljika u gradskom putničkom prijevozu u Pekingu. SD model simulirao je različite političke scenarije pod različitim uvjetima. Štoviše, neki su autori koristili SD za analizu politika zagušenja. Shiyong Liu koristio je SD model za procjenu dinamičkog utjecaja strategija određivanja cijena zagušenja na socioekonomski sustav prijevoza i za podršku kreatorima politike; stanovništvo, rast zaposlenosti i turizam egzogeni su čimbenici koji utječu na potražnju za putovanjima. Za probleme prijevoza tereta, Carina Thaller et al. koristili su SD model za opisivanje i otkrivanje gradskog teretnog prometa, te napravili srednjoročna i dugoročna predviđanja. Predloženi SD model omogućio je analizu trenda srednjoročnim i dugoročnim prognozama. Wen Huang predložio je metodološki okvir za regulaciju težine kamiona na temelju dinamike sustava. Okvir je bio sastavljen od pet podsustava i obuhvatio je varijable vozila, autoceste i tereta koje utječu na učinke regulacije težine kamiona i učinkovitosti prijevoza tijekom vremena. Za validaciju modela, obujam tereta, promet kamiona i promet tereta simulirani SD modelom uspoređeni su sa stvarnim vrijednostima u istom razdoblju. Pronađene su značajne korelacije između stvarnih i simuliranih podataka. SD model je verificiran pronalaskom značajne korelacije između stvarnih i simuliranih podataka. Za neke druge probleme, Eirini Grammatiki Pagoni razvila je novi alat za podršku odlučivanju temeljen na SD-u za procjenu društveno i financijski održivog učinka nacionalnih programa javno-privatnog partnerstva. Povijesni podaci korišteni su za procjenu parametara SD modela i njihovih trendova. Rezultati ispitivanja nisu pokazali sustavnu pristranost između simuliranih i stvarnih vrijednosti; stoga bi SD model mogao replicirati promatrano ponašanje u proučavanom sustavu. Ova su istraživanja vrijedna za razumijevanje strukture SD modela, verifikaciju modela, simulaciju modela i primjene u analizi politika.

Sistemska dinamika učinkovit je alat za proučavanje složenih sustava. Međutim, malo je literature o sustavnom proučavanju utjecaja transportnog sustava na održivi urbani razvoj, posebice kvantitativnog odnosa između urbanog transportnog sustava i održivog razvoja urbanog transporta.

### **3.4. Programski paket „Vensim“**

Vensim® je simulacijski softver koji je razvila tvrtka Ventana Systems. Primarno podržava kontinuiranu simulaciju (dinamiku sustava), uz neke diskretne mogućnosti modeliranja na temelju događaja i agenata. Prema Ventana Systems UK (2023) Vensim je softver koji predstavlja prvi izbor tisućama analitičara, konzultanata i istraživača širom svijeta za izgradnju visokokvalitetnih simulacijskih modela u poslovnim, znanstvenim, ekološkim i društvenim sustavima.

Vensim integrira u jedno okruženje snažan paket alata za razvoj, testiranje, tumačenje i distribuciju modela. Ovi alati uključuju dijagrame uzroka i posljedica, grafičku i tekstualnu konstrukciju modela, jednostavnu reprodukciju strukture modela korištenjem indeksa (nizova), Monte Carlo analizu osjetljivosti, optimizaciju, rukovanje podacima i sučelja aplikacija. Daljnje značajke omogućuju naprednu rezoluciju i vjernost modela. Vensim uključuje patentirane tehnike za pomoć u otkrivanju pogrešaka, sprječavanju pogrešaka i brzom razumijevanju složenih rezultata.

Vensim pruža sučelje za grafičko modeliranje sa dijagramima zaliha i protoka i kauzalne petlje, povrh tekstualnog sustava jednadžbi u deklarativnom programskom jeziku. Uključuje patentiranu metodu za interaktivno praćenje ponašanja kroz uzročne veze u strukturi modela, kao i jezično proširenje za automatizaciju eksperimenata kontrole kvalitete na modelima pod nazivom Reality Check.

Jezik modeliranja podržava nizove (subscripts) i dopušta mapiranje među dimenzijama i agregaciju. Ugrađene funkcije dodjele zadovoljavaju ograničenja koja ponekad nisu zadovoljena konvencionalnim pristupima kao što je logit. Podržava diskretna kašnjenja, redove i niz stohastičkih procesa.

Postoji više putova za uvoz i izvoz podataka presjeka i vremenskih serija, uključujući tekstualne datoteke, proračunske tablice i ODBC. Modeli se mogu kalibrirati u odnosu na podatke korištenjem optimizacije, Kalmanovog filtriranja ili metoda Markovljevog lanca Monte Carlo. Opcije analize osjetljivosti pružaju razne načine testiranja i uzorkovanja modela, uključujući Monte Carlo simulaciju s Latin Hypercube uzorkovanjem.

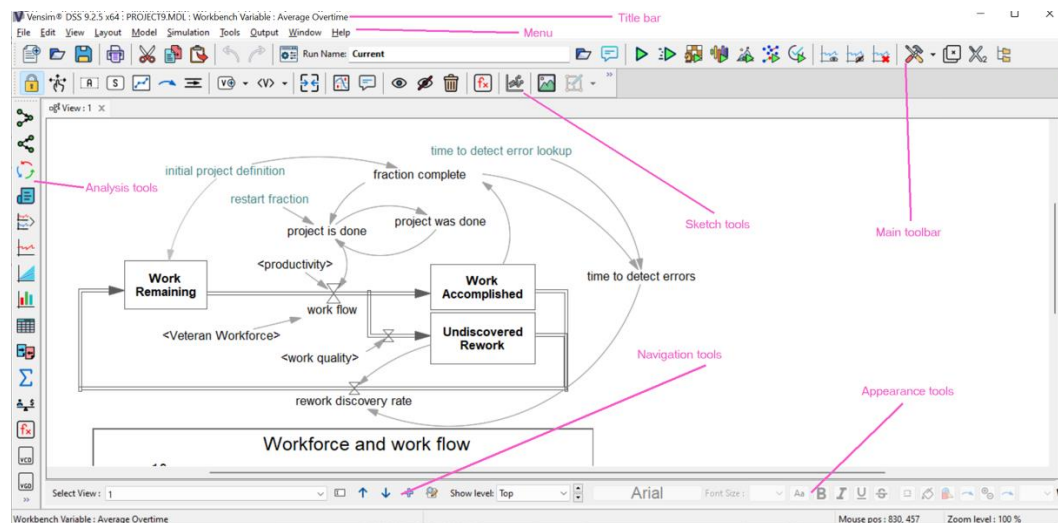
Datoteke modela Vensim mogu se pakirati i objaviti u prilagodljivom formatu samo za čitanje koji se može izvršiti besplatno dostupnim čitačem modela. To omogućuje dijeljenje interaktivnih modela s korisnicima koji ne posjeduju program i/ili kojima autor modela ne želi pristup bazi koda modela.

Prema Ventana Systems UK (2023), Vensim je softver opće namjene koji se koristi u širokom spektru problemskih domena. Uobičajene primjene softvera uključuju sljedeća područja:

- Transport i energija
- Poslovna strategija
- Zdravlje
- Sigurnost i terorizam
- Upravljanje projektima
- Znanost o marketingu u lijekovima i potrošačkim proizvodima
- Logistika
- Okoliš

## Grafički prikaz 6.

### Sučelje Vensim softvera



Izvor: dostupno na <https://www.vensim.com/documentation/usr02.html> (pristupljeno 14.06.2023)

## 4. ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA TRANSPORTNOG SUSTAVA

### 4.1. Elementi transportnog sustava

Transportni sustav sastoji se od velikog broja elemenata koji imaju različite tipove međudjelovanja. U ovom Diplomskom radu cilj je modeliranjem prikazati utjecaj transportnog sustava na održivi urbani razvoj. U tu svrhu potrebno je u transportni sustav uključiti elemente različitih, naizgled nepovezanih podsustava. Podsustavi transportnog sustava relevantni za model koji će se izraditi u Diplomskom radu jesu sljedeći:

- Ekonomski podsustav
- Društveni podsustav
- Podsustav okoliša
- Podsustav transportne infrastrukture

Elementi koji spadaju u ekonomski podsustav su sljedeći:

- BDP po glavi stanovnika
- Stopa rasta BDP – a
- Stopa rasta realnog BDP – a
- Investicije u urbani transport
- Investicije u konstrukciju cesta

Elementi koji spadaju u društveni podsustav su sljedeći:

- Stopa rađanja
- Stopa migracije populacije
- Rast populacije
- Urbana populacija
- Stopa smrtnosti
- Pad populacije

Elementi koji spadaju u podsustav okoliša su sljedeći:

- Udio vlasništva vozila
- Vlasništvo vozila
- Povećanje emisije ugljikovog oksida

- Prosječne godišnje emisije NOx po vozilu
- Sudjelovanje motornih vozila u emisiji NOx
- Kumulativna emisija NOx
- Rasipanje NOx
- Stopa rasipanja NOx

Elementi koji spadaju u podsustav transportne infrastrukture su sljedeći:

- Putovanja po glavi stanovnika
- Ukupna putovanja stanovnika
- Putovanja automobilom
- Stopa dijeljenja javnog prijevoza
- Korištenje javnih bicikli
- Broj stanica
- Broj putnika po stanici
- Regularna putovanja autobusom
- Kapacitet putnika po busu po godini
- Rast broja autobusa
- Stopa konverzije investicija u transport
- Stopa padanja broja autobusa
- Vlasništvo autobusa
- Pad broja autobusa
- Zasićenje cesta
- Prosječan broj vozila po kilometru
- Cestovna kilometraža
- Povećanje cestovne kilometraže
- Konverzijska stopa cestovne investicije

Ova 4 podsustava svojim međudjelovanjem imaju izravan utjecaj na održivost urbanog razvoja. U narednim poglavljima bit će prikazan konkretan razvoj modela transportnog sustava sa uključenim gore navedenim elementima, kao i njihovo međudjelovanje i analizu rezultata simulacije koja će biti provedena. Za izradu takvog modela potrebni su stvarni podaci kojima će se ostvariti relevantnost

modela urbanog transportnog sustava, kao i vjerodostojnost rezultata simulacija provedenih na takvom modelu.

#### 4.2. Pregled podataka o transportnom sustavu

Modeliranje i simulacija urbanog transportnog sustava moguće je isključivo ako on predstavlja stvarnu sliku realnog sustava. To znači da su za izradu modela potrebni adekvatni ulazni podaci.

U nastavku su navedeni stvarni podaci na razini Republike Hrvatske, a koji će predstavljati ulazne podatke prilikom izrade modela urbanog transportnog sustava korištenjem programskog paketa Vensim.

##### 1. Stopa nataliteta i stopa smrtnosti

Stopa nataliteta i stopa smrtnosti važni su za izradu modela koji prikazuje utjecaj transportnog sustava na urbani održivi razvoj jer o njihovom iznosu ovisi stanje sustava urbane populacije. Naime, stanje sustava urbane populacije u direktnoj je vezi sa ostalim važnim varijablama urbanog transportnog sustava kao što su BDP, ukupna putovanja stanovništva i vlasništvo vozila. U tablici 1. moguće je uočiti stope nataliteta i smrtnosti, odnosno trend prirodnog kretanja stanovništva od 2012. do 2021. godine. Ono što je moguće primijetiti jest da se stopa nataliteta iz godine u godinu nije drastično mijenjala te se kretala oko iznosa od 8,9 do 9,8. S druge strane, stopa smrtnosti pokazivala je nešto uočljiviji trend rasta u kojem je od 2012. godine do 2021. došlo do postupnog povećanja stope smrtnosti sa najmanjeg iznosa 11,8 u 2013. godini na 16,1 u 2021. godini.

**Tablica 1.**

*Prirodno kretanje stanovništva od 2012. do 2021.*

	Živorodeni	Umrli	Prirodni prirast	Stope na 1 000 stanovnika			Verižni indeksi	
				živorodeni	umrli	prirodni prirast	živorodeni	umrli
2012.	41 771	51 710	-9 939	9,8	12,1	-2,3	101,4	101,3
2013.	39 939	50 386	-10 447	9,4	11,8	-2,5 <sup>1)</sup>	95,6	97,4
2014.	39 566	50 839	-11 273	9,3	12,0	-2,7	99,1	100,9
2015.	37 503	54 205	-16 702	8,9	12,9	-4,0	94,8	106,6
2016.	37 537	51 542	-14 005	9,0	12,3	-3,4 <sup>1)</sup>	100,1	95,1
2017.	36 556	53 477	-16 921	8,9	13,0	-4,1	97,4	103,8
2018.	36 945	52 706	-15 761	9,0	12,9	-3,9	101,1	98,6
2019.	36 135	51 794	-15 659	8,9	12,7	-3,9 <sup>1)</sup>	97,8	98,3
2020.	35 845	57 023	-21 178	8,9	14,1	-5,2	99,2	110,1
2021.	36 508	62 712	-26 204	9,4	16,1	-6,7	101,8	110,0

Izvor: dostupno na: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29028> (pristupljeno 15.06.2023)

## 2. Stopa migracije

Slično kao i stope nataliteta i smrtnosti, stopa migracije ima izravan utjecaj na stanje sustava urbane populacije, a shodno tome i utjecaj na BDP, ukupna putovanja stanovništva i vlasništvo vozila. U tablici 2. vidljivi su podaci o vanjskoj migraciji stanovništva Republike Hrvatske od 2012. do 2021. Moguće je uočiti da su kroz godine bile velike oscilacije u migracijskom saldu, a moguće je i primijetiti da se od 2019. – 2021. godine zadržava trend relativno niskog iznosa migracijskog salda u odnosu na prijašnje godine koje su uzete u razmatranje.

**Tablica 2.**

*Vanjska migracija stanovništva Republike Hrvatske od 2012. do 2021.*

	Doseljeni iz inozemstva	Odseljeni u inozemstvo	Migracijski saldo
2012.	8 959	12 877	-3 918
2013.	10 378	15 262	-4 884
2014.	10 638	20 858	-10 220
2015.	11 706	29 651	-17 945
2016.	13 985	36 436	-22 451
2017.	15 553	47 352	-31 799
2018.	26 029	39 515	-13 486
2019.	37 726	40 148	-2 422
2020.	33 414	34 046	-632
2021.	35 912	40 424	-4 512

Izvor: dostupno na: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29030> (pristupljeno 18.06.2023)

## 3. Stopa rasta realnog BDP – a

Stopa rasta BDP – a bitan je ulazni podatak s obzirom da ima izravan utjecaj na BDP koji je u transportnom sustavu bitan jer o njemu ovise investicije u urbani transport i investicije u konstrukciju cesta, kao i BDP po glavi stanovništva o kojem ovisi koliko će biti putovanja stanovništva i kako će se kretati vlasništvo vozila. U tablici 3. uočljivo je da je od 2011. – 2014. stopa rasta realnog BDP – a bila negativna, a od 2015. – 2022. je imala pozitivan iznos, s iznimkom u 2020. godini kada je zbog pandemije iznos stope realnog BDP – a bio negativan.

### Tablica 3.

*Stopa rasta realnog BDP - a Republike Hrvatske od 2011. do 2022.*

↑↓	⌘	GEO	Croatia ↓
TIME ↓			
2011			-0.1
2012			-2.3
2013			-0.4
2014			-0.4
2015			2.5
2016			3.6
2017			3.4
2018			2.8
2019			3.4
2020			-8.5
2021			13.1 (p)
2022			6.2 (p)

Izvor: dostupno na: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tec00115/default/table> (pristupljeno 18.06.2023)

#### 4. Cestovna mreža

Cestovna mreža u izravnoj je ovisnosti o investicijama u cestovnu mrežu. Cestovna mreža obuhvaća sve kilometre svih vrsta cesti u Republici Hrvatskoj. Tako je na grafičkom prikazu 7. u nastavku prikazano da u Republici Hrvatskoj ima cesta 26.550,5 kilometara ukupne duljine, a koje su podijeljene na autoceste, poluautoceste, državne ceste, županijske ceste i lokalne ceste.



## Grafički prikaz 7.

### Cestovna mreža Republike Hrvatske

Republika Hrvatska raspolaže sa sljedećom osnovnom mrežom prometne infrastrukture:



### MREŽA CESTA:



**Ceste: 26.550,5 kilometara ukupne duljine**

- administrativno je podijeljena na:
- **autoceste** i poluautoceste **1.423 km**
- **državne ceste**: ceste **7.307,6 km**
- **županijske ceste** **9.371,9 km**
- **lokalne ceste** **8.448 km**

Izvor: dostupno na: <https://mmpi.gov.hr/infrastruktura/prometna-infrastruktura-137/republika-hrvatska-raspolaže-sa-sljedećom-osnovnom-mrežom-prometne-infrastrukture/10402> (pristupljeno 20.06.2023)

## 5. Ukupna putovanja stanovnika

Ukupna putovanja stanovnika podrazumijevaju sva putovanja stanovnika koristeći sve dostupne opcije prijevoza: željeznički prijevoz, cestovni linijski prijevoz, pomorski i obalni prijevoz te zračni prijevoz. Podaci o ukupnim putovanjima stanovnika bitni su jer su povezani s podacima o korištenju javnog prijevoza koji je jedan od glavnih faktora održivog urbanog razvoja. U tablici 4. prikazan je broj prevezenih putnika i putničkih kilometara za 2021. i 2022. godinu. Može se primijetiti da je u 2022. godini došlo do porasta broja prevezenih putnika i putničkih kilometara u svim vrstama prijevoza.

**Tablica 4.***Prijevoz putnika prema vrstama prijevoza*

	Mjerna jedinica	2021.		2022.		Indeksi		
		X. - XII.	I. - XII.	X. - XII.	I. - XII.	$\frac{X. - XII. 2022.}{X. - XII. 2021.}$	$\frac{I. - XII. 2022.}{I. - XII. 2021.}$	$\frac{I. - XII. 2022.}{X. - XII. 2021.}$
Prevezeni putnici <sup>1)</sup>	tis.	14 856	57 874	18 595	82 170	81,3	125,2	142,0
Željeznički prijevoz <sup>1)</sup>	tis.	4 026	13 541	5 106	18 216	110,4	126,8	134,5
Cestovni linijski prijevoz	tis.	8 849	30 993	11 032	47 292	112,5	124,7	152,6
Pomorski i obalni prijevoz	tis.	1 683	12 280	1 914	14 261	25,6	113,7	116,1
Zračni prijevoz	tis.	298	1 061	543	2 401	56,6	182,3	226,4
Putnički kilometri <sup>1)</sup>	mil.	1 163	4 439	1 902	7 651	72,2	163,5	172,3
Željeznički prijevoz <sup>1)</sup>	mil.	141	540	259	811	110,4	183,1	150,1
Cestovni linijski prijevoz	mil.	684	2 394	887	3 224	107,5	129,7	134,7
Pomorski i obalni prijevoz	mil.	82	582	93	693	25,9	113,5	119,2
Zračni prijevoz	mil.	256	924	663	2 923	54,6	259,3	316,4

Izvor: dostupno na: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29102> (pristupljeno 21.06.2023)

**6. Putovanja autobusom i broj autobusa**

Putovanja autobusom bitan su faktor utjecaja na stopu dijeljenja javnog prijevoza. Odnosno što se putovanja autobusom povećavaju to znači da se povećava i učestalost korištenja javnog prijevoza. Kao što je navedeno u prethodnom odjeljku, javni prijevoz predstavlja jedan od važnijih faktora kada je u pitanju održivi urbani razvoj s obzirom da većina autora predlaže da bi se transportna politika trebala fokusirati na javni prijevoz kako bi se postigla optimalna razina održivosti urbanog razvoja. U tablici 5. prikazuju se podaci o cestovnom linijskom prijevozu putnika autobusima. Prikazani su podaci o prevezenim putnicima i putničkim kilometrima za unutarnji i međunarodni prijevoz za godine 2021. i 2022. Moguće je primijetiti da je došlo do povećanja broja prevezenih putnika i putničkih kilometara i za unutarnji i za međunarodni prijevoz u 2022. godini u odnosu na 2021. godinu. S druge strane, tablica 6. prikazuje podatke o gradskom prijevozu autobusima i tramvajima. Prikazani su podaci o prijeđenim kilometrima autobusa i tramvaja te prevezenim putnicima u autobusima i tramvajima. Moguće je primijetiti porast broja prevezenih putnika i prijeđenih kilometara autobusa te broja autobusa u 2022. godini u odnosu na 2021. S druge strane u 2022. godini smanjio se broj tramvaja u odnosu na 2021. godinu. Broj prijeđenih kilometara tramvaja se u 2022. godini također smanjio u odnosu na 2021., dok je broj prevezenih putnika u tramvaju u periodu od X.-XII. U 2021. godini bio veći nego u istom tom periodu u 2022. godini.

**Tablica 5.***Cestovni linijski prijevoz putnika autobusima*

	Mjerna jedinica	2021.		2022.		Indeksi		
		X. - XII.	I. - XII.	X. - XII.	I. - XII.	$\frac{X. - XII. 2022.}{VII. - XI. 2022.}$	$\frac{X. - XII. 2022.}{X. - XII. 2021.}$	$\frac{I. - XII. 2022.}{I. - XII. 2021.}$
Prevezeni putnici	tis.	8 849	30 993	11 032	47 292	112,5	124,7	152,6
Unutarnji prijevoz	tis.	8 543	29 368	10 709	44 306	120,5	125,4	150,9
Međunarodni prijevoz	tis.	306	1 625	323	2 986	35,2	105,6	183,8
Putnički kilometri	mil.	684	2 394	887	3 224	107,5	129,7	134,7
Unutarnji prijevoz	mil.	652	2 232	735	2 696	114,6	112,7	120,8
Međunarodni prijevoz	mil.	31	162	151	529	82,6	481,0	326,7

Izvor: dostupno na: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29102> (pristupljeno 20.06.2023)

**Tablica 6.***Gradski prijevoz autobusima i tramvajima*

	Mjerna jedinica	2021.		2022.		Indeksi		
		X. - XII.	I. - XII.	X. - XII.	I. - XII.	$\frac{X. - XII. 2022.}{VII. - IX. 2022.}$	$\frac{X. - XII. 2022.}{X. - XII. 2021.}$	$\frac{I. - XII. 2022.}{I. - XII. 2021.}$
Autobusi	broj	1 317	1 317	1 351	1 351	101,0	102,6	102,6
Prijeđeni kilometri autobusa	tis.	16 938	64 860	16 847	66 010	103,2	99,5	101,8
Prevezeni putnici	tis.	34 474	123 073	31 866	128 333	109,0	92,4	104,3
Tramvaji <sup>1)</sup>	broj	345	345	338	338	100,9	98,0	98,0
Prijeđeni kilometri tramvaja	tis.	3 473	13 459	3 188	12 693	110,4	91,8	94,3
Prevezeni putnici	tis.	33 091	119 671	31 969	119 735	121,2	96,6	100,1

1) Uključena su motorna kola i prikolice.

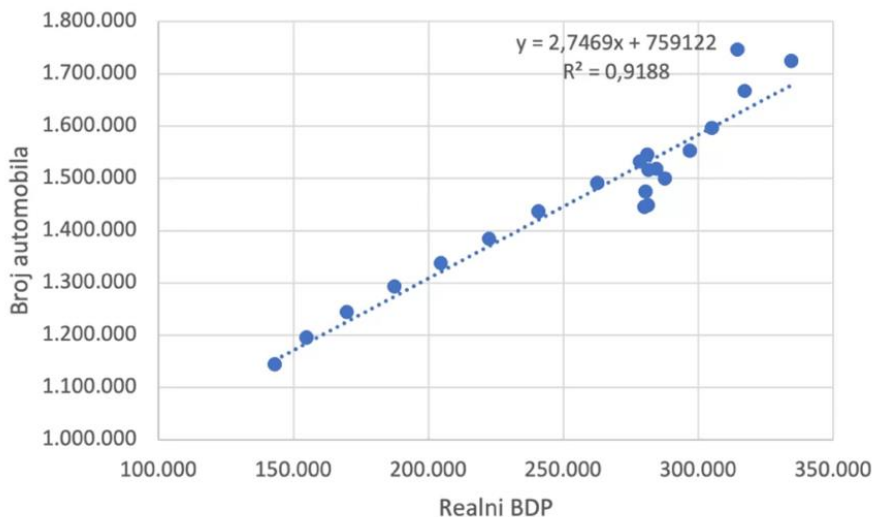
Izvor: dostupno na: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29102> (pristupljeno 20.06.2023)

**7. Korelacija između broja vozila i BDP – a**

Prema Ekonomskoj bazi (2022) korelacija između broja vozila i BDP – a je pozitivna i predstavlja linearnu funkciju  $y = 2,7469x + 759122$ . Na grafičkom prikazu 8. prikazana je linearna funkcija korelacije između broja vozila i BDP – a. Podaci ukazuju da rastom realnog BDP – a raste i broj automobila. Pojednostavljeno, kako raste BDP, stanovnici Hrvatske u prosjeku imaju više novca te oni novac mogu trošiti na kupnju novog ili rabljenog automobila. R2 odnosno koeficijent determinacije u ovoj analizi iznosi 91% što znači da se 91% porasta u broju automobila može objasniti porastom realnog BDP – a.

## Grafički prikaz 8.

*Pozitivna korelacija između broja vozila i realnog BDP – a u Republici Hrvatskoj od 2000. – 2020. godine*



Izvor: dostupno na: <https://ekonomskabaza.hr/analize/kakva-je-povezanost-između-broja-automobila-i-realnog-bdp-a-rh/> (pristupljeno 21.06.2023)

## 8. Prosječne godišnje emisije stakleničkih plinova

Iznos godišnje emisije stakleničkih plinova u području transporta zauzima sve veći udio u ukupnom iznosu godišnje emisije stakleničkih plinova. Podaci u tablici 7. koji prikazuju prosječne godišnje emisije prema kategorijama u razdoblju od 1990. do 2018. godine ukazuju na to da je prisutan kontinuirani rast iznosa godišnjih emisija stakleničkih plinova, kako u svim kategorijama, tako i u transportu. Međutim, u odnosu na druge kategorije, kod transporta je prisutan najveći porast koji se s godinama sve više povećava. Posljedice koje takav porast emisije štetnih plinova ima, a posebno na urbane aglomeracije, su zabrinjavajuće te upućuju na to da je potrebno pronaći način koji će u budućnosti smanjivati taj iznos kako bi se moglo doći do optimalne održivosti urbanih aglomeracija.

**Tablica 7.**

*Prosječne godišnje emisije stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj prema kategorijama od 1990. do 2018.*

Kategorije stakleničkih plinova	1990.	1995.	2000.	2005.	2010.	2015.	2016.	2017.	2018.
1. Energetika	21,731.3	16,033.2	18,194.8	21,583.4	19,749.5	16,625.2	17,009.5	17,388.1	16,443.0
A. Aktivnosti izgaranja	20,701.3	14,879.8	17,229.9	20,545.8	18,912.5	16,167.2	16,583.8	16,891.4	15,992.8
1. Energetske transf.	7,071.5	5,233.7	5,805.9	6,837.5	5,903.4	4,742.6	4,875.3	4,493.2	3,937.9
2. Industrija	5,529.0	2,967.9	3,115.6	3,739.0	3,030.1	2,232.0	2,236.8	2,439.4	2,421.3
3. Promet	3,882.8	3,367.4	4,443.3	5,549.2	5,954.7	5,973.1	6,194.9	6,662.2	6,428.2
4. Sektor Opće potr.	4,217.9	3,310.8	3,865.1	4,420.1	4,024.4	3,219.5	3,276.8	3,296.6	3,205.4
5. Ostalo	NO,IE	NO,IE	NO,IE	NO,IE	NO,IE	NO,IE	NO,IE	NO,IE	NO,IE
B. Fugitivne emisije	1,030.0	1,153.4	964.9	1,037.6	837.0	458.0	425.7	496.7	450.3
1. Kruta goriva	59.6	28.2	NO,NA	NO,NA	NO,NA	NO,NA	NO,NA	NO,NA	NO,NA
2. Tekuća goriva, p.plin	970.3	1,125.2	964.9	1,037.6	837.0	458.0	425.7	496.7	450.3
C. Promet i skladištenje	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Izvor: dostupno na:

[https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/012 klima/dostava\\_podataka/Izvjescia/NIR\\_2020\\_hr\\_v.pdf](https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/012_klima/dostava_podataka/Izvjescia/NIR_2020_hr_v.pdf) (pristupljeno 21.06.2023)

### **4.3. Identifikacija glavnih problema i izazova u vezi s održivim razvojem i transportom**

Gradovi su mjesta s visokom razinom akumulacije i koncentracije gospodarskih aktivnosti. To su složene prostorne strukture podržane infrastrukturom, uključujući transportne sustave. Što je veći grad, veća je njegova složenost i potencijal za poremećaje, osobito kada se ovom složenošću ne upravlja učinkovito. Urbana produktivnost uvelike ovisi o učinkovitosti transportnog sustava za premještanje radne snage, potrošača i tereta između više polazišta i odredišta. Ipak, prometna infrastruktura i terminali također pridonose određenom nizu izazova. Osim toga, prometni terminali kao što su luke, zračne luke i željezničke stanice nalaze se unutar urbanih područja, što pomaže usidrenju grada unutar regionalnog i globalnog sustava mobilnosti. Neki su izazovi stari, poput zagušenja (koji su mučili gradove poput Rima), dok su drugi novi, poput urbane distribucije tereta ili utjecaja na okoliš.

U nastavku su navedeni izazovi i problemi s kojima se urbani transportni sustavi suočavaju u modernom okruženju, a koji će biti polazište za izradu modela ovog Diplomskog rada.

#### **1. Prometne gužve i poteškoće s parkiranjem**

Zagušenja su jedan od najčešćih prometnih izazova u velikim urbanim aglomeracijama. Iako se zagušenja mogu pojaviti u svim gradovima, osobito su česta u onima iznad praga od oko milijun stanovnika. Te su strukture dovoljno velike i složene da stvore uvjete koji stvaraju sustavnu razinu zagušenja. Uz veličinu i složenost, zagušenje je posebno povezano s motorizacijom i širenjem automobila, što je povećalo potražnju za prometnom infrastrukturom. Međutim, ponuda infrastrukture često nije mogla pratiti tempo rasta mobilnosti. Budući da vozila većinu vremena provode parkirana, motorizacija je povećala potražnju za cestovnom infrastrukturom i parkirnim prostorom. Do 21. stoljeća postoji tri puta veća vjerojatnost da će vozači biti pogođeni gužvama nego u drugom dijelu 20. stoljeća.

Gužva i parkiranje također su međusobno povezani budući da ulično parkiranje troši transportni kapacitet, uklanjajući jednu ili dvije trake za promet duž gradskih cesta. Nadalje, traženje parkirnog mjesta (zvano "krstarenje") stvara dodatna kašnjenja i otežava lokalnu cirkulaciju. U središnjim područjima velikih gradova, krstarenje može činiti više od 10% lokalne cirkulacije, jer vozači mogu potrošiti i do 20 minuta tražeći parkirno mjesto. Ova praksa se često smatra ekonomski učinkovitijom od korištenja parkinga izvan ulice koji se plaća. Vrijeme potrošeno na traženje besplatnog (ili jeftinog)

parkirnog mjesta nadoknađuje se ostvarenom novčanom uštedom. Parkiranje također otežava dostavu jer će se mnoga dostavna vozila dva puta parkirati na najbližem mogućem mjestu kako bi iskrcali svoj teret.

Identificiranje pravog uzroka zagušenja strateško je pitanje za urbano planiranje jer je zagušenje obično rezultat okolnosti specifičnih za grad, kao što je nedostatak parkinga ili loše sinkronizirana prometna signalizacija.

## **2. Neadekvatnost javnog prijevoza**

Mnogi sustavi javnog prijevoza ili njihovi segmenti previše su ili nedovoljno iskorišteni budući da je potražnja za javnim prijevozom podložna razdobljima vrhunca i pada. Tijekom vršnih sati, gužva stvara nelagodu za korisnike jer se sustav nosi s privremenim porastom potražnje. To stvara izazov pružanja odgovarajuće razine tranzitne infrastrukture i razine usluga. Planiranje za vršni kapacitet ostavlja sustav nedovoljno iskorištenim tijekom sati izvan vršnog opterećenja, dok će planiranje za prosječni kapacitet dovesti do zagušenja tijekom vršnih sati.

Nizak broj putnika čini mnoge usluge financijski neodrživim, osobito u prigradskim područjima gdje gustoća nije dovoljno visoka da opravda takve usluge. Unatoč značajnim subvencijama i unakrsnom financiranju (npr. cestarine), gotovo svaki sustav javnog prijevoza ne može ostvariti dovoljan prihod da pokrije operativne i kapitalne troškove. Dok su se u prošlosti deficiti smatrali prihvatljivima zbog ključne usluge koju je javni prijevoz pružao urbanoj mobilnosti, njegov financijski teret sve je kontroverzniji.

## **3. Poteškoće za nemotorizirani prijevoz**

Ove poteškoće rezultat su intenzivnog prometa, gdje je smanjena mobilnost pješaka, bicikala i drugih nemotoriziranih vozila, ali također i zbog očiglednog nedostatka pažnje za pješake i bicikle u fizičkom dizajnu infrastrukture i objekata. Sa suprotne strane, postavljanjem biciklističkih staza oduzima se kapacitet od prometnica kao i parking prostor. Negativan bi ishod bio dodijeliti više prostora za nemotorizirani prijevoz od stvarne potražnje mobilnosti, što bi pogoršalo gužve.

#### **4. Visoki troškovi održavanja infrastrukture**

Gradovi koji se suočavaju sa starenjem svojih prometnih sustava moraju preuzeti sve veće troškove održavanja, kao i pritiske za nadogradnjom na moderniju infrastrukturu. Osim uključenih troškova, aktivnosti održavanja i popravka stvaraju poremećaje cirkulacije. Odgođeno održavanje prilično je uobičajeno jer donosi prednost održavanja niskih trenutnih troškova, ali nauštrb većih budućih troškova i, u nekim prilikama, rizika od kvara infrastrukture. Što je mreža cesta i autocesta razgranatija, to su troškovi održavanja i financijski teret veći. Isto se odnosi i na infrastrukturu javnog prijevoza koja zahtijeva strategiju održavanja na razini cijelog sustava.

#### **5. Emisija štetnih plinova**

Iako su se globalne emisije ugljika povećale, čini se da su blizu vrhuncu. Nadalje, sastav najvećih emitera je evoluirao, sa sve većim udjelom gospodarstava u razvoju. Stoga postoji razlika između razvijenih gospodarstava u kojima su emisije ugljičnog dioksida u padu i gospodarstava u razvoju u kojima one rastu. Ekonomski ciklusi utječu na emisije koje se obično smanjuju tijekom recesija (npr. 2008.-2009.). Pandemija Covid-19 također je bila povezana s primjetnim padom jer su smanjena mobilnost i putovanja. Dok su Sjedinjene Države činile 23,1% globalnih emisija CO<sub>2</sub> 1990., taj je udio pao na 13,8% 2020. Za Kinu, njezin je udio otišao s 10,8% 1990. na 30,7% 2020., što je rezultat golemog vala industrijalizacije, gospodarski razvoj i proizvodnje električne energije iz ugljena.



## 5. RAZVOJ MODELA SISTEMSKE DINAMIKE

### 5.1. Opis modela i identifikacija ključnih varijabli

U ovom poglavlju bit će prikazan strukturni model uzročno – posljedičnih veza urbanog transportnog sustava čija je svrha biti potpora odlučivanju prilikom donošenja strateških odluka za unaprjeđenje održivosti urbanih aglomeracija. Model prikazuje odnos urbanog transporta sustava i održivog razvoja urbanog transporta. Transportni sustav uključuje faktore okoliša, faktore populacije, ekonomske faktore i faktore koji se tiču potražnje i ponude transporta. Ovaj model zasniva se na uzročno posljedičnim vezama. To znači da je svaka varijabla u modelu povezana sa ostalim varijablama te da jedna na drugu imaju neki utjecaj. Strukturni dijagrami uzročno-posljedičnih veza izrađeni su u alatu draw.io. Znakom „+“ na dijagramu prikazana je pozitivna uzročna posljedična veza, odnosno povećanje jedne varijable dovodi do povećanja druge varijable. S druge strane znakom „-“ na dijagramu prikazana je negativna uzročna posljedična veza, odnosno povećanje jedne varijable dovodi do smanjenja druge varijable, a isto tako smanjenje jedne varijable dovodi do povećanja druge varijable.

Model se zasniva na uzročnim petljama koje su bazirane po sljedećoj logici:

Poboljšanje regionalnog BDP – a ima pozitivan utjecaj na investicije u javni prijevoz, a investicije u javni prijevoz su u pozitivnoj korelaciji sa brojem putovanja autobusom. Regionalni BDP poboljšava i investicije u konstrukciju cesta koje imaju pozitivan utjecaj na povećanje cestovne kilometraže. Obje vrste investicija u transport imaju neizravan utjecaj na zasićenje cesta koje potom ima izravan utjecaj na stopu rasta BDP-a.

Rast urbane populacije utječe na rast broja motornih vozila. Povećanje broja motornih vozila negativno utječe na stanje cestovnog prometa i okoliš, što potom utječe negativno na ekonomski razvoj.

Razvoj urbane ekonomije pozitivno utječe na razvoj investicija u urbani transport. Povećanje cestovne kilometraže povećava cestovni kapacitet što onda pozitivno djeluje na urbani ekonomski razvoj.

Povećanje urbane populacije povećava broj stanovnika koji putuju. Povećanje broja putovanja ima negativno djelovanje na cestovnu mrežu, odnosno povećava se zasićenost cesta. Pogoršanje cestovne mreže ima negativan utjecaj na ekonomski razvoj.

Model je moguće podijeliti na 4 podsustava:

- Ekonomski podsustav
- Društveni podsustav
- Podsustav okoliša
- Podsustav transportne infrastrukture

U sljedećim poglavljima bit će detaljno objašnjeni strukturni dijagrami uzročno – posljedičnih veza svakog podsustava urbanog transportnog sustava te će za svaki podsustav biti navedene varijable koje će se koristiti prilikom izrade simulacijskog modela u programu Vensim.

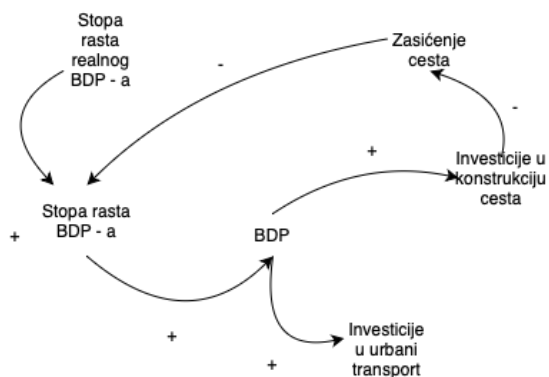
#### **5.1.1. Ekonomski podsustav**

Ekonomski podsustav za svrhu ima prikazati utjecaj ekonomskih varijabli na ukupno stanje transportnog sustava. Glavna varijabla ekonomskog podsustava jest „BDP“. Ova varijabla spaja ekonomski podsustav sa društvenim podsustavom i na taj način se više puta koristi u modelu. Glavni cilj prikaza ekonomskog sustava u modelu transportnog sustava jest dokazivanje utjecaja koji ekonomske varijable imaju na njega. Modeliranjem ovog podsustava može dati odgovore na pitanja poput: „Koliko će se BDP povećati ukoliko se povećaju investicije u javni prijevoz?“ ili „Koliki utjecaj na cestovnu infrastrukturu ima povećanje BDP – a?“. Gledajući strukturu ovog podsustava može se zaključiti da se sastoji od jedne varijable stanja sustava „BDP“, te sljedećih pomoćnih varijabli: „Stopa rasta BDP – a“, „Stopa rasta realnog BDP-a“, „Stopa konverzije investicija u transport“, „Konverzijska stopa cestovnih investicija“ te „Zasićenje cesta“.

Na sljedećem grafičkom prikazu prikazan je strukturni dijagram uzročno – posljedičnih veza na kojemu su uočljive veze koje imaju prethodno spomenute varijable.

## Grafički prikaz 9.

Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za ekonomski podsustav



Izvor: Izrada autora

S obzirom na sve prethodno spomenuto, potrebno je svaku varijablu ekonomskog podsustava povezati s odgovarajućom formulom i podacima koji će biti temelj za izradu simulacijskog modela. U nastavku je prikazana tablica sa svim varijablama ekonomskog podsustava, kao i sa odgovarajućim definicijama i formulama svake od varijabli.

**Tablica 8.**

*Varijable ekonomskog podsustava uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu*

Naziv varijable	Mjerna jedinica	Definicija	Formula	Izvor podataka
Stopa rasta BDP-a	Dmnl/Year	Postotna promjena BDP – a između dvije različite vremenske točke (Economy pedia, 2023).	Stopa rasta realnog BDP - a*(1+Zasićenje cesta)	Xue i sur. (2020)
Stopa rasta realnog BDP-a	Dmnl/Year	Postotna promjena realnog BDP – a između dvije različite vremenske točke (Economy pedia, 2023).	Tablična funkcija (Grafički prikaz 10.)	Eurostat (2023)

BDP	Eur	Vrijednost svih roba i dobara jedne države koji su proizvedeni u jednoj godini (Danas.hr, 2023)	BDP*Stopa rasta BDP-a	Xue i sur. (2020)
BDP po glavi stanovnika	Eur	Ekonomski rast po glavi stanovnika.	BDP/Urbana populacija	Yang (2018)
Investicije u konstrukciju cesta	Eur	Iznos sredstava iz BDP -a koji se ulaže u konstrukciju cesta.	BDP* 0.0416 (Nation master, 2023)	Nation master (2023)
Investicije u urbani transport	Eur	Iznos sredstava iz BDP -a koji se ulaže u urbani transport.	BDP* 0.006	Eurostat (2023)
Zasićenje cesta	Dmnl	Postotak zasićenja cesta u ovisnosti o broju vozila na dostupnoj cestovnoj kilometraži.	(Vlasništvo autobusa+Vlasništvo vozila)/(Prosječan broj vozila po kilometru*Cestovna kilometraža)	Shamsapour i sur. (2020)

Izvor: Izrada autora

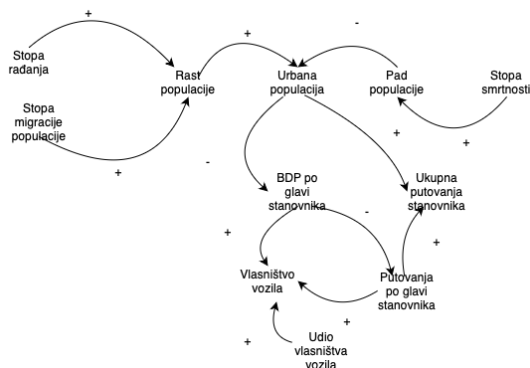
### 5.1.2. Društveni podsustav

Društveni podsustav za cilj ima prikazati utjecaj koji promjena populacije ima na transportni sustav. U ovom podsustavu ističu se varijable kao što su stopa rađanja i smrtnosti, stopa migracija te njihov utjecaj na promjenu broja urbane populacije koji ujedno predstavlja i glavnu varijablu ovog modela. Strukturno gledajući, društveni podsustav se sastoji od jedne varijable stanja sustava „Urbana populacija“. Pomoćne varijable u podsustavu su „Stopa rađanja“, „Stopa smrtnosti“, „Stopa migracije populacije“, „Rast populacije“ i „Pad populacije“.

Na sljedećem grafičkom prikazu prikazan je strukturni dijagram uzročno – posljedičnih veza na kojemu su uočljive veze koje imaju prethodno spomenute varijable.

## Grafički prikaz 10.

Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za društveni podsustav



Izvor: Izrada autora

U nastavku je prikazana tablica sa podacima o varijablama društvenog podsustava.

**Tablica 9.**

Varijable društvenog podsustava uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu

Naziv varijable	Mjerna jedinica	Definicija	Formula	Izvor podataka
Pad populacije	Person/Year	Smanjenje populacije po godini.	Stopa smrtnosti*Urbana populacija	Xue i sur. (2020)
Putovanja po glavi stanovnika	Trip/Person	Ukupna putovanja stanovništva po glavi stanovnika.	Tablična funkcija	DZS (2023)
Rast populacije	Person/Year	Broj stanovnika koji povećava trenutni broj stanovnika.	Urbana populacija*(Stopa rađanja+Stopa migracije populacije)	Yang (2018)
Stopa migracije populacije	Dmnl/Year	Postotna promjena promjene stanovništva između dvije različite vremenske točke.	Tablična funkcija	DZS (2023)
Stopa rađanja	Dmnl/Year	Postotna promjena rođenja stanovništva	Tablična funkcija	DZS (2023)

		između dvije različite vremenske točke.		
Stopa smrtnosti	Dmnl/Year	Postotna promjena smrtnosti stanovništva između dvije različite vremenske točke.	Tablična funkcija	DZS (2023)
Udio vlasništva vozila	(Standard vehicle*Person)/Eur	Udio ukupnih vlasničkih vozila u ukupnom stanovništvu.	40.9	Nation master (2023)
Ukupna putovanja stanovnika	Trip	Ukupan broj putovanja stanovnika u jednoj godini.	Putovanja po glavi stanovnika*Urbana populacija	Yang (2018)
Urbana populacija	Person	Ukupan broj stanovnika na nekom području.	Rast populacije-Pad populacije	Xue i sur. (2020)
Vlasništvo vozila	Standard vehicle	Ukupan broj vozila na nekom području.	BDP po glavi stanovnika *Udio vlasništva vozila	Xue i sur. (2020)

Izvor: Izrada autora

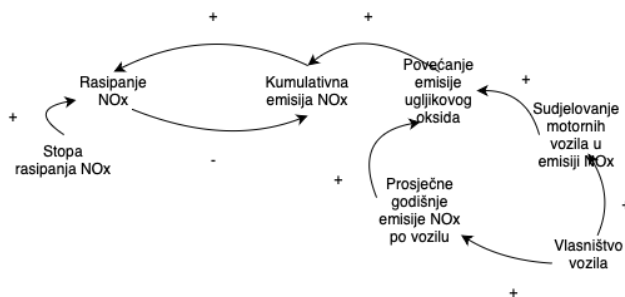
### 5.1.3. Podsustav okoliša

Podsustav okoliša za cilj ima prikazati utjecaj koji emisija štetnih plinova ima na transportni sustav. Glavna varijabla ovog modela jest „Kumulativna emisija NOx“. Svaka varijabla u ovom podsustavu ima određeni utjecaj kojim djeluje na kumulativnu emisiju NOx. Ovisno o utjecajima tih varijabli, kumulativna emisija NOx se povećava ili smanjuje u vremenskom intervalu što posljedično ima utjecaja i na ostale podsustave, ali i na cjelokupni transportni sustav. Strukturno gledajući, podsustav okoliša ima varijablu stanja sustava „Kumulativna emisija NOx“. Pomoćne varijable su sljedeće: „Rasipanje NOx“, „Stopa rasipanja NOx“, „Povećanje stope emisije NOx“, „Sudjelovanje motornih vozila u emisiji NOx“, „Prosječne emisije NOx po vozilu“. Vlasništvo vozila je linearna funkcija zavisna o „BDP po glavi stanovnika“.

Na sljedećem grafičkom prikazu prikazan je strukturni dijagram uzročno – posljedičnih veza na kojemu su uočljive veze koje imaju prethodno spomenute varijable.

## Grafički prikaz 11.

Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za podsustav okoliša



Izvor: Izrada autora

U nastavku je prikazana tablica sa podacima o varijablama podsustava okoliša.

## Tablica 10.

Varijable podsustava okoliša uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu

Naziv varijable	Mjerna jedinica	Definicija	Formula	Izvor podataka
Kumulativna emisija NOx	Mil ton	Ukupna emisija NOx.	Povećanje emisije ugljikovog oksida-Rasipanje NOx	Xue i sur. (2020)
Povećanje emisije ugljikovog oksida	Mil ton/Year	Povećanje emisije ugljikovog monoksida u milijun tona po godini.	(Vlasništvo vozila*Prosječne godišnje emisije NOx po vozilu)/Sudjelovanje motornih vozila u emisiji NOx	Xue i sur. (2020)
Prosječne godišnje emisije NOx	Mil Ton/(Year*Standard Vehicle)	Prosječna vrijednost emisije NOx po godini.	1800000 (Nation master, 2023)	Nation master (2023)
Rasipanje NOx	Mil Ton/Year	Rasipanje NOx u milijun tona po godini.	Kumulativna emisija NOx*Stopa rasipanja NOx	Yang (2018)
Sudjelovanje motornih vozila u emisiji NOx	Dmnl	Udio kojim motorna vozila sudjeluju u emisiji NOx.	0.002	Haop (2023)

Izvor: Izrada autora

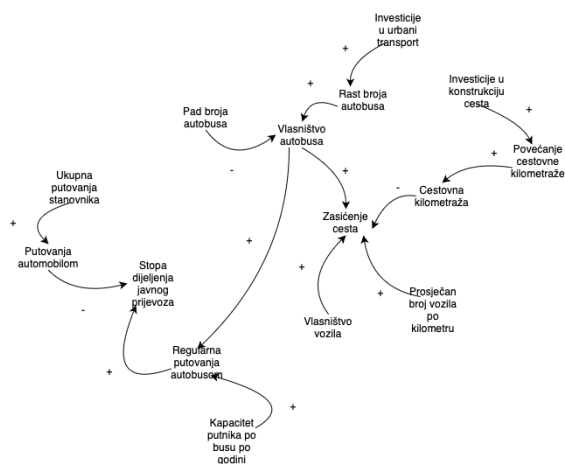
#### 5.1.4. Podsustav transportne infrastrukture

Podsustav transportne infrastrukture ima za cilj prikazati utjecaj koji investicije u urbani transport i konstrukciju cesta imaju na stopu dijeljenja javnog prijevoza, ali i na konstrukciju cesta u smislu povećanja cestovne kilometraže i shodno tome na zasićenje cesta. Ovaj podsustav je najkompleksniji od sva 4, a sadrži i nekoliko ključnih varijabli u modelu transportnog sustava. Varijable „Stopa dijeljenja javnog prijevoza“ i „Zasićenje cesta“ jako su bitne s obzirom da se analizom tih varijabli mogu dati odgovori na ključna pitanja vezana uz to kolika je odgovarajuća stopa dijeljenja javnog prijevoza te kolike su investicije u konstrukciju cesta potrebne kako bi se minimiziralo zasićenje cesta. Strukturno gledajući, u ovom podsustavu su tri varijable stanja sustava: „Vlasništvo autobusa“, „Regularna putovanja autobusom“ i „Cestovna kilometraža“. Pomoćne varijable su „Rast broja autobusa“, „Pad broja autobusa“ i „Povećanje cestovne kilometraže“.

Na sljedećem grafičkom prikazu prikazan je strukturni dijagram uzročno – posljedičnih veza na kojemu su uočljive veze koje imaju prethodno spomenute varijable.

#### Grafički prikaz 12.

Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za podsustav transportne infrastrukture



Izvor: Izrada autora

U nastavku je prikazana tablica sa podacima o varijablama podsustava transportne infrastrukture.



**Tablica 11.**

*Varijable podsustava transportne infrastrukture uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu*

<b>Naziv varijable</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Definicija</b>	<b>Formula</b>	<b>Izvor podataka</b>
Cestovna kilometraža	Km	Ukupan broj kilometara cestovne infrastrukture.	Cestovna kilometraža + Povećanje cestovne kilometraže	Xue i sur. (2020)
Kapacitet putnika po busu po godini	Standard vehicle/(Trip/Year)	Prosječan kapacitet putnika po jednom autobusu u jednoj godini.	119625	DZS (2023)
Pad broja autobusa	Standard vehicle/Year	Smanjenje broja autobusa po godini.	Vlasništvo autobusa*Stopa padanja broja autobusa	Yang (2018)
Povećanje cestovne kilometraže	Km/Year	Povećanje cestovne kilometraže po godini.	Investicije u konstrukciju cesta*Konverzijska stopa cestovne investicije	Shamsapour i sur. (2020)
Prosječan broj vozila po kilometru	Standard vehicle/Km	Prosječan broj vozila koji se nalazi na 1 km.	57.61	Nation master (2023)
Putovanja automobilom	Trip	Prosječan broj putovanja automobilom.	Ukupna putovanja stanovnika* 0.8234	Nation master (2023)
Rast broja autobusa	Standard vehicle/Year	Broj autobusa koji povećava trenutni broj autobusa.	Investicije u urbani transport*Stopa konverzije investicija u transport	Shamsapour i sur. (2020)
Regularna putovanja autobusom	Trip	Prosječan broj putovanja autobusom u odnosu na broj autobusa i kapacitet autobusa po jednoj godini.	Vlasništvo autobusa/Kapacitet putnika po busu po godini	Yang (2018)
Stopa dijeljenja javnog prijevoza	Dmnl	Udio korištenja javnog prijevoza u ukupnom korištenju urbanog prijevoza.	(Korištenje javnih bicikli+Regularna putovanja autobusom)/(Putovanja automobilom+Korištenje javnih bicikli+Regularna putovanja autobusom)	Xue i sur. (2020)

Stopa padanja broja autobusa	Dmnl/Year	Prosječna stopa po kojoj pada broj autobusa po godini.	0.0258	DZS (2023)
Vlasništvo autobusa	Standard vehicle	Ukupan broj autobusa na nekom području.	Rast broja autobusa-Pad broja autobusa	Xue i sur. (2020)

Izvor: Izrada autora

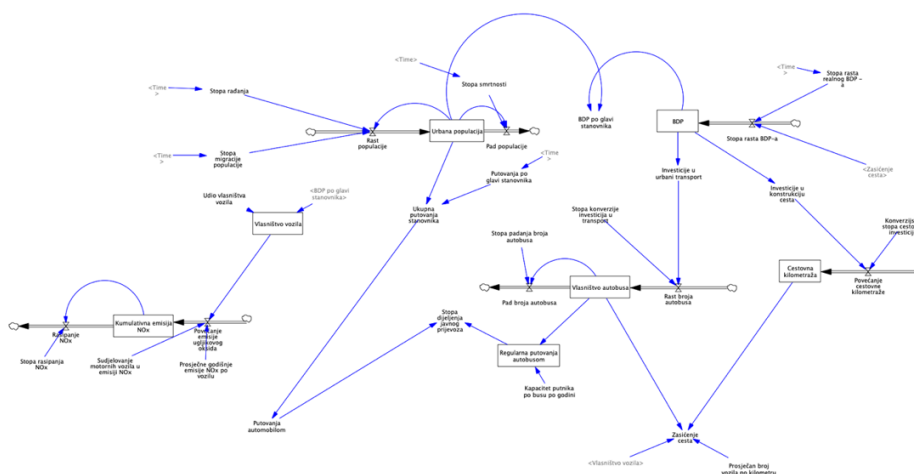
## 5.2. Izrada sistemsko dinamičkog modela urbanog transportnog sustava

Cilj modeliranja transportnog sustava jest prikazati konstrukciju sustava urbanog transporta te evaluirati efekte koje urbani transport ima na okolišne i ekonomske faktore. U tu svrhu izrađen je sistemsko – dinamički model urbanog transportnog sustava uz pomoć kojeg je moguće evaluirati scenarije koji pridonose promociji održivog urbanog transporta.

Na grafičkom prikazu 13. prikazan je sistemsko dinamički model transportnog sustava.

### Grafički prikaz 13.

*Sistemsko - dinamički model transportnog sustava*



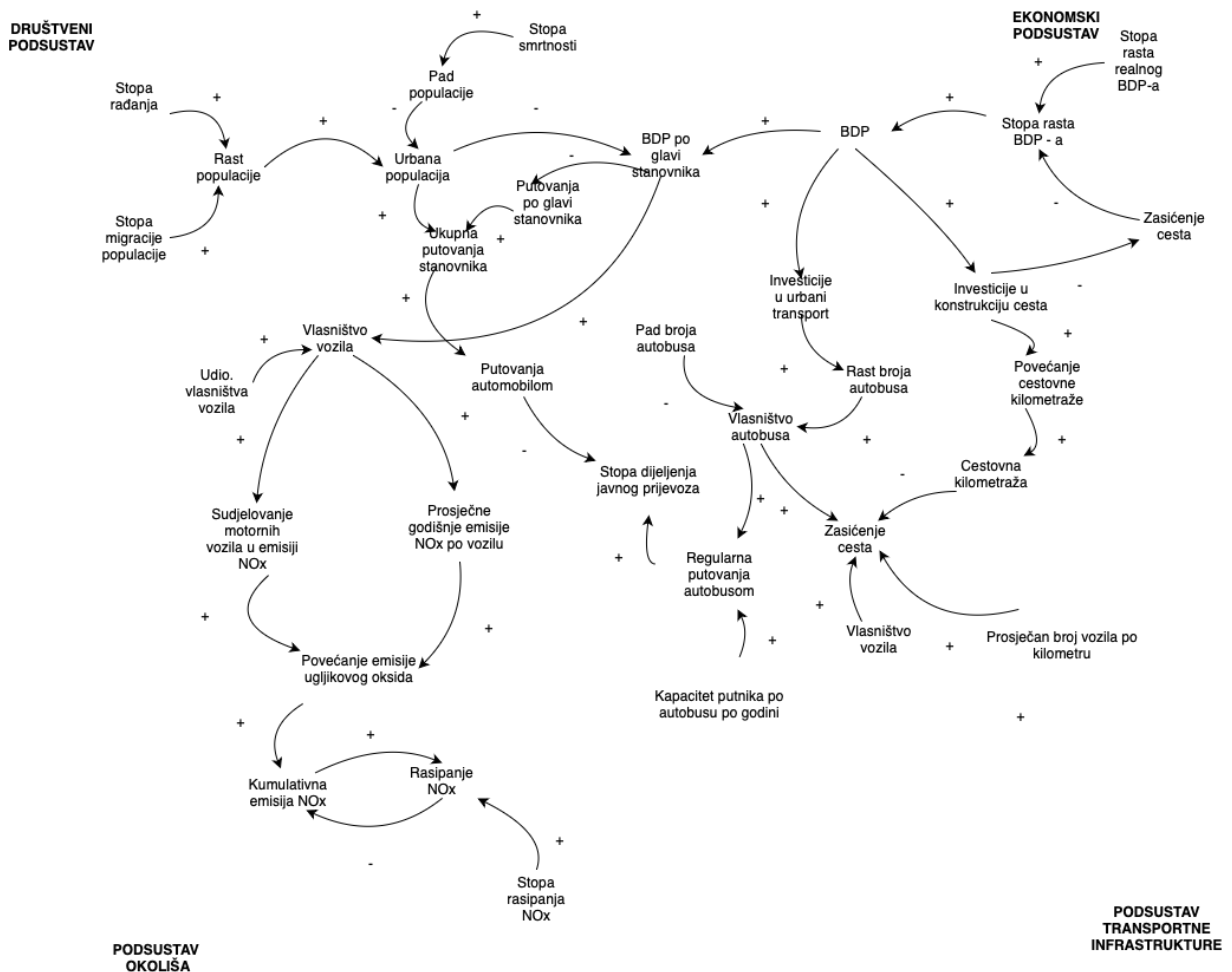
Izvor: Izrada autora

Ovaj sistemsko-dinamički model izrađen je na temelju podataka spomenutih u prethodnom poglavlju, također je izrađen korištenjem programskog paketa Vensim o kojem je više bilo riječ u poglavlju 3.

Naime, prethodno su bili prikazani strukturni dijagrami uzročno – posljedičnih veza svakog podsustava, koji mogu biti objedinjeno prikazani kao na grafičkom prikazu 14.

### Grafički prikaz 14.

Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza transportnog sustava



Izvor: Izrada autora

Upravo na toj logici zasniva se ovaj sistemsko – dinamički model. Za svaku varijablu u ovom modelu vrijede pravila i formule koje su spomenute u poglavlju 5.1.

Ovaj sistemsko-dinamički model osnova je za provedbu simulacija, odnosno scenarija o kojima će više biti riječ u sljedećem poglavlju. Ovaj model, sa svim svojim varijablama te njihovim formulama i ulaznim podacima, predstavlja alat koji za cilj ima olakšati donošenje odluka u sferi urbanog transportnog sustava. Upravo će scenarijima koji će biti provedeni u nastavku biti dokazana svrha simulacijskog modeliranja uz pomoć systemske dinamike na primjeru sistemsko-dinamičkog modela transportnog sustava prikazanog na grafičkom prikazu 14.

## 6. ANALIZA I INTERPRETACIJA REZULTATA

### 6.1. Scenario analiza

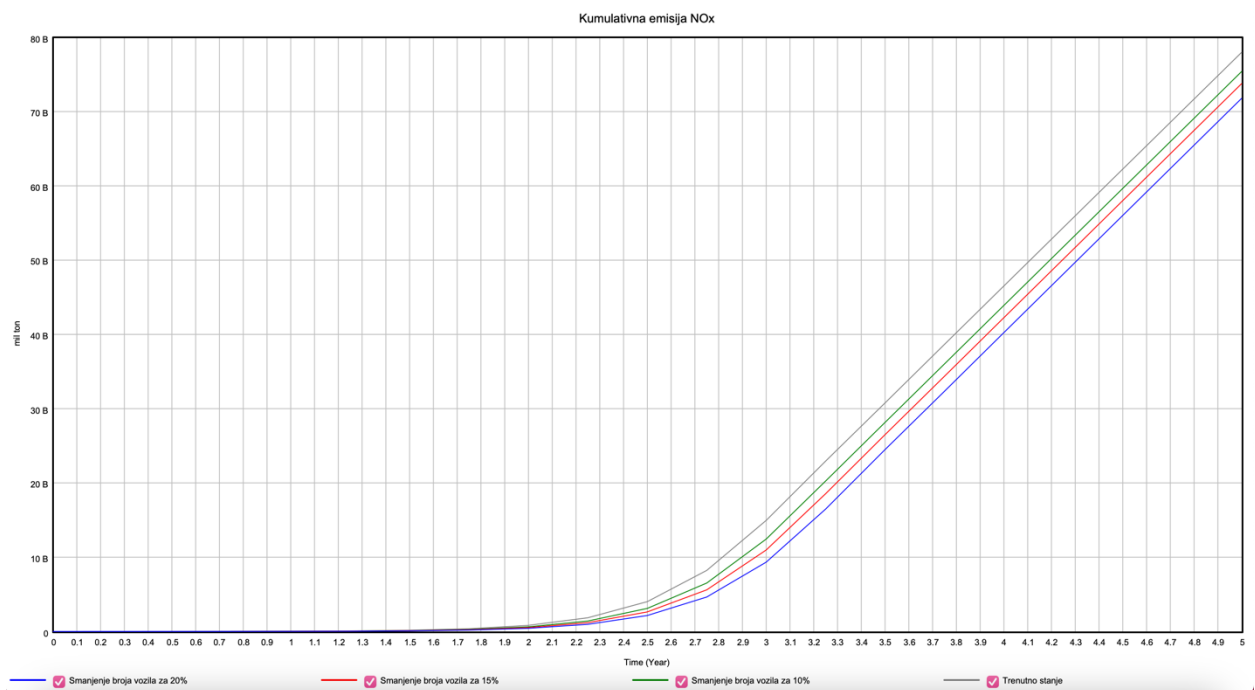
U ovom poglavlju bit će provedena simulacija scenarija povezanih uz utjecaj transportnog sustava na održivi urbani razvoj. Simulacijom scenarija koji će biti navedeni u nastavku moći će biti doneseni zaključci o potencijalnim promjenama strukture transportnog sustava kako bi isti bio u funkciji održivog urbanog razvoja. Promatrano razdoblje u ovim simulacijama je 5 godina s korakom simulacije od 0.25.

#### Scenario 1.

Prvi scenarij trebao bi dati odgovor na pitanje što će se dogoditi sa kumulativnom emisijom štetnih plinova ukoliko se broj vozila bude smanjivao za 10%, 15% i 20% svake godine unutar promatranog razdoblja od 5 godina. Na temelju rezultata simulacije prikazanih u nastavku moguće je uvidjeti koliko se može smanjiti zagađenje štetnim plinovima ukoliko dođe do postupnog smanjenja broja vozila.

#### Grafički prikaz 15.

##### Scenario 1.



Izvor: Izrada autora

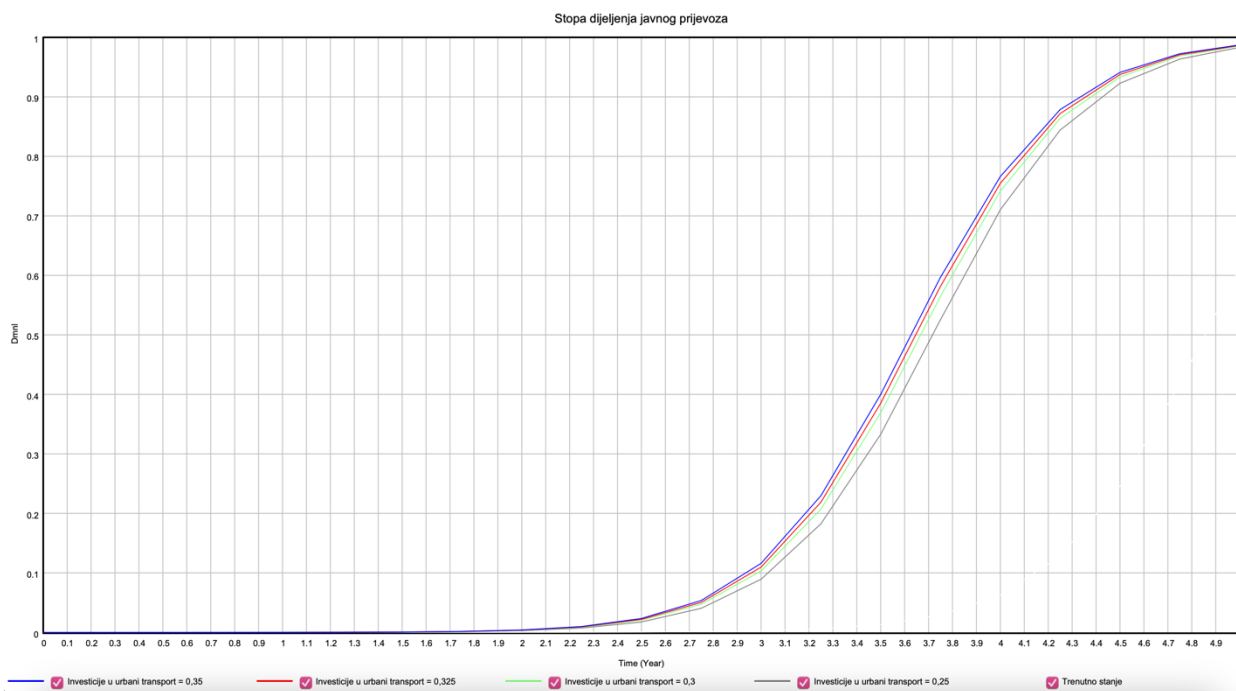
Grafički prikaz 15. prikazuje rezultate scenarija 1. Naime, vidljivo je da kroz period od 5 godina kumulativna emisija NOx eksponencijalno raste, ali ukoliko dolazi do postupnog smanjenja od 10 %, 15 % i 20 % nagib grafa pada. Vidljivo je da je pad nagiba kumulativne emisije NOx veći ukoliko dođe do većeg smanjenja broja vozila. Iz ove simulacije moguće je zaključiti da bi logično rješenje problema sve veće emisije NOx bilo smanjivanje broja vozila. S obzirom da je različit udio ispuštanja štetnih plinova iz različitih vozila, dobra politika za povećanje urbane održivosti mogla bi biti ograničavanje vlasništva vozila koja ispuštaju veću razinu štetnih plinova od one prosječne.

### **Scenario 2.**

U scenariju 2. pregledava se utjecaj različitih iznosa investicija u urbani transport na stopu dijeljenja javnog prijevoza. Proporcije investicija u urbani transport koje su uzete u obzir su 0.25, 0.3, 0.325 i 0.35. Ove proporcije investicija u urbani transport prikazuju udio investicija u urbani transport u ukupnom BDP – u. U simulaciji će biti prikazano što će se dogoditi sa stopom dijeljenja javnog prijevoza ukoliko se iznosi investicija budu mijenjali za gore navedene iznose unutar promatranog razdoblja od 5 godina. Na temelju rezultata simulacije prikazanih u nastavku moguće je uvidjeti koliki utjecaj na korištenje javnog prijevoza imaju investicije u urbani transport.

## Grafički prikaz 16.

### Scenario 2.



Izvor: Izrada autora

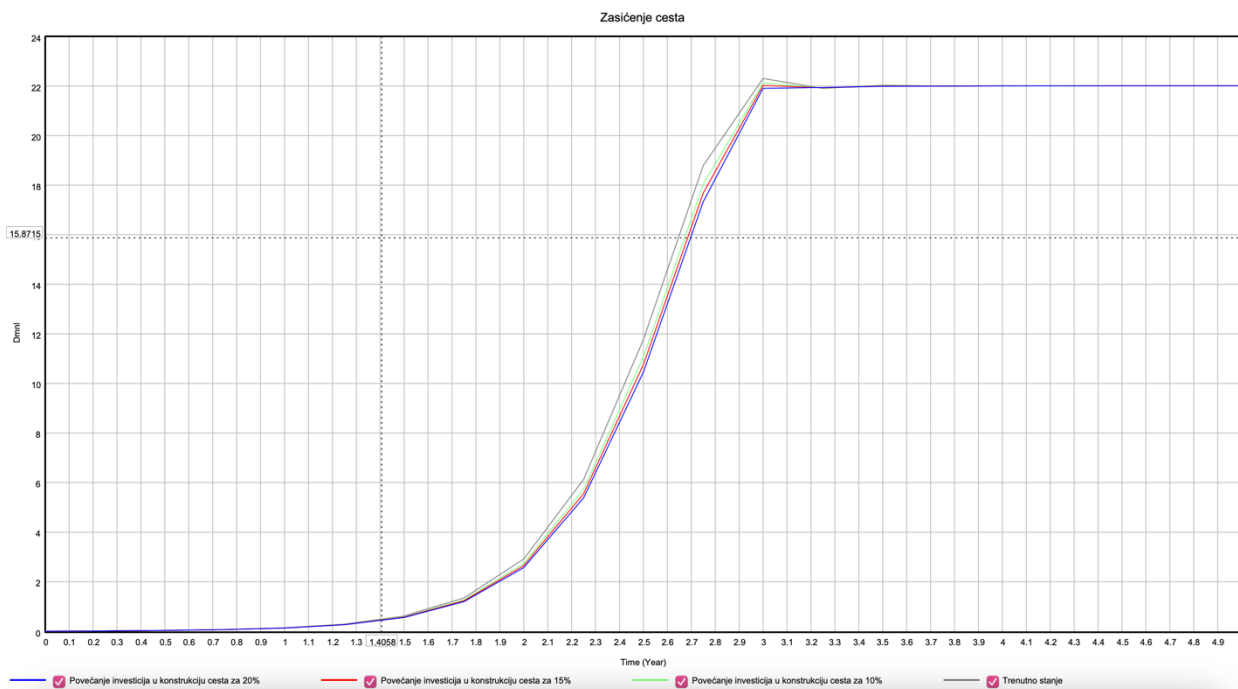
Na grafičkom prikazu 16. uočljivo je eksponencijalno povećanje stope dijeljenja javnog prijevoza s padom nagiba u posljednjoj promatranoj godini. S obzirom na inicijalnu vrijednost investicija u urbani transport, scenariji u kojima bi se povećavala stopa investicija u javni prijevoz na 0.25, 0.3, 0.325 i 0.35 imali bi znatno veći utjecaj na stopu dijeljenja javnog prijevoza. Moguće je uočiti da se povećanjem udjela investicija u urbani transport pozitivno mijenja, odnosno povećava stopa dijeljenja javnog prijevoza.

### Scenario 3.

U scenariju 3. pregledava se utjecaj različitih iznosa investicija u konstrukciju cesta na iznos zasićenja cesta. U obzir će biti uzeto povećanje investicija u konstrukciju cesta za 10%, 15% i 20% te će se prikazati kakav utjecaj to povećanje može imati na zasićenje cesta.

## Grafički prikaz 17.

### Scenario 3.



Izvor: Izrada autora

Na grafičkom prikazu 17. prikazan je rezultat simulacije scenarija 3. Ono što je vidljivo iz ovog rezultata jest da s vremenskim odmakom dolazi do povećanja zasićenja cesta. Ono što je moguće zaključiti iz navedenog scenarija jest to da povećanjem investicija u konstrukciju cesta dolazi do blagog smanjenja nagiba grafa zasićenja cesta, ali to smanjenje nije toliko značajno i ne mijenja previše trenutnu situaciju koja predstavlja kontinuirano povećanje zasićenja cesta kroz vrijeme. Također, moguće je zaključiti da povećanje investicija u konstrukciju cesta nisu jedino i idealno rješenje za smanjenje zasićenja cesta te da bi se ukoliko se želi riješiti taj problem u obzir trebala uzeti i neka druga rješenja. Naime, investiranje u konstrukciju cesta može imati i negativno djelovanje na zasićenje cesta jer se povećava cestovna kilometraža, a samim time se stvara i veći prostor za korištenje vozila i potencijalno zagušivanje cesta.

## 6.2. Analiza utjecaja varijabli na transportni sustav i održivi razvoj

Na temelju prikazanih simulacija u prethodnom poglavlju može se zaključiti da različite varijable sustava imaju različit utjecaj na transportni sustav i održivi razvoj transportnog sustava.



Varijable koje predstavljaju vlasništvo vozila, odnosno broj vozila, izravno utječu na varijablu emisije NOx. Na temelju scenarija 1. moguće je zaključiti da smanjenje, odnosno povećanje broja vozila pozitivnom povratnom vezom utječe na kumulativnu emisiju NOx. Preciznije rečeno, smanjenje broja vozila potiče smanjenje kumulativne emisije NOx, a povećanje broja vozila potiče povećanje kumulativne emisije NOx.

Investicije u urbani transport i konstrukciju cesta dvije su veoma važne varijable u ovom modelu. Naime, investicije u urbani transport izravno su vezane uz stopu dijeljenja javnog prijevoza, dok investicije u konstrukciju cesta imaju veze s cestovnom kilometražom te zasićenjem cesta. Na temelju scenarija 2. može se zaključiti da povećanje investicija u urbani transport uzrokuje povećanu stopu dijeljenja urbanog transporta, odnosno postoji pozitivna povratna veza. Ukoliko bi se smanjile investicije u urbani transport, smanjila bi se i stopa dijeljenja javnog prijevoza. Ono što se može zaključiti iz scenarija 3. je to da povećanje investicija u konstrukciju cesta povećava cestovnu kilometražu, odnosno prisutna je pozitivna povratna veza, dok povećanje investicija u konstrukciju cesta s druge strane smanjuje zasićenje cesta, odnosno postoji negativna povratna veza. Isto tako vrijedi i da smanjenje investicija u konstrukciju cesta smanjuje cestovnu kilometražu, a povećava zasićenje cesta.

## 7. ZAKLJUČAK

Urbani transportni sustav kompleksni su adaptivni sustavi koji su suočeni s brojnim izazovima. Onečišćenje zraka, prometne gužve i nedovoljna iskorištenost javnog prijevoza samo su neki od izazova koji su prisutni u gotovo svakoj urbanoj aglomeraciji. Načine na koji te izazove riješiti teško je pronaći, a ovise i o svakoj urbanoj aglomeraciji posebno. Jedan od potencijalnih alata za detekciju i rješavanje problema vezanih uz urbane transportne sustave jest model sistemske dinamike koji omogućava simulaciju stvarnog sustava u svrhu detekcije i rješavanja problema.

U ovom Diplomskom radu izrađena su 3 scenarija koristeći metodu sistemske dinamike na temelju stvarnih podataka na razini Republike Hrvatske. Na temelju provedenih simulacija može se zaključiti da varijable koje utječu na probleme urbanog transporta mogu biti detaljno analizirane te kvantificirane, a sve u svrhu donošenja odluka koje će ublažiti ili riješiti aktualne probleme urbanog transporta. Varijable koje su pokazale značajan utjecaj na urbani transportni sustav jesu vlasništvo vozila te investicije u urbani transport i konstrukciju cesta. Provedene simulacije prikazale su da vlasništvo vozila može utjecati na kumulativnu emisiju NO<sub>x</sub>, investicije u urbani transport na stopu dijeljenja javnog prijevoza, a investicije u konstrukciju cesta na zasićenje cesta.

Rezultati ovih simulacija, odnosno provedenih scenarija, mogu poslužiti kao alat za donošenje odluka u sferi urbanog transporta. Naime, ovaj sistemsko dinamički model može biti univerzalan za bilo koju urbanu aglomeraciju, a razliku čine samo inicijalni podaci koji se unose za svako promatrano područje posebno. Na temelju ovog modela moguće je izraditi analize koje se tiču pregleda utjecaja različitih varijabli na kumulativnu emisiju NO<sub>x</sub>, stopu dijeljenja javnog prijevoza i zasićenje cesta.

## LITERATURA

1. Alberti M., Sussking L. (1996): Managing urban sustainability: an introduction to the special issue
2. Armenia S., Baldoni F., Falsini D., Taibi E. (2021): A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System
3. Asasuppakit P., Thiengburanathum P. (2019): System Dynamics model of CO2 emissions from urban transportation in Chiang Mai city, International Journal of GEOMATE
4. Batur I., Koc M. (2017): A Review of System Dynamics Applications in Sustainable Urban Transportation, Hamad Bin Khalifa University
5. Bazis M. (2021): How Fewer Cars on the Road Have Affected the Environment
6. Božikov J.(2002): Modeliranje i simulacija, Medicinski fakultet sveučilišta u Zagrebu
7. Busari A., Loto R., Ajayi S., Odunlami O., Folake A. (2021): Ameliorating Urban Traffic Congestion for Sustainable Transportation
8. Buzasi A., Csete M. (2015): Sustainability Indicators in Assessing Urban Transport Systems, Periodicca Polytechnica Transportation Engineering
9. Centlewski B., Warchol J. (2021): IoT and its Role in Sustainable Transportation
10. Cepeda M., Schoufour J., Freak-Poli R., Koolhaas C. (2016): Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review
11. Chan S. (2001): Complex Adaptive Systems
12. Childers D., Pickett S., Grove J., Ogden L, Whitmer A. (2014): Advancing urban sustainability theory and action: Challenges and opportunities, School of Sustainability
13. Ćosić M. (2016): Održivi urbani promet - fokus nemotorizirani promet
14. Deming E. (1994): The New Economics, MIT
15. Fontoura W., Radzicki M.J., Ribeiro G.: Using System Dynamics to understand long - term impact of sustainable mobility policies: an analysis pre - and post - COVID - 19 pandemic
16. Fontoura W.B., Ribeiro G.M. (2021): System Dynamics for Sustainable Transportation Policies: A Systematic Literature Review, Universidade Federal do Rio de Janeiro
17. Forrester J.W. (1971): Principles of System, MIT
18. Gao J., Pan L. (2022): A System Dynamic Analysis of Urban Development Paths under Carbon Peaking and Carbon Neutrality Targets: A Case Study of Shangai
19. Grava S. (2004): Urban Transportation Systems
20. Gwilliam K., Kojima M., Johnson T. (2004): Reducing Air Pollution from Urban Transport

21. Haghshenas H., Vaziri M. (2012): Urban sustainable transportation indicators for global comparison
22. Herrmann - Lunecke M. (2018): Persistence of walking in Chile: lessons for urban sustainability
23. Hiremath R., Balachandra P., Kumar B., Murali J. (2013): Indicator - based urban sustainability - A review, Earth Science and Climate change
24. Huang L., Wu J., Yan L. (2015): Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators
25. Jakolin E. (2022): Održiva urbana mobilnost
26. Jašić T. (2021): Suvremeni informacijski sustavi u javnom prijevozu u pametnim gradovima
27. Kadyraliev A., Supaeva G., Bakas B. (2022): Investments in transport infrastructure as a factor of stimulation of economic development
28. Keivani R. (2010): A review of the main challenges to urban sustainability
29. Kekez I. (2021): Prometna infrastruktura u funkciji urbane održivosti: poslovni slučaj Istočna obala grada Splita, Sveučilište u Splitu, Ekonomski fakultet
30. Ling L., Feng L., Cao L. (2016): Analyzing the Relationship Between Urban Macroeconomic Development and Transport Infrastructure System Based on Neural Network
31. Liu S., Chen S., Liang X., Mao B., Jia S. (2015): Analysis of Transport Policy Effect on CO2 Emissions Based on System Dynamics, SAGE Publications
32. May T., Crass M. (2017): Sustainability in Transport: Implications for Policy Makers
33. Miller P., Barros A., Kattan L., Wirasinghe S. (2016): Public Transportation and Sustainability: A review
34. Nguyen T., Cook S., Ireland V. (2017): Application of System Dynamics to Evaluate the Social and Economic Benefits of Infrastructure Projects, The University of Adelaide
35. Panteleeva M., Borozdina S. (2022): Sustainable Urban Development Strategic Initiatives
36. Peixoto Neto A.G.L., Galves M.L., Junior O.F. (2008): Challenges of urban transport problems and city logistics: Sao Paulo city center case
37. Peštova V. (2019): Sustainable urban development: case study Copenhagen
38. Pojani D., Stead D. (2015): Sustainable Urban Transport in the Developing World: Beyond Megacities, School of Geography, The University of Queensland
39. Portugal-Pereira J.O., Doll C., Suwa A. (2013): The sustainable mobility – congestion nexus: a co-benefits approach to finding win-win solutions
40. Rodrigue J.P. (2020): The Geography of Transport Systems

41. Rodrigue J.P. (2020): The Geography of Transport Systems, New York: Routledge
42. Ruggerio C.A. (2021): Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions
43. Shamsapour N., Hajinezhad A., Noorollahi Y. (2020): Developing a system dynamics approach for CNG vehicles for low - carbon urban transport: a case study, International Journal of Low - carbon Technologies
44. Shepherd S.P. (2014): A review of system dynamics models applied in transportation, University of Leeds
45. Smolčić A. (2020): Održivi razvoj u urbanom prometu
46. Susniene D. (2011): Quality approach to the sustainability of public transport
47. Škunca O., Penzar D. (2000): Modeliranje i simulacije kompleksnih adaptivnih sustava
48. Škunca O., Penzar D. (2000): Modeliranje i simulacije kompleksnih adaptivnih sustava
49. Tatra - Yug (2021): Public transportation can reduce traffic congestion
50. Verma P., Raghubanshi A. (2018): Urban sustainability indicators: Challenges and opportunities, Integrative Ecology Laboratory
51. Wang P., Liu P., Wang C., Wang A., Guan H., Li S., Xia X. (2021): Optimal dynamic investment allocation on construction of intelligent transportation infrastructure and road maintenance with environmental costs
52. Xue Y., Cheng L., Wang K., An J., Guan H. (2020): System Dynamics Analysis of the Relationship between Metropolis Construction and Sustainable Development of Urban Transportation - Case Study of Nanchang City
53. Yang G. (2018): Study on the System Dynamics Model of Low Carbon City Development, International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)
54. Zavitsas K., Kaparias I., Bell M.G.H. (2010): Transport problems in cities
55. Zekić-Sušac M. (2013): Sistemska dinamika
56. Zuber N. (2019): Savjeti eko vožnje: Planirajte svoje putovanje!

#### INTERNET IZVORI:

1. AHK (2019): Hrvatska ulaže u cestovnu mrežu, dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://kroatien.ahk.de/hr/info-centar/novosti/detail/hrvatska-ulaze-u-cestovnu-mrezu>

2. Danas.hr (2023): Što je BDP?, dostupno 21.06.2023. na internetskoj stranici <https://danas.hr/arhiva/sto-je-bdp-objasnjenje-pojma-i-znacenje-bdp-a-e10c92a0-b9f0-11ec-9978-0242ac120021>
3. DZS (2020): Transport u 2020., dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://podaci.dzs.hr/hr/arhiva/transport-i-komunikacije/transport/>
4. DZS (2022): Investicije u 2021., dostupno 19.06.2023. na internetskoj stranici <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29158>
5. DZS (2022): Migracija stanovništva Republike Hrvatske u 2022., dostupno 19.06.2023. na internetskoj stranici <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29030>
6. DZS (2022): Prirodno kretanje stanovništva Republike Hrvatske u 2021., dostupno 19.06.2023. na internetskoj stranici <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29028>
7. DZS (2023): Transport u četvrtom tromjesečju 2022., dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici [https://podaci.dzs.hr/media/bmudzpcl/tran-2022-1-1\\_4-transport-u-2022.pdf](https://podaci.dzs.hr/media/bmudzpcl/tran-2022-1-1_4-transport-u-2022.pdf)
8. Economy pedia (2023): Stopa rasta, dostupno 22.06.2023. na internetskoj stranici <https://hr.economy-pedia.com/11038624-growth-rate>
9. Ekonomska baza (2022): Kakva je povezanost između broja automobila i realnog BDP – a RH?, dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://ekonomskabaza.hr/analize/kakva-je-povezanost-između-broja-automobila-i-realnog-bdp-a-rh/>
10. Eurostat (2018): Government expenditure on transport: 1.9% of GDP, dostupno 24.06.2023. na internetskoj stranici <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20180904-1>
11. Eurostat (2023): Real GDP growth rate – volume, dostupno 18.06.2023. na internetskoj stranici <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/16921720/2-08062023-AP-EN.pdf/70e6937f-93ad-2936-ed03-5dbc9fd762f6>
12. McKinsey&Company (2018): Elements of success: Urban transportation systems of 24 global cities, dostupno 22.06.2023. na internetskoj stranici [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Elements%20of%20success%20Urban%20transportation%20systems%20of%2024%20global%20cities/Urban-transportation-systems\\_e-versions.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Elements%20of%20success%20Urban%20transportation%20systems%20of%2024%20global%20cities/Urban-transportation-systems_e-versions.ashx)
13. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike (2020): Izvješće o inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske za razdoblje 1990. – 2018. NIR 2020, dostupno 24.06.2023. na internetskoj stranici

[https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/012\\_klima/dostava\\_podataka/lzvi\\_esca/NIR\\_2020\\_hrv.pdf](https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/012_klima/dostava_podataka/lzvi_esca/NIR_2020_hrv.pdf)

14. MMPI (2022): Broj vozila po vrsti vozila i vrsti goriva u RH, dostupno 21.06.2023. na internetskoj stranici [https://mmpi.gov.hr/UserDocImages/arhiva/Prilog%204%20%20NOP%20ver30-05-2015%2014-7\\_15.pdf](https://mmpi.gov.hr/UserDocImages/arhiva/Prilog%204%20%20NOP%20ver30-05-2015%2014-7_15.pdf)
15. MMPI (2023): Prometna infrastruktura, dostupno 19.06.2023. na internetskoj stranici <https://mmpi.gov.hr>
16. Nation master (2023): Investment in road infrastructure, dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://www.nationmaster.com/nmx/ranking/investment-in-road-infrastructure>
17. Nation master (2023): NOx emissions per populated area, dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://www.nationmaster.com/country-info/stats/Environment/NOx-emissions-per-populated-area>
18. Nation master (2023): Ownership of passenger cars, dostupno 01.07.2023. na internetskoj stranici <https://www.nationmaster.com/nmx/ranking/ownership-of-passenger-cars>
19. Nation master (2023): Share of passenger cars in total road motor vehicles, dostupno 01.07.2023. na internetskoj stranici <https://www.nationmaster.com/nmx/ranking/share-of-passenger-cars-in-total-road-motor-vehicles>
20. Nation master (2023): Vehicles per km of road, dostupno 03.07.2023. na internetskoj stranici <https://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Vehicles/Per-km-of-road>
21. NL Promo (2022): Ukupna ulaganja u prometnu infrastrukturu u Republici Hrvatskoj dosegula su iznos od gotovo 25 milijardi kuna, dostupno 29.06.2023. na internetskoj stranici <https://www.novolist.hr/ostalo/promo/ukupna-ulaganja-u-prometnu-infrastrukturu-u-republici-hrvatskoj-dosegnula-su-iznos-od-gotovo-25-milijardi-kuna/>
22. Study Smarter (2021): Sustainable Urban Development, dostupno 21.06.2023. na internetskoj stranici <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/human-geography/economic-geography/sustainable-development-goal-15/>
23. The Future is PUBLIC TRANSPORT (2021): How investing in public transport this decade can protect our jobs, our climate, our future, dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://www.c40.org/wp-content/uploads/2021/11/ITF-C40-joint-report-Making-COP26-count-Nov-2021-EN.pdf>
24. UCLA Sustainability Committee (2016): Guiding Campus principles of sustainability, dostupno 20.06.2023. na internetskoj stranici <https://www.sustain.ucla.edu/sustainability-committee/>

25. Ventana Systems UK (2023): Ventana Software dostupno 24.06.2023. na internetskoj stranici  
<https://www.ventanasystems.co.uk>
26. Ventana Systems UK (2023):Vensim, dostupno 24.06.2023. na internetskoj stranici  
<https://www.ventanasystems.co.uk>



## POPIS GRAFIČKIH PRIKAZA

Grafički prikaz 1. Urbani transportni sustav

Grafički prikaz 2. Simboli systemske dinamike

Grafički prikaz 3. Simboli koji se upotrebljavaju kod dijagrama uzročnih petlji

Grafički prikaz 4. Četiri karakteristična obrasca ponašanja sustava

Grafički prikaz 5. Fitness krajolik

Grafički prikaz 6. Sučelje Vensim softvera

Grafički prikaz 7. Cestovna mreža Republike Hrvatske

Grafički prikaz 8. Pozitivna korelacija između broja vozila i realnog BDP – a u Republici Hrvatskoj od 2000. – 2020. godine

Grafički prikaz 9. Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za ekonomski podsustav

Grafički prikaz 10. Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za društveni podsustav

Grafički prikaz 11. Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za podsustav okoliša

Grafički prikaz 12. Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza za podsustav transportne infrastrukture

Grafički prikaz 13. Sistemsko - dinamički model transportnog sustava

Grafički prikaz 14. Strukturni dijagram uzročno-posljedičnih veza transportnog sustava

Grafički prikaz 15. Scenario 1.

Grafički prikaz 16. Scenario 2.

Grafički prikaz 17. Scenario 3.

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prirodno kretanje stanovništva od 2012. do 2021.

Tablica 2. Vanjska migracija stanovništva Republike Hrvatske od 2012. do 2021.

Tablica 3. Stopa rasta realnog BDP - a Republike Hrvatske od 2011. do 2022.

Tablica 4. Prijevoz putnika prema vrstama prijevoza

Tablica 5. Cestovni linijski prijevoz putnika autobusima

Tablica 6. Gradski prijevoz autobusima i tramvajima

Tablica 7. Prosječne godišnje emisije stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj prema kategorijama od 1990. do 2018.

Tablica 8. Varijable ekonomskog podsustava uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu

Tablica 9. Varijable društvenog podsustava uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu

Tablica 10. Varijable podsustava okoliša uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu

Tablica 11. Varijable podsustava transportne infrastrukture uz pripadajuću mjernu jedinicu, definiciju i formulu

## **SAŽETAK**

Izazovi povezani s urbanim transportom sve su prisutniji u suvremenom svijetu. Rješenja tih problema gotovo su nemoguća s obzirom na sve veću urbanizaciju. Sistemska dinamika predstavlja metodu koja može olakšati donošenje potencijalnog rješenja.

Model sistemske dinamike urbanog transportnog sustava prikazuje sve varijable stvarnog modela uz sve pripadajuće podatke. Varijable modela povezane su na točno određen način kako to i jest u stvarnom životu. Na temelju uzročno posljedičnih veza, kao i formula te inicijalnih podataka, mogu se provesti simulacije koje daju detaljan uvid u stvarno i potencijalno stanje urbanih transportnih sustava.

Na temelju modela sistemske dinamike moguće je izrađivati analize koje mogu pomoći u donošenju odluka vezanih uz poboljšanje urbanih transportnih sustava kao i za povećanje održivog razvoja urbanih transportnih sustava.

**Ključne riječi:** urbani transport, sistemska dinamika, model sistemske dinamike, simulacija, održivi razvoj

## **SUMMARY**

Challenges associated with urban transport are increasingly present in the modern world. Solutions to these problems are almost impossible given the increasing urbanization. System dynamics represents a method that can facilitate the adoption of a potential solution.

The model of the system dynamics of the urban transport system shows all the variables of the real model along with all the associated data. The variables of the model are related exactly as they are in real life. On the basis of cause-and-effect relationships, as well as formulas and initial data, simulations can be carried out that provide a detailed insight into the actual and potential state of urban transport systems. Based on the model of system dynamics, it is possible to make analyzes that can help in making decisions related to the improvement of urban transport systems, as well as to increase the sustainable development of urban transport systems.

**Key words:** urban transport, system dynamics, system dynamics model, simulation, sustainable development