

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA
Trg Mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ SAŠA REGIJE

RAZISKOVALNA NALOGA

**OPTIMIZACIJA PROMETNEGA TOKA S
POMOČJO RAČUNALNIŠKE SIMULACIJE**

Tematsko področje: Računalništvo

Avtor:
Timotej Kompare

Mentor:
Aleš Spital

Velenje, 2024

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje, Elektro in računalniški šoli.

Mentor: Aleš Spital

Datum predstavitve: marec 2024

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Elektro računalniška šola Velenje, 2023/2024

KG promet / analiza / optimizacija / paradoks

AV KOMPARE, Timotej

SA SPITAL, Aleš

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

ZA Elektro računalniška šola Velenje

LI 2024

IN OPTIMIZACIJA PROMETNEGA TOKA S POMOČJO RAČUNALNIŠKE SIMULACIJE

TD Raziskovalna naloga

IJ sl

JI sl / en

AI Moja raziskovalna naloga sistematično obravnava kompleksni problem optimizacije prometnega toka z izčrpnim pregledom naprednih metod računalniške simulacije. Osredotoča se na analizo vpliva odločitev voznikov na dinamiko prometnega toka, pri čemer se osredotoča na uporabo konceptov teorije iger in modeliranja vedenja udeležencev v prometu. Poleg tega se poglobljeno preučujejo paradoksi in kontraproduktivni ukrepi prometne politike, pri čemer se izvaja iskanje najbolj optimalnih rešitev z uporabo algoritmov, ki temeljijo na optimizaciji prometnega toka. Cilj raziskave je razviti inovativne strategije za optimizacijo prometnega toka, ki temeljijo na celovitem razumevanju kompleksnih interakcij med različnimi prometnimi parametri in prometno infrastrukturo. Z uporabo le teh je namen predvsem izboljšati učinkovitost prometnih sistemov, kar bo omogočilo boljše načrtovanje in upravljanje prometnih omrežij v prihodnosti, hkrati pa prispevalo k ustvarjanju bolj trajnostnega, varnega in učinkovitega prometnega okolja.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Elektro računalniška šola Velenje, 2023/2024

CX traffic / analysis / optimization / paradox

AU KOMPARE, Timotej

AA SPITAL, Aleš

PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

PB Elektro računalniška šola Velenje

PY 2024

TI OPTIMIZATION OF TRAFFIC FLOW USING COMPUTER SIMULATION

DT Research work

LA SL

AL sl/en

AB My research assignment systematically addresses the complex problem of traffic flow optimization through a comprehensive review of advanced computer simulation methods. It focuses on the analysis of the impact of driver decisions on the dynamics of traffic flow, focusing on the application of game theory concepts and modeling the behavior of road users. In addition, the paradoxes and counterproductive measures of transport policy are studied in depth, and the search for the most optimal solutions is carried out using algorithms based on traffic flow optimization. The aim of the research is to develop innovative strategies for traffic flow optimization based on a comprehensive understanding of the complex interactions between different traffic parameters and traffic infrastructure. By using only these, the main purpose is to improve the efficiency of transport systems, which will enable better planning and management of transport networks in the future, and at the same time contribute to the creation of a more sustainable, safe and efficient transport environment.

KAZALO VSEBINE

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | UVOD | 1 |
| 2 | PREGLED VSEBIN | 2 |
| 2.1 | RAZVOJ PROMETA | 2 |
| 2.2 | PROBLEMATIKA PROMETNIH ZASTOJEV | 3 |
| 2.2.1 | NAČINI ZA ZMANJŠANJE PROMETNIH ZASTOJEV | 3 |
| 3 | BRAESSOV PARADOKS | 5 |
| 3.1 | PRIMERI IZ REALNEGA ŽIVLJENJA | 5 |
| 3.1.1 | ODSTRANITEV ZVEZDNEGA IGRALCA IZ KOŠARKAŠKE EKIPE | 5 |
| 3.1.2 | PROJEKT OBNOVE AVTOCESTE V SEOULU | 6 |
| 3.1.3 | ZAPRTJE 42TH STREET V MANHATTNU | 7 |
| 3.2 | ZAKAJ PRIHAJA DO TEGA POJAVA? | 7 |
| 3.3 | GAME THEORY | 8 |
| 3.3.1 | ZAPORNIŠKA DILEMA | 9 |
| 3.3.2 | NASH EQUILLIBRIUM | 10 |
| 3.4 | SIMULACIJA IN ANALIZA PARADOKSA | 11 |
| 3.5 | POTEK IZDELAVE SIMULACIJE..... | 18 |
| 3.5.1 | KNJIŽNICA NETWORKX | 19 |
| 3.5.2 | RAČUNANJE NAJKRAJŠE POTI MED VOZLIŠČI | 19 |
| 3.5.1 | ALGORITEM DIJKSTRA..... | 20 |
| 3.5.2 | VIZUALIZACIJA OMREŽJA Z MATPLOTLIB KNJIŽNICO | 21 |
| 4 | OPTIMIZACIJA PRETOČNOSTI PROMETA..... | 23 |
| 4.1 | POJAV NAMIŠLJENE PROMETNE ZAMAŠITVE..... | 23 |
| 4.1.1 | ZAKAJ PRIDE DO NAVIDEZNE ZAMAŠITVE? | 23 |
| 4.1.2 | POENOSTAVLJENA VERZIJA TAKŠNEGA POJAVA | 24 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------|
| 4.2 | SHOCKWAVE EFEKT | 24 |
| 4.2.1 | REŠITVE, KI PRIPOMOREJO K OPTIMIZACIJI | 25 |
| 4.2.2 | ANALIZA EFEKTA | 25 |
| 4.2.3 | IZRAČUN PRETOČNOSTI SEMAFORIZIRANEGA KRIŽIŠČA | 27 |
| 4.2.4 | PRETOČNOST PROMETA BREZ VPLIVA ČLOVEKA | 28 |
| 5 | REZULTATI..... | 29 |
| 5.1 | UGOTOVITVE SIMULACIJE BRAESSEVEGA PARADOKSA..... | 29 |
| 5.2 | UGOTOVITVE IZRAČUNA SHOCKWAVE EFEKTA | 29 |
| 6 | RAZPRAVA..... | 31 |
| 7 | ZAKLJUČEK | 32 |
| 8 | ZAHVALA | 33 |
| 9 | VIRI IN LITERATURA | 34 |

KAZALO SLIK

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Primer zaporniške dileme [14] | 9 |
| Slika 2: Grafični prikaz enostavnega cestnega omrežja | 11 |
| Slika 3: Grafični prikaz prometnega omrežja skozi katerega pelje 400 vozil | 12 |
| Slika 4: Prikaz nadgraditve prometnega omrežja z dodatno povezavo | 13 |
| Slika 5: Prikaz najhitrejša poti pri 325 vozilih | 14 |
| Slika 6: Prikaz najhitrejša poti pri 400 vozilih | 15 |
| Slika 7: Grafični prikaz omrežja pri gostoti 450 vozil | 16 |
| Slika 8: Grafični prikaz omrežja brez dodatne povezave s 450 vozili | 17 |
| Slika 9: Prikaz preobremenitve omrežja brez dodatne povezave | 18 |
| Slika 10: Prikaz enostavnega omrežja za namene računanja najkrajše poti..... | 20 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 11: Grafa, ki prikazujeta gostoto prometa na dani relaciji [11]..... | 26 |
|----------------------------------------------------------------------------|----|

KAZALO ENAČB

| | |
|---------------------------------------------------|----|
| Enačba 1: Izračun razdalje glede na pospešek..... | 27 |
|---------------------------------------------------|----|

1 UVOD

Promet, ta neprekinjen tok gibanja in interakcije, je temeljni steber sodobnih urbanih okolij. Vendar pa se pod tem površjem vsakodnevnega vrveža skrivajo kompleksni pojavi, ki vplivajo na potek vsakdanjega prometa. V tej raziskovalni nalogi sem se odločil analizirati različne pojave, ki vplivajo na promet in potovalni čas posameznikov ter prometnega omrežja kot celota. Raziskoval sem vplive ljudi in človeških faktorjev na pretočnost prometa. Poznavanje teh razlogov je ključno za razvoj boljših in bolj učinkovitih prometnih sistemov ter za oblikovanje strategij za optimizacijo prometne infrastrukture.

HIPOTEZE:

1. Širjenje prometnih povezav poveča pretočnost prometa in posledično zmanjša potovalni čas od točke A do B.
2. Pretočnost prometa lahko povečamo za več kot 50%, če onemogočimo človeške faktorje pri vplivu na potek prometa.
3. Simulacija nam omogoči lažje razumevanje in prikaz različnih vplivov na prometni tok in njegovo pretočnost.

2 PREGLED VSEBIN

Promet predstavlja ključni vidik vsakdanjega življenja sodobne družbe, ki je kljub svojim prednostim pogosto zaznamovan s težavami in izzivi. Vsakodnevno se soočamo z različnimi vidiki prometnih težav, med katerimi so zamaški ena izmed najbolj običajnih in motečih pojavov. Ti ne le vplivajo na naše časovno načrtovanje, temveč imajo tudi ekonomske, okoljske in socialne posledice.

2.1 RAZVOJ PROMETA

Promet je bil ključni dejavnik človeškega razvoja skozi celotno zgodovino človeštva. Od prvih preprostih prevoznih sredstev, kot so bili konji in vozovi, do današnjih visokotehnoloških avtomobilov in pametnih prometnih sistemov, je promet doživel izjemno razvojno pot, ki je temeljito spremenila način, kako se premikamo, komuniciramo in živimo. [1]

V zadnjih desetletjih smo priča hitremu razvoju tehnologije, ki spreminja način, kako se premikamo in upravljamo s prometom. Pametni prometni sistemi, povezana vozila, avtonomna vozila in aplikacije za deljenje prevoza so samo nekatere inovacije, ki oblikujejo prihodnost prometa. Pametni prometni sistemi uporabljajo napredne tehnologije, kot so senzorji, kamere, umetna inteligenca, za spremljanje prometa, upravljanje prometnih tokov, zmanjšanje zastojev in izboljšanje varnosti na cestah. Povezana vozila omogočajo komunikacijo med vozili in infrastrukturo, kar omogoča boljše upravljanje prometa in preprečevanje nesreč. Avtonomna vozila pa obetajo popolnoma novo dobo mobilnosti, kjer bodo vozila sposobna samodejno voziti brez človeškega posredovanja. [1]

2.2 PROBLEMATIKA PROMETNIH ZASTOJEV

Prometni zastoji, ki jih običajno označujemo kot "traffic jams" ali preprosto "zamaški", predstavljajo enega izmed najbolj običajnih, motečih in razširjenih problemov sodobnega urbanega življenja. Čeprav so se pojavili kot posledica povečanega števila vozil v prometu, so njihove posledice precej kompleksne in večplastne. [1] [11]

Prvi in najopaznejši učinek prometnih zamaškov je izguba časa. Vsakodnevno se na milijone ljudi po vsem svetu znajdejo ujeti v prometnih konicah, kar povzroča zamude pri njihovih dnevnih opravkih, službi, šoli in drugih pomembnih dejavnostih. Ta izguba časa ni le moteča, temveč ima tudi resne ekonomske posledice. Po podatkih raziskav porabijo vozniki v nekaterih mestih do 100 ur letno v zastojih, kar povzroči milijarde izgubljenih dolarjev zaradi zamud pri delu in drugih poslovnih dejavnostih. [1] [11]

Poleg časovne izgube prometni zamaški povzročajo tudi povečano onesnaževanje okolja. Vozila, ujeta v zastoj, porabijo več goriva in oddajajo več toplogrednih plinov, kar prispeva k poslabšanju kakovosti zraka in prispeva k podnebnim spremembam. Poleg tega prometni zamaški povečujejo tudi tveganje za prometne nesreče, saj lahko dolgotrajno čakanje in nepredvidljivo premikanje vozil povzročijo frustracijo in povečajo stopnjo nevarnosti na cesti.

Zaradi teh in drugih razlogov je zmanjšanje prometnih zastojev postalo ključna prioriteta za mestne oblasti, urbaniste, prometne inženirje ter druge strokovnjake. Obstaja več pristopov k reševanju te problematike, vključno z izboljšanjem prometne infrastrukture, uvedbo pametnih prometnih sistemov, spodbujanjem trajnostnih načinov prevoza, kot je kolesarjenje in uporaba javnega prevoza, ter spremembo vedenja voznikov. [1]

2.2.1 NAČINI ZA ZMANJŠANJE PROMETNIH ZASTOJEV

Eden izmed učinkovitih načinov za zmanjšanje prometnih zastojev je izboljšanje prometne infrastrukture. To vključuje gradnjo dodatnih prometnih pasov, razširitve cest in avtocest, izboljšanje križišč ter uvedbo naprednih prometnih signalizacij. Poleg tega

lahko uvedba pametnih prometnih sistemov, ki temeljijo na tehnologiji in podatkih, pomaga pri boljšem upravljanju prometa in optimizaciji pretoka vozil na cestah. [1] [11]

Poleg infrastrukturnih ukrepov je pomembno tudi spodbujanje alternativnih načinov prevoza. Investicije v javni prevoz, kolesarske poti in pešpoti ter spodbujanje souporabe vozil, lahko zmanjša odvisnost od individualnega avtomobilskega prevoza in posledično zmanjšajo obremenitev cest. [1]

Ključnega pomena je tudi ozaveščanje in izobraževanje voznikov o pomembnosti defenzivne vožnje, spoštovanja prometnih pravil ter sprejemanja alternativnih načinov prevoza. S spremembo vedenja voznikov lahko bistveno zmanjšamo število prometnih nesreč ter izboljšamo pretok prometa na cestah. [1] [11]

3 BRAESSOV PARADOKS

Braessov paradoks je pojav, ki opisuje nenavaden pojav v teoriji omrežij, kjer dodajanje nove poti v omrežje lahko poslabša celotno učinkovitost omrežja. Poimenovan je po nemškem matematiku Dietru Braessu, ki je leta 1968 kot prvi raziskoval ta pojav. [3]

V osnovi gre za to, da lahko dodajanje nove poti med dvema točkama v omrežju poveča celotno količino prometa in s tem poveča čas potovanja za vse udeležence. To se zgodi zaradi vpliva različnih faktorjev na potek prometa, kot so čas potovanja, prometni tokovi in interakcije med udeleženci. [3] [4]

Tipičen primer bi bil, če bi v mestu obstajale tri poti med dvema točkama, pri čemer bi bila ena cesta zelo zasedena. Na prvi pogled bi se zdelo smiselno dodati četrto pot, da bi razbremenili zasedenost na preostalih poteh. Vendar pa se lahko zgodi, da bo dodana pot spodbudila več prometa, kar bi na koncu povečalo zastoje in čase potovanja na vseh poteh. [3] [4]

3.1 PRIMERI IZ REALNEGA ŽIVLJENJA

Pojav tega paradoksa lahko zasledimo tudi v drugih panogah, ne le prometu. Primer le teh so recimo električna omrežja, komunikacijska omrežja, družbene mreže, ekipni šport kot je denimo košarka itd.

3.1.1 ODSTRANITEV ZVEZDNEGA IGRALCA IZ KOŠARKAŠKE EKIPE

Primer Braessovega paradoksa na področju košarke je moč zaslediti, ko iz ekipe odstranimo zvezdnega igralca. Ta igralec je običajno v ekipi najboljši in posledično zadane največ točk. Zaradi tega se žoga večinoma pretaka preko njega. To si lahko predstavljamo tako, da je koš končna destinacija, igralci pa so vmesne postaje. Relacije

med njimi so podaje katere morajo opraviti. Večina podaj je tako namenjenih temu specifičnemu igralcu, ki naposled spravi žogo v koš. Pojav tega paradoksa je tukaj očiten, saj ob odstranitvi takšnega igralca iz ekipe, izgubimo ključno povezavo med omrežjem, v tem primeru igralci in končno destinacijo, košem. Zato je potrebno uporabiti druge povezave, v tem primeru je v to potrebno vključiti druge igralce in s podajami preko njih priti do zelenega cilja. To sistem razbremeni in posledično porazdeli pretočnost podaj v igri košarke, saj pride do več možnosti pretoka žoge iz igrišča do koša.

Vendar jaz se bom v tej raziskovalni nalogi posvetil predvsem pojavom tega paradoksa na področju prometa. Teh smo lahko, skozi zgodovino, zabeležili kar nekaj, vendar našel sem par primerov, kjer je bil prav ta pojav najbolj izrazit.

3.1.2 PROJEKT OBNOVE AVTOCESTE V SEOULU

Cheonggyecheon Restoration Project v Seulu, Južna Koreja, je bil prelomen projekt, ki je spremenil urbano krajino mesta. Projekt je vključeval odstranitev avtocestne povezave, imenovane Cheonggyecheon highway, ter njeno preoblikovanje v rečni tok in javno rekreacijsko območje. Cilj projekta je bil narediti mesto bolj ekološko in trajnostno ter izboljšati kakovost življenja prebivalcev. [8] [9]

Seul se je soočal s pomembnimi prometnimi težavami, ki so bile posledica hitre rasti prebivalstva, urbanega razvoja, gospodarske rasti in povečane uporabe avtomobilov. Cheonggyecheon highway je bil ena od glavnih prometnih žil mesta, ki je nosila velik del prometa. Zato je bilo veliko strahu glede nadomestitve te ključne ceste z javnim vodnim tokom, saj se je domnevalo, da bi to še poslabšalo prometne težave v mestu. [8] [9]

Vendar pa je bil rezultat projekta presenetljiv. Prometni tok se je dejansko pospešil v regiji, s čimer so se zmanjšali časi potovanja. To lahko razložimo s pomočjo Braessovega paradoksa, ki temelji na motivih voznikov. Zaradi zaprtje avtoceste je potrebno promet razpršiti na več drugih cest, kar posledično zmanjša skupni čas potovanja. [8] [9]

Prav ta projekt je tako postal odličen primer Braessovega paradoksa v praksi, saj je pokazal, kako lahko odstranitev ključne prometne poti dejansko izboljša prometno situacijo v mestu, namesto da bi jo poslabšalo. To je jasen primer, kako lahko premišljena urbanistična strategija in infrastrukturni projekti prispeva k boljši kakovosti življenja in trajnostnemu razvoju mest. [3] [8] [9]

3.1.3 ZAPRTJE 42TH STREET V MANHATTNU

V letu 1990 je New York City izvedel eksperimentalno ukrepanje z začasnim zaprtjem 42nd Street v Manhattnu, kot del prizadevanj za obnovo mesta. Ta poteza je želela preoblikovati preobremenjeno prometno arterijo v pešcem prijazno območje, s čimer bi izboljšali urbanokrajinsko izkušnjo prebivalcev in obiskovalcev. Kljub začetnim pozitivnim pričakovanjem pa je zaprtje 42nd Street nevede izpostavilo paradoksalne posledice, podobne Braessovemu paradoksu. Čeprav je bil cilj zmanjšanje prometnega zastoja, so spremembe v prometnih vzorcih povzročile povečano zastoje na okoliških cestah, kar je paradoksalno poslabšalo prometne razmere. [1] [2] [3]

Zaprtje ceste 42nd Street je razkrilo kompleksnost urbanega prometnega sistema in pokazalo, kako lahko navidezno pozitivne spremembe v infrastrukturi vodijo v nepričakovane rezultate. To je pomemben nauk za urbano načrtovanje, ki poudarja potrebo po celovitem premisleku in analizi pred vsako spremembo v prometni infrastrukturi. Kljub dobrim nameram lahko nepremišljena ukrepanja povzročijo večje težave kot koristi, kar nas opominja, da je treba pri načrtovanju upoštevati kompleksnost prometnih sistemov in njihovih interakcij z okoljem. [2]

3.2 ZAKAJ PRIHAJA DO TEGA POJAVA?

Razlog za nastanek tega pojava so predvsem vozniki, ki sebično izbirajo pot, po kateri se bodo peljali, vendar pri tem pogosto ne izberejo najboljše možne poti za celotno omrežje, ampak izberejo tisto, ki njim tisti trenutek najbolj ustreza. To pomeni, da lahko dodatna

cesta ali zmogljivost privabi več prometa, saj se vozniki odločijo za to alternativo, namesto da bi ostali na svojih prvotnih poteh, kar posledično poslabša učinkovitost celotne infrastrukture. [3] [4]

Posledično se promet porazdeli neenakomerno, kar lahko povzroči zastoje in poslabšanje celotnega prometnega omrežja. Kljub temu, da bi posamezni vozniki lahko izboljšali svoje čase potovanja z izbiro preostalih poti, to ni mogoče, saj bi to morali storiti prav vsi vozniki, ki se tisti trenutek nahajajo v prometnem omrežju. Pa čeprav to za nekatere posameznike pomeni nekaj minut daljša vožnja. [3] [4]

3.3 GAME THEORY

Teorija iger proučuje strateške interakcije med racionalnimi igralci. Osredotoča se na analizo odločitvenih procesov, kjer vsak igralec izbira strategijo, ki naj bi mu prinesla najboljše možne rezultate, ob upoštevanju strategij drugih igralcev. Glavni cilj teorije iger je razumevanje ravnotežij in rezultatov v različnih scenarijih, kar omogoča napovedovanje izidov in oblikovanje učinkovitih strategij v interaktivnih okoljih. [5]













V kontekstu teorije iger lahko Braessov paradoks razumemo kot primer situacije, kjer se vozniki v prometnem omrežju znajdejo v več igralni igri, kjer vsak posamezni igralec, v tem primeru voznik, izbira svojo pot glede na svoje osebne cilje in interese. Vsak voznik si želi doseči svoj cilj, ki je običajno čim hitrejši prihod na ciljno destinacijo. [3]

Toda vsak voznik se odloča le na podlagi svojih trenutnih informacij in osebnih preferenc, ob tem pa nima vedno vpogleda v celotno prometno omrežje. Namesto da bi vsak voznik izbral najboljšo pot za celotno omrežje, vsak sebično izbere pot, ki mu v določenem trenutku najbolj ustreza, kar lahko vodi v neracionalno porazdelitev prometa in poslabšanje celotne učinkovitosti prometnega omrežja. [5] [12]

3.3.1 ZAPORNIŠKA DILEMA

Zaporniška dilema (ang. Prisoner's dilemma) je miselni eksperiment teorije iger, kjer dva igralca, ki ne moreta komunicirati med seboj, izbirata med sodelovanjem ali izdajo. Glavna značilnost tega pojava je, da je optimalna strategija vsakega posameznika odvisna od odločitve drugega igralca. [5] [6] [7]

Koncept teorije zaporniške dileme poteka takole. Dva člana kriminalne združbe sta aretirana in zaprta. Vsak od njiju je v osami, brez možnosti komuniciranja z drugim. Policija prizna, da nimajo dovolj dokazov, da bi ju obtožili zločina, vendar imajo zadosti dokazov, da lahko oba zaprejo za eno leto. Hkrati policija vsakemu zaporniku ponudi možnost, da lahko izda svojega partnerja in bo v tem primeru oproščen krivde, medtem ko bo partner dobil tri leta zapora. V primeru, da oba zapornika izdata drug drugega, bosta oba obsojena na dve leti zapora. Ob tem predpostavimo, da oba zapornika razumeta pravila igre, vsak izmed njiju cilja na najboljši lastni izkupiček ter ne veta katero možnost je izbral drugi. [6] [7]

| B A |  B stays silent |  B testifies |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | |
|  A stays silent |   $R=1$ $R=1$ |   $S=3$ $T=0$ |
|  A testifies |   $T=0$ $S=3$ |   $P=2$ $P=2$ |

Slika 1: Primer zaporniške dileme [14]

Iz analize njunih najboljših možnosti, lahko ugotovimo, da je najboljša izbira za vsakega od njiju izdaja. Vsak izmed njiju ima torej dve možnosti, ostati tiho ali pa izdati drugega. Torej, če se oseba A odloči, da ostane tiho, bi morala oseba B izdati drugega za najboljši lastni izkupiček, namreč ostati svoboden je bolje kot pa iti v zapor za eno leto. Vendar tudi v primeru, če se oseba A odloči za izdajo, mora storiti enako tudi oseba B, namreč dve leti zaporne kazni je boljše kot pa tri leta. Iz tega torej ugotovimo, da je najboljša strategija za osebo B, da stori izdajo, saj to predstavlja najboljši izkupiček, ne glede na to kaj izbere oseba A. Prav tako enako velja za osebo A pri izbiri njegove strategije.

To vodi do ugotovitve, da kar je najboljše za posameznika, ni nujno, da je najboljše za družbo kot celoto. V našem primeru, bi torej najboljši skupni izkupiček bil, da oba ostaneta tiho ter s tem oba prejmeta zaporno kazen enega leta, kar skupno znesne dve leti zaporne kazni. Situacija, kjer oba izbereta izdajo, pravzaprav predstavlja najslabši možni izkupiček, saj je skupna zaporna kazen štiri leta, več kot katerikoli drug izid.

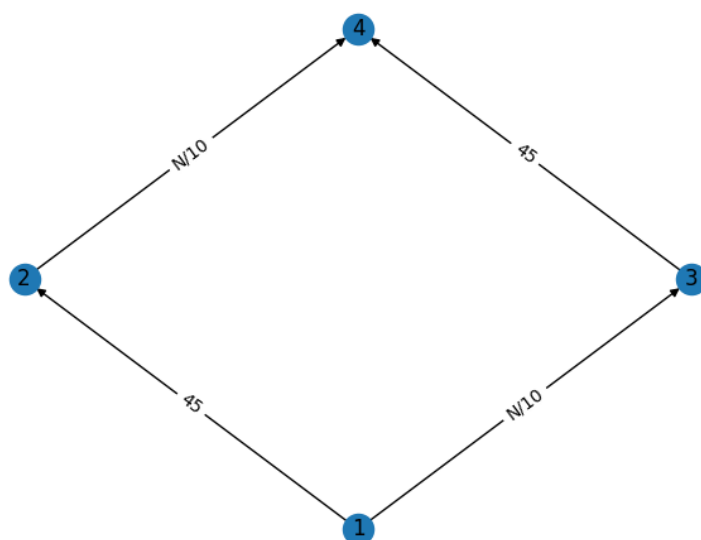
3.3.2 NASH EQUILLIBRIUM

Nashovo ravnotežje (ang. Nash Equilibrium) je koncept, ki opisuje situacijo, v kateri noben igralec ne more izboljšati svojega izida z menjavo svoje strategije, če pozna izbrano strategijo drugega igralca. Ta pojav nastane takrat, ko so vsi igralci v »ravnovesju« in nihče izmed igralcev ne želi spremeniti svoje odločitve, saj zaradi tega ne bi prejel višje nagrade ali pa bi prav zaradi tega prejel celo manjšo nagrado. [12] [13]

V zgornjem primeru, je torej strategija za najboljši posameznikov izkupiček izdaja. Kar pomeni, izdaja obeh zapornikov predstavlja Nashovo ravnotežje, pri čemer nihče izmed zapornikov nima razloga, da bi menjal svojo strategijo, saj bi lahko ali ostal brez zaporne kazni ali pa zaporno kazen povečal za eno leto. Ta specifični pojav imenujemo močno Nashovo ravnotežje (ang. Strong Nash Equilibrium), kjer menjava strategije prinese slabši rezultat, ne glede na izbiro nasprotnikove strategije. [12] [13]

3.4 SIMULACIJA IN ANALIZA PARADOKSA

Za lažjo predstavo in razumevanje, bomo ustvarili poenostavljeno prometno omrežje, kjer bodo naši vozniki se skušali pripeljati od točke A do točke B. Vendar, povezava med tema dvema točkama, žal ne bo direktna. Točki bosta torej med sabo povezovali dve cestni relaciji iz dveh delov, pri čemer bo en del avtocestna relacija, kjer bo pretočnost prometa ogromna. Za lažjo predstavo in računanje bomo predpostavili, da bo pretočnost neomejena, kar pomeni, da gostota prometa ne bo imela vpliva na sam pretok prometa, medtem ko bo pretok druge cestne relacije odvisen od gostote prometa tisti trenutek na tej relaciji.

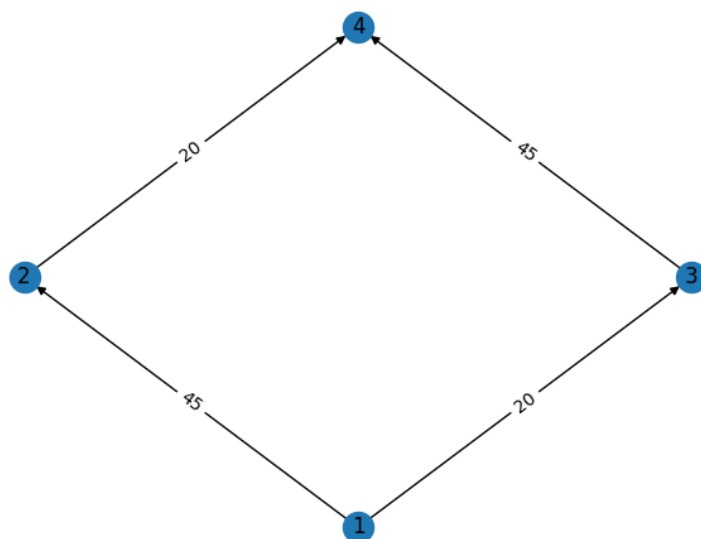


Slika 2: Grafični prikaz enostavnega cestnega omrežja

Naše cestno omrežje je torej sestavljeno iz dveh statičnih delov (1-2 in 3-4), kjer je čas potovanja neodvisen od gostote prometa in bo vedno 45 minut ter dveh dinamičnih delov (1-3 in 2-4), kjer bo čas odvisen od gostote prometa in bo v našem primeru $N/10$ minut, pri čemer N predstavlja število vozil v tistem trenutku na tej relaciji, kar pomeni, da v primeru, ko bo na tej relaciji istočasno deset vozil, bo desetemu vozilu v vrsti ta relacija prištela dodatno minuto potovalnega časa.

Sedaj lahko simuliramo vedenje voznikov v tem prometnem omrežju. Recimo, da skozi simulacijo naenkrat pošljemo 400 voznikov enega za drugim. Vsi želijo prispeti od točke »1« do točke »4«. Možnosti sta tako v tem primeru le dve, ali se bodo vozniki odločili, da bodo najprej vozili po avtocestni relaciji in šele nato po relaciji odvisni od gostote prometa, ali obratno. Pri tem lahko predpostavimo, da so vsi udeleženci prometa seznanjeni z razmerami na cestah in lahko v naprej izračunajo svoj potovalni čas do želene destinacije. Recimo, da jim pri tem pomaga navigacija.

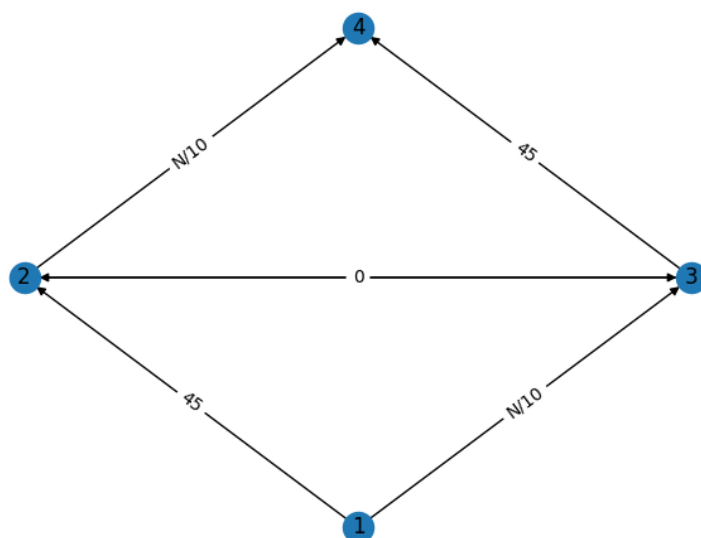
Prvi avtomobil v vrsti, bo zaradi tega imel prosto izbiro poti, da bo prišel na željeno destinacijo, saj mu bosta obe poti vzeli vsega skupno 45,1 minut potovalnega časa. Drugi voznik bo tudi lahko izbiral med obema potema, vendar v primeru, da se bo odločil za isto pot, kot se je odločil voznik pred njim bo njegov potovalni čas znašal 45,2 minut. Vendar, ker vsaka sekunda šteje, bo drugi voznik zato ubral drugo, hitrejšo, pot, ki mu bo vzela vsega skupaj 45,1 minut potovalnega časa. Tretji voznik, bo tako imel spet prosto izbiro, saj izbira poti ne bo imela vpliva na njegov končni čas, v obeh primerih bo znašal 45,2 minut. To se bo ponavljalo, dokler se po našem prometnem omrežju ne bo porazdelilo vseh 400 vozil.



Slika 3: Grafični prikaz prometnega omrežja skozi katerega pelje 400 vozil

Če bo vsak voznik izbral, zase, najbolj optimalno pot, se bo gostota prometa porazdelila in s tem bo polovica vozil na relaciji 1-2-4, polovica pa na relaciji 1-3-4, kar pomeni 200 vozil na vsaki relaciji. Skupni potovalni čas zadnjega vozila v koloni bo torej znašal 65 minut.

Vendar nam se 65 minut zdi preveč, zato želimo naše prometno omrežje optimizirati, razširiti, tako da bi potovalne čase zmanjšali. Odkrijemo super način, kjer lahko dodamo novo relacijo 2-3, ki za potovanje vzame nič minut. Ker je to povezava, ki ne vzame dobesedno nič potovalnega časa, se nam to zdi najboljši način za razširitev našega cestnega omrežja.

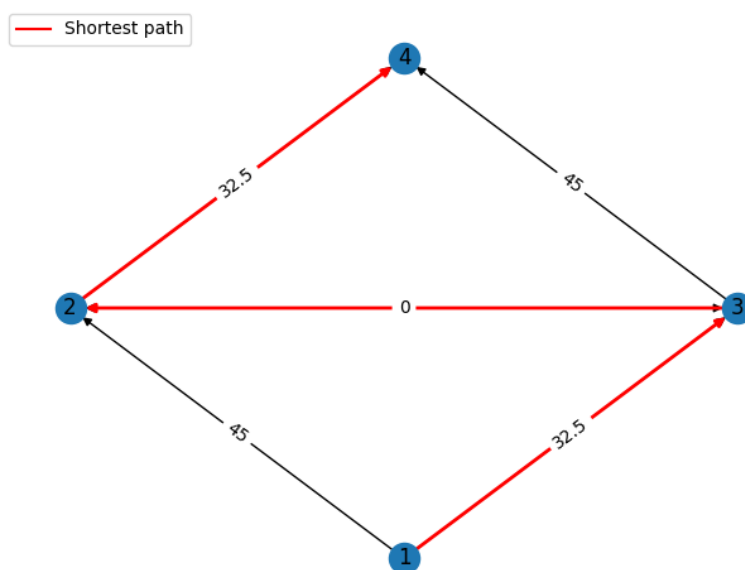


Slika 4: Prikaz nadgraditve prometnega omrežja z dodatno povezavo

Nato ponovno poženemo simulacijo našega prometnega s 400 vozili, ki jih enega za drugim pošljemo od destinacije »1« do destinacije »4« in ugotovimo, da najhitrejša pot znaša 80 minut. Kar je 15 minut več, kakor pri omrežju brez dodatne relacije. Ampak, kako je to možno? Čudežna povezava, bi morala potovalni čas zmanjšati in ne povečati.

Ta pojav, kjer širjenje prometnih omrežij, z dodatnimi relacij, potovalnega časa ne zmanjša, temveč ga celo poveča, imenujemo Braessov paradoks. Do tega pojava pride zaradi človeške narave, kjer vsak posameznik gleda nase in na lastni izkupiček. V novi

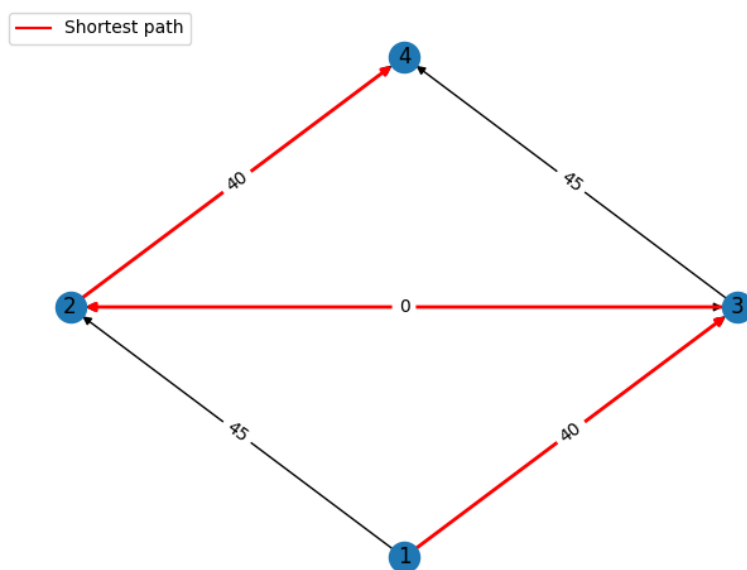
simulaciji z dodatno relacijo lahko tako izračunamo potovalne čase za vsako vozilo posebej. Predvidevamo, da bo vsak izmed voznikov izbral sebi najhitrejšo pot. V tem primeru, bo voznik ena izbral relacijo 1-3-2-4, saj bo zaradi izjemno nizke gostote prometa, za to potreboval 0,2 minute potovalnega časa. Drugi voznik, bo izbral isto pot, saj je tudi zanj najhitrejša pot z relacijami 1-3-2-4, za katero bo porabil 0,4 minute. Ta postopek se bo nadaljeval, saj bo ta relacija najbolj optimalna za vse voznike.



Slika 5: Prikaz najhitrejše poti pri 325 vozilih

Do tega, težko razumljivega pojava, pride pri 325 vozilu, ki izenači potovalni čas predhodnega cestnega omrežja, brez dodatne relacije 2-3. Namreč čas, ki ga vozilo potrebuje za relacijo 1-3 in 2-4 je 32,5 minut, zaradi prenatrpanosti relacije, katere čas je odvisen od gostote prometa $N/10$. Skupno to z dodatno relacijo 2-3 znaša 65 minut potovalnega časa, kar je enako kot pri prometnem omrežju brez dodatne povezave. A vendar se čas, ki ga vozila potrebujejo za prihod na cilj, tukaj ne ustavi. Denimo, če v našo simulacijo pošljemo 326 vozil, bo skupni potovalni čas zadnjega v vrsti znašal 65,2 minut, kar je že 0,2 minute več, kot potovalni čas zadnjega v vrsti pri prometnem omrežju brez dodatne relacije, s kar 74 vozili več.

Tukaj lahko zasledimo lastnosti zaporniške dileme, ki se pojavi med vozniki, kjer vsak izmed njih gleda le na lastno dobro in ne na dobrobit celotne družbe. V tem primeru so vsa vozila v Nashovem ravnotežju, pri čemer nihče izmed voznikov ne bo imel boljšega izkupička, četudi menja strategijo, v tem primeru pot, po kateri bo prišel do končne destinacije.

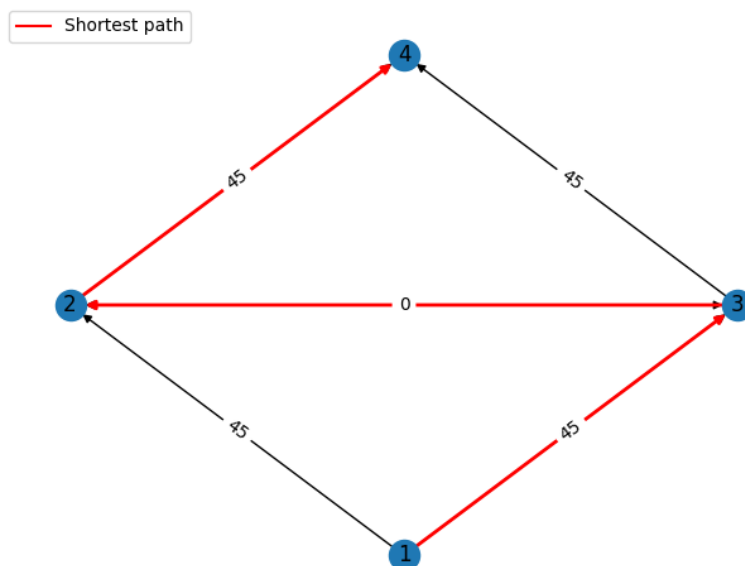


Slika 6: Prikaz najhitrejša poti pri 400 vozilih

Če se sedaj vrnemo na simulacijo s 400 sočasnimi vozili v prometnem omrežju z dodatno relacijo. Vsa vozila so v Nashovem ravnotežju, saj nihče ne bo profitiral s spremembo izbrane poti, kajti si bo s tem povečal skupni potovalni čas. Recimo, da želi zadnji voznik v vrsti spremeniti potovalno pot, mu pri tem preostaneta še dve možnosti. Prva možnost sta relaciji 1-2-4 ali 1-3-4, za kateri bi potreboval skupno 85 minut, kar je še vedno 5 minut dlje kot najhitrejša možna pot in relacija 1-2-3-4, ki skupno znaša 90 minut potovalnega časa in je kar 10 minut daljša kot najhitrejša pot. To imenujemo močno Nashovo ravnotežje, saj bi vsak, ki bi zamenjal svojo izbrano pot, svoj čas, ki ga porabi za opravljeno pot, podaljšal.

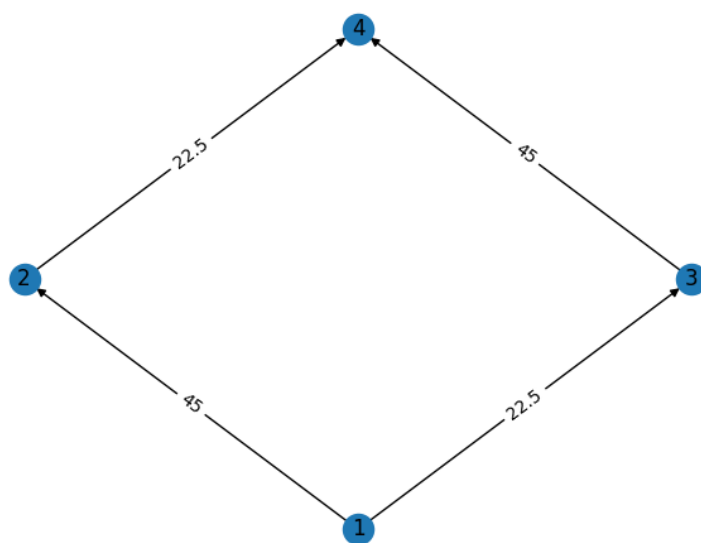
To nam pove, da bo vsak, ki bo svojo potovalno pot želel čimbolj skrajšati, izbral relacijo 1-3-2-4, ki je v tem primeru najhitrejša in znaša 80 minut skupnega potovalnega časa.

Četudi to pomeni, da je skupni potovalni čas še vedno za skoraj četrtno daljši od potovalnega časa v prometnem omrežju, z enakim številom vozil, brez dodatne relacije.



Slika 7: Grafični prikaz omrežja pri gostoti 450 vozil

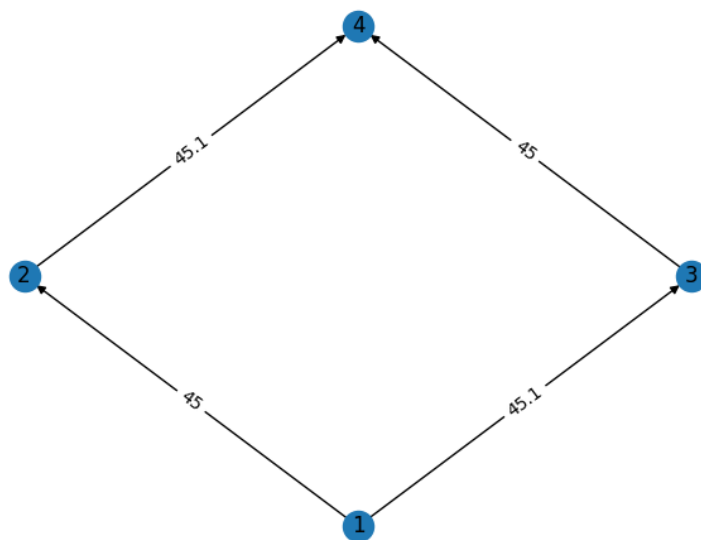
V »optimiziranem« prometnem omrežju, dosežemo popolno ravnotežje pri sočasni prometni gostoti 450 vozil, kjer se potovalni čas ustali in doseže svoj maksimum, 90 minut. Torej, ko bosta relaciji 1-3 in 2-4, s svojo največjo pretočno zmogljivostjo, izenačili potovalni čas z relacijama 1-2 in 3-4, v tem primeru 45 minut, dodatno povečanje gostote prometnega toka ne bo imelo vpliva na končni potovalni čas, saj bodo vsi nadaljnji vozniki lahko ubrali pot 1-2-3-4, ki ni odvisna od gostote prometa. Zato bo potovalni čas, na tej relaciji, vedno 90 minut.



Slika 8: Grafični prikaz omrežja brez dodatne povezave s 450 vozili

Na primeru simulacije prometnega omrežja brez dodatne relacije 2-3 s 450 sočasnimi vozili, lahko opazimo, da je skupni potovalni čas zadnjega v vrsti 67,5 minut, kar je, v primerjavi z omrežjem z dodatno relacijo, še vedno 22,5 minut hitreje.

Če sedaj gostoto prometnega toka povečamo na 900 vozil, lahko izračunamo, da bo najhitrejši potovalni čas, zadnjega vozila znašal 90 minut, kar se enači s potovalnim časom v prometnem omrežju z dodatno relacijo, a le pri pol manjši gostoti prometa. Kar pomeni, da je za gostoto vozil pri 900 ali manj, v našem virtualnem omrežju, optimalnejša infrastruktura omrežja brez dodatne relacije kot pa omrežja z njo. Pri čemer je končni potovalni čas omrežja brez dodatne relacije, pri gostoti nad 900 vozil, vedno večji od 90 minut, saj bo pri tem omrežju, le ta, vedno odvisen od gostote prometa in se bo vzporedno z gostoto vedno spreminjal.



Slika 9: Prikaz preobremenitve omrežja brez dodatne povezave

Potovalni čas pri prometnem omrežju brez dodatne relacije 2-3, z 902 sočasnima voziloma, znaša 90,1 minute, kar je nekaj sekund več od omrežja z dodatno relacijo, kjer je pri 902 vozilih, potovalni čas še vedno 90 minut. Pri tem torej ugotovimo, da pri velikem povečanju gostote prometa, dodatna relacija le izboljša sam potovalni čas voznikov.

3.5 POTEK IZDELAVE SIMULACIJE

Simulacijo sem zasnoval za namene lažjega računanja posameznih vozil v našem virtualnem omrežju, pri večji gostoti samega omrežja in za lažjo grafično predstavo. Za izdelavo simulacije sem uporabil Python programski jezik, ki je namenjen predvsem hitremu in enostavnemu pisanju programske kode ter razvoju različnih vrst aplikacij, vključno z računalniškimi programi, spletnimi aplikacijami, znanstvenimi modeli, umetno inteligenco in avtomatizacijo nalog.

3.5.1 KNJIŽNICA NETWORKX

Za izdelavo mojega omrežja, za namene simulacije in vizualizacije Braessovega paradoksa, sem uporabil knjižnico NetworkX, ki je namenjena analizi, gradnji in vizualizaciji kompleksnih omrežij.

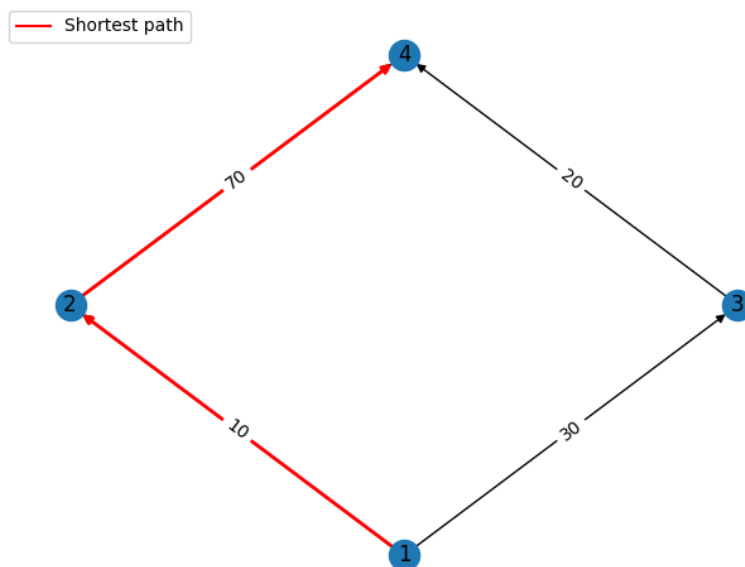
Omrežje sem zasnoval tako, da sem postavil štiri vozlišča, ki sem jih nato povezal z relacijami. Vsaki relaciji sem dodelil utež, ki je v mojem primeru pomenila potovalni čas, porabljen na tej relaciji. Uteži sem tako razdelil na statične in dinamične. Statične so bile vedno konstantne in se niso spreminjale z gostoto prometa, medtem ko dinamične so se. Tako sem za vsakim vozilom, ki je prevozilo relacijo odvisno od gostote prometa, posodobil uteži teh relacij.

3.5.2 RAČUNANJE NAJKRAJŠE POTI MED VOZLIŠČI

Načinov za izračun najkrajše poti od točke A do točke B, v nekem omrežju, je več. Ena izmed teh je možnost, kjer vozila nimajo vpogleda v celotno omrežje, vendar le na relacije, ki so povezane s trenutnim vozliščem na katerem se nahajajo.

Pri tem program začne z najkrajšo dosegljivo relacijo in pri vozlišču preveri naslednje relacije, to počne dokler ne pride v slepo ulico in se vrača po vozliščih nazaj, dokler ne najde prvega niza relacij, ki vodijo do zelenega cilja. Pri tem seveda vedno izbere najkrajšo relacijo, ki je vidna iz vozlišča pri katerem se nahaja.

Prav tu sem se na začetku zataknil sam, saj sem izračun najhitrejše poti, računal po principu sosednje relacije z najmanjšo utežjo. Kar je mogoče na prvi pogled pravilni postopek, vendar ni za računanje najhitrejše poti od točke A do točke B v celotnem omrežju.



Slika 10: Prikaz enostavnega omrežja za namene računanja najkrajše poti

Na tem konkretnem primeru omrežja z vozlišči in relacijami, lahko vidimo, da sta od točke »1«, do točke »4« dve različni poti. Od vozlišča »1« lahko našo pot začnemo po eni izmed dveh relacij. Ena meri 10 in druga 30 enot. Če računamo najkrajšo pot in nimamo vpogleda v celotno omrežje in s tem nadaljevanje naše poti do ciljne destinacije, bomo izbrali relacijo z utežjo 10, saj je to manj kot utež 30. Na vozlišču »2« nam preostane le ena opcija, ki v tem primeru vodi do naše končne destinacije. Ta utež je vredna 70 enot, kar pomeni, da pot, ki smo jo opravili, znaša skupno 80 enot in ker smo prišli na cilj se tukaj naše potovanje zaključuje.

Čeprav to ni najbolj optimalna pot, namreč če na začetku izberemo relacijo z utežjo 30, ki na prvi pogled ni najkrajša. Vendar nato nadaljujemo do končne destinacije na relaciji z utežjo 20 enot, kar znaša skupno 50 enot. Kar je v tem primeru krajša pot, kot tista, ki smo jo izračunali po tem principu.

3.5.1 ALGORITEM DIJKSTRA

Zaradi tega, ker sem moral izračunati najbolj optimalne poti v celotnem omrežju, sem uporabil drugo metodo in sicer algoritem Dijkstra. To sem storil zato, ker je ta algoritem

posebej zasnovan za iskanje najkrajših poti v grafih z utežmi na povezavah, kar je ključno pri simulaciji prometnih omrežij, kjer se želi določiti najbolj optimalna pot glede na čas, razdaljo ali druge kriterije.

Postopek Dijkstrinega algoritma se začne z določitvijo začetnega vozlišča, od katerega se želi najti najkrajšo pot do vseh ostalih vozlišč. Začetno vozlišče ima začetno razdaljo 0, medtem ko so vse ostale razdalje začasno nastavljene na neskončno. Algoritem nato iterativno posodablja razdalje do sosednjih vozlišč, pri čemer upošteva uteži povezav med njimi. Za vsako sosednje vozlišče se izbere najkrajša pot, kar se nadaljuje, dokler ni obiskano vsako vozlišče v grafu ali dokler ni več dosegljivih vozlišč z neskončno razdaljo.

Eden od ključnih konceptov Dijkstrinega algoritma je ideja izbire najkrajše poti do vsakega vozlišča v vsakem koraku, ob upoštevanju že znanih najkrajših poti do drugih vozlišč. Ta pristop zagotavlja, da se najkrajše poti do vsakega vozlišča postopoma izboljšujejo, dokler ni dosežena končna rešitev.

Pomen Dijkstrinega algoritma sega preko teorije grafov in računalništva. Uporablja se v številnih aplikacijah v vsakdanjem življenju, kot so navigacijski sistemi, kjer omogoča iskanje najhitrejših poti med lokacijami, logistika, telekomunikacije in še bi lahko naštevali. Prav zaradi njegove preprostosti, učinkovitosti in uporabnosti ga uvrščajo med enega najpomembnejših algoritmov v računalništvu.

3.5.2 VIZUALIZACIJA OMREŽJA Z MATPLOTLIB KNJIŽNICO

Za vizualizacijo te simulacije sem uporabil knjižnico Matplotlib, ki je ena izmed najbolj priljubljenih knjižnic v programskem jeziku Python za ustvarjanje statičnih, interaktivnih in animiranih vizualizacij podatkov.

Matplotlib omogoča ustvarjanje različnih vrst vizualizacij, vključno s črtastimi grafikoni, histogrami, tortnimi grafikoni, površinami, slikami, 3D grafikoni in še veliko več. Poleg tega knjižnica omogoča tudi natančno prilagajanje vizualnih elementov, kot so barve, legende, osi, oznake in slogi, kar omogoča ustvarjanje vizualizacij po meri in prilagojenih

potrebam projekta. Zaradi tega je bil prikaz omrežja, namenjenega simuliranju paradoksa, z uporabo te knjižnice enostaven.

4 OPTIMIZACIJA PRETOČNOSTI PROMETA

V kontekstu nenehnega razvoja prometnih sistemov in tehnologije je optimizacija pretočnosti prometa postala ključna naloga za izboljšanje učinkovitosti cestnega omrežja in zmanjšanje prometnih zastojev. Tukaj se bom posvetil raziskovanju in razumevanju pojavu nenadnih zastojev, pri čemer bomo uporabil simulacije in izračune, da bi identificiral in analiziral dejavnike, ki vodijo do nastanka le teh. S tem bomo prispeval k boljšemu razumevanju dinamike prometnih tokov ter razvoju učinkovitih strategij za zmanjšanje prometnih zastojev in izboljšanje pretočnosti prometa. [1] [10] [11]

4.1 POJAV NAMIŠLJENE PROMETNE ZAMAŠITVE

Med številnimi izzivi, ki jih prinaša promet, je eden izmed najpogostejših pojavov imenovan namišljena prometna zamašitev (ang. Phantom traffic jam effect). Ta pojav se pogosto pojavlja na avtocestah, kjer se zdi, da se prometni zastoj pojavlja brez očitnega razloga in se nato raztopi, ne da bi pri tem prišlo do kakršnih koli nesreč ali ovir na cesti. [11]

4.1.1 ZAKAJ PRIDE DO NAVIDEZNE ZAMAŠITVE?

Eden od ključnih dejavnikov, ki prispeva k nenadni zamašitvi prometnega toka, je reakcijski čas voznikov. Človeški možgani potrebujejo čas, da zaznajo spremembe v okolju in nanje odreagirajo. Če se na primer voznik nenadoma ustavi pred vozilom, mora voznik začeti z zaviranjem. Vendar pa se lahko zgodi, da vozniki ne zaznajo spremembe pravočasno ali pa njihova reakcija ni dovolj hitra, kar povzroči verižno reakcijo zaviranja. Tudi majhne zamude pri reakciji enega voznika lahko imajo kaskadne učinke na promet, kar vodi v širjenje zastoja. [11]

Poleg tega k temu pojavu prispevajo tudi napake pri vožnji, ki jih naredijo vozniki. Nepričakovano menjavanje pasov, nepravilno ocenjevanje hitrosti ali razdalje,

nepričakovano zaviranje ali pospeševanje - vse to so napake, ki lahko sprožijo verižno reakcijo in povzročijo zastoje na cestah.

4.1.2 POENOSTAVLJENA VERZIJA TAKŠNEGA POJAVA

Predpostavimo, da imamo primer prometa, ki poteka tekoče. Pri tem bomo zanemarili vse človeške faktorje in ostale faktorje, ki bi lahko vplivali na rezultate te analize. Na cesti imamo kolono stotih vozil, pri čemer se vsa gibljejo s hitrostjo 100 km/h. Razdalja med vsakim izmed njih je enaka povprečnemu človeškemu reakcijskemu času. Nenadno zaviranje prvega vozila v koloni, zaradi zunanjega razloga, kot je recimo prečkanje divjadi čez cesto, povzroči verižno reakcijo. Zaradi tega vsako naslednje vozilo zavira malenkost bolj, ker se to razlikuje od človeškega instinkta, lahko določimo, da vsako vozilo zavira za 1% bolj kot vozilo pred njim.

To pomeni, če imamo 100 vozil, vsako izmed njih se premika s 100 km/h in prvo vozilo v koloni zavira, pri čemer zmanjša trenutno hitrost za 50%. To sproži reakcijo vseh vozil za njim, pri čemer vozilo tik za njim zmanjša hitrost za 51%, da slučajno ne bi prišlo do trka. V resničnem življenju so ta zaviranja med vozili veliko večja in izrazitejša, vendar tukaj to predpostavimo zaradi lažje predstave.

V tem primeru, bo po zaviranju prvega vozila za 50% začetne hitrosti, vozilo, ki je v koloni na 51. mestu, svojo hitrost zmanjšalo za 100%, kar je 0 km/h.

4.2 SHOCKWAVE EFEKT

Prehod iz rdeče na zeleno luč na semaforju je vsakdanja situacija, ki jo doživljamo vsak dan na cestah. Ta prehod sproži zaporedje dogodkov, ki lahko vplivajo na učinkovitost prometa. Eno izmed ključnih pojavov, ki se pojavlja pri tem prehodu, je tako imenovani »shockwave« efekt, kjer vozila pospešujejo z zamikom, kar lahko negativno vpliva na pretočnost prometa. [11]

V našem primeru je naš proces prehoda na zeleno luč na semaforju kompleksen proces, ki vključuje več dejavnikov, kot so signalizacija semaforja, odzivnost voznikov in prometne razmere. Ko na semaforju zasveti zelena luč, lahko prvi voznik v vrsti začne z vožnjo, pri čemer mu sledijo mu ostala vozila. Pri tem prihaja do ključnega problema, saj prihaja do zamika med prehodi vozil iz mirujočega stanja v pospešeno enakomerno gibanje.

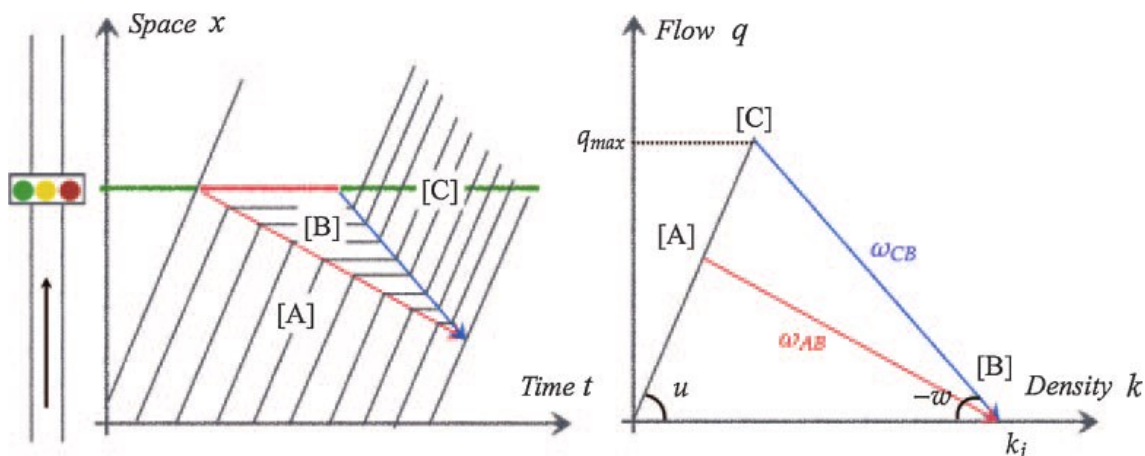
4.2.1 REŠITVE, KI PRIPOMOREJO K OPTIMIZACIJI

Časovnik za odštevanje pred prehodom na zeleno luč je eno izmed najučinkovitejših rešitev za povečanje pretočnosti prometa pri semaforjih. Ta tehnologija omogoča voznikom, da se bolje pripravijo na spremembo svetlobnega signala in začnejo pospeševati že prehodom semaforja na zeleno luč, kar posledično zmanjša zamik v pospeševanju vozil.

Poleg tega lahko časovnik za odštevanje voznikom zagotovi tudi večjo varnost in zmanjša stres v prometu. Z jasnim prikazom časa, ki je še preostal do spremembe svetlobnega signala, lahko vozniki bolje ocenijo trenutno situacijo in se ustrezno pripravijo na začetek vožnje. To lahko zmanjša tveganje za nenadne manevre ali nesreče ter prispeva k bolj tekočemu in varnemu prometnemu toku. Skupaj s tehnikami sinhronizacije semaforjev in naprednimi sistemi opozarjanja voznikov lahko časovnik za odštevanje pred prehodom na zeleno luč igra ključno vlogo pri izboljšanju pretočnosti prometa in ustvarjanju boljših prometnih razmer na cestah.

4.2.2 ANALIZA EFEKTA

Za analizo je predlagan algebraični model razvoja prometa znotraj urbanega odseka cest, ki vključuje modeliranje pojavov, ki jih povzročajo semaforji. Model omogoča rešitev prometne gostote in pretoka brez reševanja diferencialnih enačb, kar bistveno zmanjša računsko obremenitev. [10] [11]



Slika 11: Grafa, ki prikazujeta gostoto prometa na dani relaciji [11]

V mestnem prometu je razumno domnevati, da se tokovi generirajo s semaforji ali križišči, kar pomeni, da so prihodi in odhodi iz odseka ceste pulzi, ki se začnejo v določenih trenutkih. Pod takimi pogoji se odsek ceste razdeli na celice, in v omejenem časovnem intervalu bo vsako stanje celice določeno z eno točko na osnovnem diagramu (F/D). Nagib med točkami FD sosednjih celic bo konstanten v tem časovnem intervalu. Po teoriji udarnega vala ta nagib določa hitrost širjenja enot med celicami. [11]

Predstavljamo si mestni odsek ceste, kjer je na koncu semafor, ki ob zeleni luči, omogoča prehod skozi križišče. Razumno je domnevati, da predstavljeni odsek ceste predstavlja osnovni segment prometne mreže, kar pomeni, da znotraj odseka ni dovoljenih zunanjih tokov. [10]

Pretočnost dane situacije lahko določimo s številom vozil N , ki bodo prečkale semaforizirano križišče v določenem časovnem intervalu T . Za lažji izračun, bomo zanemarili dejstvo, da vozniki med seboj ne pospešujejo enakomerno, zato bomo določili pospešek a , pri čemer nato vozilo doseže maksimalno hitrost v . Gostota našega prometa bo v tem primeru $p = 1$, kar pomeni eno vozilo na en meter.

Sedaj lahko izračunamo število vozil, ki bodo prečkale križišče ob prižigu zelene luči, ob predpostavki povprečnega reakcijskega časa ene sekunde.

4.2.3 IZRAČUN PRETOČNOSTI SEMAFORIZIRANEGA KRIŽIŠČA

Pri N številu vozil lahko tako izračunamo porabljeni čas za prečkanje vsakega posameznega vozila n . Pri čemer bo čas, pri katerem bo začel s pospeševanjem enak vsoti reakcijskih časov vozil pred njim, $n \cdot 1$ sekunde. Razdalja potrebna za prečkanje semaforiziranega križišča, pa bo enaka vsoti dolžin celic pred vozilom. V našem primeru bo to torej $n \cdot s$ [m], kjer je $s = 1$ m.

Glede na podan pospešek in maksimalno omejeno hitrost, ki je po zakonu voznik ne sme prekoračiti, lahko sedaj izračunamo čas, ki ga bo voznik potreboval za to razdaljo. V primeru, da je skupni porabljeni čas, manjši od časa t , ki nam pove kako dolgo bo gorela zelena luč, potem bo ta avto lahko uspešno prevozil, v nasprotnem primeru, bo moral počakati na naslednjo.

Enačba 1: Izračun razdalje glede na pospešek

$$D = v * t + 1/2 * a * t^2$$

Na podlagi teh informacij lahko izračunamo potovalni čas vsakega izmed vozil v semaforiziranem omrežju, na katerem se nahaja $N = 50$ vozil in posledično izračunamo tudi pretočnost danega križišča ob določenih parametrih. Prvo vozilo v vrsti n_1 , bo tako imelo skupni potovalni čas iz vsote reakcijskega časa 1 sekunde in časa porabljenega za prevoženo razdaljo $n \cdot s$, ob določenem pospešku. To v našem primeru skupno znaša 2,41 sekunde. Drugo vozilo v vrsti, bo tako potrebovalo za prečkanje križišča 3 sekunde in tako dalje, vse do zadnjega, petdesetega v vrsti. Zadnje vozilo, n_{50} , bo v našem primeru za prečkanje semaforiziranega križišča, porabilo 60 sekund.

Če bi torej zelena luč na semaforju gorela 30 sekund, bi križišče, v danem časovnem intervalu, lahko pod temi pogoji prečkalo 23 vozil, pri čemer bi zadnje vozilo, ki bi uspelo prečkati križišče, za opravljeno pot porabilo 29,78 sekund.

4.2.4 PRETOČNOST PROMETA BREZ VPLIVA ČLOVEKA

Predstavljajmo si svet, kjer so vsi udeleženci prometa, samo vozeča vozila. Vsako izmed vozil ima točne informacije o prometu, v katerem je tisti trenutek udeležen, prav tako pa je omrežje zasnovano tako, da pridobimo skupni najboljši izkupiček vseh udeležencev v prometu in ne le posameznikov.

To pomeni, da bi vsa vozila točno vedela kdaj se bo na semaforju prižgala zelena luč, prav tako bodo vedela s kakšno hitrostjo se in se bo premikal promet pred njimi. Kar v teoriji pomeni, da bodo vsa vozila ob prižigu zelene luči, lahko začela pospeševati istočasno. Pri čemer se znebimo faktorja človeškega reakcijskega časa, ki vpliva na kočni potovalni čas. To torej pomeni, da bi na končni potovalni čas n vozila v koloni na semaforiziranem križišču, vplivala le razdalja ter pospešek vozila pred njim, saj bi, za maksimalni izkupiček, lahko pospeševali enako hitro in pri tem ne bi prišlo do trka.

Če sedaj uporabimo isti primer semaforiziranega križišča kot v zgornjem primeru, kjer smo pri izračunu končnega potovalnega časa upoštevali človeški faktor, lahko izračunamo novi potovalni čas za n vozila, pri čemer tega ne potrebujemo upoštevati. Konkretno to pomeni, da bo pri časovnem intervalu $T = 30\text{s}$ na semaforju, 23. vozilo v vrsti še vedno uspelo prečkati križišče, kajti bo za 23m oddaljenosti od prečkanja križišča, porabilo le 6,78 sekunde, kar je kar 23 sekund manj, kot v primeru, kjer je vsak izmed voznikov za speljevanje potreboval 1 sekundo reakcijskega časa. V teoriji, bi torej pod temi pogoji, križišče prečkalo kar 327 vozil, pri čemer bi 327. vozilo za prečkanje križišča potrebovalo le 29,94 sekund.

5 REZULTATI

Moja raziskava je bila namenjena predvsem analizi in optimizaciji prometnega toka s pomočjo računalniških algoritmov, za namene preučevanja in simuliranja različnih vplivov na promet, njegovo pretočnost in udeležence v njem s spreminjanjem vhodnih parametrov.

5.1 UGOTOVITVE SIMULACIJE BRAESSOVEGA PARADOKSA

Pri simulaciji enostavnega primera cestnega omrežja, kjer v samo omrežje dodamo dodatno cestno povezavo v upanju, da bo izboljšala pretočnost prometa, sem ugotovil da to ne drži v vseh primerih. V mojem primeru sem ugotovil, da v primeru dodajanja dodatne cestne povezave v našem omrežju pri ohranjanju gostote 400 vozil v prometnem omrežju, na skupnem potovalnem času celotnega omrežja ne pridobimo. Pravzaprav se potovalni čas celo poveča za 15 minut. Do izboljšanja potovalnega časa pride v točki, kjer gostota vozil v danem omrežju, prekorači 900, saj je v omrežju brez dodatne cestne relacije, katerakoli pot odvisna od gostote prometa, kar pa ne drži v primeru omrežja brez dodatne relacije.

Pri tem je potrebno upoštevati dejstvo, da je dodatna cestna relacija v našem primeru porabila točno 0 minut dodatnega potovalnega časa, kar je imelo vpliv na posledične rezultate. Predvidevam, da bi se končni rezultati lahko razlikovali, če bi tudi dodatna relacija bila odvisna od gostote prometa.

5.2 UGOTOVITVE IZRAČUNA SHOCKWAVE EFEKTA

Na enostavnem primeru »shockwave« efekta, sem ugotovil, da je to v prometu eden izmed večjih razlogov za nastajanje prometnih zastojev. Glavni faktor, za nastajanje takšnih pojavov, je človek sam. Saj ljudje med vožnjo niso 100% zbrani in fokusirani na cesto, velikokrat med vožnjo namenjajo pozornost drugim rečem, ob tem pa imamo vsi

različne reakcijske čase. Ob tem človek tudi nima zmožnosti učinkovitega enakomernega zaviranja, nima vpogleda v infrastrukturo prometa in obnašanje drugih voznikov v prometu samem.

V moji analizi tega pojava, na primeru semaforiziranega križišča, sem ugotovil, da bi lahko pretočnost prometa povečali za 14 krat, če bi izničili vse človeške faktorje na vpliv v prometu. To v teoriji pomeni to, da so samo vozeča vozila prihodnost v prometu. Če bi celotno prometno omrežje upravljal računalnik in bi tako imel nadzor nad vsemi enotami, ki so del prometa, bi lahko promet najbolj optimizirali. S tem bi izničili zastoje, skrajšali bi povprečne čase potovanja in posledično tudi izboljšali vpliv prometa na okolje. Pa vendar je potrebno tu upoštevati dejstvo, da to nekaterim posameznikom ne bi bilo všeč, kajti nekaterim je vožnja hobi, hkrati pa ljudje ne bi mogli več hiteti v prometu, saj bi bili omejeni na računalnik.

6 RAZPRAVA

Glede na dane rezultate, lahko sedaj potrdim oziroma ovržem izbrane hipoteze.

Prvo hipotezo, da širjenje prometnih povezav poveča pretočnost prometa in posledično zmanjša potovalni čas od točke A do B, **OVRŽEM**.

Primer simulacije na prometnem omrežju, kjer dodamo dodatno relacijo, potrdi teorijo Braessovega paradoksa, kjer dodajanje novih povezav pretočnost zmanjša in ne poveča. Kljub temu, da so primeri, kjer bi nove relacije zmanjšale končni potovalni čas, to ne velja za večino primerov.

Drugo hipotezo, da lahko pretočnost prometa povečamo za več kot 50%, če pri tem onemogočimo človeške faktorje pri vplivu na potek prometa, **POTRDIM**.

Na enostavni simulaciji, kjer sem raziskoval »shockwave« efekt, sem ugotovil, da lahko ta pojav z odstranitvijo človekovega vpliva na promet, v teoriji v celoti izničimo. Pri tem sem ugotovil, da lahko pretočnost prometa s tem povečamo kar 14 krat.

Tretjo hipotezo, da nam simulacija omogoči lažje razumevanje in prikaz različnih vplivov na prometni tok in njegovo pretočnost, **POTRDIM**.

Simulacija vseh pojavov, ki sem jih v tej raziskovalni nalogi preučeval, mi je omogočila lažje razumevanje specifičnih pojavov, pri čemer sem lahko opazoval obnašanje vsakega posameznika v prometu in sem tako imel vpogled v celotno prometno omrežje.

7 ZAKLJUČEK

Promet je ena izmed ključnih sestavin sodobnega urbanega življenja, vendar se soočamo z izzivi, kot so zastoji, podaljšani časi potovanja in negativni vplivi na okolje. V zadnjih letih so se razvile številne tehnološke rešitve, ki ponujajo možnosti za izboljšanje prometnega sistema. Vendar pa se s tem odpirajo tudi vprašanja glede učinkovitosti in sprejemljivosti teh rešitev v družbi.

Avtomatizacija prometa se izkaže kot obetavna rešitev za optimizacijo prometnega toka. S prenosom nadzora na računalniške algoritme bi lahko zmanjšali vpliv človeških napak in posledično izboljšali pretočnost prometa. To bi lahko pripomoglo k zmanjšanju zastojev, krajšim časom potovanja ter pozitivnemu vplivu na okolje.

Kljub potencialnim koristim pa je pomembno upoštevati tudi morebitne izzive in pomisleke, povezane z avtomatizacijo prometa. Omejitve svobode posameznikov v prometu ter družbena sprejemljivost takšnih sistemov predstavljajo pomembne vidike, ki jih je treba obravnavati. Celostni pristop, ki upošteva tako tehnične kot tudi družbene faktorje, je ključen za uspešno implementacijo in sprejetje avtomatiziranih prometnih sistemov v prihodnosti.

Spremembe v prometnem sistemu zahtevajo premišljen pristop in sodelovanje med strokovnjaki, vladnimi organi in družbenimi skupinami. Le tako lahko dosežemo bolj učinkovit, varnejši in trajnostno naravnan prometni sistem, ki bo ustrezal potrebam sodobne družbe in hkrati ohranjal ravnovesje med tehničnim napredkom ter človeškimi vrednotami.

8 ZAHVALA

Iskreno bi se rad zahvalil svojemu mentorju, gospodu Alešu Spitalu, za pomoč pri sami raziskavi ter IME PRIIMEK za lektoriranje raziskovalne naloge. Prav tako, pa bi rad svojo hvaležnost izkazal vsem, ki so me pri samem raziskovanju na kakršen koli način podpirali.

9 VIRI IN LITERATURA

- [1] Downs, Anthony (2004). "Traffic: Why It's Getting Worse, What Government Can Do". Brookings. Dostopno na: <https://www.brookings.edu/articles/traffic-why-its-getting-worse-what-government-can-do/>
- [2] Kolata, Gina (1990). "What if They Closed 42d Street and Nobody Noticed?". New York Times. Retrieved 16 November 2008. Dostopno na: <https://www.nytimes.com/1990/12/25/health/what-if-they-closed-42d-street-and-nobody-noticed.html>
- [3] Boyd, Andrew. "Braess' Paradox". Engines of Our Ingenuity. Episode 2814. Dostopno na: <https://engines.egr.uh.edu/episode/2814>
- [4] Milchtaich, Igal (2006). "Network topology and the efficiency of equilibrium". Games and Economic Behavior. 57 (2): 321–346. Dostopno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0899825605001284?via%3Dihub>
- [5] Myerson, Roger B. (1991). Game Theory: Analysis of Conflict. Harvard University Press.
- [6] Dal Bó, Pedro; Fréchette, Guillaume R. (2019). "Strategy Choice in the Infinitely Repeated Prisoner's Dilemma". American Economic Review. 109 (11): 3929–3952. Dostopno na: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.20181480>

- [7] Axelrod, Robert (1980). "Effective Choice in the Prisoner's Dilemma". The Journal of Conflict Resolution. 24 (1): 3–25. Dostopno na:
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002200278002400101>
- [8] Cornell University (2017). »Braess' Paradox – The Cheonggyecheon Restoration Project«. Dostopno na:
<https://blogs.cornell.edu/info2040/2017/09/14/braess-paradox-the-cheonggyecheon-restoration-project/>
- [9] Cornell University (2017). »Braess's Paradox in South Korea«. Dostopno na:
<https://blogs.cornell.edu/info2040/2017/10/17/braesss-paradox-in-south-korea/>
- [10] Washington Faculty (2017). »Traffic flow: the Lighthill-Whitham-Richards model«. Dostopno na:
https://faculty.washington.edu/rjl/riemann_book/Traffic_flow.html
- [11] Giovanni De Nunzio, Per-Olof Gutman (2017). »An application of shock wave theory to urban traffic control via dynamic speed advisory«. Dostopno na:
https://transp-or.epfl.ch/heart/2017/abstracts/hEART2017_paper_184.pdf
- [12] Carmona, Guilherme; Podczeck, Konrad (2009). "On the Existence of Pure Strategy Nash Equilibria in Large Games". Journal of Economic Theory. 144 (3): 1300–1319. Dostopno na:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022053108001695?via%3Dihub>

[13] Schelling, Thomas (1980). »The Strategy of Conflict«, Harvard University Press.

[14] Wikipedia. »An example prisoner's dilemma payoff matrix«. Dostopno na:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Prisoner%27s_dilemma#/media/File:Prisoners_dilemma.s
vg](https://en.wikipedia.org/wiki/Prisoner%27s_dilemma#/media/File:Prisoners_dilemma.svg)