

# Određivanje energetskeg profila prometnice na temelju povijesnih zapisa o kretanju vozila

---

**Mardešić, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:199795>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Nikola Mardešić

**ODREĐIVANJE ENERGETSKOG PROFILA  
PROMETNICE NA TEMELJU POVIJESNIH  
ZAPISA O KRETANJU VOZILA**

ZAVRŠNI RAD br 5110

Zagreb, 2019.

Zagreb, 28. ožujka 2019.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**  
Predmet: **Baze podataka**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 5110

Pristupnik: **Nikola Mardešić (0135243785)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Određivanje energetskeg profila prometnice na temelju povijesnih zapisa o kretanju vozila**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno obraditi povijesne podatke o kretanju vozila cestovnom mrežom s ciljem određivanja profila brzina i akceleracija za cestovne segmente na području grada Zagreba. Također potrebno korištenjem Copernicus baze podataka o visini reljefa odrediti nagibe cestovnih segmenata. Potom je potrebno dizajnirati i izraditi energetske model potrošnje (energetske profile) jednog električnog vozila zasnovanog na poznavanju brzine, akceleracije i nagiba prometnice. Potrebno je oblikovati i izraditi bazu podataka u koju će se spremi navedeni podaci te izraditi grafičko sučelje za prikaz i analizu podataka.

Mentor:



---

prof. dr. sc. Hrvoje Gold

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



---

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD br 5110

**ODREĐIVANJE ENERGETSKOG PROFILA  
PROMETNICE NA TEMELJU POVIJESNIH ZAPISA O  
KRETANJU VOZILA**

**DETERMINATION OF ROAD ENERGY PROFILE  
BASED ON HISTORICAL RECORDS OF VEHICLE  
TRAJECTORIES**

Mentor: prof. dr. sc. Hrvoje Gold  
Neposredni voditelj/komentor:  
Tomislav Erdelić, mag. ing. el. techn. inf.

Student: Nikola Mardešić  
JMBAG: 0135243785

Zagreb, rujan 2019.



# ODREĐIVANJE ENERGETSKOG PROFILA PROMETNICE NA TEMELJU POVIJESNIH ZAPISA O KRETANJU VOZILA

## Sažetak:

Udjel električnih vozila postepeno se povećava na globalnom tržištu. Uz sve svoje prednosti električna vozila su karakterizirana relativno malim dosegom vožnje. Kako optimalno iskoristiti kapacitet baterije predstavlja nezaobilazno pitanje. Praćenje putanje vozila na prometnoj mreži rezultira akumuliranjem velike količine podataka. Ti povijesni podaci mogu se koristiti kao višestruki izvor dodatnih informacija tijekom prometne analize te su glavni izvor podataka korištenih u ovom radu. Cilj ovog rada je prostorno-vremenska analiza energetske profila mreže prometnica unutar šire okolice Grada Zagreba te razvijanje grafičkog korisničkog sučelja za integraciju i ilustraciju dobivenih rezultata za krajnje korisnike.

U svrhu postizanja ovih ciljeva primijenjena je metodologija izračuna energetske profila temeljena na povijesnim podacima kretanja vozila. U radu je obrazložen model izračuna električne energije vozila na razmatranom prometnom segmentu. Budući da se vrijednosti energetske profila prometnice mijenjaju tijekom dana dizajnirano je interaktivno grafičko korisničko sučelje u kojem se vizualno prikazuju energetske profili mreže prometnica u danom trenutku. U radu je također primijenjen algoritam grupiranja prometnica na temelju sličnih karakteristika te razvijen algoritam rutiranja električnih vozila na temelju izračunatih energetske profila prometnica.

Prostorno-vremenska analiza razvijena u okviru ovog rada proizvela je rezultate sukladne s prostornom logikom područja istraživanja unutar šire okolice Grada Zagreba. Rezultati istraživanja nude praktičan uvid u energetske učinkovitost prometnih segmenata urbanog prostora na temelju kojeg je moguća izvedba planiranja ruta flote električnih vozila.

**Ključne riječi:** NoSQL, C#, veliki skupovi podataka, obrada i pohrana prometnih podataka, energetske profil prometnica, rutiranje vozila, grupiranje prometnica, električna vozila

# DETERMINATION OF ROAD ENERGY PROFILE BASED ON HISTORICAL RECORDS OF VEHICLE TRAJECTORIES

## **Abstract:**

The share of electric vehicles is gradually increasing in the global vehicle market. Although electric vehicles have several advantages, they are characterised by relatively low cruising range (autonomy). Therefore, optimal battery utilization is a crucial question and challenge. Road traffic monitoring produces vast quantities of real time and historical data. Historical traffic data is a valuable resource in the field of traffic analysis and it constitutes the primary data used in this research. The aim of this research is to analyse road energy profiles from a spatio-temporal aspect and to develop a graphical user interface for integrating and illustrating the results of the research for end users.

To achieve these aims we have implemented a methodology for estimating road energy profiles based on historical traffic data analysis. Furthermore, we have developed an approach for computing electric vehicle electricity consumption (or generation) on individual road segments. However, the values of the road's energy profile change in the course of a day. Thus we have created an graphical user interface through which we can observe road energy profile values at a given time of day. We have also implemented an algorithm for clustering road segments based on similar energy profiles. Finally, we have developed an modified vehicle routing algorithm which dynamically calculates optimal routes based on road energy profiles at a given time of day.

The results of this research can help inform policy makers on the given situation for electric vehicles implementation and proliferation in the larger urban area of Zagreb city. More importantly, combined with the graphical user interface and custom routing algorithm, the outcomes of this research could provide electric vehicle users a valuable tool for optimizing their vehicle utilization.

**Keywords:** NoSQL, C#, large datasets, traffic data analysis, road energy profiles, vehicle routing, road clustering, electric vehicles

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. Ciljevi rada . . . . .	2
1.2. Struktura rada . . . . .	2
<b>2. Električna vozila i model potrošnje električne energije</b>	<b>4</b>
2.1. Električna vozila . . . . .	4
2.2. Longitudinalni model potrošnje električne energije . . . . .	6
<b>3. Opis, pohrana i obrada podataka</b>	<b>9</b>
3.1. Struktura podataka . . . . .	9
3.2. Obrada podataka . . . . .	12
3.2.1. Obrada GPS podataka . . . . .	12
3.2.2. Podaci o nadmorskoj visini . . . . .	14
3.3. Pohrana podataka . . . . .	17
3.3.1. NoSQL . . . . .	17
3.3.2. Razlike u odnosu na SQL baze podataka . . . . .	17
<b>4. Izračun energetskeg profila prometnice</b>	<b>19</b>
<b>5. Grafičko sučelje za prikaz i analizu podataka</b>	<b>24</b>
5.1. Programski jezik . . . . .	24
5.2. NuGet paket . . . . .	25
<b>6. Dijkstra algoritam</b>	<b>26</b>
6.1. Teorija grafova . . . . .	26
6.1.1. Problem sedam mostova Königsberga . . . . .	27
6.1.2. Teorija i vrste grafova . . . . .	28
6.2. Pronalazak najkraćeg puta . . . . .	29
<b>7. K-Means algoritam</b>	<b>35</b>



<b>8. Rezultati</b>	<b>39</b>
8.1. Energetski, brzinski i akceleracijski profil . . . . .	39
8.2. Optimizacija prometnih procesa . . . . .	51
8.3. Detekcija i grupiranje sličnih linkova . . . . .	58
<b>9. Zaključak</b>	<b>70</b>
<b>Literatura</b>	<b>71</b>
<b>Popis slika</b>	<b>74</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>77</b>

# 1. Uvod

Rastući prometni sektor konzumira gotovo jednu trećinu (28%) ukupne primarne energije u svijetu. Nadalje, više od 90% utrošene energije unutar prometnog sektora konzumiraju vozila na unutarnje izgaranje [1]. Uz ograničene izvore, temeljni problem fosilnih goriva predstavlja proizvodnja prekomjerne količine stakleničkih plinova. Gotovo 29% ukupne količine svjetskih stakleničkih plinova rezultat je izgaranja fosilnih goriva korištenih u prometu [2]. Pomak prema ekološki i energetski učinkovitijem rješenju u prometu od vitalnog je značaja za ublažavanje antropogenog klimatskog pritiska. Električna vozila dugoročno predstavljaju obećavajući put ka dekarbonizaciji prometnog sektora. Primjenom električnih putničkih vozila mogu se smanjiti emisije štetnih plinova i ovisnost o fosilnim gorivima te se znatno povećati učinkovitost rada samog vozila. Uz sve prednosti, električna vozila su i dalje karakterizirana relativno malim dosegom vožnje. Značajni istraživački naponi usmjereni su na razvoj algoritama za pronalazak energetski optimalnih ruta.

Inteligentni transportni sustavi (ITS) predstavljaju okosnicu prometnog sustava. Upravljačkom i informacijsko-komunikacijskom nadogradnjom klasičnog prometnog sustava nastoje se postići znatna poboljšanja u svakom kutu prometnog sustava. Da bi ta poboljšanja bila izvediva, neophodno je prikupljati podatke koji se svakodnevno zbivaju oko nas. U svrhu analize i optimizacije prometnog sustava, jedan takav podataka koji se redovno prikuplja je podatak o prometnom toku.

U ovom radu provest će se prostorno-vremenska analiza energetskih profila mreže prometnica unutar šire okolice Grada Zagreba. Koristeći se znatnom količinom GPS (*engl. Global Positioning System*) podataka agregiranih u obliku profila brzina i osnovnih fizičkih zakona, ova će teza tražiti uvid u modele potrošnje energije električnih vozila, kao i razviti način vizualizacije izvedenih energetskih profila.

## 1.1. Ciljevi rada

U ovom radu obrađeni su povijesni podaci kretanja vozila na području šire okolice Grada Zagreba u svrhu izračuna energetskeg profila prometnica. Praćenje kretanja vozila putem GPS-a rezultira akumuliranjem velike količine podataka koji prikazuju vrijeme putovanja vozila na određenom putu. Na temelju poznavanja vremena te duljine prijeđenog puta može se izračunati profil brzine prometnice. Primjena deriviranih profila brzina je velika: za procjenu vremena putovanja i rutiranja flote vozila, za uštedu goriva, za analizu ponašanja vozača, itd. [3]. Svrha ovog rada je obrada podataka te izračun energetskeg profila prometnica na temelju deriviranih podataka.

Ciljevi rada su sljedeći:

- obrada i pohrana sirovih GPS podataka
- izrada i formuliranje modela potrošnje električne energije
- izrada programskog rješenja za izračun potrošnje električne energije
- implementacija algoritma za usmjeravanje vozila
- grupiranje prometnih segmenata po karakteristikama
- izrada grafičkog sučelja za prikaz rezultata navedenih ciljeva

## 1.2. Struktura rada

Završni rad započinje s kratkim uvodom u trenutno prometno stanje te nužnost istraživanja energetskeg profila. U ovom poglavlju se predstavljaju svrha i ciljevi rada, koji će postaviti put do završnih rezultata te odgovarajućeg zaključka. Drugo poglavlje daje uvid u osnovne karakteristike električnog vozila te prednosti i mane navedenog vozila u usporedbi s tradicionalnim vozilima na unutarnje izgaranje. Prva i osnovna prepreka u izučavanju i optimizaciji prometnih procesa na bilo kojoj prometnoj mreži predstavlja prikupljanje podataka o stanju prometne mreže. Nužan uvjet je da prikupljeni podaci sadrže dovoljnu rezoluciju mjerenja (prostornu i vremensku) te da su do određene razine pouzdani, što se osigurava upotrebom odgovarajuće metode mjerenja [4]. U trećem poglavlju ovog rada prikazati će se ulazni podaci, opisati metode obrade navedenih podataka te će se obrazložiti postupak pohrane deriviranih podataka. U okviru ovog rada, pristup koji je korišten za procjenu potrošnje električne energije kombinira generički model vozila temeljen na fizici s operativnim karakteristikama glavnih komponenti električnog vozila kako bi se zahtjevi vučne snage (na kotačima) pretvorili u zahtjeve za naponom akumulatora električnog vozila [5]. Četvrto poglavlje daje uvid u metodologiju postupka procjene potrošnje energije. U petom poglavlju je opisan programski jezik te biblioteke koje su

korištene prilikom izrade programskog rješenja. Ograničen domet vožnje u kombinaciji s nedostatkom infrastrukture namijenjene za punjenje električnih vozila nameće potrebu za izradom aplikacijskih rješenja usmjeravanja vozila. U šestom poglavlju opisati će se algoritam za izračun energetske učinkovite, optimalne rute vozila između dvije točke korištenjem Dijkstrinog algoritma. Skupovi podataka, u današnjem poslovnom i tehnološkom svijetu, su neophodni. Analiziranje i grupiranje nestrukturiranih podataka omogućuje stjecanje uvida koji mogu pomoći pri donošenju strateških odluka. U sedmom poglavlju opisati će se proces grupiranja složenih skupova podataka uporabom K-means algoritma. Osmo poglavlje rada prikazuje rezultate analiziranih i obrađenih profila brzina. Posljednje poglavlje rada je zaključno poglavlje u kojem je dan osvrt na provedene aktivnosti. U poglavlju su prikazani nedostaci istraživanja i potencijalne nadogradnje sustava.

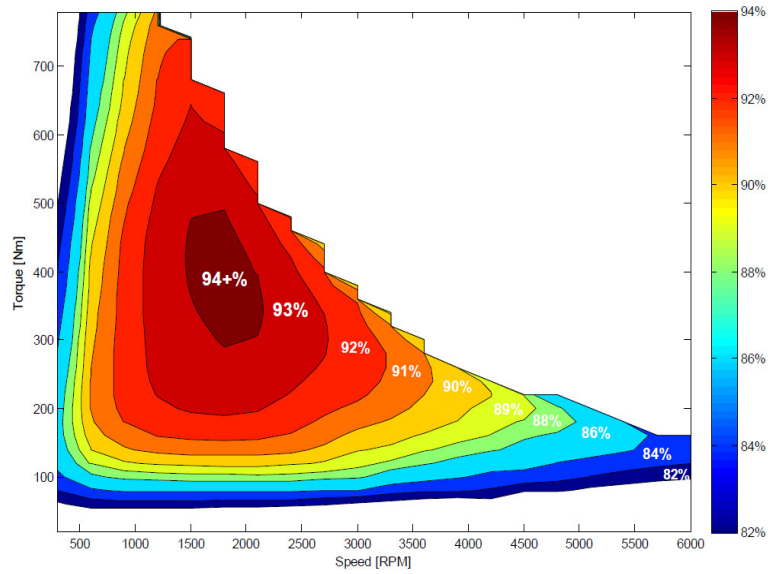
## **2. Električna vozila i model potrošnje električne energije**

U ovom poglavlju ukratko se opisuju značajke navedenih vozila te pristup izračuna njihove potrošnje električne energije. Električna vozila su sve više u uporabi i predviđa se njihova sve veća zastupljenost. Naspram znatne ograničenosti autonomije, električna vozila trenutno po dometu i cijeni po km predstavljaju optimalni izbor vozila za gradsku i prigradsku vožnju. Danas, gotovo svi proizvođači automobila rade na razvoju električnih vozila.

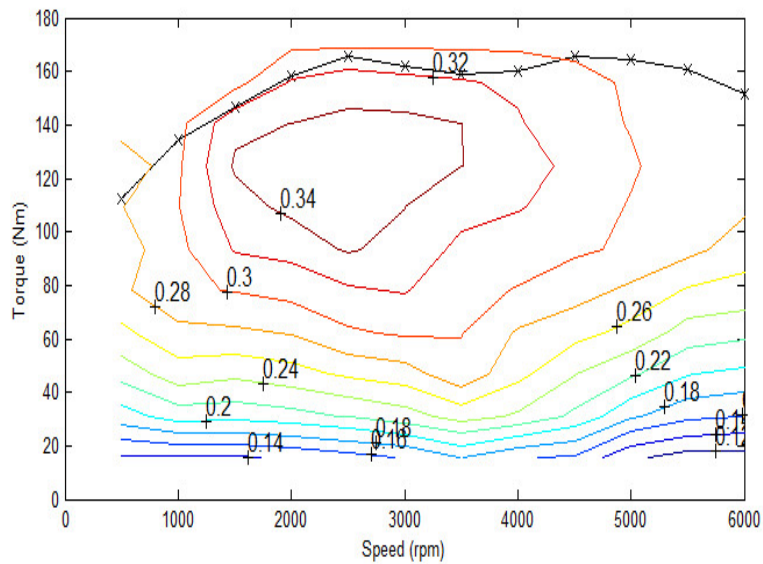
### **2.1. Električna vozila**

Električna vozila predstavljaju tip vozila čiji pogonski sustav može biti sačinjen od jednog ili više elektromotora. Energija potrebna za funkcioniranje vozila se isključivo temelji na električnoj energiji kao izvoru energije. Električno vozilo može se napajati preko sustava kolektora električnom energijom iz izvora izvan vozila ili može biti samostalno opremljeno baterijom, solarnim panelima ili električnim generatorom za pretvaranje goriva u električnu energiju [6].

Električna vozila imaju potencijal značajno smanjiti ovisnost prometnog sustava o fosilnim gorivima, smanjiti emisije štetnih plinova, razinu buke te povećati energetska učinkovitost prijevoza. Značajnu prednost predstavlja energetska učinkovitost vožnje budući da električno vozilo ima puno bolju energetska učinkovitosti od vozila s unutarnjim izgaranjem. Bolja energetska iskorištenost proizlazi iz velikog stupnja učinkovitosti električnog motora, do 95% (Slika 2.1), u usporedbi s motorom na unutarnje izgaranje čija učinkovitost seže do 35% pri primjeni fosilnih goriva (Slika 2.2).

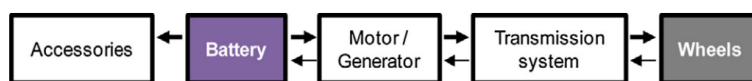


**Slika 2.1:** Učinkovitost električnog vozila, [7]



**Slika 2.2:** Učinkovitost vozila na unutarnje izgaranje, [7]

Energetska učinkovitost se dodatno obogaćuje sposobnošću električnog motora da u određenim okolnostima djeluje kao generator (Slika 2.3). Pri vožnji nizbrdo ili pri određenoj snazi kočenja, kinetička energija preko kotača vozila se pretvara u električnu energiju te se šalje nazad u akumulator [8].



**Slika 2.3:** Tok električne energije u tipičnom električnom vozilu, [8]

Iako imaju visoku učinkovitost, glavni problem električnih vozila je nizak stupanj autonomije. Akumulator odnosno baterija, trenutno predstavlja najveći nedostatak ove vrste vozila zbog svog ograničenog kapaciteta te vremena potrebnog za punjenje. Vozila s unutarnjim izgaranjem mogu biti napunjena gorivom znatno brže i punjenje je moguće na široko rasprostranjenoj mreži punionica.

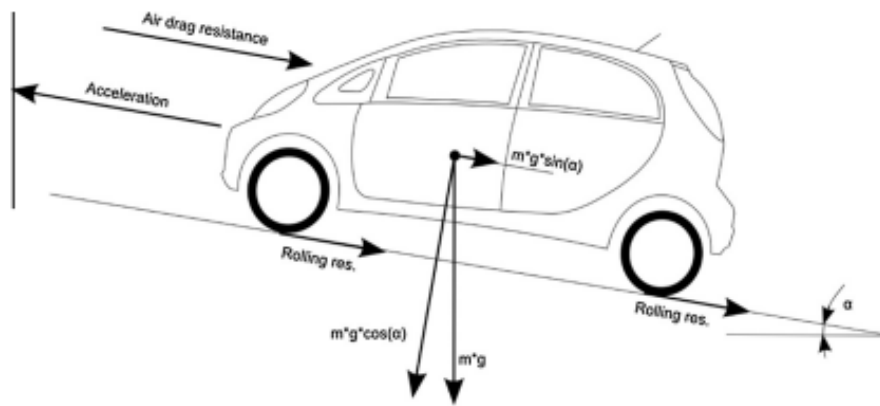
Trenutno dostupna komercijalna električna vozila imaju maksimalni doseg po punjenju otprilike 150 km. Trenutno najnaprednije komercijalno vozilo, Tesla Model S, ima maksimalni domet do 400 km. Dok prosječno vozilo s unutarnjim izgaranjem po punjenju može prevaliti udaljenost od otprilike 800 km [8]. Razlika dometa se dodatno povećava pri većem stupnju korištenja pomoćnih sredstava u vozilu, kao što su radio ili sustav za grijanje.

## **2.2. Longitudinalni model potrošnje električne energije**

Zbog malog kapaciteta akumulatora za skladištenje energije, potrebno je znati koliko energije troši vozilo kako bi se procijenio maksimalni domet vozila. U literaturi [9] se spominje više modela namijenjenih za izračun potrošnje električne energije.

U ovom radu koristio se model longitudinalne dinamike (engl. *Longitudinal Dynamics Model* - LDM), koji opisuje ponašanje kretanja vozila duž njegovog uzdužnog smjera. LDM sadrži nekoliko parametara koji se odnose na svojstva vozila i njegovu okolinu. U literaturi su navedeni različiti načini postavljanja parametara na određene vrijednosti. Zbog različitih indikacija u literaturi i različitih svojstava okoliša i vozila, svi parametri modela podliježu nesigurnosti unutar određenog raspona, što uzrokuje varijacije u procjeni potrošnje energije [8].

Ponašanje vozila uzduž njegovog smjera kretanja potpuno je određeno sumom sila koje djeluju na samo vozilo. Slika 2.4 prikazuje sile koje djeluju na vozilo pri kretanju uzbrdo. Otpor zraka, kotrljanja i otpor uzrokovan nagibom prometnice predstavljaju vanjske sile koje djeluju na vozilo. Vučnu silu za savladavanje vanjskih sila otpora te za postizanje ubrzanja vozila mora osigurati unutarnji (električni) motor [8].



**Slika 2.4:** Sile koje djeluju na vozilo pri kretanju uzbrdo, [8]

Tokom kretanja vozila, vanjske sile otpora ga pokušavaju zaustaviti, tj. dovesti do stanja mirovanja. Prema Newtonovom drugom zakonu, zakonu gibanja, sila potrebna za pokretanje vozila iz stanja mirovanja je jednaka umnošku ubrzanja vozila i njegove mase. Formula 2.1 prikazuje odnos između sile i ubrzanja,

$$F = \frac{dv}{dt}fm + F_r \quad (2.1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje [8]:

- $F$  - vučna sila električnog motora
- $\frac{dv}{dt}$  - akceleracija vozila
- $f$  - faktor mase svih rotirajućih dijelova
- $m$  - masa vozila
- $F_r$  - suma svih vanjskih sila koje djeluju na vozilo

Kako bi vozilo postiglo ubrzanje  $\frac{dv}{dt}$  ono uz pomoć vučne sile iz elektromotora mora savladati sve sile otpora. Sastav otpora  $F_r$  opisan je u formuli 2.2,

$$F_r = \underbrace{mg \sin(\alpha)}_{\text{Nagib}} + \underbrace{mg \cos(\alpha)c_{rr}}_{\text{Kotrljanje}} + \underbrace{\frac{\rho A c_w}{2}v^2}_{\text{Zrak}} \quad (2.2)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje [8]:

- $F_r$  - suma svih vanjskih sila koje djeluju na vozilo
- $m$  - masa vozila
- $g$  - gravitacijska akceleracija Zemlje
- $\alpha$  - nagib prometnice



- $c_{rr}$  - koeficijent trenja kotrljanja
- $v$  - brzina kretanja vozila
- $\rho$  - gustoća zraka
- $A$  - prednja površina vozila
- $c_w$  - koeficijent otpora zraka

Svi parametri modela su detaljno opisani u poglavlju 4.

Snaga potrebna za vožnju jednaka je umnošku sume sile trenja i brzine kretanja vozila. Ova mehanička snaga je produkt elektromotora koji crpi električnu energiju iz akumulatora. S obzirom na stope učinkovitosti vozila, potrebna snaga za kretanje vozila prikazana je formulom 2.3,

$$P = \frac{Fv}{\eta_M} \quad (2.3)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje [8]:

- $P$  - snaga potrebna za kretanje vozila
- $\eta_M$  - energetska učinkovitost vozila
- $F$  - vučna sila električnog motora
- $v$  - brzina kretanja vozila

Tokom usporavanja ili vožnje nizbrdo,  $F$  može biti negativna te u tom slučaju elektromotor može djelovati kao generator električne energije. Generirana energija se vraća natrag u akumulator vozila.

Za izračun konačne utrošene/generirane količine energije putovanja zbraja se potrebna snaga za savladavanje svakog pojedinog cestovnog segmenata na putu pomnožena s vremenom putovanja. Formula 2.4 prikazuje izračun sume energije putovanja vozila.

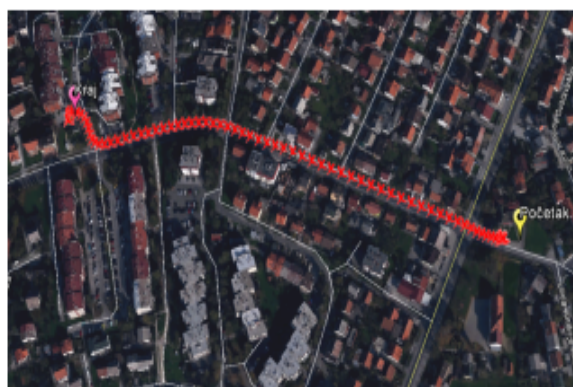
$$E = \sum_{i=1}^N P_i \Delta t_i \quad (2.4)$$

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

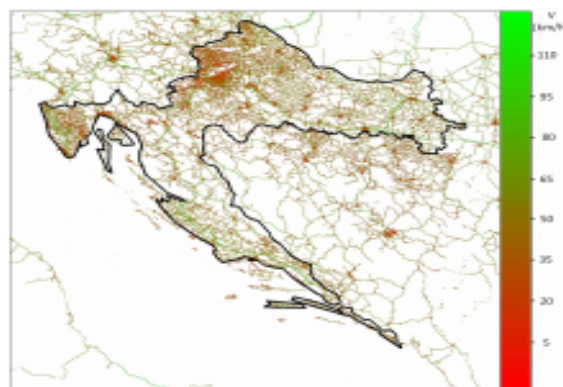
- $E$  - ukupna energija
- $P_i$  - snaga potrebna za savladavanje cestovnog segmenta
- $t_i$  - vrijeme putovanja na cestovnom segmentu

## 3. Opis, pohrana i obrada podataka

Povijesne podatke korištene u ovom radu čine GPS tragovi vozila obrađeni i prikupljeni u okviru projekta *SORDITO*<sup>1</sup>. Približno sedam milijardi GPS zapisa kretanja vozila na području Republike Hrvatske u razdoblju od pet godina je prikupljeno pokretnim osjetilima (engl. *Floating Car Data* - FCD) iz navigacijskih uređaja ugrađenih u vozila. Navigacijski uređaji su emitirali signal približno svakih 100 m kada se vozilo kretalo i svakih 5 min kada je vozilo bilo ugašeno. Slika 3.1 prikazuje zabilježene povijesne tragove vozila na teritoriju Republike Hrvatske prikazanim točkom u boji u ovisnosti izmjerenoj brzini od crvene ( $v \leq 5$  km/h) do zelene ( $v \geq 100$  km/h) [4], [10].



(a) Primjer GPS tragova



(b) Prikaz GPS tragova kretanja vozila

**Slika 3.1:** Prikaz prikupljenih podataka na teritoriju Republike Hrvatske, [4]

### 3.1. Struktura podataka

Prikupljeni GPS podaci su strukturirani u CSV (engl. *Coma Seperated Values* - CSV) formatu. U CSV datoteci u svakom retku prikazan je link na području šire okolice grada Zagreba koji će biti korišten u radu. Jedan link predstavlja dio prometnice omeđen s dva raskrižja. Svaki link definiran je s jedinstvenim identifikacijskim brojem (ID), polaritetom linka, duljinom

<sup>1</sup>Projekt SORDITO - Sustav za optimizaciju ruta u dinamičkom transportnom okruženju RC.2.2.08-0022, financiran sredstvima Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj

u metrima, statičnom brzinom, ograničenjem brzine na linku te dvjema geografskim koordinatama (početna i završna točka). Format zapisa je sljedeći:

*LinkID;Way;Length;MSpeed;Limit;x<sub>1</sub>;y<sub>1</sub>;x<sub>2</sub>;y<sub>2</sub>*

Slika 3.2 prikazuje izgled podataka o linku, dok Tablica 3.1 prikazuje i opisuje svaki atribut pojedinog linka.

```
1 LinkID;Way;Length;MSpeed;Limit;x1;y1;x2;y2
2 201044;1;1037;108;80;15.9103167057037;45.7625907032682;15.9223544597626;45.7666622807047
3 201045;1;273;108;80;15.9223544597626;45.7666622807047;15.9256267547607;45.7675753510265
4 201046;1;110;108;70;15.9256267547607;45.7675753510265;15.9269464015961;45.7679345877119
5 201047;1;141;108;70;15.9269464015961;45.7679345877119;15.9286415576935;45.7683836303153
6 201048;1;152;108;70;15.9286415576935;45.7683836303153;15.9304761886597;45.7688775730037
7 201049;1;216;108;70;15.9304761886597;45.7688775730037;15.9330296516418;45.7696633819025
8 201050;1;36;108;80;15.9329545497894;45.7697831232388;15.9325361251831;45.7696484142174
9 201051;1;254;108;80;15.9325361251831;45.7696484142174;15.9295105934143;45.7687653136859
10 201052;1;1603;108;80;15.9295105934143;45.7687653136859;15.9106707572937;45.7628526703197
11 201053;2;29;76;80;15.9329545497894;45.7697831232388;15.9332871437073;45.7698953805082
12 201054;2;29;76;70;15.9332871437073;45.7698953805082;15.9336197376251;45.7700076375517
13 201055;2;9;76;70;15.9336197376251;45.7700076375517;15.9337270259857;45.7700450565159
14 201056;2;46;76;70;15.9337270259857;45.7700450565159;15.9342634677887;45.770224667195
15 201057;2;67;76;70;15.9342634677887;45.770224667195;15.9350252151489;45.770516533315
16 201058;2;270;76;70;15.9350252151489;45.770516533315;15.9380078315735;45.7717663017357
17 201059;2;14;76;70;15.9380078315735;45.7717663017357;15.9381580352783;45.7718336537296
18 201060;2;22;42;70;15.9381580352783;45.7718336537296;15.9383940696716;45.7719384233361
19 201061;2;432;42;70;15.9383940696716;45.7719384233361;15.9431147575378;45.7740038411084
20 201062;2;215;42;70;15.9431147575378;45.7740038411084;15.9454536437988;45.7750440044303
21 201063;2;433;42;70;15.9431898593903;45.7739065586545;15.938469171524;45.7718186866268
22 201064;2;21;42;70;15.938469171524;45.7718186866268;15.9382438659668;45.7717139167954
23 201065;2;24;76;70;15.9382438659668;45.7717139167954;15.9379756450653;45.7716016631861
24 201066;2;265;76;70;15.9379756450653;45.7716016631861;15.935035943985;45.7703818260648
25 201067;2;80;76;70;15.935035943985;45.7703818260648;15.9341239929199;45.7700525403058
```

Slika 3.2: CSV format linkova

**Tablica 3.1** Opis atributa linka

Atribut	Vrijednost	Opis
LinkID	214695	Vrijednost jedinstvenog ID-a cestovnog segmenta u digitalnoj karti
Way	2	Označava jednosmjernan / dvosmjernan link i smjernost: 0 - znači dvosmjernan link; 1 - jednosmjernan link čiji je smjer kretanja po linku od točke $T_1(x_1, y_1)$ prema $T_2(x_2, y_2)$ ; 2 - jednosmjernan link čiji je smjer kretanja po linku od točke $T_2(x_2, y_2)$ prema $T_1(x_1, y_1)$ ; 3 - zatvorena cesta
Len	340	Duljina linka [m]
MSpeed	38	Statična brzina dodjeljena od tvrtke Mireo [km/h]
Limit	60	Ograničenje brzine na linku [km/h]
$x_1$	15.9521055221558	Geografska dužina točke $T_1(x_1, y_1)$ u decimalnim stupnjevima
$y_1$	45.7848684748881	Geografska širina točke $T_1(x_1, y_1)$ u decimalnim stupnjevima
$x_2$	15.95250248909	Geografska dužina točke $T_2(x_2, y_2)$ u decimalnim stupnjevima
$y_2$	45.781823298653	Geografska širina točke $T_2(x_2, y_2)$ u decimalnim stupnjevima

Za svaki link postoji dodatna datoteka koja sadrži skup izračunatih brzina prilikom prolaska vozila preko tog cestovnog segmenta. Uz derivirane brzine u datoteci se nalazi i *Coordinate Universal Time* (UTC) koji predstavlja vrijeme generiranja zapisa. Format zapisa je sljedeći:

$$UTC;v_1;v_2;v_3;v_4$$

Na slici 3.3 prikazuje se izgled datoteke linka, a u tablici 3.2 se prikazuje i opisuje format zapisa.

**Tablica 3.2** Opis podataka

Atribut	Tip podatka	Opis
UTC	int (4 B)	UTC vrijeme GPS zapisa (u sekundama) - iz UTC-a se može dobiti točan datum, te vrijeme u danu u sekundnoj rezoluciji
$v_1$	double (8 B)	Uprosječna GPS brzina svih zapisa jednog zabilježenog prolaska vozila po linku
$v_2$	double (8 B)	<b>Uprosječna jednolika brzina po segmentu izračunata na temelju prijedene udaljenosti između susjednih GPS zapisa kretanja jednog vozila na linku</b>
$v_3$	double (8 B)	Jednolika brzina kretanja izračunata na temelju prijedene udaljenosti između prvog i zadnjeg zapisa kretanja jednog vozila i proteklog vremena
$v_4$	double (8 B)	Jednolika brzina kretanja izračunata na temelju zračne prijedene udaljenosti između prvog i zadnjeg GPS zapisa kretanja jednog vozila i proteklog vremena

```

1 UTC;v1;v2;v3;v4|
2 1406117262;39.3;35.5;35.5;35.5
3 1402476019;33.3;4.1;4.1;4.1
4 1402914779;28.0;3.9;3.9;3.9
5 1385801758;39.5;39.9;39.9;39.9
6 1367582102;33.5;34.3;34.3;34.3
7 1368191304;19.3;6.4;6.4;6.4
8 1369646157;33.5;36.3;36.3;36.3
9 1375447951;36.5;3.5;3.5;3.5
10 1376303234;24.0;28.2;28.2;28.2
11 1391072039;32.0;3.9;3.9;3.9
12 1370336328;30.5;31.4;31.4;31.4
13 1399892728;17.0;15.0;15.0;15.0
14 1380009296;28.5;32.0;32.0;32.0
15 1396951663;17.5;25.1;25.1;25.1
16 1375434254;28.0;21.7;21.7;21.7
17 1324628910;35.5;33.2;33.2;33.2
18 1370604006;32.0;3.8;3.8;3.8
19 1359455801;27.0;14.1;14.1;14.1
20 1354002031;0.0;8.3;8.3;8.3
21 1404395714;40.0;3.8;3.8;3.8
22 1405306203;63.0;62.9;62.9;62.9
23 1405464093;41.0;6.3;6.3;6.3
24 1405796636;14.5;1.6;1.6;1.6
25 1405799211;35.0;36.7;36.7;36.7

```

Slika 3.3: CSV format linka

Na projektu SORDITO se pokazalo najbolje koristiti brzinu  $v_2$ , a brzine  $v_3$  i  $v_4$  potvrđuju u većini slučajeva kako je to istina jer su iste vrijednosti kao i za brzinu  $v_2$ . Iz tog razloga se u ovom radu promatrala brzina  $v_2$ .

## 3.2. Obrada podataka

Točnost rezultata analiziranja sustava uvjetovana je predobradom sirovih, nesortiranih podataka u kristalne strukture prometnih parametara. U ovom radu, krajnji cilj obrade skupa podataka predstavljalo je grupiranje podataka prema sljedećim vremenskim razdobljima:

- grupiranje prema *danima u tjednu*
- grupiranje prema *minutnim intervalima*

### 3.2.1. Obrada GPS podataka

Postupak obrade podataka izvršavao se unutar objektno orijentiranog programskog jezika  $C\#^2$ . Algoritam obrade skupa podataka podijeljen je u sedam razina:

- *Prva razina* algoritma predstavlja skup naredbi koje na temelju dobivenog ključa (identifikacijskog broja linka) pronalaze datoteku u kojoj se nalaze svi zabilježeni *GPS* zapisi promatranog linka. Prva razina ujedno je i uvjet za izvršavanje svih ostalih razina algoritma. Identifikacijski ključ predstavlja element u prvom stupcu na slici 3.2.

<sup>2</sup>Programski jezik detaljno je opisan u poglavlju 5

- **Druga razina** se izvršava nakon uspješnog dohvaćanja skupa podataka promatranog linka. Unutar druge razine, nad skupom *GPS* zapisa, izvršava se postupak pretvorbe *epoch UTC* vremena u oblik čitak ljudima s godinom, mjesecom, danom, satima, minutama i sekundama. *UTC* predstavlja element u prvom stupcu na slici 3.3. Postupak izvedbe pretvorbe razlikuje se ovisno o programskom jeziku u kojem se radi. Slika 3.4 predstavlja prikaz koda koji je korišten unutar programskog jezika *C#*.
- **Treća razina** na temelju rezultata druge razine dijeli podatke na dva tipa dana. Podatke koji pripadaju *radnim danima*, vremenski raspon od ponedjeljka do petka, te na dane koji pripadaju *neradnim danima*, tj. subota i nedjelja.
- **Četvrta razina** predstavlja proces daljnjeg grupiranja podataka pojedinog tipa dana na sate u danu, tj. na raspon od 0 h do 24 h.
- **Peta razina** dijeli dobivene podatke iz četvrte razine na 5 minutne intervale unutar jednog dana.
- **Šesta razina** predstavlja razinu algoritma u kojoj se za svaki 5 minutni interval iz skupa podataka dobivenih iz pete razine izračunava prosječna brzina vozila. Za svaki dan biti će spremljeno 288 5-minutnih zapisa prosječne brzine ( $288 \cdot 5 \text{ min} = 1440 \text{ min} = 24 \text{ h}$ ).
- **Sedma razina** predstavlja krajnju razinu algoritma u kojoj se izvršava konačni zapis prosječnih brzina po 5-minutnom intervalu za oba tipa dana promatranog linka. Zapis se vrši u datoteku u kojoj se nalazi skup svih obrađenih linkova.

```
public static DateTime UtcToRealTime(int x) //Metoda za pretvorbu UTC vremena u lokalno vrijeme, metoda prima parametar koji predstavlja broj sekundi (UTC zapis)
{
    int utcTime = x;
    DateTime epoch = new DateTime(1970, 1, 1); // UTC se racuna na principu da se gleda broj sekundi proteklih od ponoci 1.1.1970.
    DateTime Converter = epoch.AddSeconds(utcTime);
    var CESTime = TimeZoneInfo.ConvertTime(Converter, TimeZoneInfo.Utc, TimeZoneInfo.Local);
    return CESTime; // Vracanje vremena
}
```

**Slika 3.4:** *C#* algoritam pretvorbe UTC zapisa u čitljiv oblik

Obrađeni podaci su pohranjeni unutar *.txt* datoteke prikazane na Slici 3.5 (N.B. označen je samo dio zapis linka koji ne posjeduje brzinske zapise za svaki 5-minutni interval tijekom dana da bi se zornije mogla vidjeti konstrukcija zapisa izračunatih profila). U jednom redu datoteke nalaze se svi poznati brzinski profili za oba tipa dana te svi ostali parametri pojedinog linka. Takav način pohrane podataka učinkovitiji je od drugog načina pohrane, pri kojem je svaki 5 minutni interval pojedinog linka zapisan u zasebnom redu. Spremanje svih brzinskih i vremenskih podatak linka unutar jednog reda drastično ubrzava čitanje datoteke i samnjuje potreban memorijski prostor.

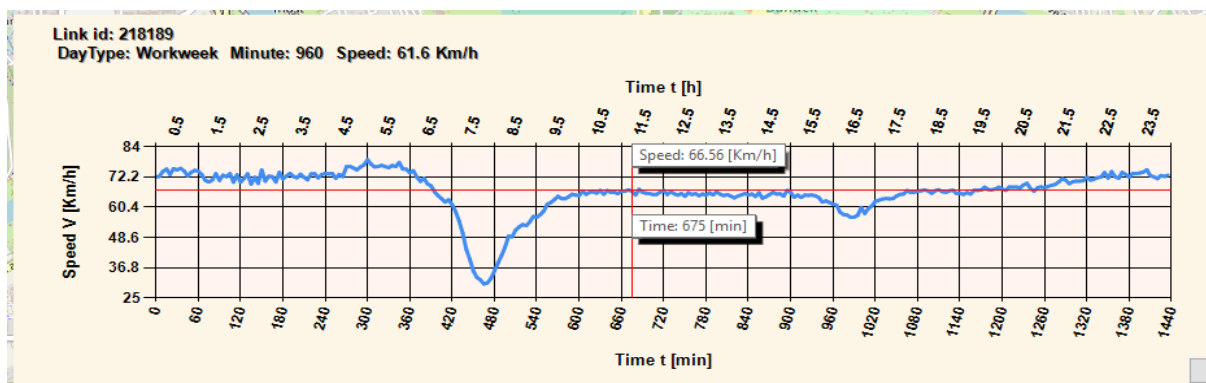
```

06;Workweek;10;2.7;Interpolation;LinkClass;1080
;Workweek;11;20.6;Interpolation;LinkClass;1080
5;Weekend;5;2.4;Interpolation;LinkClass;1080
;Workweek;465;14.1;480;22.8;1050;73.7;Weekend;520;40.7;Interpolation;LinkClass;1080
11;Workweek;740;22.3;750;7.5;945;12.8;Weekend;220;13.9;Interpolation;16.155781745910
11;Workweek;635;5.2;795;11.1;1205;32.3;Weekend;370;17.6;620;30.7;745;17;Interpolation
4;Workweek;6;Interpolation;LinkClass;1080
7;Workweek;6;Weekend;220;50.3;370;36;620;30;745;2
527;Workweek;1025;21.5;Interpolation;LinkClass;1080
7;Workweek;330;23.6;990;2.8;Interpolation;LinkClass;1080
856;Workweek;675;21.6;960;25.1;1025;21.5;1065;46.7;Interpolation;LinkClass;1080

```

Slika 3.5: Prikaz dijela konačnog zapisa obrađenih podataka

Pri zahtjevu korisnika za dohvat cjelodnevnog profila brzine određenog linka, programski jezik konstruira graf temeljen na izračunatim prosječnim brzinama pohranjenima unutar datoteke. Slika 3.6 prikazuje primjer raspona brzinskih vrijednosti izračunatih na dionici Mosta slobode u smjeru sjevera za radni tip dana.



Slika 3.6: Graf profila brzine na segmentu Mosta slobode u smjeru sjevera

### 3.2.2. Podaci o nadmorskoj visini

Uz prostorno-vremenske brzinske zapise, u svrhu izračuna energetskega profila, potrebno je poznavati i podatke o nadmorskoj visini promatranih prometnih segmenata. Poznavanjem nadmorske visine početne i krajnje točke linka moguće je izračunati nagib samog linka. Zanimarivanje vrijednosti nagiba može značajno povećati pogrešku modela procjene energije.

#### Digitalni visinski model

Podaci o nadmorskoj visini i samim tim nagibu puta mogu se dobiti iz različitih izvora podataka koristeći različite metode uzorkovanja. U ovom radu korišten je EU-DEM<sup>3</sup> (engl. EU-

<sup>3</sup>Više o bazi podataka <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/eu-dem-2013-report-on-the-results-of-the-statistical-validation>

*Digital Elevation Model*), digitalni površinski model koji pokriva Europu, nastao tijekom programa Kopernik, financiranog od strane Europske unije. Podaci su dostupni pri razlučivosti od 25 metara s vrijednostima nadmorske visine pohranjenim u obliku rastera. Vrijedi napomenuti da su slični podaci o razlučivosti dostupni i na globalnoj razini. Vrijednosti nadmorske visine određuju se iz DEM-a za svaku točku primjenom bilinearnog interpolacijskog uzorkovanja rastera koji izračunava vrijednost na temelju četiri najbliža centra rasterskih stanica. Za analizirane linkove promatraju se vrijednosti nadmorske visine između 97 i 1035 metara nadmorske visine (Sljeme).

## QGIS

U ovom radu korišten je QGIS u svrhu izvlačenja podataka o nadmorskim visinama iz baze podataka europske službe "Copernicus Land Monitoring service". QGIS je računalna aplikacija otvorenog koda koja omogućuje vizualizaciju, upravljanje, uređivanje i analiziranje geografskih podataka. Slično ostalim GIS aplikacijama, QGIS korisnicima omogućuje stvaranje karata s većim brojem slojeva koji koriste različite projekcije karata. Karte mogu biti sastavljene u različitim formatima i za različite namjene. QGIS omogućuje stvaranje karata koje se sastoje od rasterskih ili vektorskih slojeva. Vektorski podaci mogu biti pohranjeni kao točke, linije, ili poligoni, a podržane su različite vrste rasterskih slika. Program podržava i georeferenciranje [11].

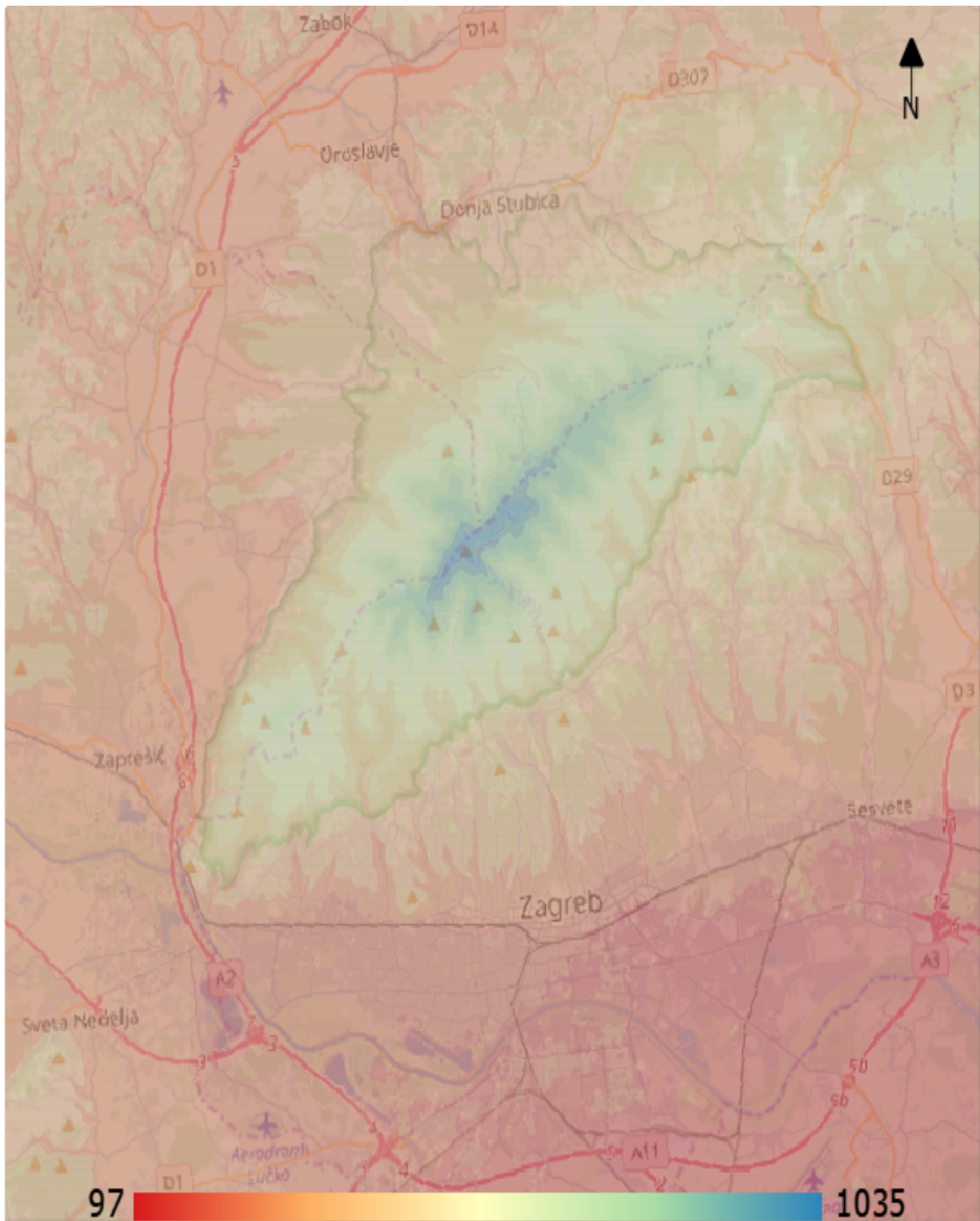
Pri pokretanju aplikacije potrebno je učitati podatke dobivene iz "Copernicus Land Monitoring service" baze podataka koji su u obliku rasterskog zapisa. Radi lakšeg snalaženja na karti korišten je *OpenStreetMap* paket koji prikazuje cestovnu mrežu u obliku sloja postavljenog preko rastera nadmorske visine. Rasterski zapis potrebno je pretvoriti u čitljiv oblik. U svrhu pretvorbe rasterskog zapisa u CSV format potrebno je nad rasterom postaviti *fishnet*, tj. mrežu točaka rezolucije 10x10 metara. Ovim koracima postignuto je precizno očitavanje nadmorske visine uz razumno korištenje računalnih resursa (rezolucija 1x1 metar pokazala se pre zahtjevnom za računalo, dok 100x100 metara nedovoljno preciznom s obzirom na očekivane dužine cestovnih segmenata). Postavljanjem *fishnet*-a nad promatranim područjem DEM rastera omogućeno je iščitavanje zapisa nadmorskih visina iz rastera u točku mreže koja se nalazi iznad visinskog zapisa. Iščitavanje je obavljeno pomoću *Point Sampling Tool*<sup>4</sup> *open – source* alata unutar QGIS aplikacije.

QGIS aplikacija pruža mogućnost kreiranja prikaza na temelju ulaznih podataka. Na Slici 3.7, korištenjem DEM rastera, *OpenStreetMap* paketa te *fishnet*-a, prikazan je visinski raspon dijela šire okolice grada Zagreba koji tvore područje istraživanja u ovom radu. Nota bene, slika je

<sup>4</sup>Više o alatu <https://plugins.qgis.org/plugins/pointssamplingtool/>



ilustrativna za prikaz rezultata iščitavanja nadmorskih visina te ne uključuje čitavo područje istraživanja. Basemap (podloga) je učitana sa OSM (Open Street Map).



**Slika 3.7:** Prikaz vrijednosti nadmorskih visina na promatranom području Zagrebačke županije i Grada Zagreba

## 3.3. Pohrana podataka

### 3.3.1. NoSQL

Za pohranu podataka u ovom radu korištena je NoSQL baza podatak. NoSQL baze pohranjuju i prezentiraju podatke koji nisu striktno podijeljeni u tablice i ograničeni relacijama kao u relacijskim bazama podataka. Primjena takvih baza podataka započinje s novim valom visoko tehnološke industrije gdje se nastoji prikupiti što veći broj podataka o svakom aspektu života. Najznačajniji predstavnici, čije se poslovanje temelji na prikupljanju što većeg volumena podataka su kompanije Google, Facebook te Amazon. Mnoge aplikacije koje generiraju podatke od korisnika mijenjaju svoju strukturu podataka u relativno malom vremenu. Rapidnu promjenu strukture i vrste prikupljenih podataka relacijske baze podataka ne mogu podnijeti iz razloga što nisu dizajnirane za prihvrat velike količine nesortiranih podataka. Dinamička shema NoSQL baza podataka naspram statične sheme relacijskih baza podataka omogućava agilnost i robusnost samog sustava [12].

NoSQL ne predstavlja jednu tehnologiju ili proizvod stoga se razvilo više vrsta baza podataka. Četiri osnovne vrste u koje se dijele NoSQL baze podataka su [13]:

- **Document database** - spremanje podataka u obliku dokumenta koji prati određenu strukturu, najčešće JSON strukturu. Unutar svakog dokumenta nalaze se ključ-vrijednost parovi koji sadrže podatke.
- **Spremanje pomoću grafa** - način spremanja koji omogućava pohranu informacija najčešće o mrežama korisnika te njihovim vezama i atributima.
- **Key-value spremanje** - najjednostavnija struktura koja se koristi kod spremanja podataka. Svaki podatak definiran je dvjema vrijednostima: key koji je identifikacijski ključ podatka i value koja predstavlja vrijednost.
- **Wide-column spremanje** - baze podataka optimirane za rad s upitima na velikim količinama podataka. Umjesto redaka koriste se stupci s podacima koji se zajedno spremaju.

### 3.3.2. Razlike u odnosu na SQL baze podataka

Najznačajniju prednost relacijske baze podataka u odnosu na NoSQL predstavlja ACID (*engl. Atomicity, Consistency, Isolation, Durability*) podrška. U računalnoj znanosti termin ACID predstavlja skup svojstava koja jamče pouzdanost transakcije baze podataka [12]. Tablica 3.3 prikazuje osnovne razlike između ove dvije vrste baza podataka.

**Tablica 3.3** Usporedba relacijski i NoSQL baza podataka, [14]

	Relacijske baze	NoSQL
Tipovi	SQL baza podataka	Više vrsta: key-value, dokument database, wide-column store i graph store
Povijesni razvoj	Razvijene 1970-ih kao podrška aplikacijama	Razvijene u kasnim 2000-ima kao odgovor na ograničenja SQL baza podataka posebice vezano za skalabilnost, različite strukture podataka i agilni način razvoja softvera
Primjeri	MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server, Oracle database	MongoDB, Redis, Cassandra, HBase, Neo4j
Način spremanja podataka	Zasebni zapisi koji se spremaju kao redovi u tablice gdje stupci izričito definiraju tip podatka. Podaci u različitim tablicama kombiniraju se pomoću strukturiranih upita korištenjem upitnog jezika (SQL); tablice se spajaju pomoću primarnih i stranih ključeva	Ovisi o odabranom tipu baze podataka
Sheme	Struktura i tipovi podataka unaprijed su određeni; novi podaci moraju pratiti unaprijed zadanu strukturu	U većini slučajeva implementirana je dinamička shema; podaci mogu biti različito strukturirani
Skaliranje (povećavanje obujma)	Obično baza radi na jednom serveru; distribuiranje relacijske baze podataka kompleksan je proces	Prilagođene za distribuirane i <i>cloud</i> sustave
Licence	Kombinacija <i>open-source</i> licenci i licenci koje se plaćaju	<i>open-source</i> licence
Manipulacija podacima	Korištenjem SQL upitnog jezika	Korištenjem objektno orjentiranih programskih biblioteka
ACID podrška	Da	Većinom ne

## 4. Izračun energetskeg profila prometnice

Postupak izračuna energetskeg profila prometnice u ovom radu zasniva se na longitudinalnom dinamičkom modelu potrošnje električne energije preuzetom od Asamer et al. [8], a prezentiranom u poglavlju 2. U ovom radu korišten je primjer Nissan Leaf modela vozila za izračun potrošnje električne energije na području grada Zagreba i okolice. Glavni parametri modela i tehničke specifikacije vozila prikazani su u Tablici 4.1. Ograničen domet vožnje i potreba za

**Tablica 4.1** Parametri modela i tehničke specifikacije Nissan Leaf vozila, [5]

Opis	Vrijednost	Jedinica
Gravitacijsko ubrzanje	9.80665	$m/s^2$
Gustoća zraka	1.25	$kg/m^3$
Energija baterije	24	$kWh$
Učinkovitost rada baterije	0.95	
Tip baterije	LiIon	
Vučni koeficijent	0.29	
Prednja površina	2.19	$m^2$
Učinkovitost prijenosa	0.97	
Omjer zupčanika	8.2	
Faktor korekcije mase	0.05	
Najveća snaga motora	80	$kW$
Najveći okretni moment motora	280	$Nm$
Tip motora	Indukcijski	
Potrošnja energije dodatne opreme	300	$W$
Koeficijent kotrljanja	0.008	
Polumjer gume	0.316	$m$
Masa vozila	1521	$kg$

dodatnom infrastrukturuom za ponovno punjenje predstavljaju dva glavna problema električnih vozila. Imperativ za optimalno iskorištavanje kapaciteta električnih vozila predstavlja precizan izračun potrošnje električne energije na segmentima mreže prometnica. Poznavajući očekivanu potrošnju na pojedinim cestovnim segmentima vozači mogu unaprijed odabrati optimalni put kretanja električnim vozilom te povećati domet samog vozila. Poznavanje brzine kretanja vozila, nagiba i duljine linka te drugih parametara omogućuje izračun potrebne sile za savladavanje tog linka. Poznavanjem sile te brzine kretanja vozila može se izračunati vrijednost moguće po-

trošnje ili regeneracije električne energije na linku. Sila  $F$  potrebna za ubrzanje i savladavanje otpora (nagiba, kotrljanja, zraka) dana je formulom 4.1. Parametri formule 4.1 prikazani su u Tablici 4.2.

$$F = \underbrace{mg \sin(\alpha)}_{\text{Nagib}} + \underbrace{mg \cos(\alpha)c_{rr}}_{\text{Kotrljanje}} + \underbrace{\frac{\rho A c_w}{2} v^2}_{\text{Zrak}} + \underbrace{fma}_{\text{Acc.}} \quad (4.1)$$

**Tablica 4.2** Parametri jednadžbe za izračun sile potrebne za savladavanje otpora

Oznaka	Jedinica	Opis
$m$	$kg$	Masa vozila (praznog)
$a$	$m/s^2$	Ubrzanje vozila
$v$	$m/s$	Brzina vozila
$g$	$m/s^2$	Gravitacijska konstanta
$f$		Faktor mase rotirajućih dijelova vozila (do 5% ukupne mase vozila [9])
$\alpha$	$rad$	Nagib prometnice
$c_{rr}$		Koeficijent trenja kotrljanja
$c_w$		Koeficijent otpora zraka
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća zraka
$A$	$m^2$	Prednja površina vozila

Ako je  $F \geq 0$ , vozilo ubrzava te mu je potrebna snaga za kretanje. U suprotnom, ako je  $F < 0$ , dolazi do usporavanja (kočenja) ili vožnje nizbrdo, pri čemu se električni motor ponaša kao generator električne energije te se energija vraća u bateriju vozila.

Pseudokod algoritma prikazan je u Algoritmu 1, a pripadne oznake prikazane su u Tablici 4.3.

Opis algoritma:

- **1.** U početnom trenutku se inicijalizira vrijednost akceleracije te joj se prirodaje iznos 0. Izračun akceleracije se temelji na poznavaju dvije uzastopne brzine koje se pojavljuju na linku ( $n$  i  $n+1$  zapis), gledano u pet-minutnim intervalima. U sljedećem koraku algoritam provjerava da li postoji brzinski zapis za vremenski interval  $n+1$ . Ako postoji zapis, unutar  $if$  pelje se izvršava izračun akceleracije koji se temelji na derivaciji brzine i vremena. U brojniku funkcije se izračunava razlika brzina između zapisa vremenskog intervala  $n+1$  i  $n$ . Nazivnik predstavlja vrijednost pet-minutnog intervala izraženog u obliku broja sekundi koje predstavljaju vremenski period između dvije uzastopne brzine. U slučaju kada ne postoji brzinski zapis koji se nalazi na  $n+1$  pet-minutnom intervalu nije moguće izračunati realnu vrijednost akceleracije. Stoga se u daljnim izračunima

koristi početna vrijednost akceleracije, tj. 0.

- **2.** Na temelju izračunate akceleracije vozila na promatranom linku i ulaznih argumenata, vrši se izračun sila otpora koje djeluju na vozilo pri vožnji na linku. Nakon izračuna svih sila otpora, izračunava se konačna sila  $F$  kojom se vozilo giba.
- **3.** Konačni korak algoritma predstavlja izračun snage te naposljetku električne energije koju vozilo konzumira/generira pri kretanju na promatranom linku.

**Tablica 4.3** Oznake u algoritmu izračuna energetskeg profila linka

Oznaka	Opis
$v_1$	Brzina vozila u n-tom promatranom pet-minutnom intervalu
$v_2$	Brzina vozila u n+1 pet-minutnom intervalu
$g$	Gravitacijska konstanta
$c_{rr}$	Koeficijent trenja kotrljanja
$\rho$	Gustoća zraka
$A$	Prednja površina vozila
$c_w$	Koeficijent otpora zraka
$m$	Masa vozila
$\alpha$	Nagib prometnice
$e_{ef}$	Energetska učinkovitost motora
$f$	Faktor mase rotirajućih dijelova vozila
$E$	Energetska vrijednost linka
$a$	Akceleracija linka
$F_g$	Sila potrebna za savladavanje nagiba linka
$F_r$	Sila potrebna za savladavanje trenja kotrljanja
$F_a$	Sila potrebna za savladavanje otpora zraka
$F$	Sila potrebna za ubrzavanje i savladavanje otpora
$L$	Duljina razmatranog linka
$P$	Snaga potrebna za savladavanje linka
$t$	Vrijeme putovanja na linku

---

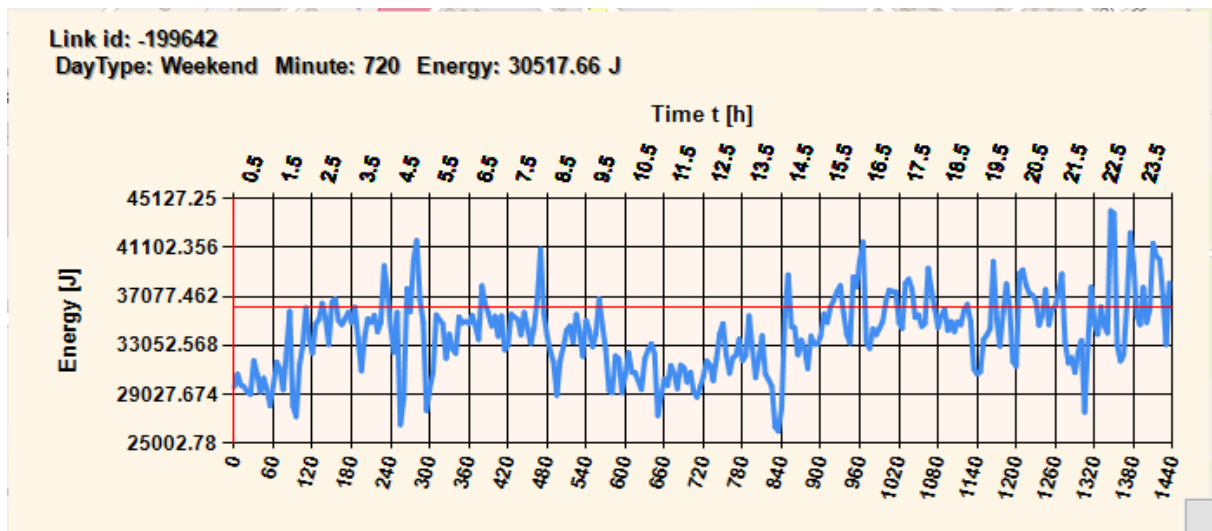
**Algoritam 1** Algoritam izračuna energetskega profila linka

---

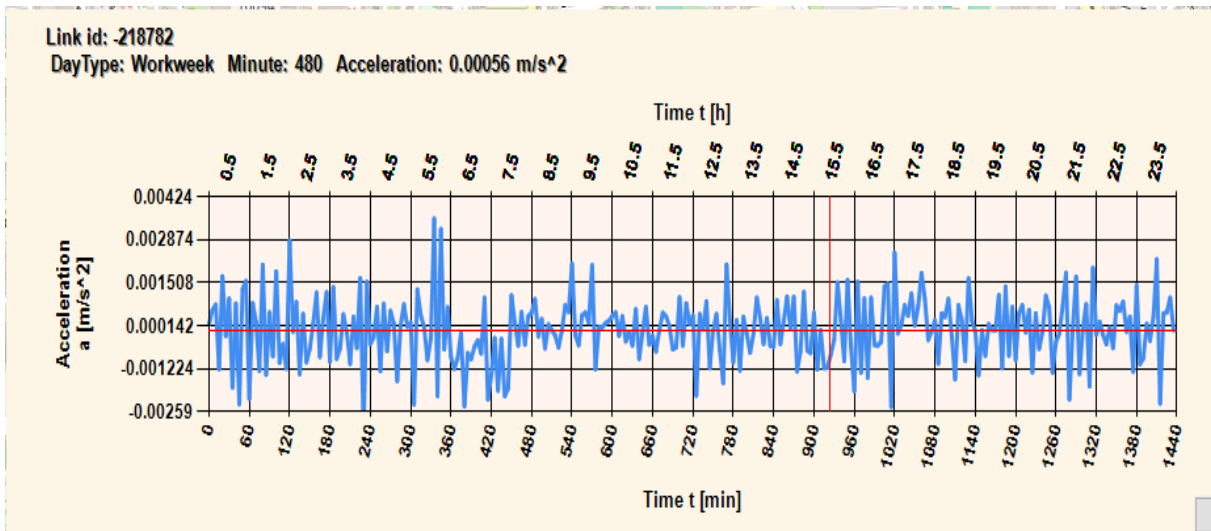
**Input:**  $v_1, v_2, g, c_{rr}, \rho, A, cw, m, \alpha, e_{ef}, f, L$ **Output:**  $E$ 

- 1:  $a \leftarrow 0$
  - 2: **if**  $v_2$  is not *empty* **then**
  - 3:    $a \leftarrow (v_2 - v_1)/300$
  - 4: **end if**
  - 5:  $F_g \leftarrow m * g * \sin(\alpha)$
  - 6:  $F_r \leftarrow m * g * \cos(\alpha) * c_{rr}$
  - 7:  $F_a \leftarrow 0.5 * (\rho * A * cw * v_1^2)$
  - 8:  $F \leftarrow F_g + F_r + F_a + f * m * a$
  - 9:  $P \leftarrow (F * v_1)/e_{ef}$
  - 10:  $E \leftarrow P * \Delta t$  #  $E \leftarrow P * \frac{L}{v_1}$
- 

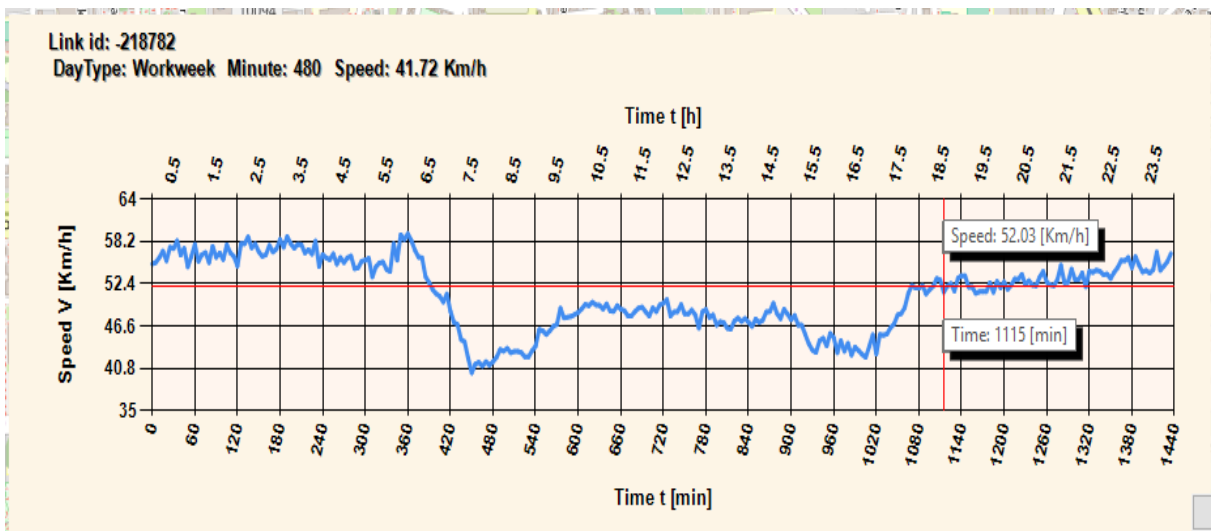
Rezultat algoritma korisniku se prikazuje u obliku iscrtanog prometnog segmenta te generiranog grafa na kojem je prikazan cjelodnevni energetskega profil razmatranog prometnog segmenta. Uz energetskega profil (Slika 4.1), korisniku se pruža mogućnost zasebne ilustracije komponenti korištenih pri samom izračunu energetskega profila, tj. akceleracijskog (Slika 4.2) i brzinskog profila (Slika 4.3).



**Slika 4.1:** Graf profila energije na segmentu autoceste A1 u smjeru juga



Slika 4.2: Graf profila akceleracije



Slika 4.3: Graf profila brzine



# 5. Grafičko sučelje za prikaz i analizu podataka

U poglavlju je opisan programski jezik te biblioteke koje su korištene prilikom izrade programskog rješenja.

## 5.1. Programski jezik

Izrada programskog rješenja analize prometnog sustava u ovom radu napravljena pomoću programskog jezika *C#*. *C#* je objektno orijentiran jezik koji programerima omogućuje izgradnju raznih sigurnih i robusnih aplikacija koje se izvode unutar .NET<sup>1</sup> okvira. .NET Framework je integralna komponenta Windowsa koja uključuje sustav virtualnog izvršavanja koji se naziva CLR<sup>2</sup> (*engl. Common Language Runtime*) te objedinjeni skup biblioteka. CLR je Microsoftova komercijalna implementacija zajedničke jezične infrastrukture CLI<sup>3</sup> (*engl. Common Language Infrastructure*) koja predstavlja međunarodni standard koji je osnova za stvaranje okruženja za izvršavanje i razvoj u kojima jezici i biblioteke neometano rade zajedno. Kao objektno orijentirani jezik, *C#* podržava koncepte enkapsulacije, nasljeđivanja i polimorfizma. Sve definicije i metode, uključujući glavnu metodu i ulaznu točku aplikacije ugrađene su unutar definicije klase. Klasa se može naslijediti izravno od jedne roditeljske klase [15].

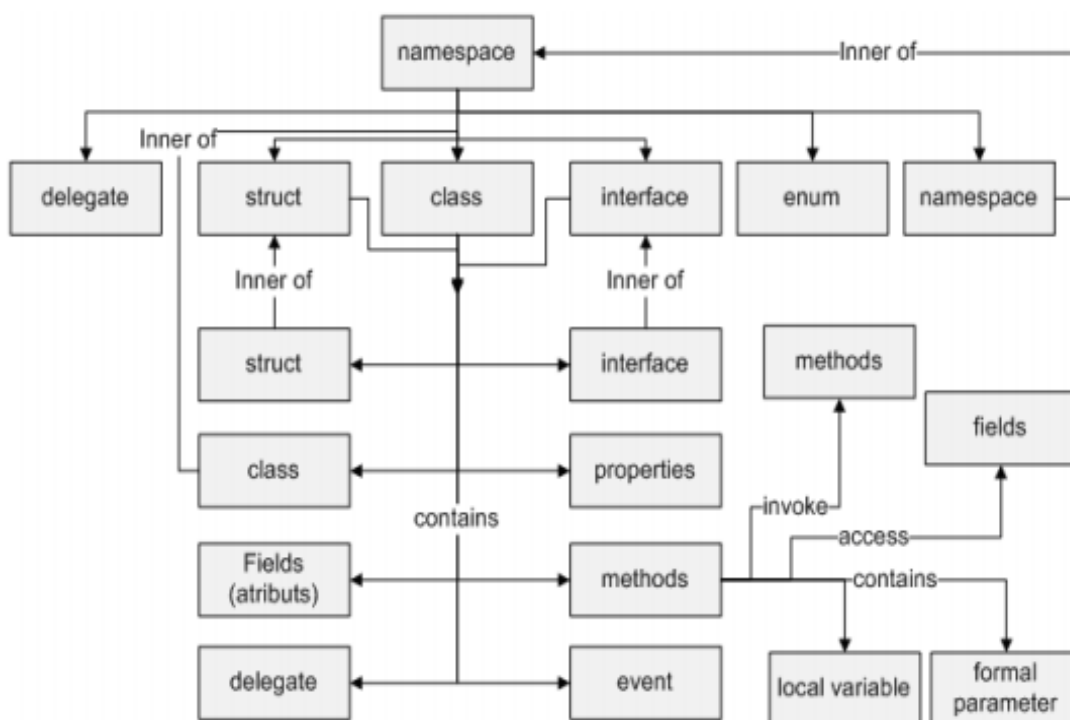
Programski jezik *C#* sadrži entitete izvornog koda koji su organizirani u obliku okomite hijerarhije. Jedan entitet može biti unutarnji entitet drugog entiteta ili obrnuto. Izvor svih entiteta je prostor imena (*engl. Namespace*) koji može sadržavati druge entitete, uključujući unutarnji prostor imena, ali ne pripada drugim vrstama kao što su klasa, sučelja itd. Fleksibilnost posjedovanja unutarnjih entiteta dodatno otežava model *C#*-a. Na slici 5.1 predstavljen je model koji sadrži sve entitete koji mogu biti sadržani unutar jednog *C#* izvornog koda. Prostor imena nalazi se na vrhu modela *C#* entiteta. Svaka vrsta u ovoj hijerarhiji pripada prostoru imena, a unutarnji prostori imena modeliraju se kao pojedinačni prostori s imenima [16].

---

<sup>1</sup>Više o .Net Framework softveru <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-net-framework/>

<sup>2</sup>Više o CLR <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/clr>

<sup>3</sup>Više o CLI <https://searchmicroservices.techtarget.com/definition/Common-Language-Infrastructure-CLI>



Slika 5.1: C# model, [16]

## 5.2. NuGet paket

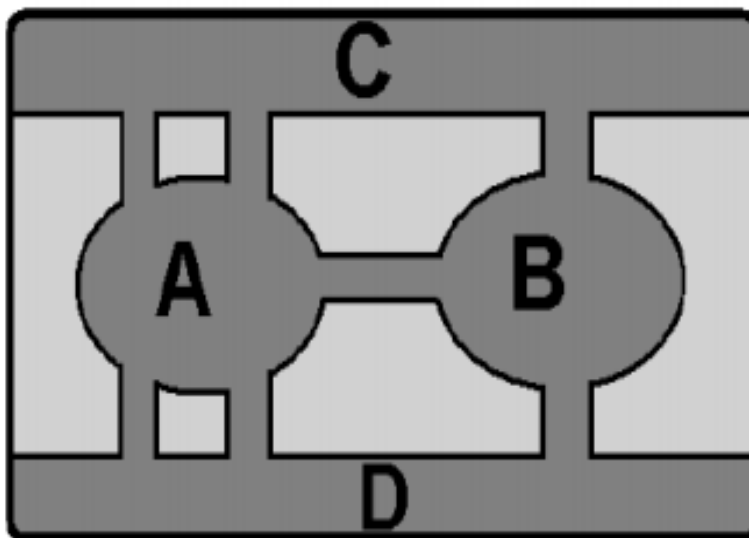
Za modeliranje digitalne karte unutar programskog jezika C# korišten je programski paket GMap.NET. NuGet Package predstavlja funkciju VSa gdje programeri mogu podijeliti svoj kod s drugim korisnicima. To je jednostavno sažet kod koji je moguće implementirati u vlastiti projekt kako bi se proširile funkcionalnosti programa. GMap.NET je besplatan softverski paket u C#-u koji omogućuje korisniku pristup uslugama temeljenim na digitalnim kartama. Paket sadrži veliki izbor platformi za prikaz digitalne karte, najznačajnije platforme su *Google*, *Yahoo!*, *Bing*, *OpenStreetMap* i *ESRI ArcGIS*.

## 6. Dijkstra algoritam

Jedan algoritam za pronalaženje najkraćeg puta od početnog čvora do ciljnog čvora u ponderiranom grafu je Dijkstrin algoritam. Algoritam kreira stablo najkraćih staza od početnog čvora do svih ostalih čvorova na grafu. Dijkstrin algoritam, objavljen 1959. i nazvan po svom tvorcu nizozemskom računalnom znanstveniku Edsgeru Dijkstra, može se primijeniti na ponderiranom grafikonu. Graf može biti usmjeren ili neusmjeren. Jedan od uvjeta za korištenje algoritma je da grafikon mora imati nenegativnu težinu na svakom bridu [17].

### 6.1. Teorija grafova

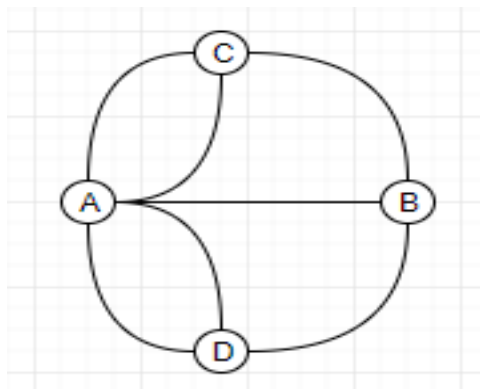
Temelje teoriji grafova udario je švicarski matematičar Leonhard Euler (1707.–1783.) koji je 1736. godine riješio problem *Königsberških mostova*. Stari pruski grad Königsberg, današnji Kalinjingrad u Rusiji, smješten je na obalama rijeke Pregel. Dio grada nalazi se na dvije ade (rječna otoka), koje su povezane s kopnom i međusobno sa sedam mostova (Slika 6.1) [18].



Slika 6.1: Raspored mostova Königsberga, [19]

### 6.1.1. Problem sedam mostova Königsberga

Stanovnici Königsberga (danas Kaliningrad) pokušavali su bezuspješno pronaći način za prijeći svih sedam mostova tako da svaki most prijeđu točno jednom i da se vrate na polaznu točku. Taj problem privukao je pozornost švicarskog matematičara Leonhard Eulera, koji je 1735. godine predstavio rješenje problema. Euler je vrlo brzo objasnio zašto nije moguće pronaći put. Euler je iznio pretpostavku da je jedino važno svojstvo svake rute slijed prelazaka preko mostova. Ta mu je pretpostavka omogućila da ukloni sva svojstva, osim kopnenih površina i mostova koji ih povezuju te je na taj način stvorio apstraktni prikaz problema. U tom slučaju svaka kopnena površina (obale rijeke i otoci) prikazana je čvorom ili vrhom, a svaki most kao brid. Bridovi povezuju čvorove i tvore matematičku strukturu koja se naziva graf (Slika 6.2) [18].



Slika 6.2: Prikaz mostova Königsberga pomoću grafa

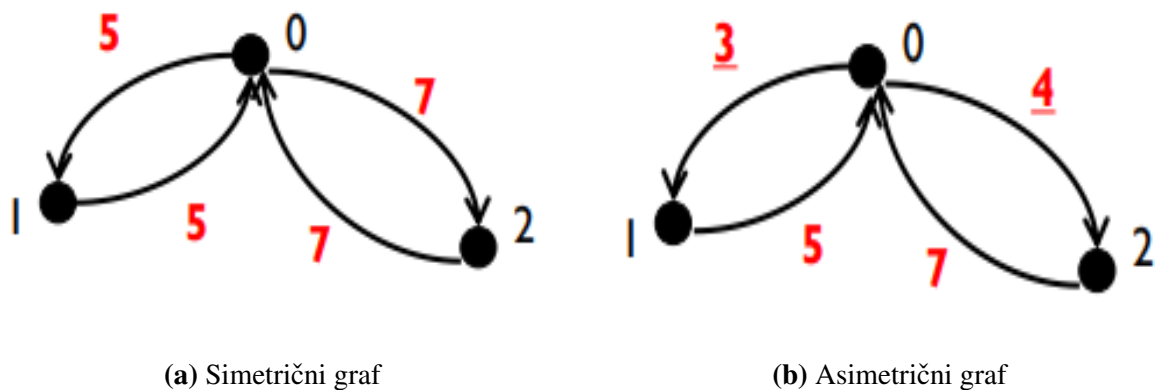
Osim krajnjih točaka šetnje, dolazak na čvor i odlazak mora biti preko mosta (brida). Dakle, tijekom šetnje po grafu, broj puta kada se dođe do čvora (a da čvor nije kraj puta) jednak je broju puta kada se izađe s tog čvora. To znači da broj mostova koji dodiruju kopno mora biti paran ukoliko most želimo prijeći samo jednom. Budući da su svi čvorovi spojeni s neparnim brojem bridova, nije moguće proći sve mostove samo jednom [18], [20].

Euler je pokazao da put po grafu u kojoj se svaki brid koristi samo jednom ovisi o stupnju čvorova. Stupanj čvora predstavlja broj bridova koji ga dotiču. Put je moguć samo ako je graf spojen i ako nula ili dva čvora imaju neparan stupanj. Ovakav put po grafu zove se Eulerov put, a ostvariv je samo ako započinje na čvoru s neparnim stupnjem i završava na čvoru s neparnim stupnjem [18]. Euler je uspostavio teoriju grafa i ovaj rad se nadovezuje na nju.

## 6.1.2. Teorija i vrste grafova

Graf je uređena trojka  $G=(V,E,\phi)$ , gdje je  $V=V(G)$  neprazan skup čiji su elemente poznati kao vrhovi,  $E=E(G)$  je skup disjunktan s  $V$  čiji su elementi poznati kao bridovi i  $\phi$  je funkcija koja svakom bridu  $e$  iz  $E$  pridružuje par  $u, v$  ne nužno različitih vrhova iz  $V$ . Graf skraćeno se označava  $G=(V,E)$  ili samo  $G$  [21]. Vrhove  $u$  i  $v$  koji su pridruženi bridu  $e$  nazivaju se krajevima brida  $e$ . Brid čiji se krajevi podudaraju predstavljaju petlju. Višestruki bridovi su dva ili više njih s istim parom krajeva. Par vrhova  $u$  i  $v$  su susjedni ako postoji brid  $e$  kojemu su oni krajevi. Pri tome je brid  $e$  incidentan s vrhovima  $u$  i  $v$ , za što se upotrijebljava oznaka  $e=uv$  ili  $e=uv$ . Stupanj vrha  $v$  u grafu  $G$  je broj bridova grafa  $G$  incidentnih s  $v$ , pri čemu se svaka petlja računa kao dva brida. Izolirani vrh je vrh stupnja 0 [21]. Graf sa samo jednim vrhom zove se trivijalan, dok su grafovi s više od jednog vrha netrivialni. Usmjereni graf ili digraf je graf u kojem svaki brid ima smjer od početka prema kraju. Potpun graf je graf gdje je svaki par vrhova u grafu povezan bridom. Osnovna podjela grafova se vrši na [19]:

- **potpuni neusmjereni graf** - skup  $E$  je skup bridova
- **potpuni usmjereni graf** - ako brid promatramo kao dvije veze (grane) od vrha A do vrha B, možemo pridjeliti svakoj vezi njenu orijentaciju (orijentaciji  $A \rightarrow B$  i  $B \rightarrow A$ )
- **težinski simetrični graf** - graf s istim težinama veza (Slika 6.3a)
- **težinski asimetrični graf** - graf s različitim težinama veza (Slika 6.3b)



(a) Simetrični graf

(b) Asimetrični graf

Slika 6.3: Prikaz simetričnog i asimetričnog grafa, [19]

## 6.2. Pronalazak najkraćeg puta

S rastom popularnost električnih vozila kao alternativa vozilima na fosilna goriva stvaraju se novi problemi rutiranja vozila koji prije nisu bili relevantni. Uz velike spremnike goriva i gustu mrežu benzinskih postaja, dostupnost energije rijetko je problem za vozila na unutarnje izgaranje. Trenutno dostupna električna vozila ograničena su malim kapacitetom akumulatora što rezultira znatno manjom autonomijom. Dakle, planiranje ruta električnih vozila uvjetovano je ograničenom rezervom energije unutar samog vozila i nedostatkom razvijene mreže punionica [22].

Za pronalazak najkraćeg puta od jednog vrha prema svim ostalima najpoznatiji je Dijkstrin algoritam [23]. Dijkstrin algoritam pronalazi najkraće stablo puta iz jednog izvornog čvora, gradeći skup čvorova koji imaju minimalnu udaljenost od izvora. Složenost algoritma je  $O(E + V \log(V))$ . Dijkstrin algoritam koristi se za pronalaženje najkraćih udaljenosti ili minimalnih troškova puta ovisno o tome što su postavljene težine bridova grafa.

Za ispravno izvršavanje standardnog Dijkstra algoritma pri planiranju puta električnih vozila troškovi, tj. težine bridova ne smiju biti negativne vrijednosti. Za razliku od klasičnih vozila, električna vozila na pojedinom cestovnom segmentu mogu regenerirati energiju. Prilikom primjene algoritma, takvi bridovi imati će negativan predznak za energetske vrijednosti. U slučaju postojanja negativne vrijednosti cestovnog brida u skupu linkova, zabranjena je uporaba standardne Dijkstre te se u tom slučaju primjenjuje  $O(nm)$  Bellman-Fordov algoritam [22].

U svrhu postizanja ispravnog izvršavanja Dijkstrinog algoritma prilikom istraživanja, sve negativne vrijednosti bridova moraju se pretvoriti u pozitivne. Jedan od načina rješavanja problema pretvaranja negativnih vrijednosti u pozitivne je pronalazak konstantne vrijednosti s kojom će se sve vrijednosti zbrojiti. Konstantna vrijednost predstavlja najmanju negativnu vrijednost brida  $e$  koja se pojavljuje u skupu bridova  $E$  grafa  $G$ .

Postupak pronalaska najmanje negativne vrijednosti prikazan je Algoritmom 2, a pripadne oznake prikazane su u Tablici 6.1.

**Tablica 6.1** Oznake u algoritmu pronalaska najmanje energetske vrijednosti

Oznaka	Opis
$e_i$	Energetska vrijednost brida
$Elist$	Skup energetske vrijednosti grafa
$minE$	Najmanja energetska vrijednost grafa

**Algoritam 2** Pronalazak najmanje vrijednosti**Input:**  $Elist$ **Output:**  $minE$ 

```

1:  $minE \leftarrow 0$  # Inicijalizacija najmanje vrijednosti
2: for value  $e_i$  in  $Elist$  do
3:   if  $e_i < minE$  then # Manja vrijednost je pronađena
4:      $minE \leftarrow e_i$  # Nova najmanja vrijednost
5:   end if
6: end for

```

Nakon utvrđivanja najmanje energetske vrijednosti koja se pojavljuje u skupu vrijednosti  $Elist$ , moguća je izvedba modificiranog Dijkstrinog algoritma. Prilikom izvedbe algoritma, pri pronalasku najmanje težine s kojom je pojedini čvor  $v$  povezan potrebno je promatranj težini dodati pronađenu najmanju energetska vrijednost. Prilikom zbrajanja trenutne težine i najmanje energetske vrijednosti, prethodno pretvorene u pozitivnu, rezultat zbrajanja se mora dodatno povećati za iznos koji je veći od nula (u algoritmu koristio se iznos 100) iz razloga što samo početni čvor smije posjedovati energetska vrijednost jednaku nuli. Postupak izvedbe modificiranog algoritma je prikazan Algoritmom 3, a pripadne oznake prikazane su u Tablici 6.2.

**Tablica 6.2** Oznake u Dijkstra algoritmu

Oznaka	Opis
$G$	Graf sustava
$minE$	Najmanja energetska vrijednost grafa
$v_i$	Čvor grafa $G$
$Q$	Lista neposjećenih čvorova grafa $G$
$u$	Čvor grafa $G$ s najmanom težinom
$e$	Energetska vrijednost staze
$alt$	Ukupna težina staze

---

**Algoritam 3** Modificiran Dijkstrin algoritam

---

**Input:**  $minE, v_i, G$ **Output:**  $Q$ 

```
1:  $dist[v_i] \leftarrow 0$  # Udaljenost od  $v_i$  do  $v_i$ 
2: for node  $v$  in  $G$  do # Inicijalizacije
3:   if  $v \neq v_i$  then
4:      $dist[v] \leftarrow infinity$  # Nepoznata udaljenost od  $v_i$  do  $v$ 
5:      $previous[v] \leftarrow undefined$  # Prijašnji čvor u stazi od  $v_i$ 
6:   end if
7:   add  $v$  to  $Q$  # Svi čvorovi inicijalno u  $Q$ 
8: end for
9: while  $Q$  is not empty do # Glavna petlja
10:   $u \leftarrow$  node in  $Q$  with min  $dist[u]$  #  $v_i$  u prvom koraku
11:  remove  $u$  from  $Q$ 
12:  for neighbour  $v$  of  $u$  do # Pri čemu  $v$  još nije izbrisan iz  $Q$ 
13:     $e \leftarrow length(u, v) + (minE * (-1) + 100)$  # Pretvorba negativnih vrijednosti u
    pozitivne
14:     $alt \leftarrow dist[u] + e$ 
15:    if  $alt < dist[v]$  then # Kraća staza prema čvoru  $v$  je pronađena
16:       $dist[v] \leftarrow alt$ 
17:       $previous[v] \leftarrow u$ 
18:    end if
19:  end for
20: end while
```

---



Nakon uspješne izvedbe, algoritam kao izlaz vraća skup vrhova  $Q$ . Unutar vrhova se nalazi zapis prethodnog vrha te ukupne potrebne energetske vrijednosti za prijelaz iz početnog vrha u promatrani vrh.

Dohvaćanje konačne putanje iz početnog čvora u krajnji čvor prikazana je Algoritmom 4, a pripadne oznake prikazane su u Tablici 6.3. Zapisane vrijednosti ne predstavljaju realni iznos utrošene/generirane energije. Pri izračunu energije, realne vrijednosti su uvećane za iznos jednak najmanjoj vrijednosti brida  $e$  iz skupa bridova  $E$  grafa  $G$ . Stoga je pri dohvaćanju putanje nužan korak normalizacije energetske vrijednosti pri čemu se razmatrana vrijednost umanjuje za iznos jednak prethodno dodanoj vrijednosti.

**Tablica 6.3** Oznake u algoritmu dohvaćanja putanje

Oznaka	Opis
$minE$	Najmanja energetska vrijednost grafa
$Epath$	Skup čvorova staze
$dist$	Iznos težine
$dest$	Krajnji čvor u skupu čvorova
$curr$	Promatrani čvor
$prev$	Prethodni čvor promatranog čvora
$Epath.Length$	Broj elemenata u skupu $Epath$

---

#### Algoritam 4 Dohvaćanje putanje

---

**Input:**  $minE, dest$

**Output:**  $Epath, dist[dest]$

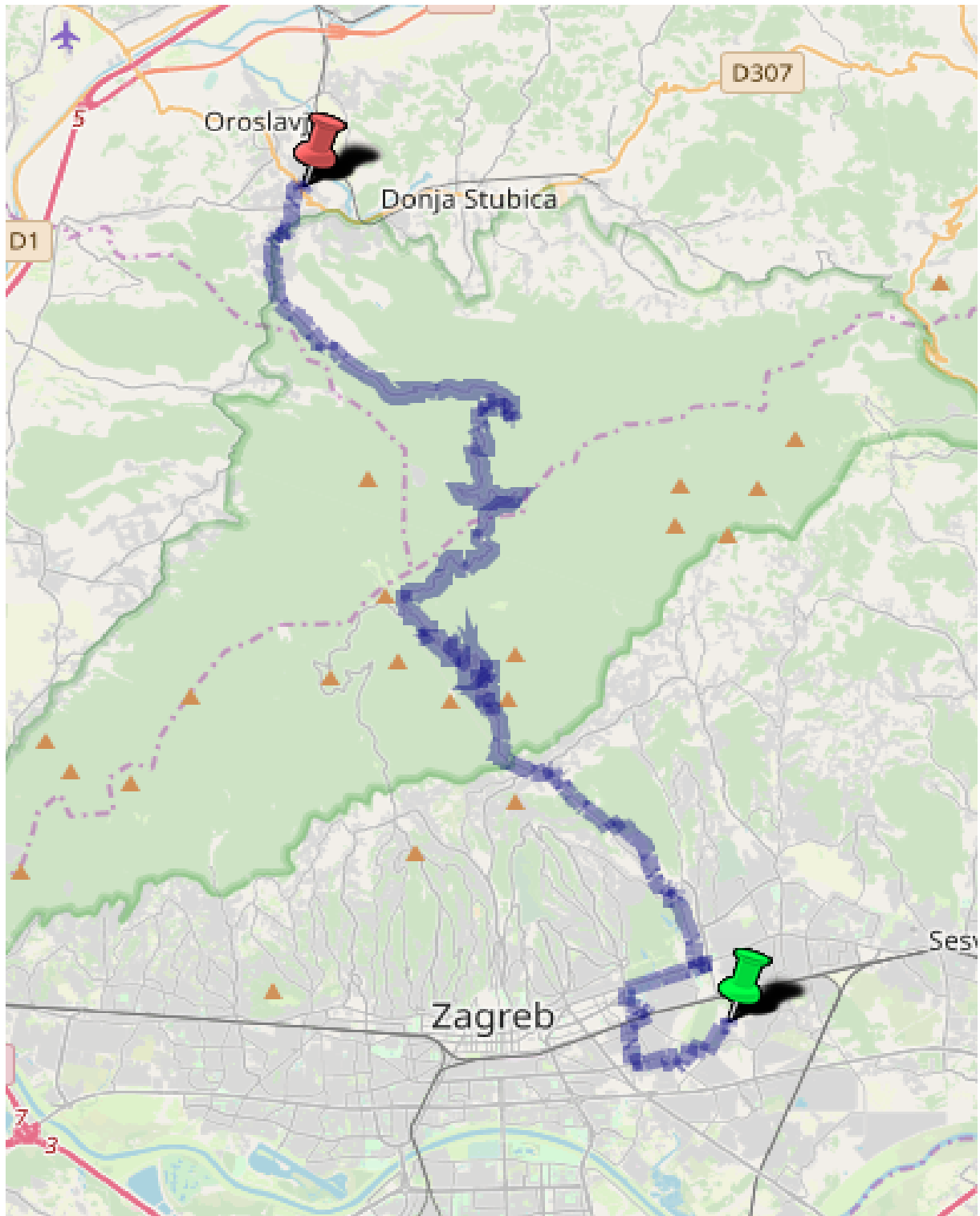
```

1:  $curr \leftarrow dest$  # Inicijalizacija krajnjeg vrha
2: while  $curr \neq null$  do
3:   add curr to Epath
4:    $curr \leftarrow curr[prev]$ 
5: end while
6:  $dist[dest] \leftarrow dist[dest] - ((Epath.Length - 1) * (minE * (-1) + 100))$  # Normalizacija
   iznosa energetske potrošnje

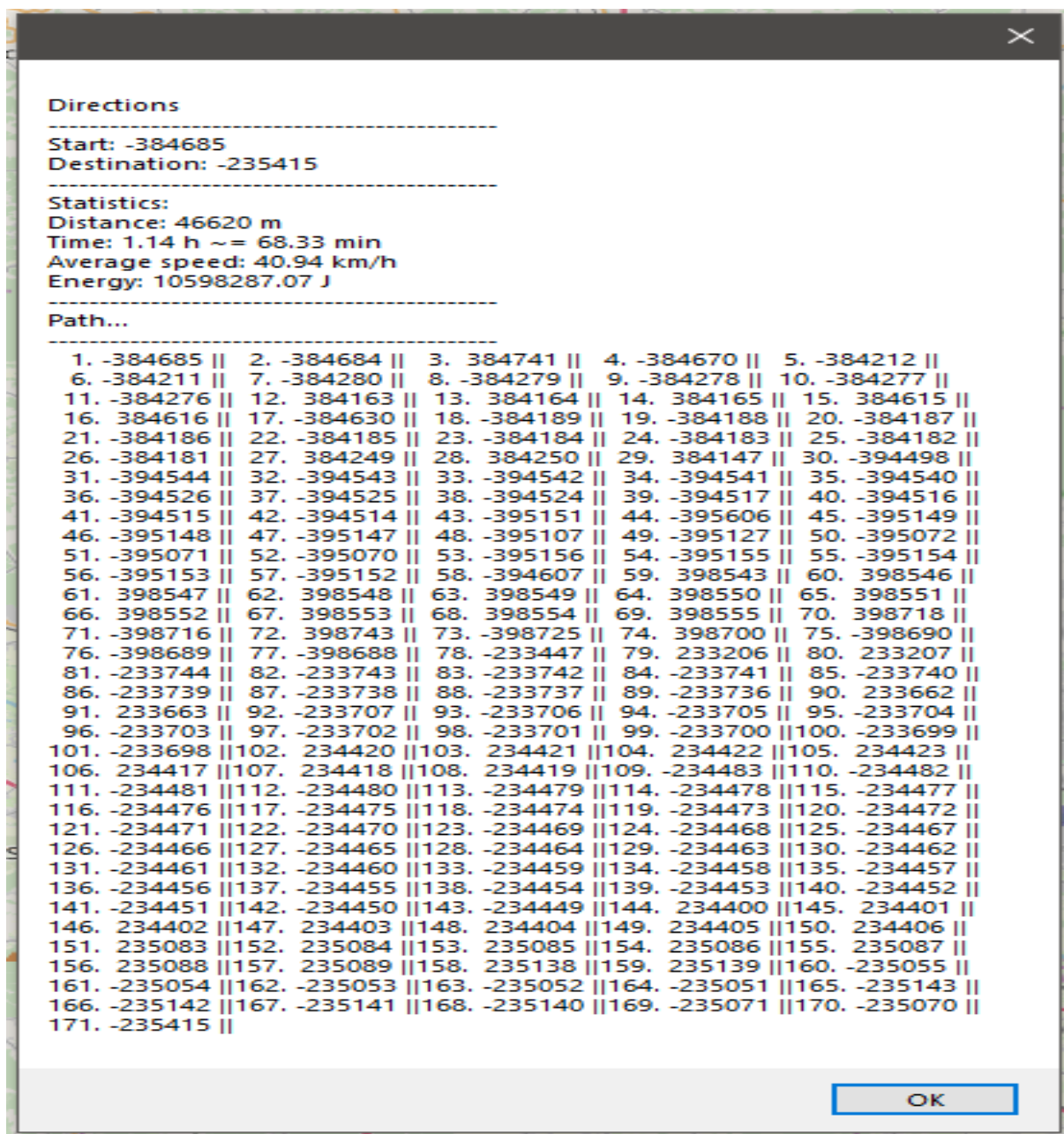
```

---

Slika 6.4 i Slika 6.5 prikazuju vizualni i statistički primjer rezultata izračuna modificiranog Dijkstra algoritma te algoritma dohvaćanja konačne putanje između dva čvora grafa.



Slika 6.4: Vizualni prikaz rezultata rutirajućeg algoritma



Slika 6.5: Statistički prikaz rezultata rutirajućeg algoritma

## 7. K-Means algoritam

Analiza klastera koristi se u području rudarenju podataka. Ona predstavlja uobičajenu tehniku analize statističkih podataka u širokom spektru znanstvenih područja, kao što su medicinske znanosti, društvene znanosti, inženjerstvo i računalna znanost. Analiza klastera služi kao alat za stjecanje uvida u distribuciju podataka te karakteristike promatranih skupova podataka, tj. klastera.

Strojno učenje se može definirati kao skup algoritama koji omogućuju automatsko detektiranje korisnih pravilnosti i obrazaca u podacima. Prvu definiciju strojnog učenja dao je Arthur Samuel 1959. godine koja glasi da je strojno učenje područje istraživanja koje računalima omogućava da uče i donose odluke bez izričitog programiranja [24].

K-Means je jedan od najjednostavnijih i najpopularnijih heurističkih algoritama strojnog učenja bez nadzora. Koristi se u slučajevima kada se obrađuje neoznačeni skup podataka kojega je potrebno podijeliti u fiksni broj grupa u kojima podaci posjeduju slične karakteristike. Glavni cilj je definirati  $k$  centroida za svaku grupu. Proces obrade podataka pomoću K-Means algoritma započinje s nasumičnim odabirom centroida, koji se koriste kao početne točke za svaki klaster. Nakon pozicioniranja centroida računa se euklidska udaljenost između određenih centroida i svakog podatka. Entiteti se na taj način dodaju najbližem centroidu te se formiraju inicijalne grupe. Centroidi se pomiču s obzirom na udaljenost od podataka. Ovaj postupak se iterativno ponavlja sve dok nema promjena u poziciji centroida. Algoritam 5 i slika 7.1 predstavljaju pojednostavljeni prikaz toka algoritma.

---

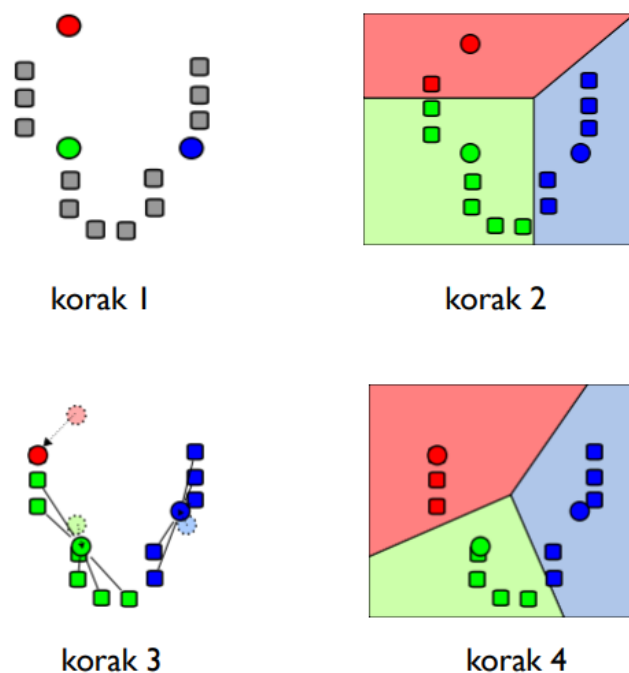
### Algoritam 5 Algoritam K-Means

---

```
1: odaberi početne lokacije centara  
2: dodijeli entitete svakom centru  
3: izracunaj novu poziciju centara  
4: while ima promjene do  
5:     dodijeli entitet najblizem centru  
6:     izracunaj novu poziciju centara  
7: end while
```

*# Inicijalizacija centroida*  
*# Izračun udaljenosti*  
*# Izračun središta skupa entiteta*

---

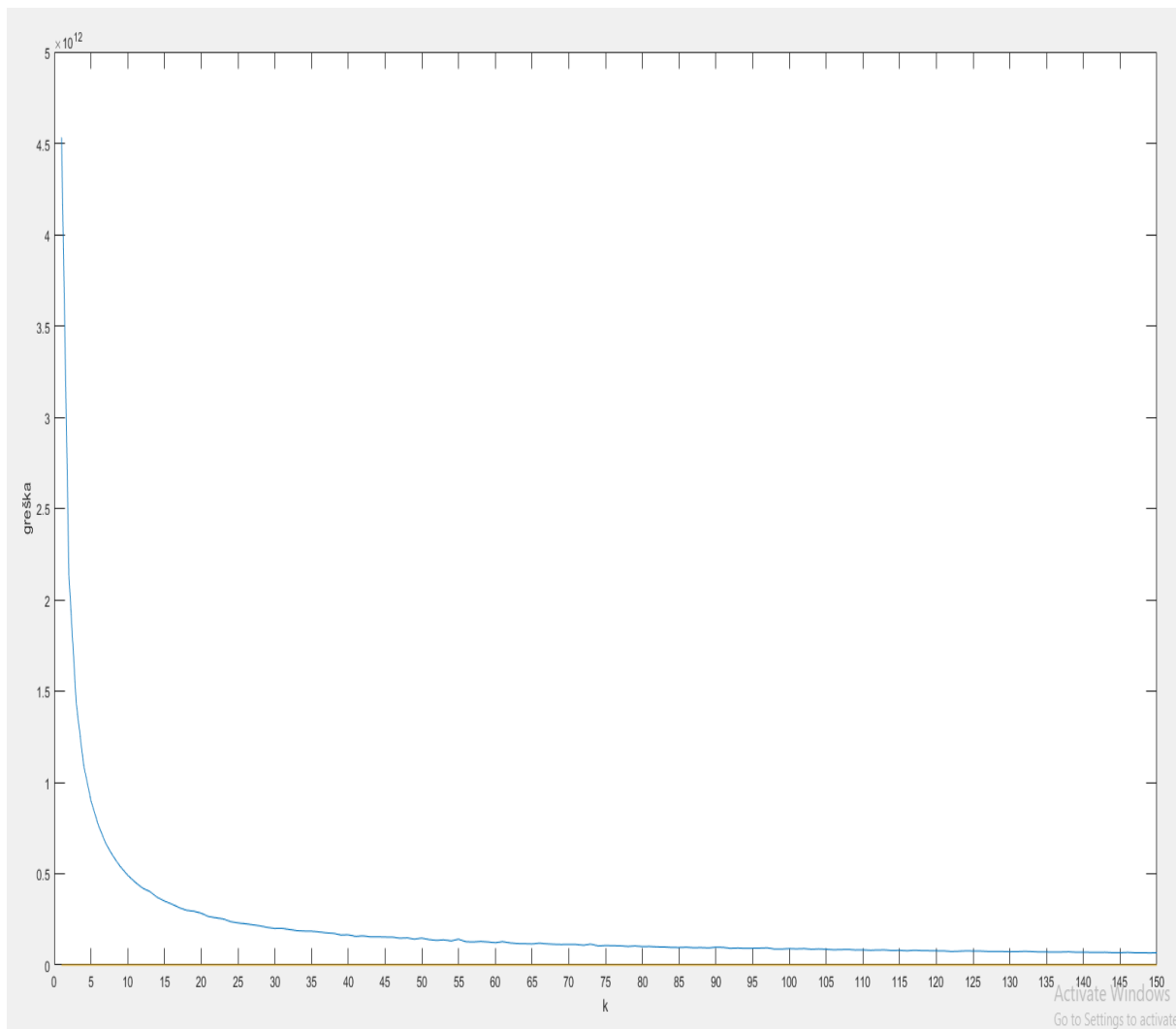


Slika 7.1: K-Means algoritam, [25]

Prednosti ovog algoritma su njegova jednostavnost i brzina koja mu dopušta izvođenje na velikim skupovima podataka. Najveći problem izvođenja K-Means algoritma predstavlja odabir broja centroida  $k$ . U slučaju izvođenjem algoritma nad istim skupom podataka, gdje pri svakom pokretanju algoritma mijenjamo broj centroida,  $k$ , rezultati grupiranja će se znatno razlikovati. Stoga je potrebno odrediti optimalan broj centara prije pokretanja algoritma.

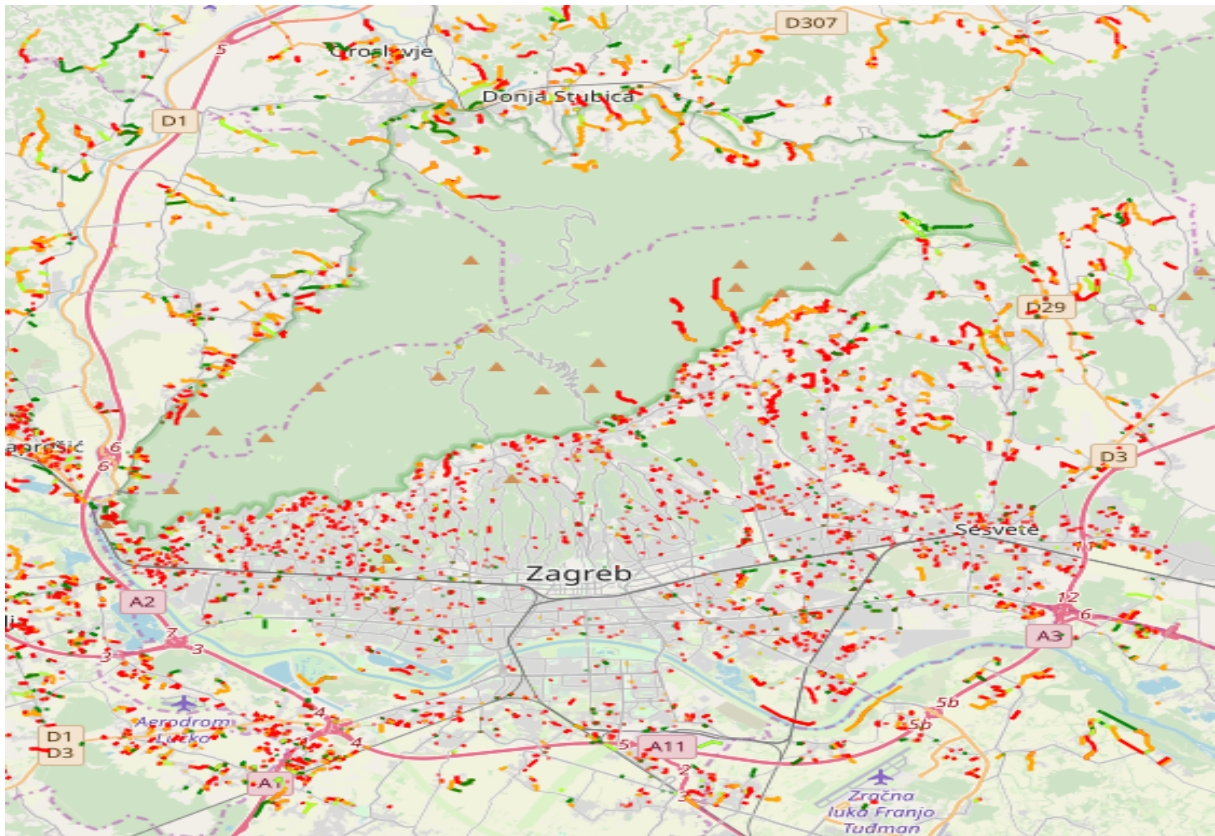
Za pronalazak optimalnog broja  $k$  postoji više metoda. Neke od metoda koje se mogu koristiti za odabir optimalnog broja centroida su: Metoda koljena (*engl. Elbow method*) i Analiza siluete (*engl. Silhouette analysis*). U ovom radu korištena je metoda koljena.

Metoda koljena prikazuje optimalan broj centroida  $k$  tako što pokreće K-means algoritam više puta za vrijednosti  $k = 1, 2, \dots, n$  i prikazuje kvadratno odstupanje (grešku) za svaki broj  $k$ . U "koljenu" dijagrama treba se nalaziti optimalan broj centroida za K-means algoritam. Ako se promatra centroid  $k = m$ , koljeno dijagrama se pojavljuje kada je greška za  $k = m - 1$  puno veća nego za  $k = m$  [12]. Slika 7.2 prikazuje optimalan broj  $k$  pri problemu grupiranja cestovnih segmenata unutar ovog rada, pri čemu je  $k = 30$ .

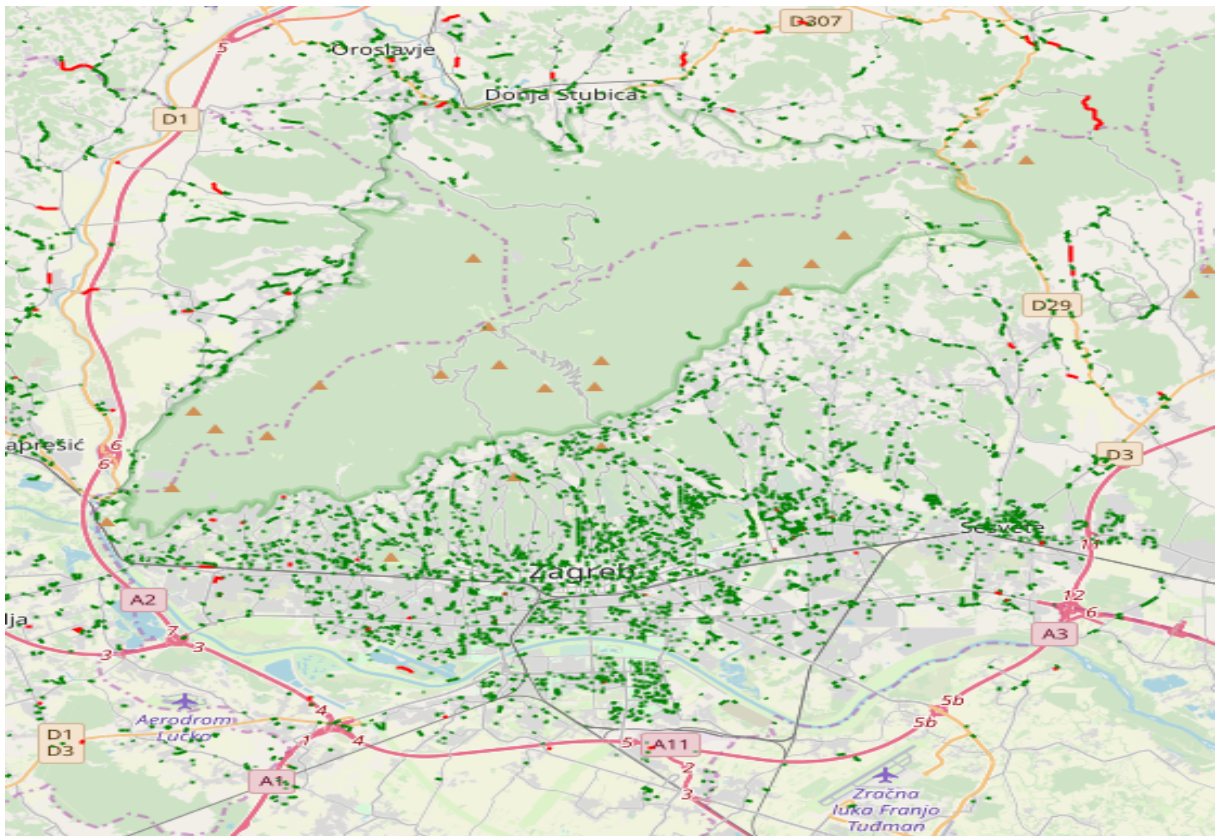


**Slika 7.2:** Metoda koljena

Za algoritma grupiranja, *K-Means*, koji je korišten u ovom radu, ulazni parametri su predstavljali cijelodnevni raspon izračunatih prosječnih brzina ili energetske vrijednosti koje su se pojavljivale na linku, ovisno o cilju grupiranja. Ulazni parametar po linku predstavljao je vektor koji je bio tipa  $1 \times 288$ . Algoritam je na temelju cijelodnevnog ponašanja prometnice, u obliku zapisanom kao vektor, uspoređivao te grupirao linkove. Primjer rezultata grupiranja prometnih segmenata na temelju profila brzine tijekom radnog dana prikazan je na Slici 7.3, a energetskog profila na Slici 7.4.



Slika 7.3: Rezultat grupiranja na temelju profila brzine



Slika 7.4: Rezultat grupiranja na temelju energetskega profila

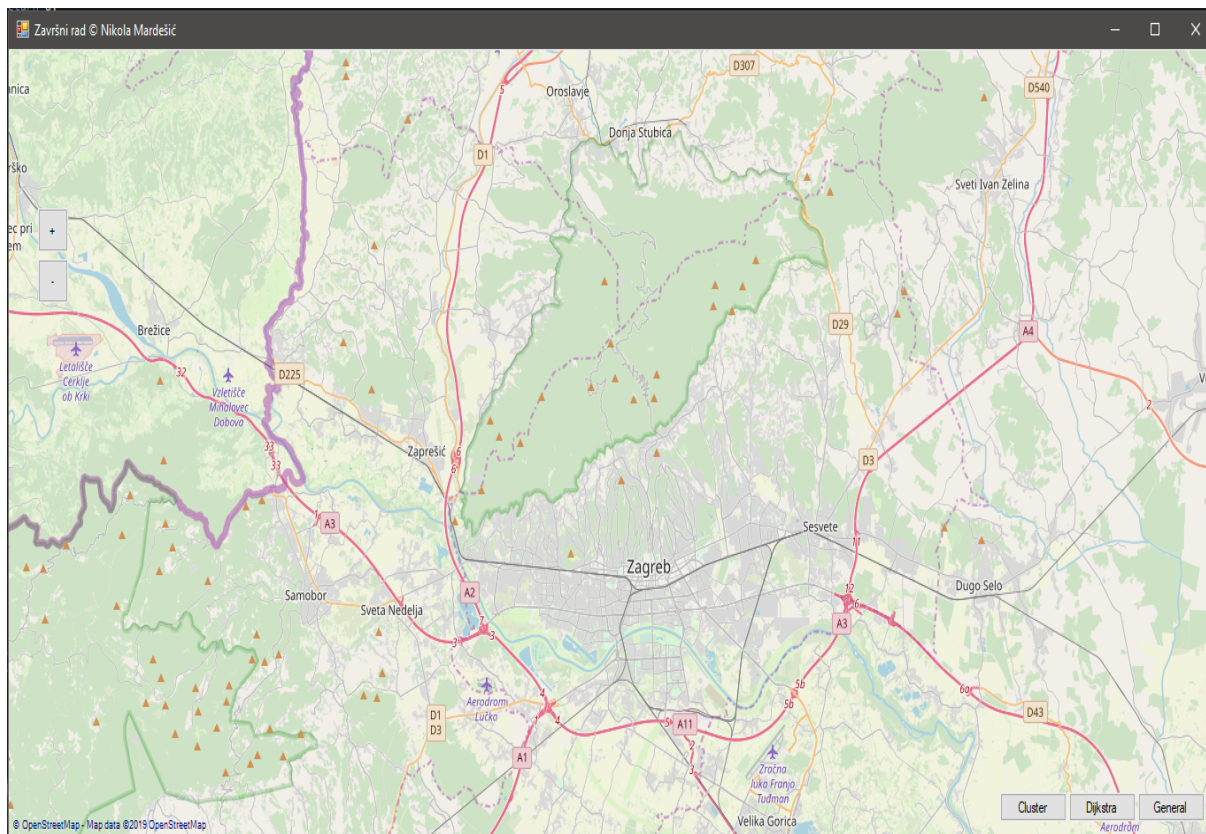
## 8. Rezultati

Rezultati istraživanja prikazani su pomoću aplikacije razvijene unutar programskog jezika *C#*. Aplikacija sadrži interaktivnu kartu na kojoj su prikazane analizirane prometnice. Uz interaktivnu kartu, pomoću višenamjenskih ploča, aplikacija korisniku omogućava detaljnu analizu svakog linka zasebno. Pri analizi linka, korisniku je pružena mogućnost izbora izlaznog formata podataka te vremenskog perioda analize. Uz detaljnu analizu svakog linka, unutar aplikacije razvijen je sustav rutiranja vozila koji korisniku omogućava vizualni te tekstualni prikaz optimalne rute vozila od početne do krajnje točke. U poglavlju su prikazani i rezultati grupiranja prometnih segmenata na temelju sličnih karakteristika.

### 8.1. Energetski, brzinski i akceleracijski profil

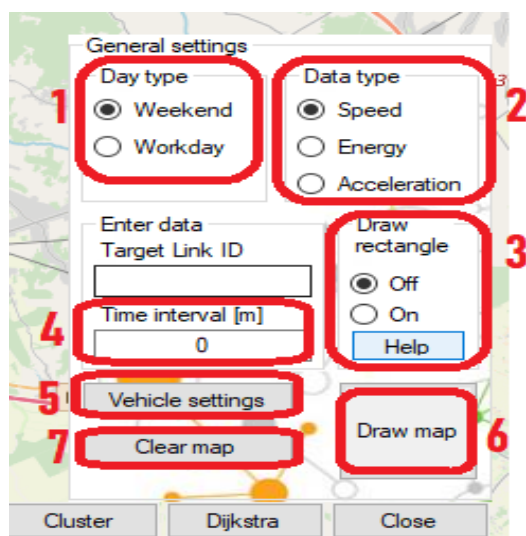
Velika količina podataka zahtjeva vizualni prikaz kako bi se iz tih podataka složila koherentna priča koju bi ljudski um mogao u cijelosti pojmiti. Izrada aplikacije sa svrhom vizualnog interpretiranja krutih podataka korisniku omogućuje lakše manipuliranje te interpretiranje podataka. Ovaj rad nudi rješenje u obliku *C#* aplikacije koja iscrtava prometnice na bazi geografskih koordinata zabilježenih za svaki link na području Zagrebačke županije i vrijednosti prostorno-vremenskih izlaznih parametara. Slika 8.1 prikazuje izgled grafičkog korisničkog sučelja.





**Slika 8.1:** Grafičko korisničko sučelje

Aplikacija korisniku nudi mogućnost iscrtavanja prometne mreže na temelju korisnikovih potreba. Slika 8.2 prikazuje kontrolnu ploču, a Tablica 8.1 opisuje prikazane brojeve unutar ploče.

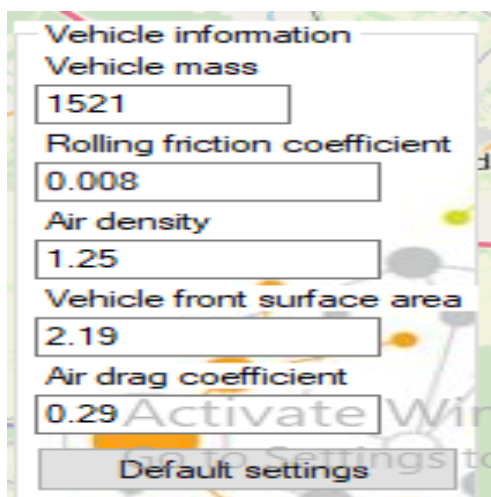


**Slika 8.2:** Glavna kontrolna ploča za iscrtavanje linkova

**Tablica 8.1** Naredbe unutar glavne kontrolne ploče

Redni broj	Opis
1	Izbornik tipa dana koji će biti analiziran
2	Izbornik tipa izlaznih vrijednosti
3	Prekidač koji korisniku omogućava kreiranje kvadranta u kojem će se vršiti daljnja analiza
4	Prostor za unos promatranog vremenskog intervala
5	Dugme za otvaranje dodatnog prozora gdje korisnik može promijeniti osnovne postavke vozila
6	Dugme za iscrtavanje linkova na karte na temelju odabranih stavki
7	Dugme za čišćenje iscrtane karte

Pri računanju energetskeg profila prometnice potrebno je poznavati više parametara, među kojima se nalaze i osnovne karakteristike vozila. U svrhu postizanja mogućnosti analize različitih tipova vozila aplikacija nudi korisniku mogućnost izmjene parametara koji se odnose na samo vozilo. Slika 8.3 prikazuje prozor u kojem korisnik može izmijeniti ulazne parametre koji će biti korišteni pri izračunu energetskeg profila prometnice za to vozilo.



**Slika 8.3:** Prozor za izmjenu osnovnih postavki promatranog vozila

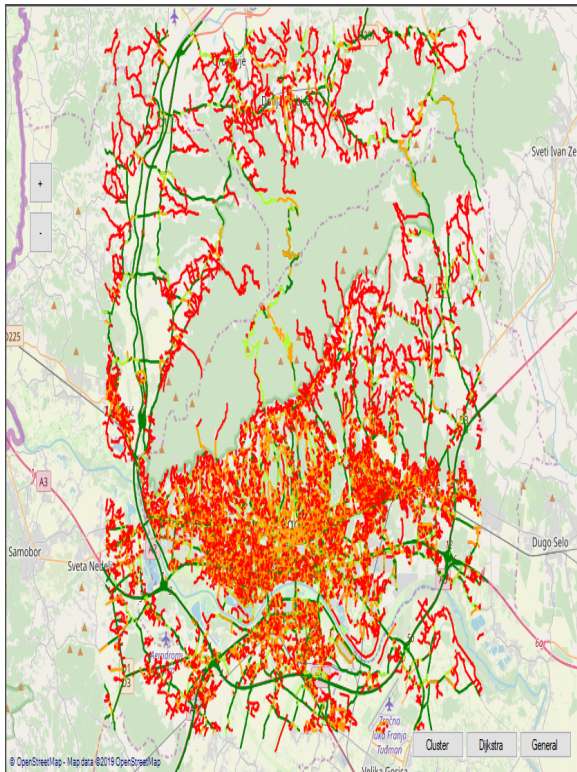
Program na temelju odabranih stavki iz glavne kontrolne ploče pokreće slijed naredbi koje izračunavaju odabranu vrijednost te na temelju izračunate vrijednosti iscrtavaju u određenoj boji svaki link na kartu. Odabir boje linka ovisi o odabranoj stavci. Pri iscrtavanju brzinskih profila aplikacija crta linkove gradijentom od crvene boje do zelene, pri čemu prva predstavlja najmanju brzinu, a druga najveću (Slika 8.4). Pri iscrtavanju energetskeg profila postoje dvije boje. Zelena predstavlja link na kojem se regenerira energija, tj. vrijednost izračuna električne

energije je negativna, a crvena predstavlja link na kojem dolazi do utroška električne energije, tj. vrijednost izračuna je pozitivan broj (Slika 8.8). Pri iscrtavanju akceleracijskog profila, zelena boja predstavlja link na kojem vozilo ubrzava, tj. vrijednost akceleracije je pozitivna, a crvena predstavlja link na kojem dolazi do usporavanja (Slika 8.6). Detaljni opis korištenih boja prikazan je u Tablici 8.2.

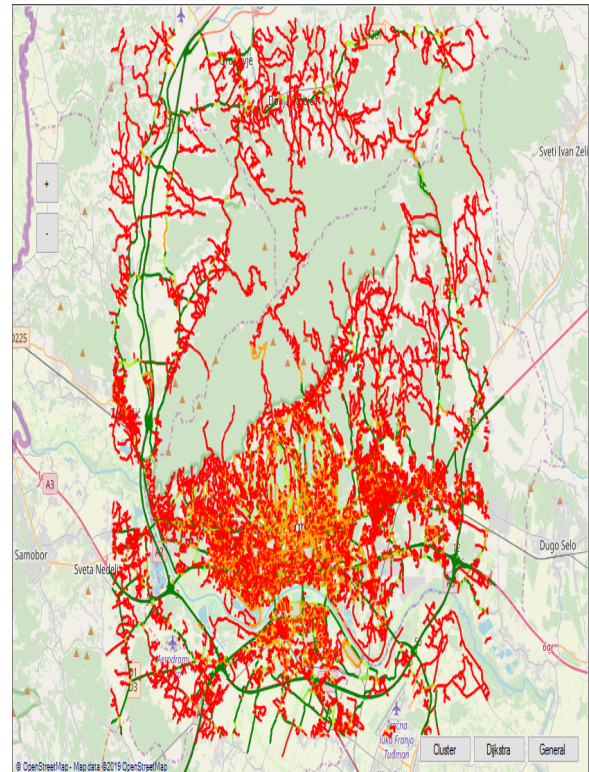
**Tablica 8.2** Korištene boje pri iscrtavanju profila

Profil	Boja	Vrijednost
Brzinski	Zelena	$x > 50 \text{ km/h}$
	Zeleno-žuta	$x > 40 \text{ km/h} \ \&\& \ x \leq 50 \text{ km/h}$
	Narančasta	$x > 20 \text{ km/h} \ \&\& \ x \leq 40 \text{ km/h}$
	Crvena	$x \leq 20 \text{ km/h}$
Akceleracijski	Zelena	$x > 0 \text{ m/s}^2$
	Crvena	$x \leq 0 \text{ m/s}^2$
Energetski	Zelena	$x \leq 0 \text{ J}$
	Crvena	$x > 0 \text{ J}$

Očekivano područje pojavljivanja negativnih energetskih vrijednosti, tj. energetskih vrijednosti pri kojima vozilo regenerira električnu energiju je svako područje gdje se vozilo giba nizbrdo. Izračun energetskih profila potvrđuje pretpostavku uzorka pojavljivanja energetskih vrijednosti te samim time potvrđuje istinitost izračuna. Prostorno-vremenska analiza razvijena u okviru ovog rada proizvela je rezultate sukladne s prostornom logikom područja istraživanja unutar šire okolice Grada Zagreba. Slike 8.4, 8.6 i 8.8 prikazuju usporedbu izračunatih profila u vršnim satima tijekom radnog dana, dok Slike 8.5, 8.7 i 8.9 prikazuju prostornu logiku područja istraživanja tijekom vikenda. Usporedbom radnog i neradnog dana vidljiva je razlika opterećenja mreže prometnica kroz profil brzine i energije.

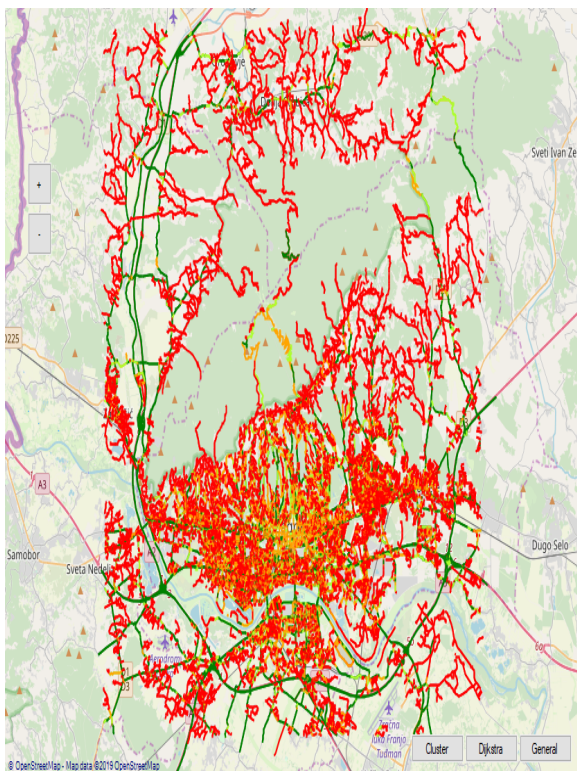


(a) Jutranji brzinski profil u 08:00 h

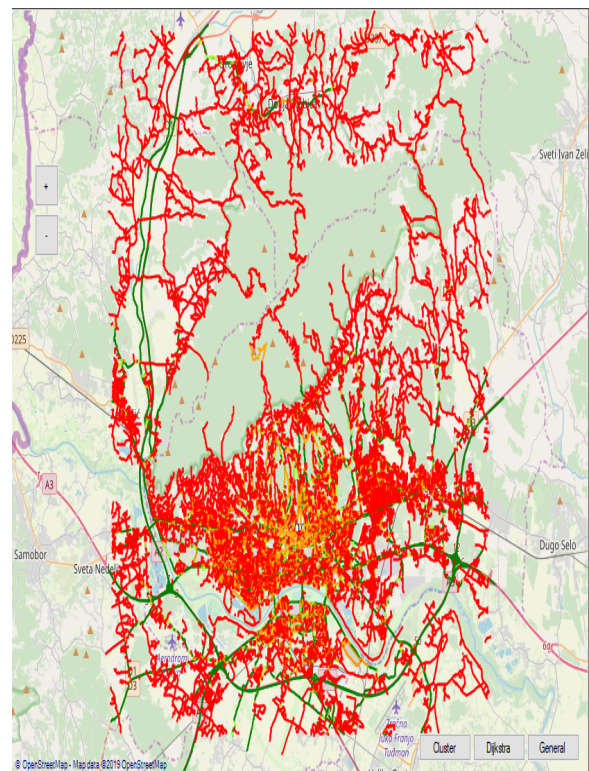


(b) Popodnevni brzinski profil u 17:00 h

**Slika 8.4:** Usporedba profila brzine u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom radnog dana

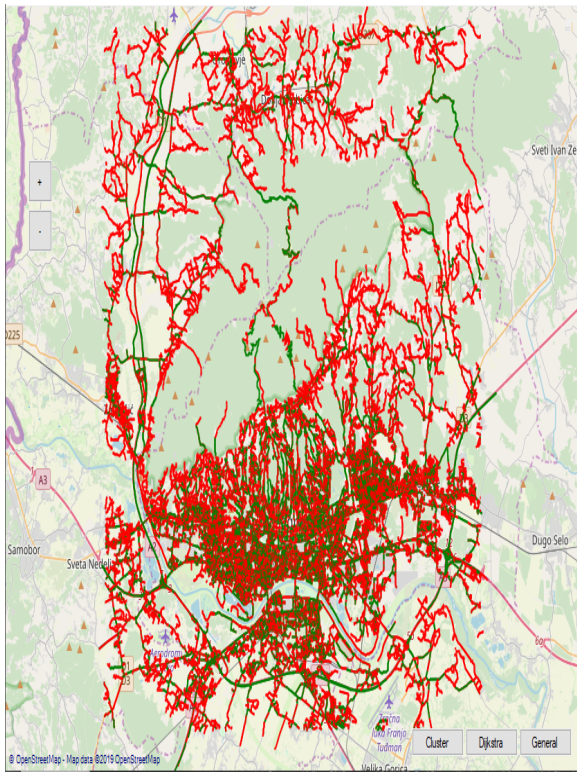


(a) Jutranji brzinski profil u 08:00 h

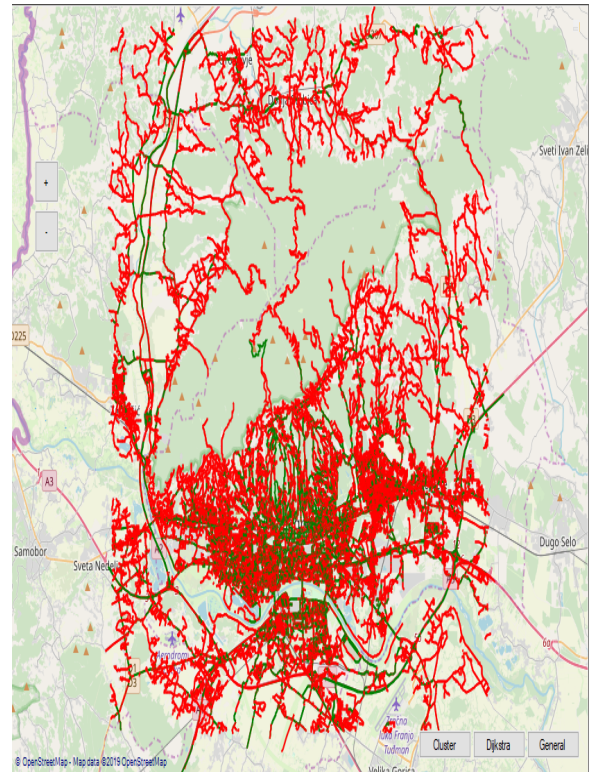


(b) Popodnevni brzinski profil u 17:00 h

**Slika 8.5:** Usporedba profila brzine u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom vikenda

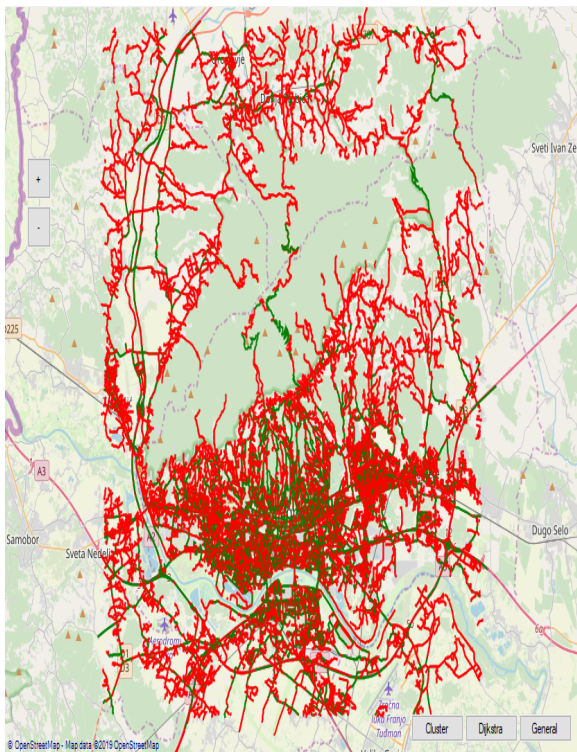


(a) Jutranji akceleracijski profil u 08:00 h

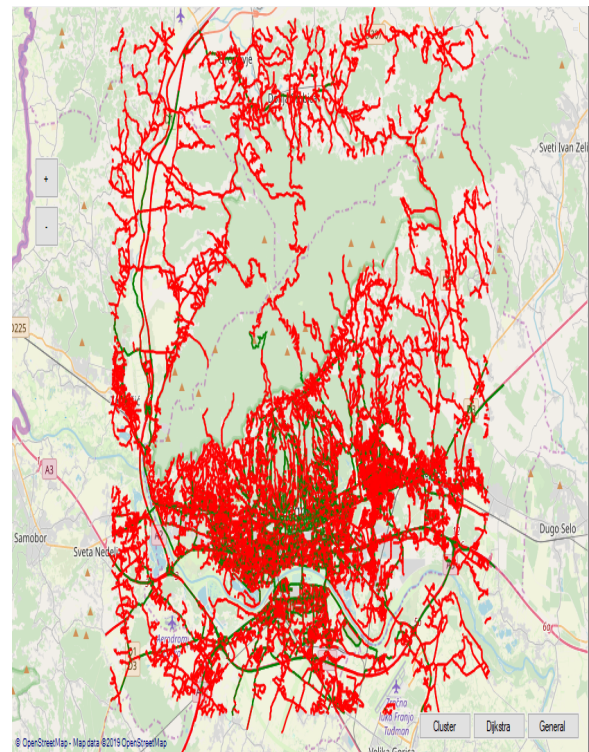


(b) Popodnevni akceleracijski profil u 17:00 h

**Slika 8.6:** Usporedba profila akceleracije u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom radnog dana

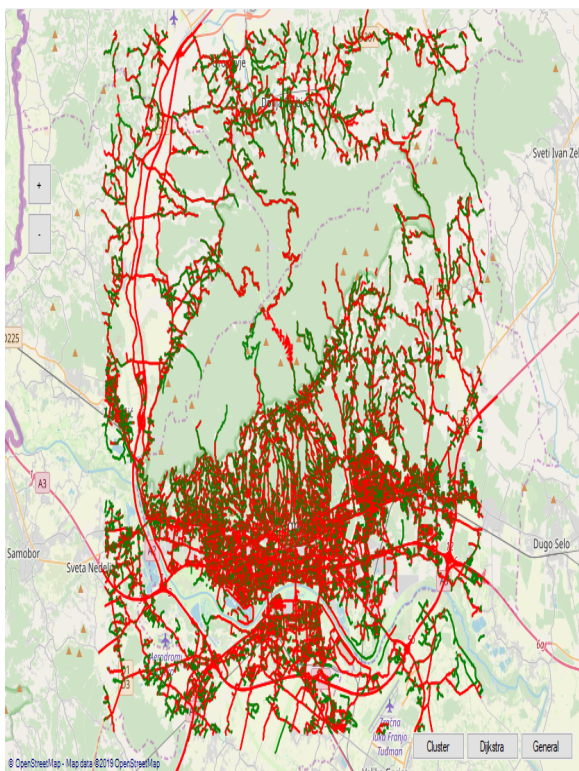


(a) Jutranji akceleracijski profil u 08:00 h

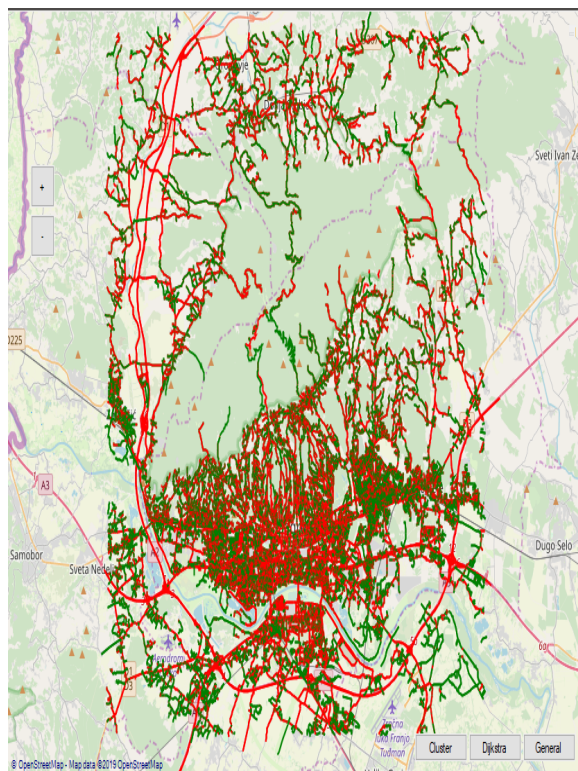


(b) Popodnevni akceleracijski profil u 17:00 h

**Slika 8.7:** Usporedba profila akceleracije u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom vikenda

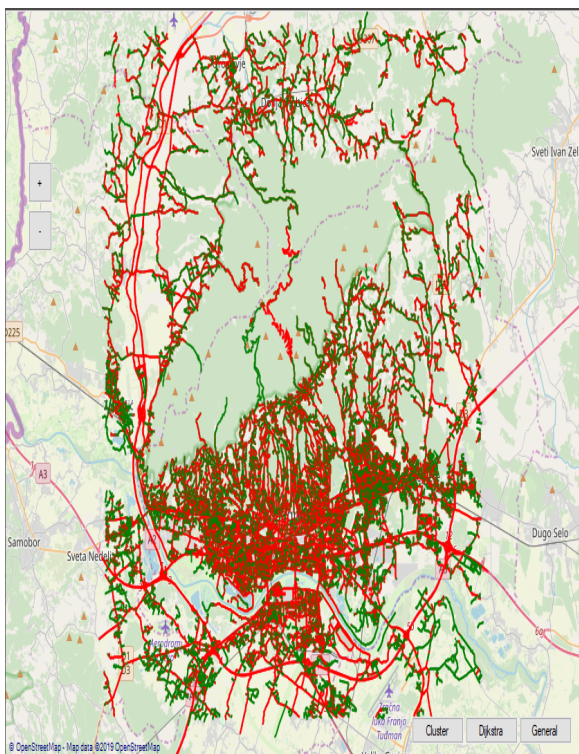


(a) Jutranji energetska profil u 08:00 h

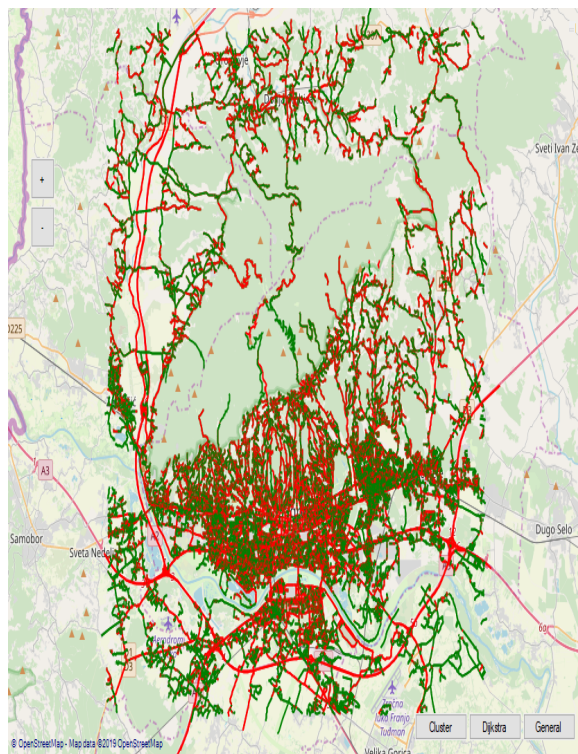


(b) Popodnevni energetska profil u 17:00 h

**Slika 8.8:** Usporedba energetska profila u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom radnog dana



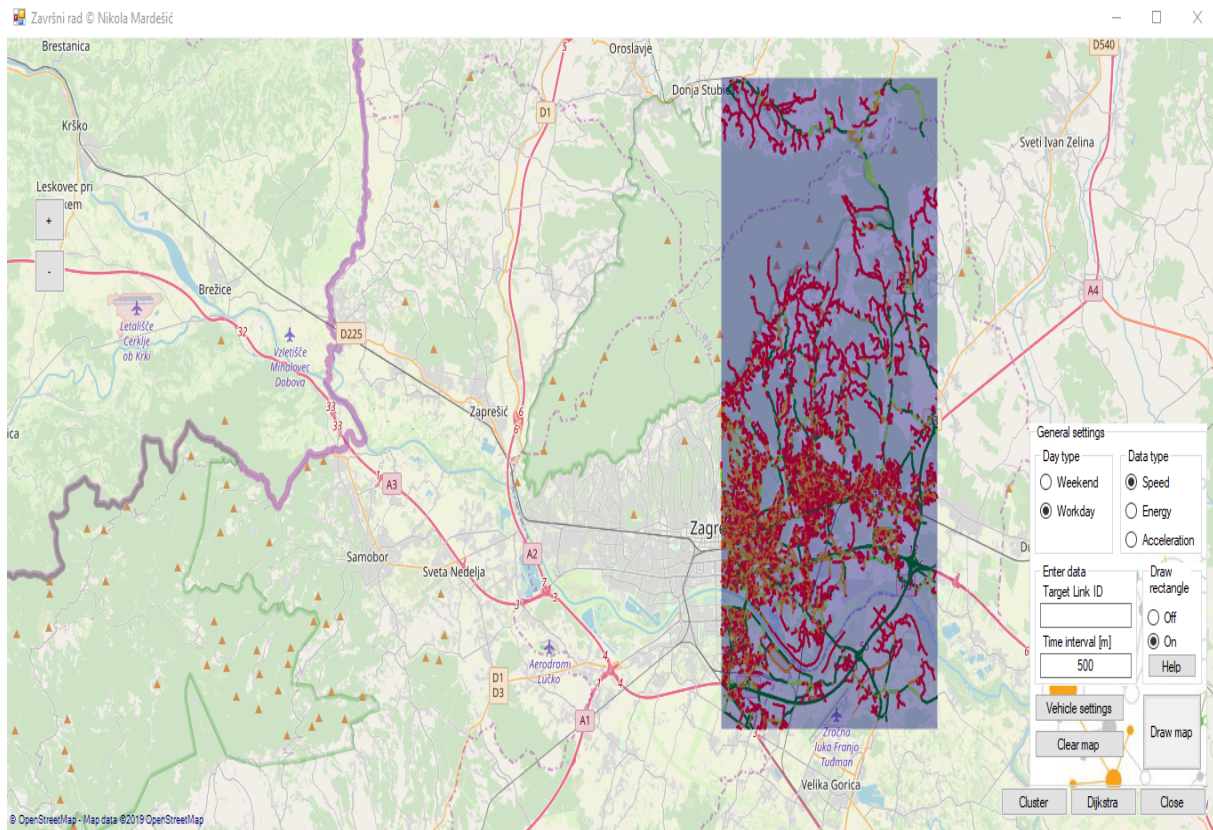
(a) Jutranji energetska profil u 08:00 h



(b) Popodnevni energetska profil u 17:00 h

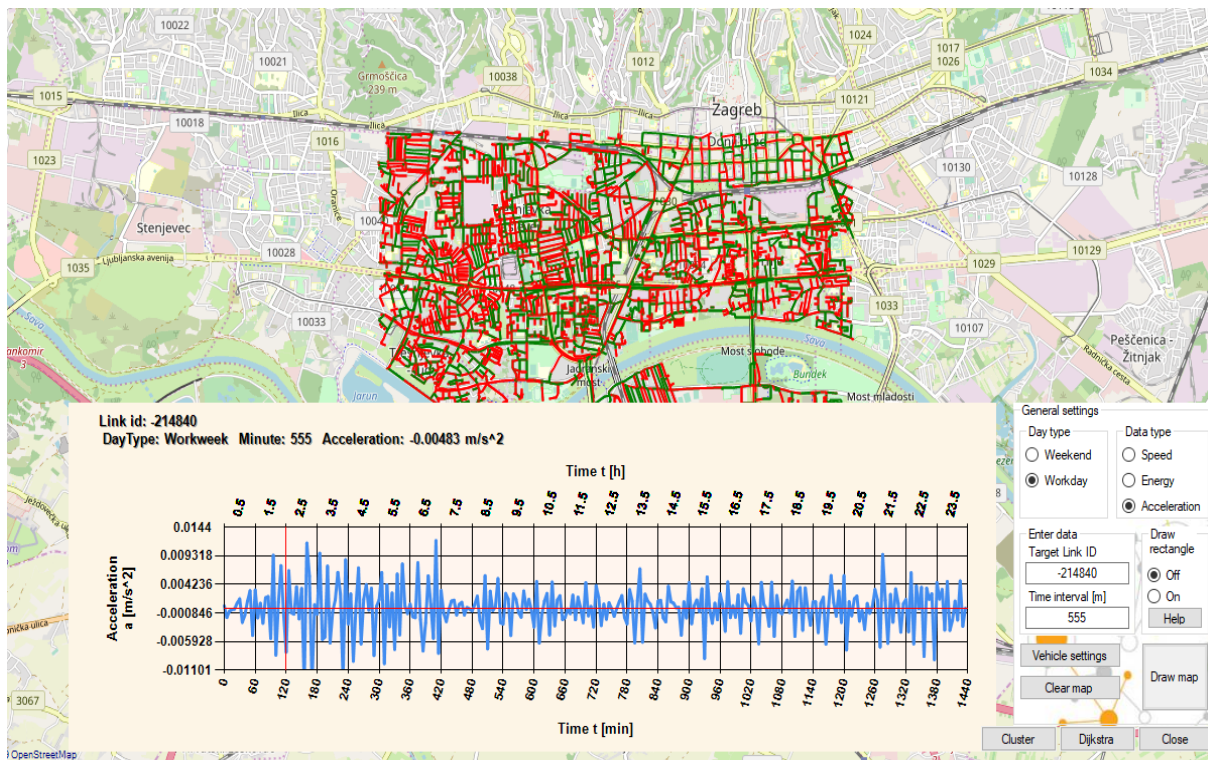
**Slika 8.9:** Usporedba energetska profila u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom vikenda

Zbog postojanja velike količine podataka stvorena je metoda koja korisniku omogućava odabir područja analize na samoj karti. Pri pokretanju metode korisniku se omogućava izrada pravokutnika pokretanjem miša po karti. Nakon izrade pravokutnika program dohvaća samo podatke koji se nalaze unutar iscrtanog pravokutnika. Na taj način se znatno smanjuje redundancija. Slika 8.10 prikazuje iscrtani te ispunjeni pravokutnik.

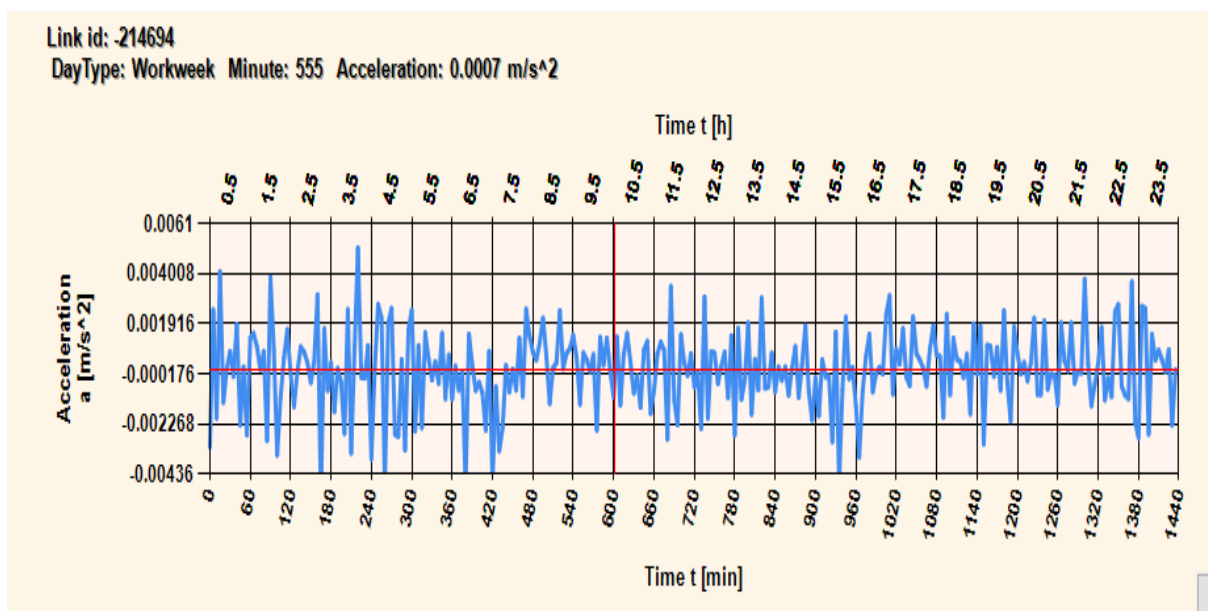


**Slika 8.10:** Pravokutnik generiran od strane korisnika

Uz vizualni prikaz linkova na prometnoj mreži, gdje su linkovi iscrtani različitim bojama koje su dodijeljene linku na temelju izračuna brzinskog, akceleracijskog ili energetskeg profila, korisniku se pruža mogućnost odabira željenog linka dvostrukim pritiskom na samu kartu. Dvostruki pritisak na kartu pokreće metodu koja na temelju geografskih koordinata linkova te koordinate miša pronalazi link koji se nalazi najbliže odabranoj lokaciji. Nakon pronalaska traženog linka, aplikacija stvara graf na kojem je iscrtan cjelodnevni raspon izmjerenih vrijednosti linka. Slika 8.11 prikazuje cjelodnevni raspon izračunatih akceleracijskih vrijednosti promatranog linka. Slike 8.13, 8.14, 8.15, 8.16, 8.17 i 8.18 prikazuju izračunate profile brzine, akceleracije i energije na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnih i neradnih dana u tjednu.

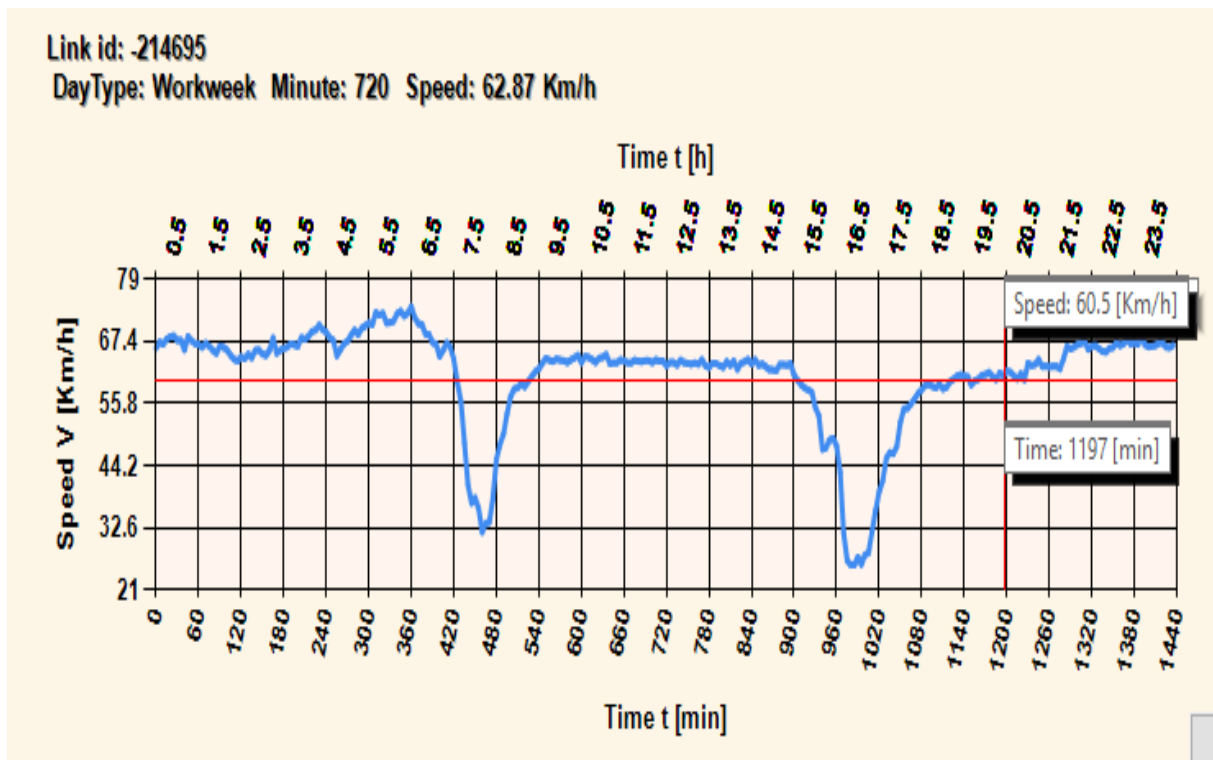


Slika 8.11: Graf akceleracijskih vrijednosti promatranog linka

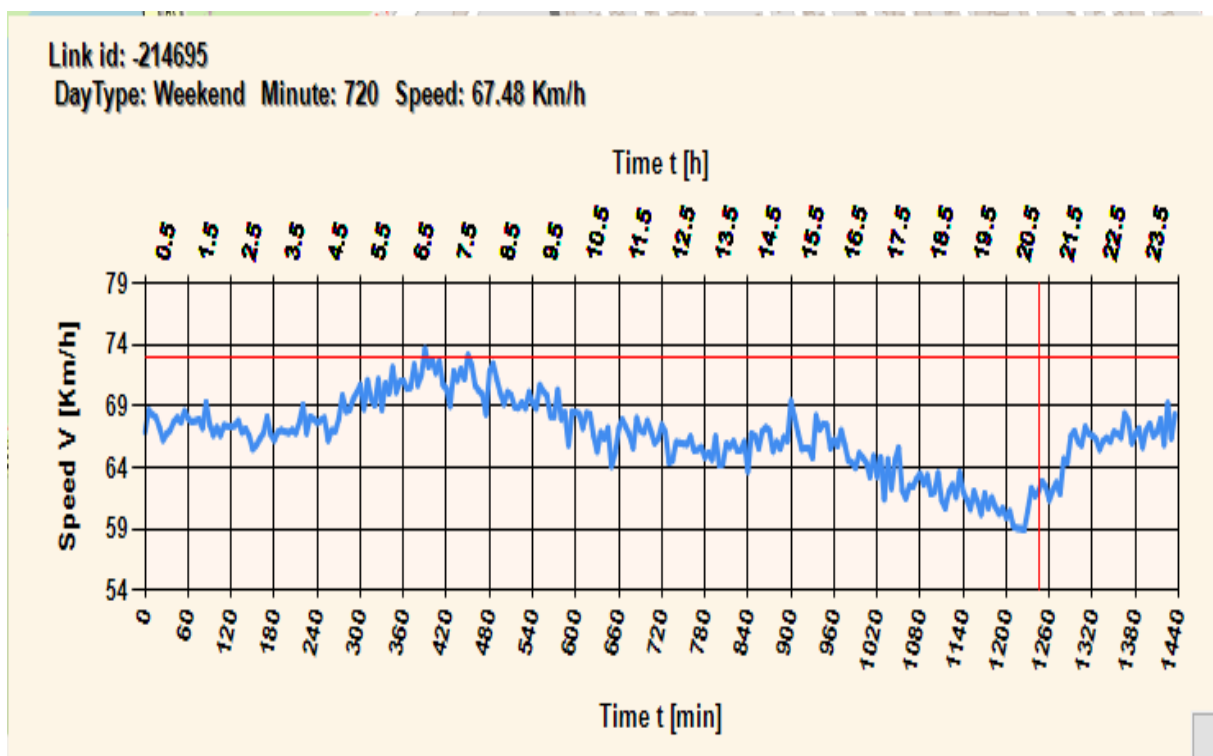


Slika 8.12: Uvećani graf akceleracijskih vrijednosti promatranog linka

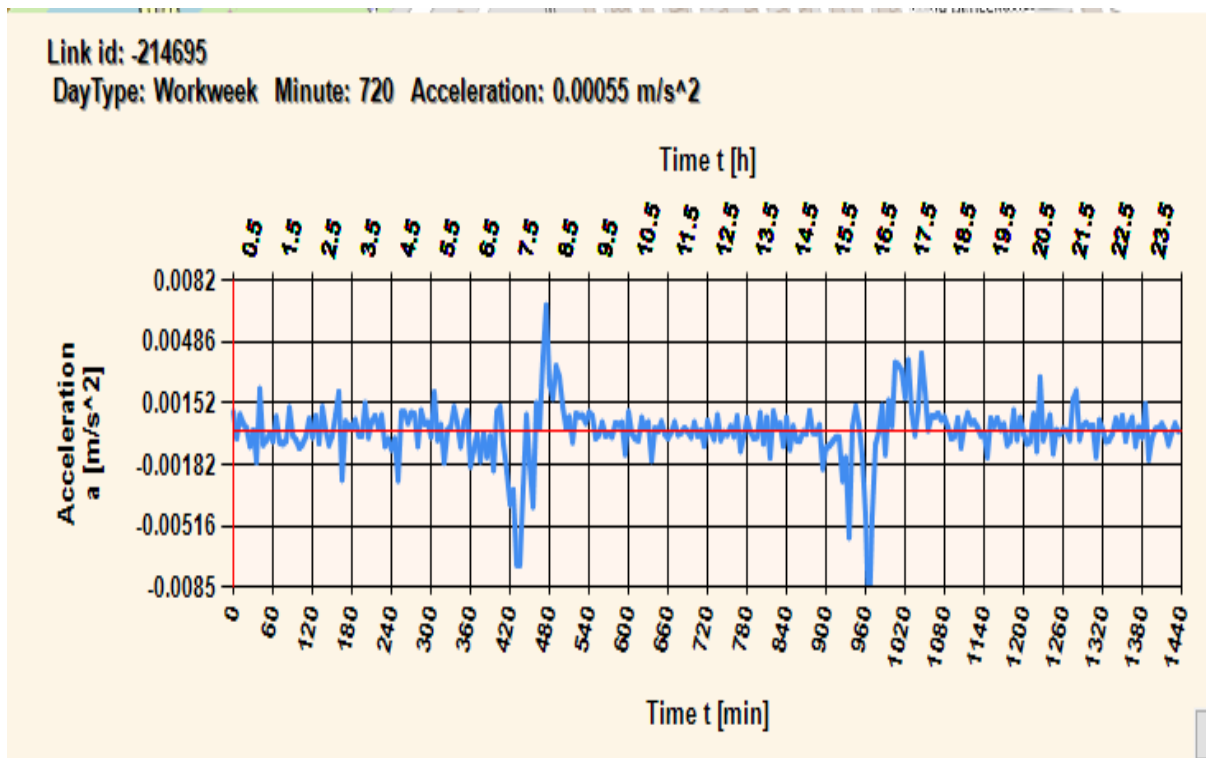




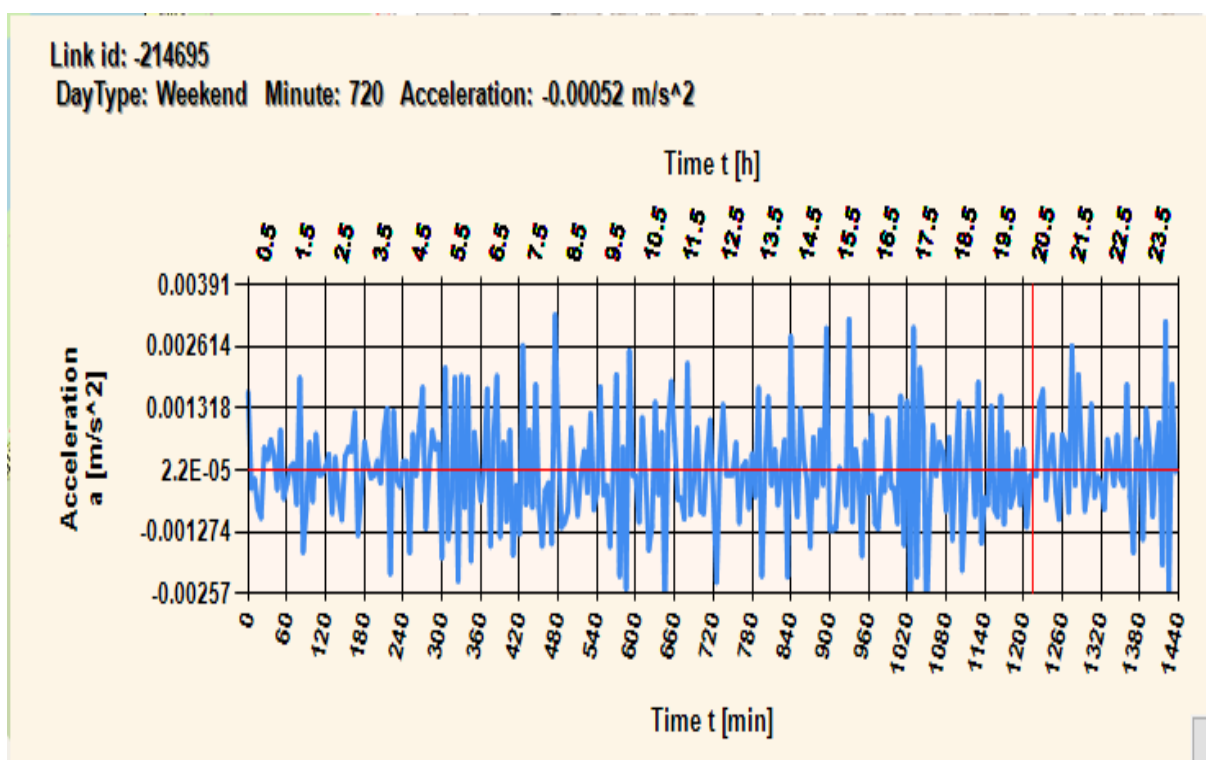
Slika 8.13: Graf profila brzine na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnog dana



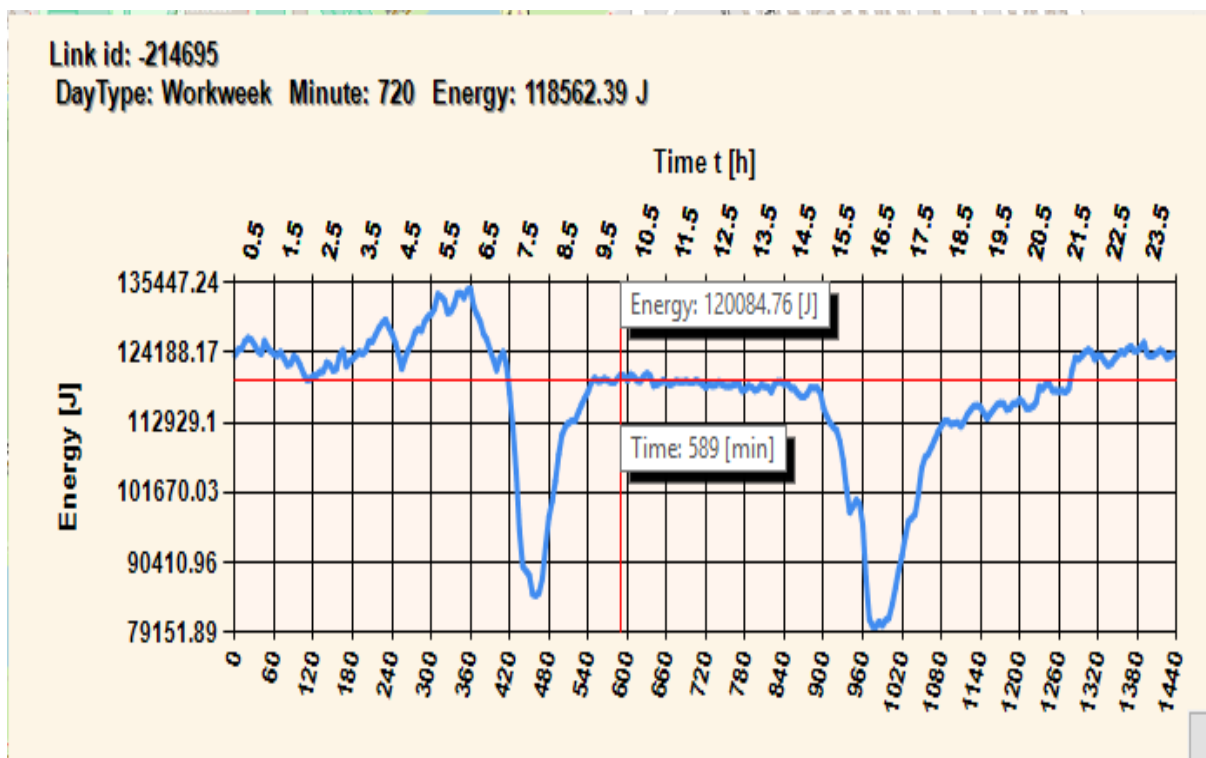
Slika 8.14: Graf profila brzine na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom vikenda



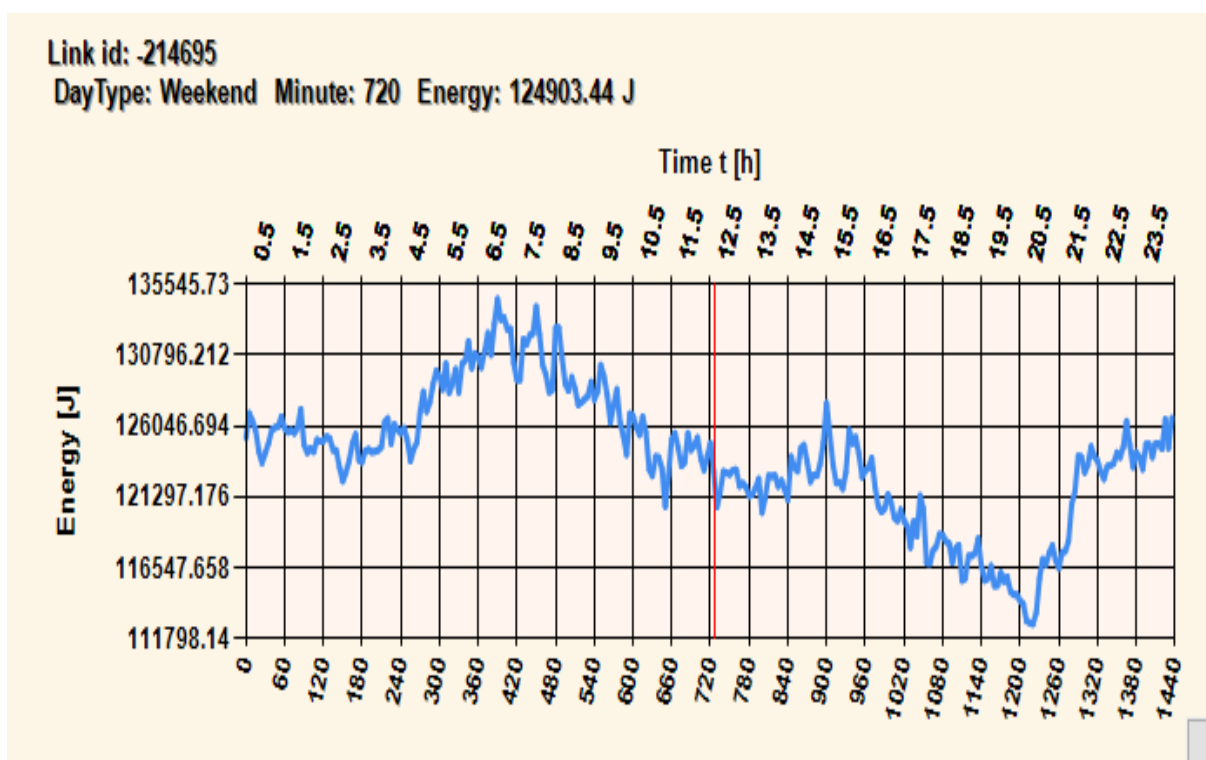
Slika 8.15: Graf akceleracijskog profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnog dana



Slika 8.16: Graf akceleracijskog profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom vikenda



Slika 8.17: Graf energetskega profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnog dana

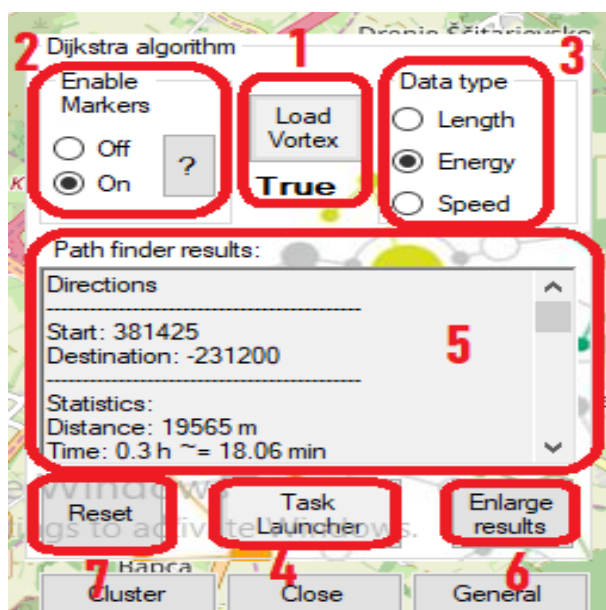


Slika 8.18: Graf energetskega profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom vikenda

## 8.2. Optimizacija prometnih procesa

Implementacija modificiranog Dijkstrinog algoritma omogućuje vozilu optimalno iskorištavanje kapacitet spremnika energije koji mu je na raspolaganju. S obzirom na problem nedovoljnog kapaciteta akumulatora kod električnih vozila, razvoj ovakvih i sličnih algoritama doprinosi optimalnoj potrošnji kapaciteta akumulatora električnih vozila. Ovakav algoritam moguće je primijeniti na navigacijskom sustavu koji bi vozaču mogao predložiti odabir više ruta, odnosno predložiti energetske isplativiji pravac kretanja. Uz računanje energetske optimalne rute, aplikacija korisniku pruža mogućnost izračuna rute koja je najbrža, tj. zahtijeva najmanji vremenski period te mogućnost odabira ulaznih parametara koji kao krajnji rezultat algoritma korisniku izračunavaju najkraću rutu prema udaljenosti.

Slika 8.19 prikazuje kontrolnu ploču za primjenu Dijkstrinog algoritma, a Tablica 8.3 opisuje prikazane brojeve unutar ploče.



Slika 8.19: Kontrolna ploča Dijkstrinog algoritma

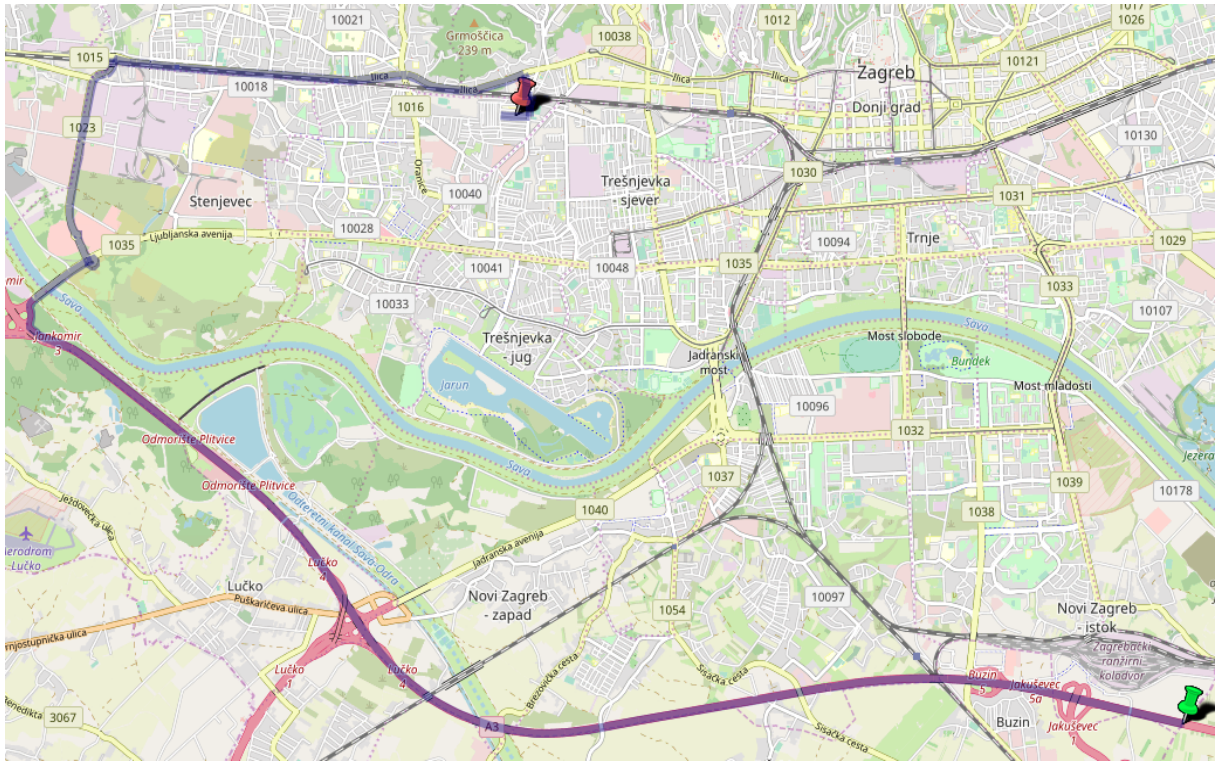
**Tablica 8.3** Naredbe unutar Dijkstra kontrolne ploče

Redni broj	Opis
1	Dugme za učitavanje vrhova i bridova grafa
2	Prekidač koji korisniku omogućava odabir početne i krajnje točke kretanja
3	Izbornik tipa izlaznih vrijednosti algoritma
4	Dugme za pokretanje algoritma
5	Prozor za ispis rezultata algoritma
6	Dugme za otvaranje dodatnog prozora gdje se nalazi uvećani prikaz rezultata algoritma
7	Dugme za čišćenje rezultata

Predmet pod rednim brojem 1 unutar Tablice 8.3 predstavlja metodu koja iz CSV datoteke dohvaća relacije između svih poznatih linkova te ih privremeno sprema unutar programa. Relacije se sastoje od podataka koji prikazuju koji su linkovi međusobno povezani te koji je smjer kretanju na linku. Algoritam se može izvršiti tek nakon uspješnog učitavanja bridova i vrhova grafa, tj. prometne mreže.

Na temelju odabira željenog izlaznog parametra, prikazanog pod rednim brojem 3, algoritam može za istu početnu i krajnju točku prikazati različite rezultate. Pri izračunu energetske optimalne rute algoritam uzima u obzir samo energetske profile linkova, pri izračunu najbrže rute algoritam će svoj rezultat bazirati na temelju brzinskih profila linkova te za izračun najkraće rute prema udaljenosti algoritam će promatrati samo vrijednosti koje opisuju duljinu linka.

Prikaz rezultata izračuna energetske optimalne rute prikazan je na slici 8.21. Pribadača zelene boje predstavlja početnu točku rute dok crvena predstavlja krajnju točku. Prikaz rezultata izračuna vremenski optimalne rute prikazan je na slici 8.22, a prikaz rezultata izračuna optimalne rute prema udaljenosti prikazan je na slici 8.23.



Slika 8.20: Vizualni prikaz energetske optimalne rute

**Directions**

---

**Start: 381425**  
**Destination: 213595**

---

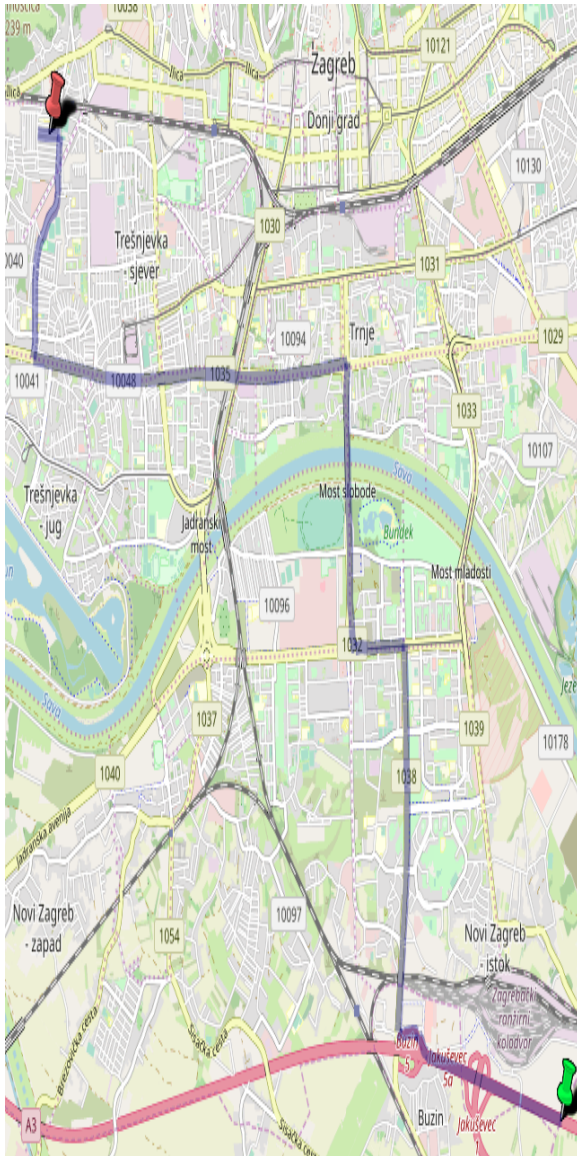
**Statistics:**  
**Distance: 23929 m**  
**Time: 0.35 h ~ 20.97 min**  
**Average speed: 68.47 km/h**  
**Energy: 9308038.9 J**

---

**Path...**

1. 381425	2. 203731	3. -202344	4. -202343	5. -202342
6. -202341	7. -202340	8. -202339	9. 201669	10. -200267
11. -200266	12. -200265	13. -200264	14. -200263	15. -200261
16. 201041	17. 201042	18. 201043	19. 199646	20. 199647
21. 199648	22. 199649	23. -209169	24. -209168	25. 208489
26. 208490	27. -208565	28. -208564	29. 209172	30. 209173
31. -209260	32. -209235	33. 209202	34. 209203	35. 209204
36. 209205	37. 209206	38. 209207	39. 209208	40. 209209
41. 209210	42. 209211	43. 209212	44. 209213	45. 209214
46. 209215	47. 209249	48. 209250	49. 209251	50. 209252
51. 209253	52. -209255	53. -209199	54. -209198	55. -209197
56. 211160	57. 211161	58. 211162	59. 211163	60. 211164
61. 211165	62. -211183	63. -213214	64. 213406	65. -213212
66. -213211	67. -213210	68. -213370	69. -213369	70. -213368
71. -213312	72. -213311	73. -213310	74. -213309	75. -213308
76. -213307	77. 213595			

Slika 8.21: Uvećani prikaz rezultata izračuna energetske optimalne rute



(a) Vizualni prikaz vremenski optimalne rute

✕

**Directions**

---

Start: 381425  
Destination: 213595

---

**Statistics:**  
Distance: 14124 m  
Time: 0.27 h ~ 16.12 min  
Average speed: 52.57 km/h

---

**Path...**

---

1. 381425 || 2. 203731 || 3. 202394 || 4. 202395 || 5. 202396 ||  
 6. 202365 || 7. 202357 || 8. 202361 || 9. 202362 || 10. 202363 ||  
 11. 202364 || 12. -203018 || 13. -203017 || 14. -203016 || 15. -203015 ||  
 16. -203014 || 17. -203013 || 18. -203012 || 19. -203011 || 20. 205151 ||  
 21. 205152 || 22. 205153 || 23. 205154 || 24. 205155 || 25. 205156 ||  
 26. 205157 || 27. 205103 || 28. 205104 || 29. -205106 || 30. -205094 ||  
 31. -205093 || 32. -205092 || 33. -205091 || 34. -205090 || 35. -205089 ||  
 36. -205088 || 37. -205087 || 38. -205086 || 39. -204541 || 40. 204528 ||  
 41. 204529 || 42. 218184 || 43. 218185 || 44. 218186 || 45. 218187 ||  
 46. 218188 || 47. 218189 || 48. 218190 || 49. -218788 || 50. -218787 ||  
 51. 218829 || 52. 218830 || 53. 218831 || 54. 218832 || 55. 218833 ||  
 56. 215369 || 57. 215370 || 58. 215371 || 59. 215372 || 60. 214641 ||  
 61. 214642 || 62. 214643 || 63. 214644 || 64. 214645 || 65. 214646 ||  
 66. 214039 || 67. 214040 || 68. 214041 || 69. 214042 || 70. 214043 ||  
 71. -212584 || 72. -212583 || 73. -212582 || 74. 212636 || 75. 212637 ||  
 76. 212638 || 77. 212639 || 78. 212640 || 79. 212641 || 80. 212642 ||  
 81. 212643 || 82. 212644 || 83. 212645 || 84. 212646 || 85. 212647 ||  
 86. 212648 || 87. 212649 || 88. 212650 || 89. 212651 || 90. 212652 ||  
 91. 213297 || 92. 213298 || 93. 213299 || 94. 213300 || 95. 213301 ||  
 96. 213302 || 97. 213303 || 98. 213304 || 99. 213305 || 100. 213306 ||  
 101. 213595 ||

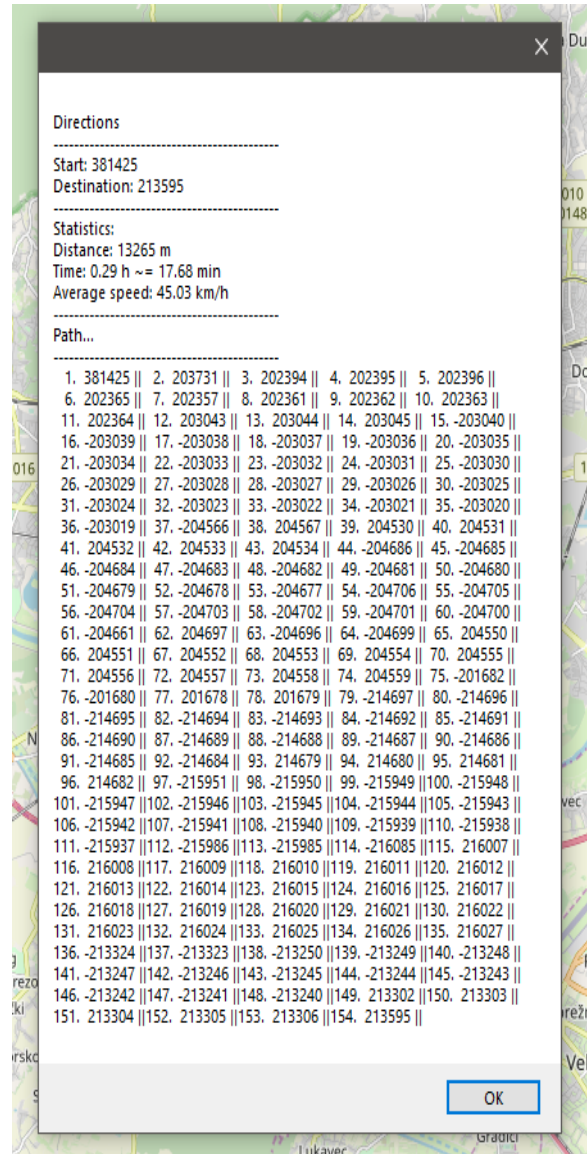
OK

(b) Uvećani prikaz rezultata izračuna vremenski optimalne rute

**Slika 8.22:** Izračun vremenski optimalne rute



(a) Vizualni prikaz optimalne rute prema udaljenosti



(b) Uvećani prikaz rezultata izračuna optimalne rute prema udaljenosti

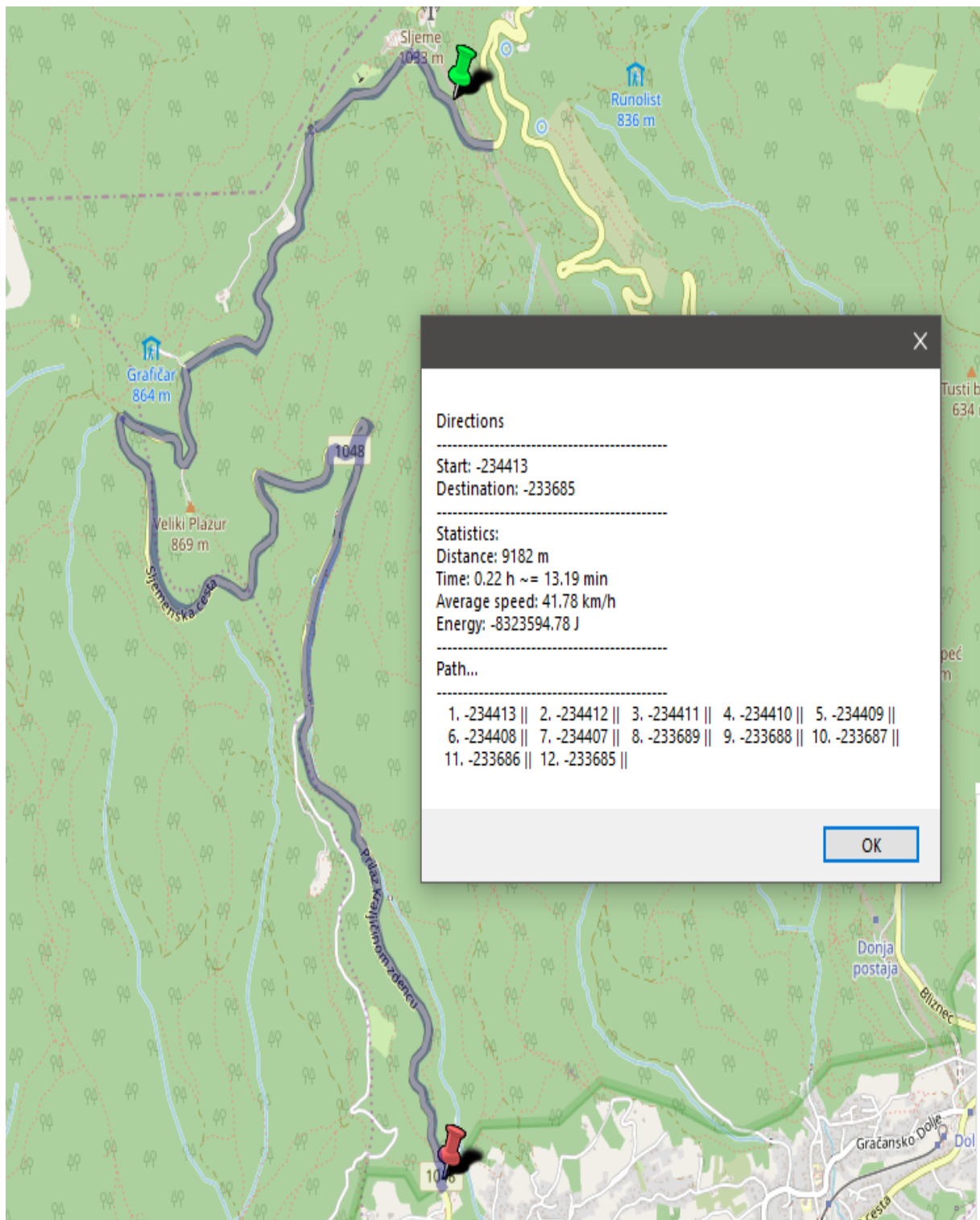
Slika 8.23: Izračun optimalne rute prema udaljenosti

Prosječno vrijeme izvršavanja algoritma za pronalazak optimalne rute iznosi jednu minutu. Relativno dugo vrijeme čekanja posljedica je izračuna udaljenosti, tj. težine od početnog čvora do svih drugih čvorova preko bridova  $e$  iz skupa gridova  $E$  grafa  $G$ . Nakon prvog pokretanja algoritma, uz uvjet da korisnik ne mijenja početni čvor, daljnje izvršavanja, tj. dohvaćanje optimalne rute izvodi se u milisekundnom vremenskom roku. Pri promjeni početnog čvora mijenja se konstrukcija čitavog grafa. Za ponovno izvršavanje algoritam treba ponovno popuniti cijeli graf s adekvatnim težinama.

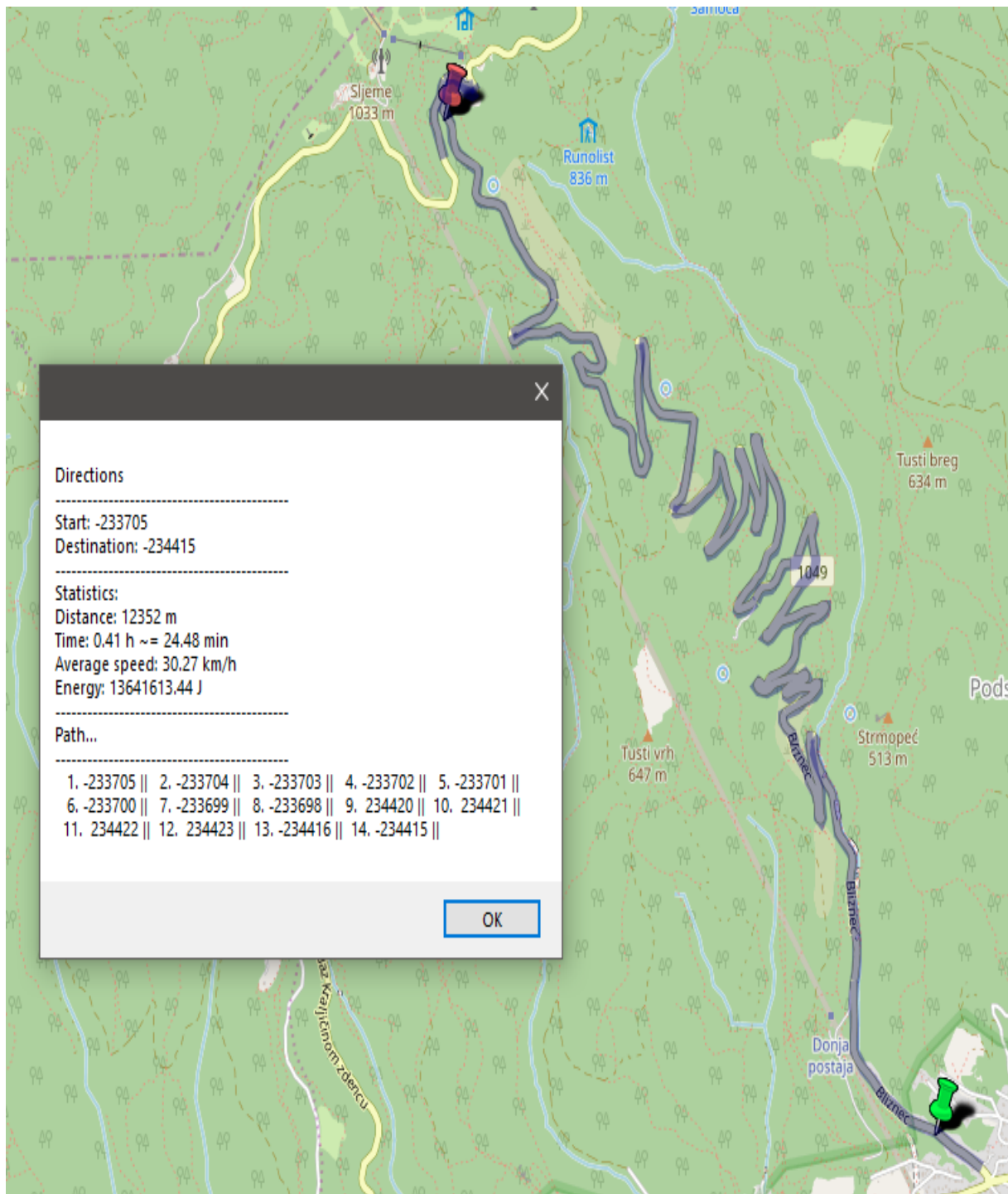
Kretanje vozila nizbrdo kao i određeni stupanj kočenja omogućavaju električnom vozilu regeneraciju energije. Slika 8.24 prikazuje rutu kretanja vozila niz Sljeme. Pri kretanju niz Me-



dvednicu vozilo regenerira određeni iznos energije, dok Slika 8.25 prikazuje uspon vozila na Sljeme pri čemu vozilo troši energiju.



Slika 8.24: Regeneracija energije pri vožnji niz Medvednicu



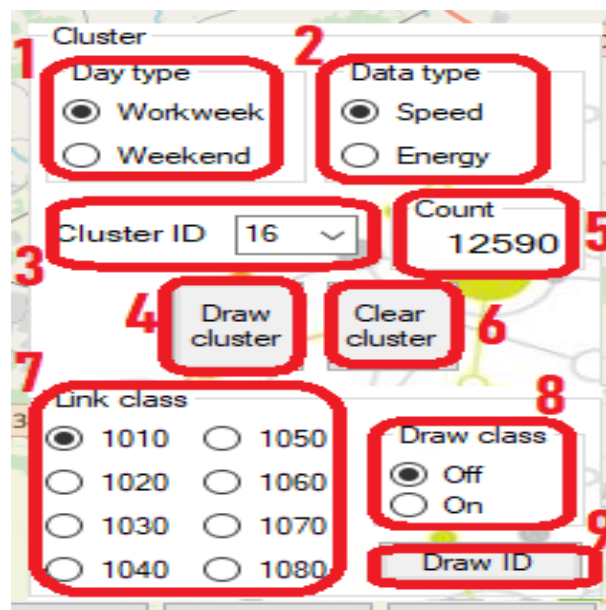
**Slika 8.25:** Utrošak energije pri vožnji uzbrdo

### 8.3. Detekcija i grupiranje sličnih linkova

S obzirom na karakteristike prometnih segmenata, izražene u obliku prometne frekvencije tokom dana, izvršen je proces grupiranja linkova. Svrha detekcije i grupiranja sličnih linkova je pronalazak odnosa i obrazaca ponašanja linkova.

Manjak podataka u određenim vremenskim intervalima na linkovima znatno je utjecao na krajnji rezultat grupiranja. Prometni segmenti koji ne posjeduju dovoljnu količinu brzinskih, a samim time i energetskih zapisa tokom dana bivaju svrstani u grupe linkova koji također nemaju dovoljnu količinu zapisa, a na temelju fizičkih atributa te geografske lokacije imaju veću vjerojatnost pripadati drugoj grupi linkova.

Slika 8.26 prikazuje kontrolnu ploču za iscrtavanje grupa linkova, a Tablica 8.4 opisuje prikazane brojeve unutar ploče.



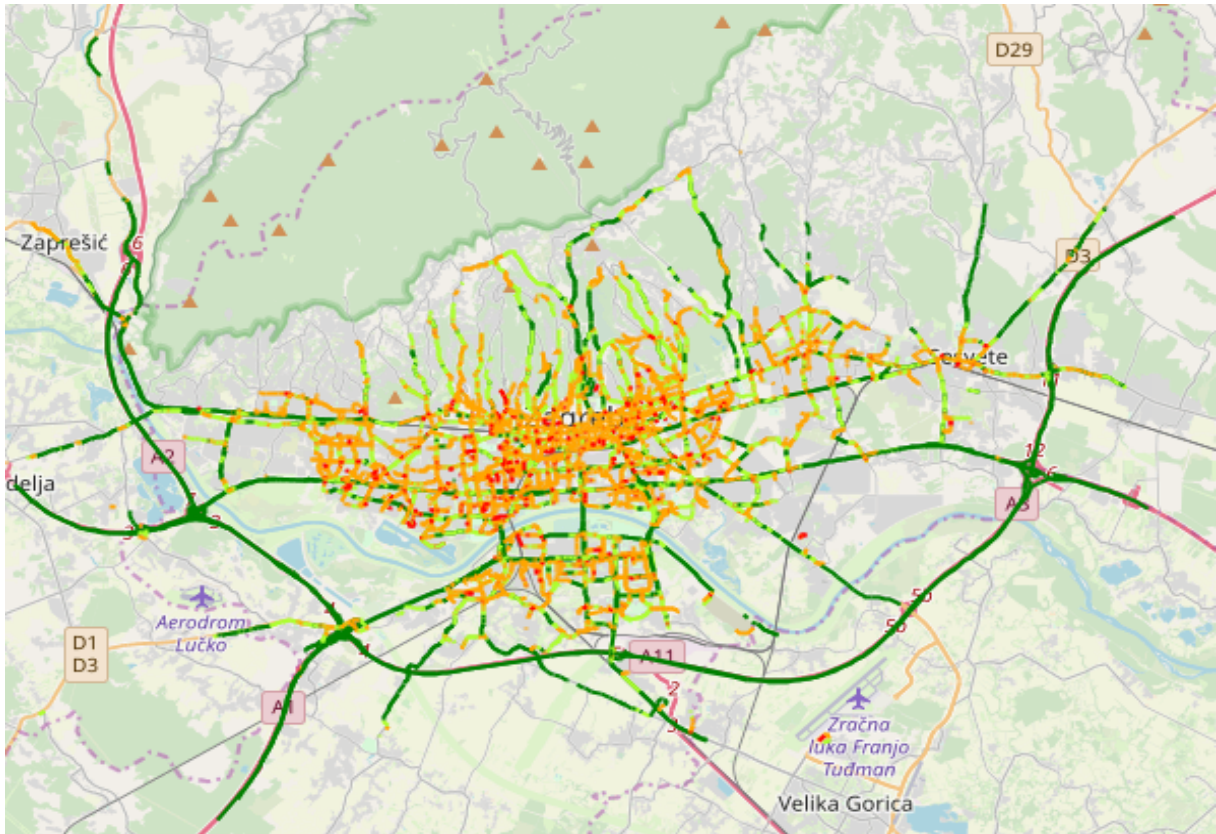
Slika 8.26: Kontrolna ploča za grupiranje linkova

**Tablica 8.4** Naredbe unuta kontrolne ploče za grupiranje linkova

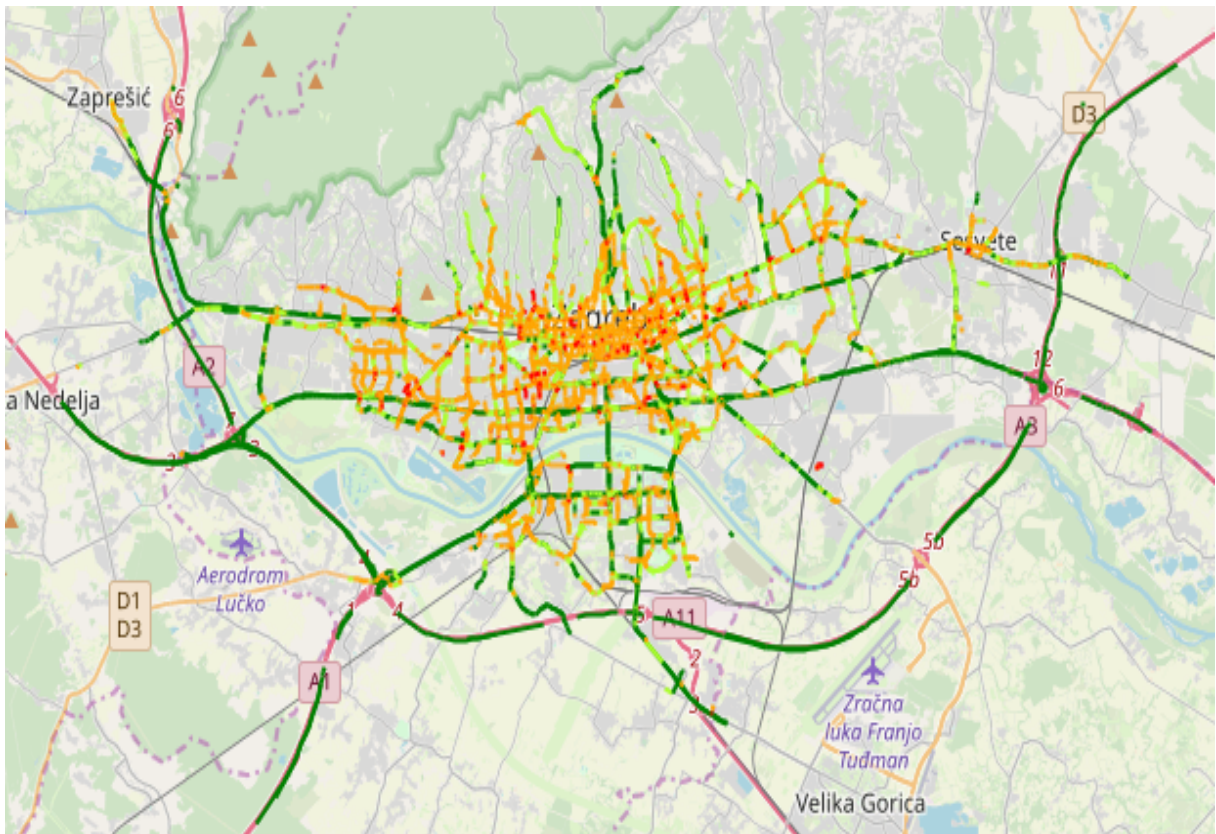
Redni broj	Opis
1	Izbornik tipa dana
2	Izbornik tipa podataka
3	Padajući izbornik grupa linkova
4	Dugme za iscertavanje odabrane grupe linkova
5	Prozor za ispis broja linkova unutar odabrane grupe
6	Dugme za čišćenje iscertane grupe linkova
7	Izbornik grupe linkova određene od tvrtke Mireo
8	Prekidač za osposobljavanje iscertavanje grupe linkova određene od tvrtke Mireo
9	Dugme za iscertavanje grupe linkova određene od tvrtke Mireo

Grupiranje linkova je izvršeno pomoću programskog jezika Matlab<sup>1</sup> te su rezultati grupiranja spremljeni u CSV formatu. Pod rednim brojem 3 unutar Tablice 8.4 korisniku je ponuđen izbor od 30 grupa linkova za oba tipa dana te za oba tipa podataka. Slika 8.27 prikazuje vizualni prikaz rezultata grupiranja linkova na temelju brzinskih zapisa tijekom radnog dana, a Slika 8.28 predstavlja klaster za neradni tip dana. Linkovi unutar odabranog identifikacijskog broja klastera iscertani su na karti na temelju postavljenog vremenskog intervala te tipa dana unutar glavne kontrolne ploče. Uz brzinske klaster, program nudi korisniku ilustraciju energetske klastera na karti. Slika 8.29 i Slika 8.30 prikazuju dva energetska klaster u kojima dominiraju prometni segmenti na planini Medvednica. Slika 8.30 prikazuje energetske vrijednosti prometnih segmenata unutar istog klastera čija je početna točka viša od završne točke, tj. na njima se vozila kreću nizbrdo i elektromotor služi kao generator. Zbog velikog nagiba prometnih segmenata na području Medvednice, pozitivnog i negativnog, izračunati energetske profili prometnica koje se gibaju na Medvednicu te obratno tvore dvije krajnosti energetske spektra što se može vidjeti pomoću prikazanih grupa klastera. Važno je napomenuti da prethodno razmatrana dva energetska klastera sadrže prometne segmente koji bi po svome dnevnom profilu mogli spadati u neki drugi klaster, ali zbog nedostatka cjelodnevni zapisa brzine/energije pripadaju grupi koju opisuje ista značajka. Slika 8.31 prikazuje diverzificirani klaster u kojem prometni segmenti pretežno sadrže cjelodnevni energetske profil nad kojim je vršeno uspoređivanje te grupiranje. To je vidljivo iz područja obuhvata i vrijednosti profila prometnih segmenata unutar tog klastera.

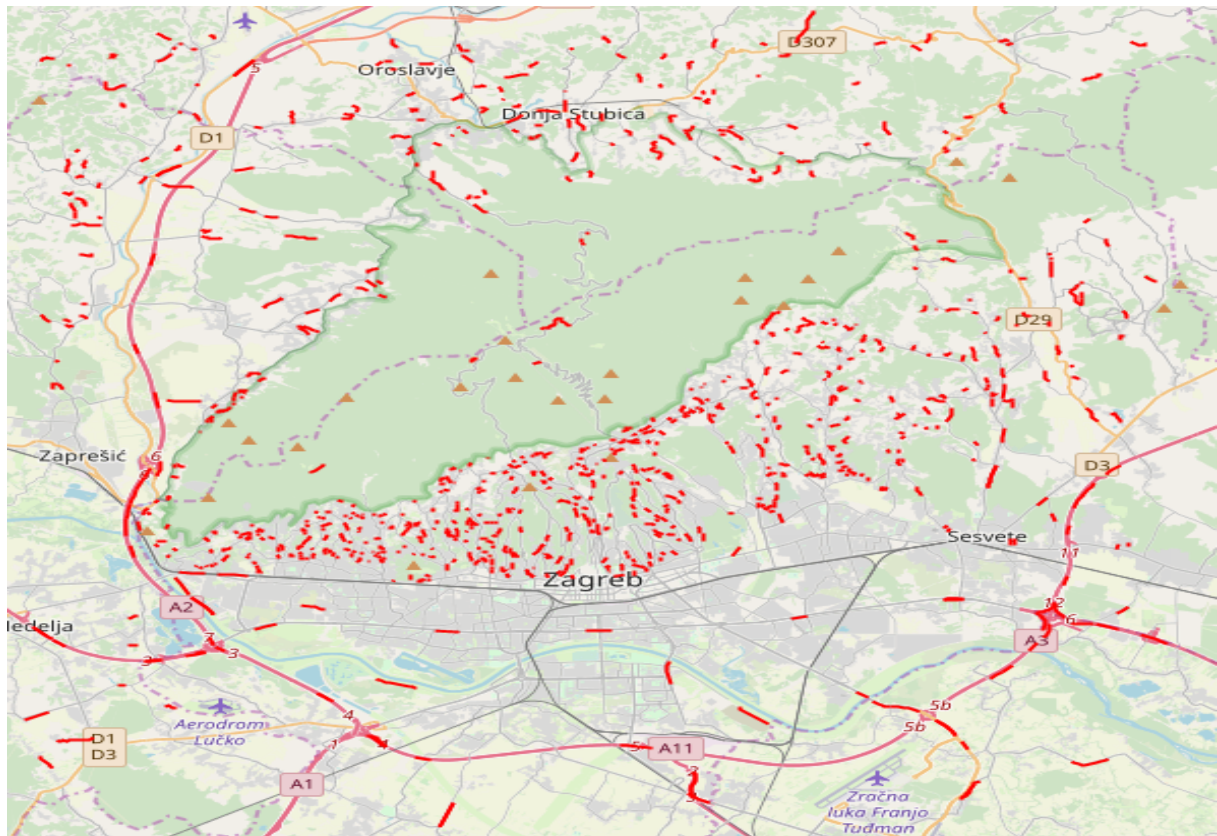
<sup>1</sup>Više o programskom jeziku <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>



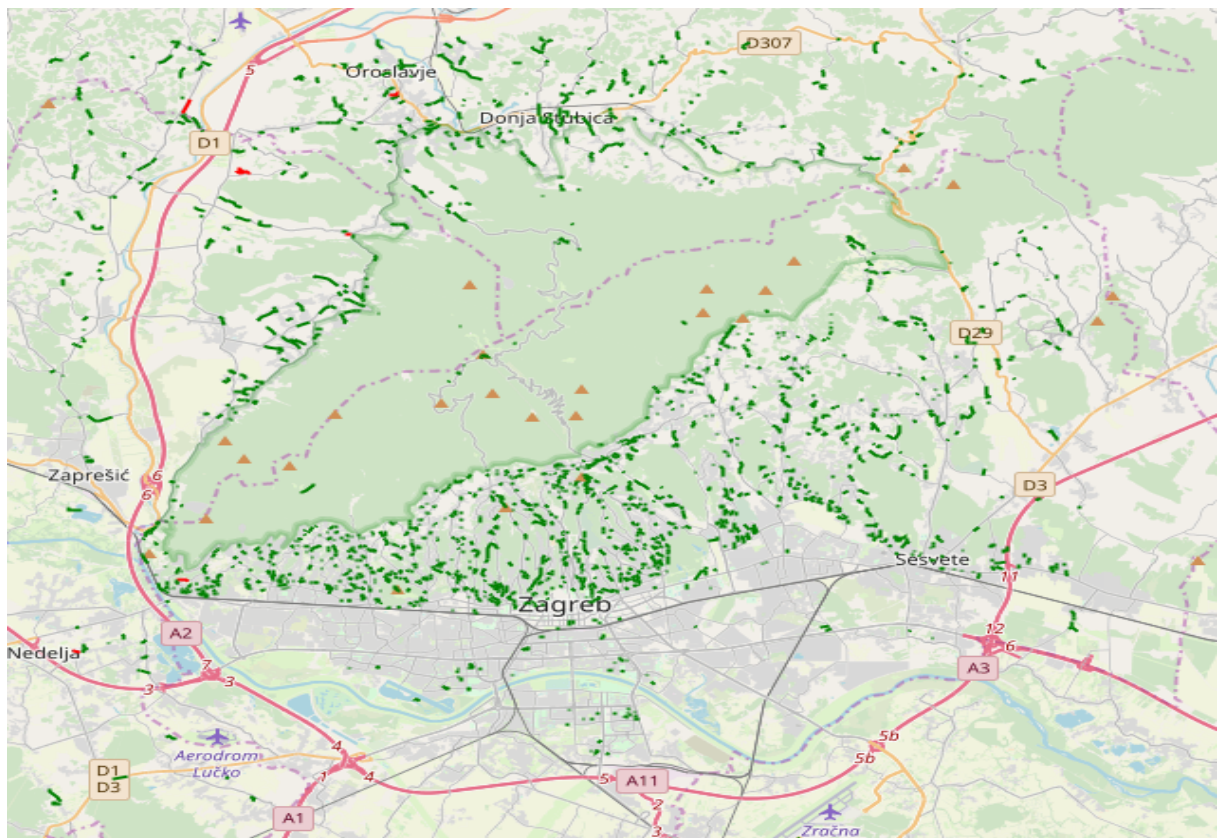
Slika 8.27: Grupiranje linkova tijekom radnog dana na temelju brzinskih zapisa



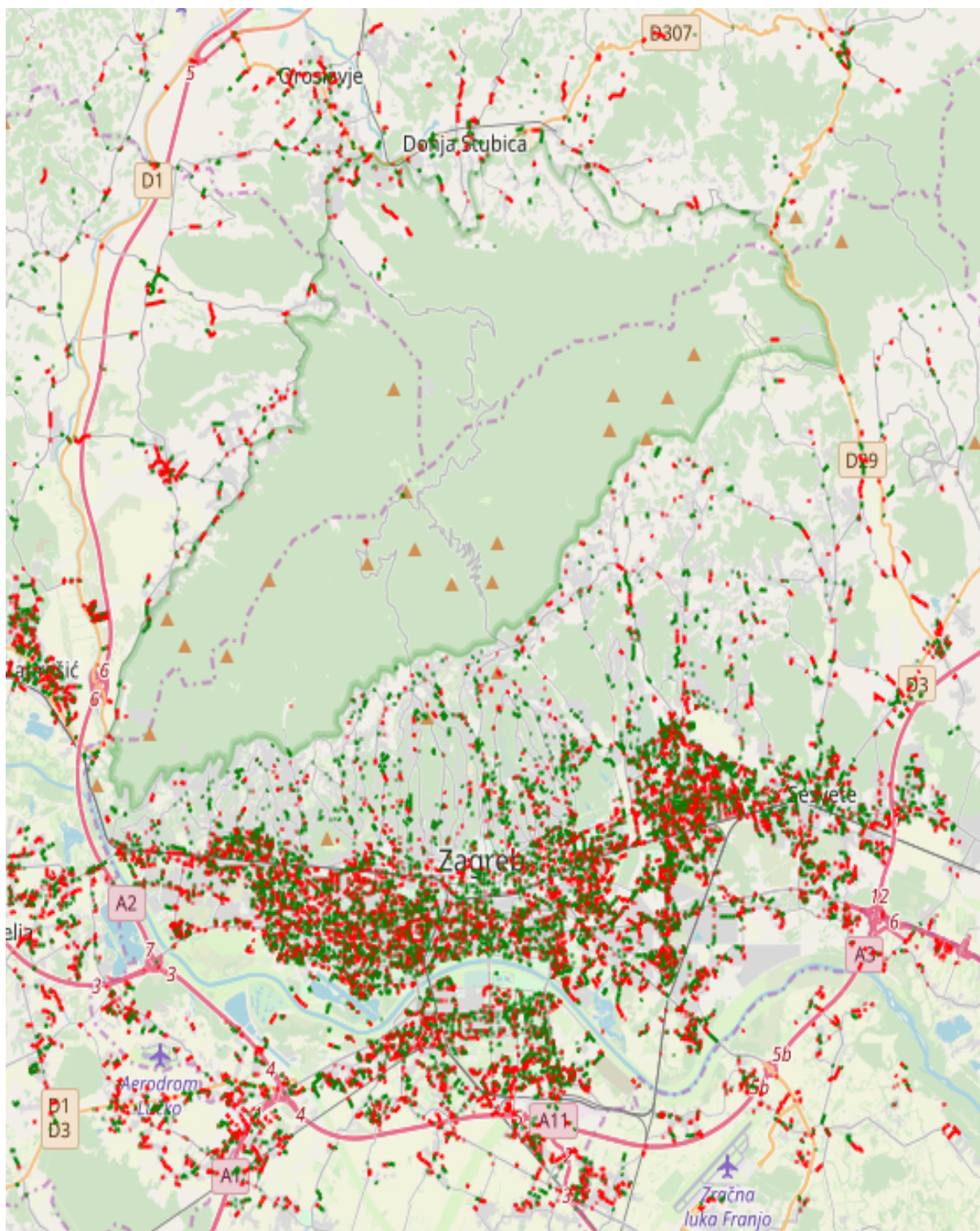
Slika 8.28: Grupiranje linkova tijekom vikenda na temelju brzinskih zapisa



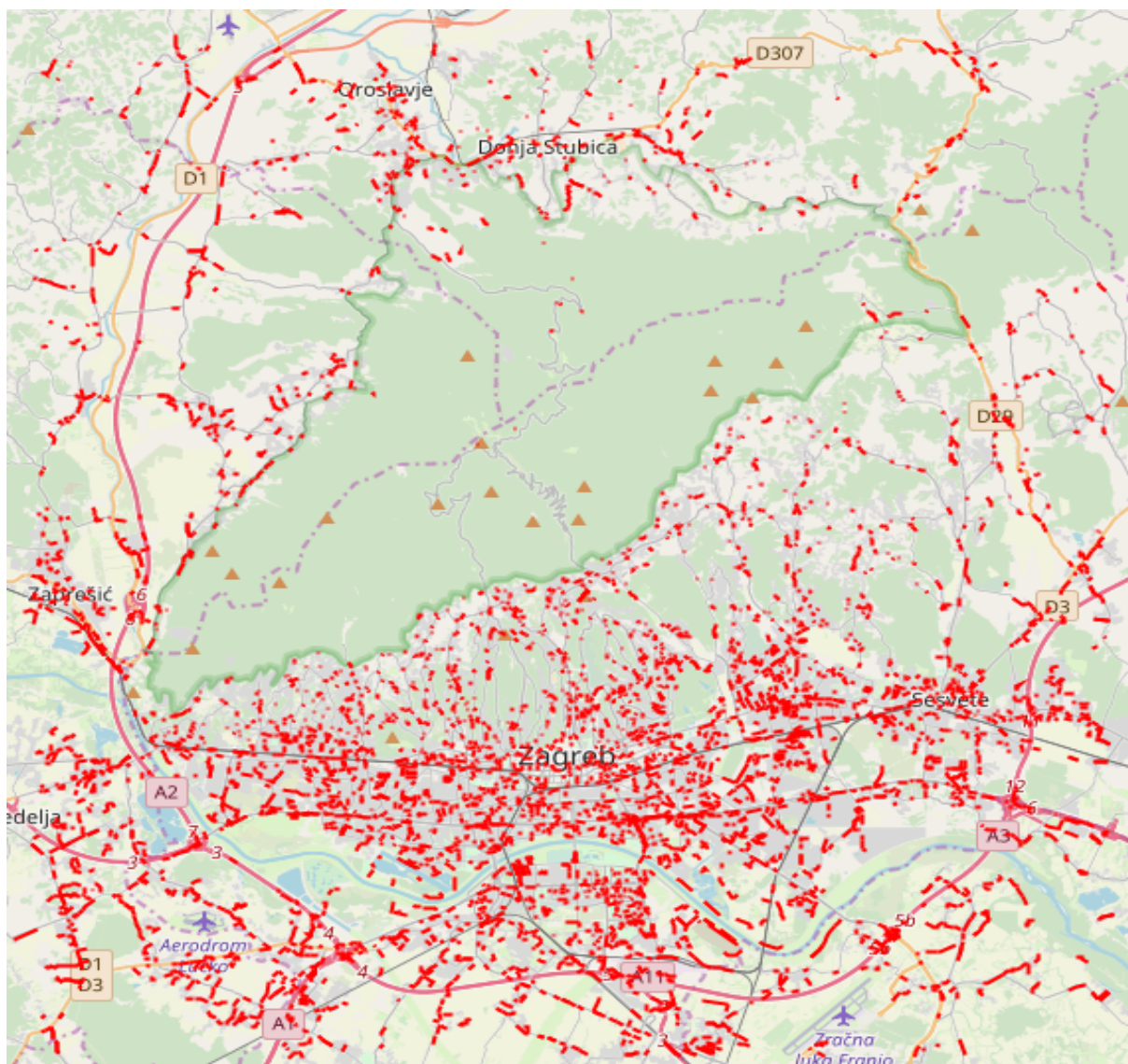
Slika 8.29: Energetski klaster s pretežno pozitivnim vrijednostima



Slika 8.30: Energetski klaster s pretežno negativnim vrijednostima



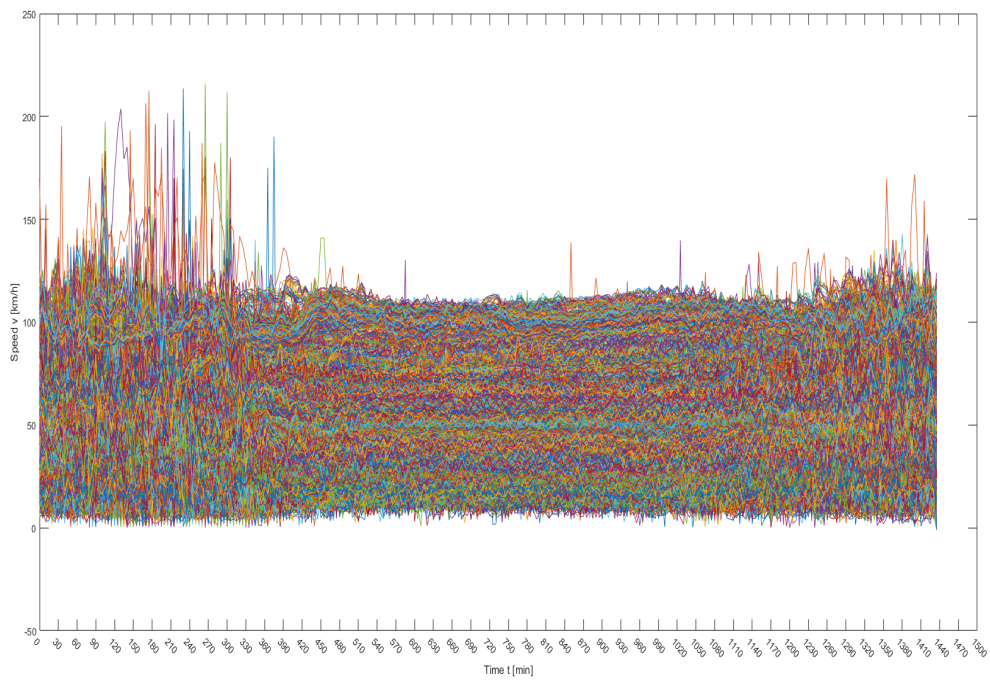
**Slika 8.31:** Energetski klaster rasprostranjen na cijelom području istraživanja



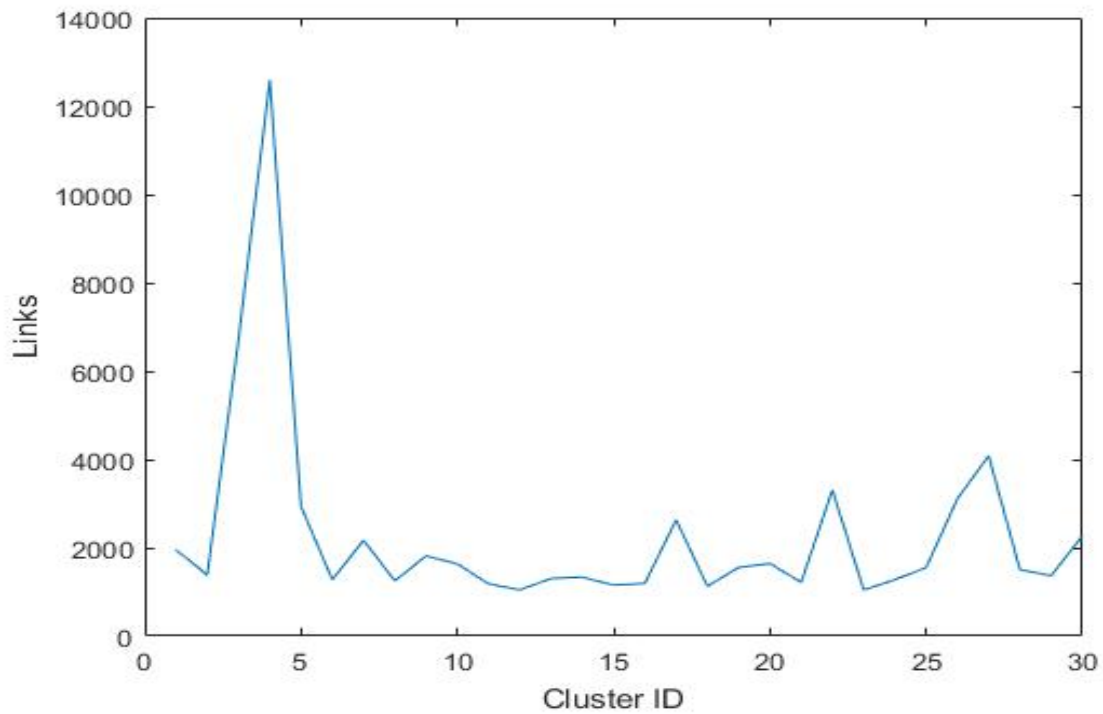
**Slika 8.32:** Energetski klaster za radni tip dana rasprostranjen na cijelom području istraživanja s pretežno pozitivnim vrijednostima

Premda je metoda koljena proizvela rezultat broja klastera sukladan s logikom samih podataka. S obzirom na veliku količinu prometnih segmenata analiziranih u ovom radu, ispostavilo se da broj klastera,  $k$ , nije dovoljan. Podaci unutar grupa klastera nisu ravnopravno raspoređeni te su neki klasteri preopterećeni (Slika 8.33). Nužno je povećanjem broja grupa klastera. Slika 8.34 prikazuje raspodjelu prometnih segmenata pri  $k = 30$ , a Slika 8.36 prikazuje raspodjelu pri  $k = 300$ .

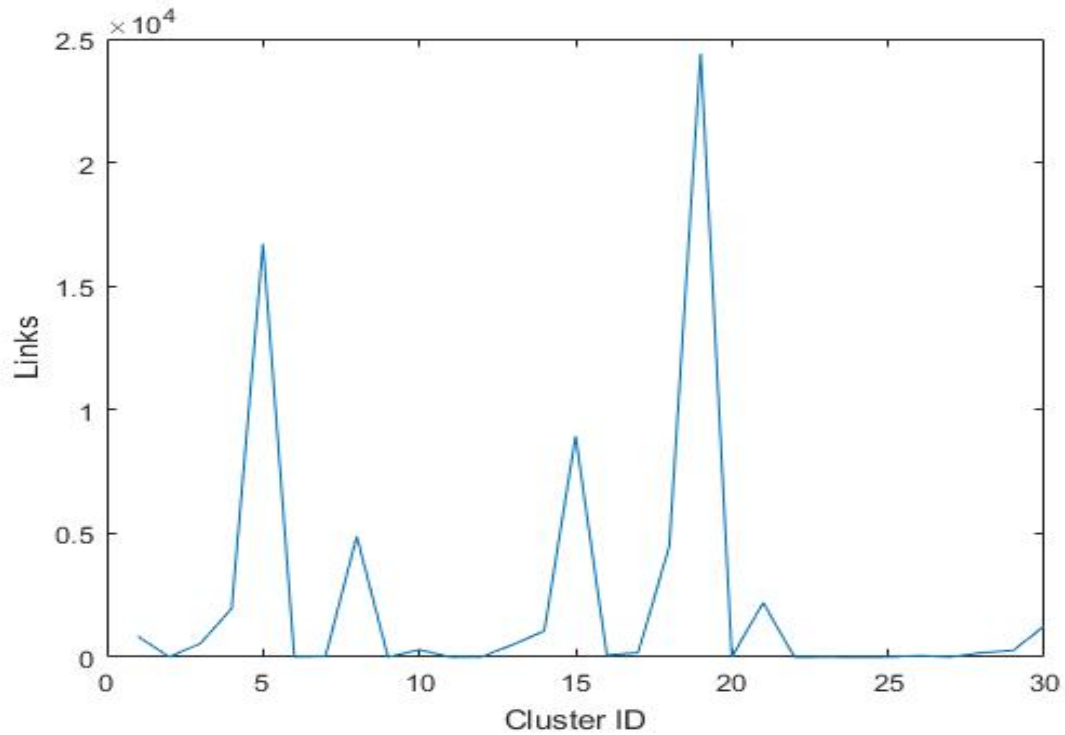




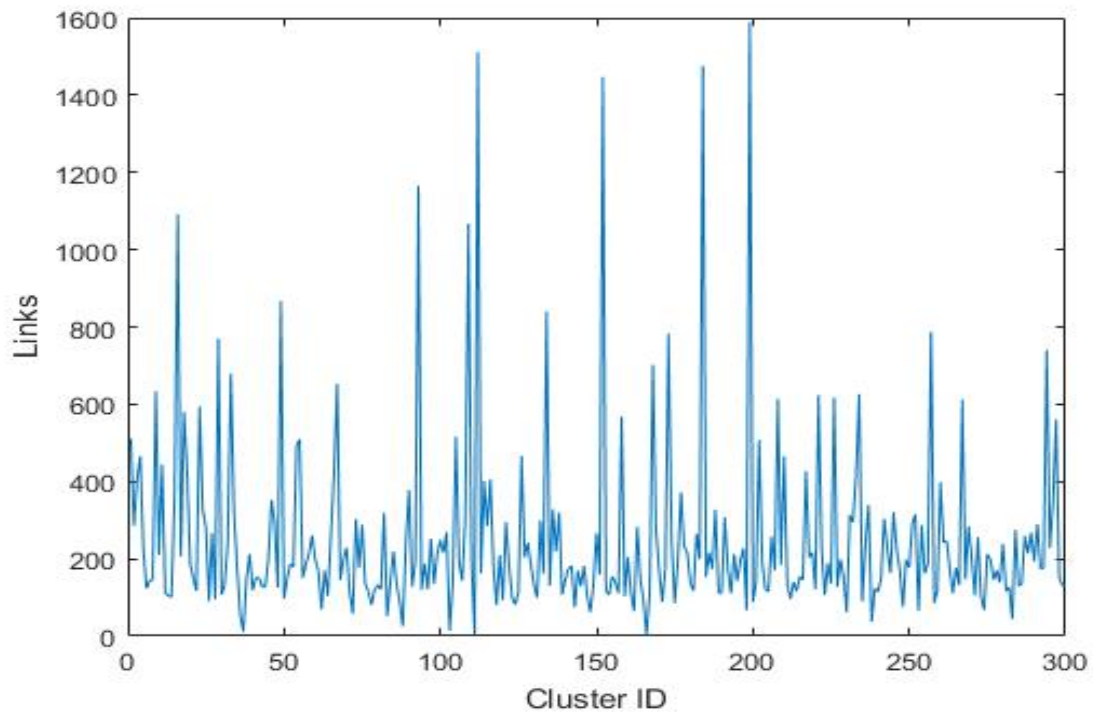
Slika 8.33: Preopterećeni brzinski klaster pri  $k = 30$



Slika 8.34: Raspodjela prometnih segmenata na temelju profila brzine pri  $k = 30$



**Slika 8.35:** Raspodjela prometnih segmenata na temelju energetskeg profila pri  $k = 30$



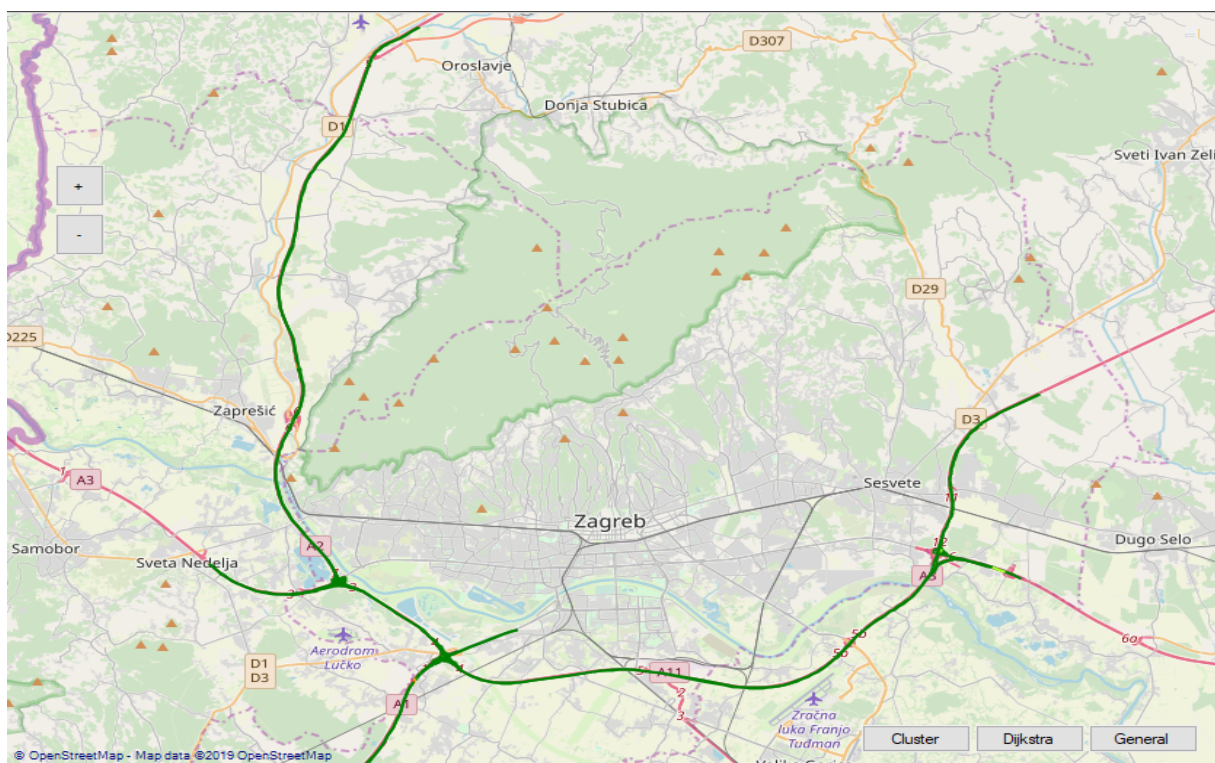
**Slika 8.36:** Raspodjela prometnih segmenata na temelju profila brzine pri  $k = 300$

Uz grupe linkova razrađene u ovom radu, aplikacija korisniku nudi mogućnost vizualnog prikaza grupa linkova određenih od tvrtke Mireo. Slike 8.37, 8.38, 8.39, 8.40, 8.41 i 8.42 pri-

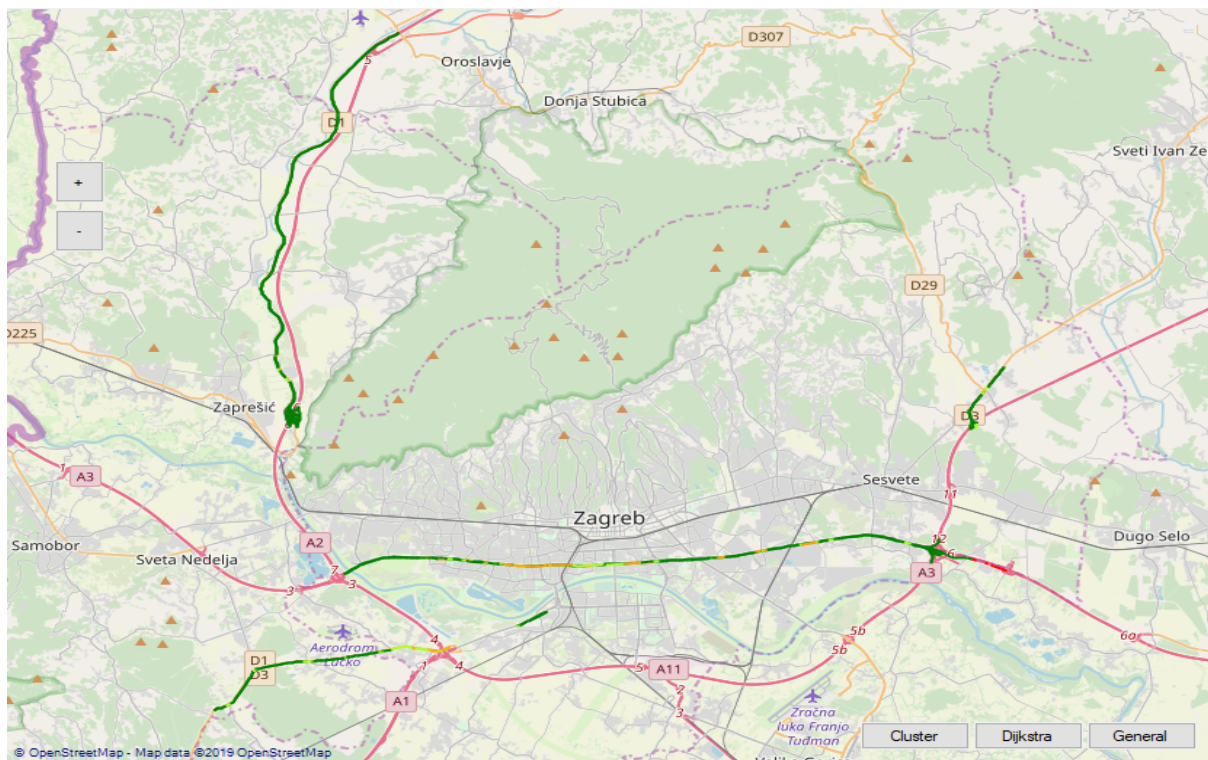
kazuju rezultate grupiranja linkova tvrtke Mireo provedene u okviru projekta SORDITO. Radi lakšeg razumijevanja ilustracija Tablica 8.5 prikazuje neformalni opis identifikacijskih ključeva klastera.

**Tablica 8.5** Opis identifikacijskih ključeva klastera Tvrtke Mireo, [4]

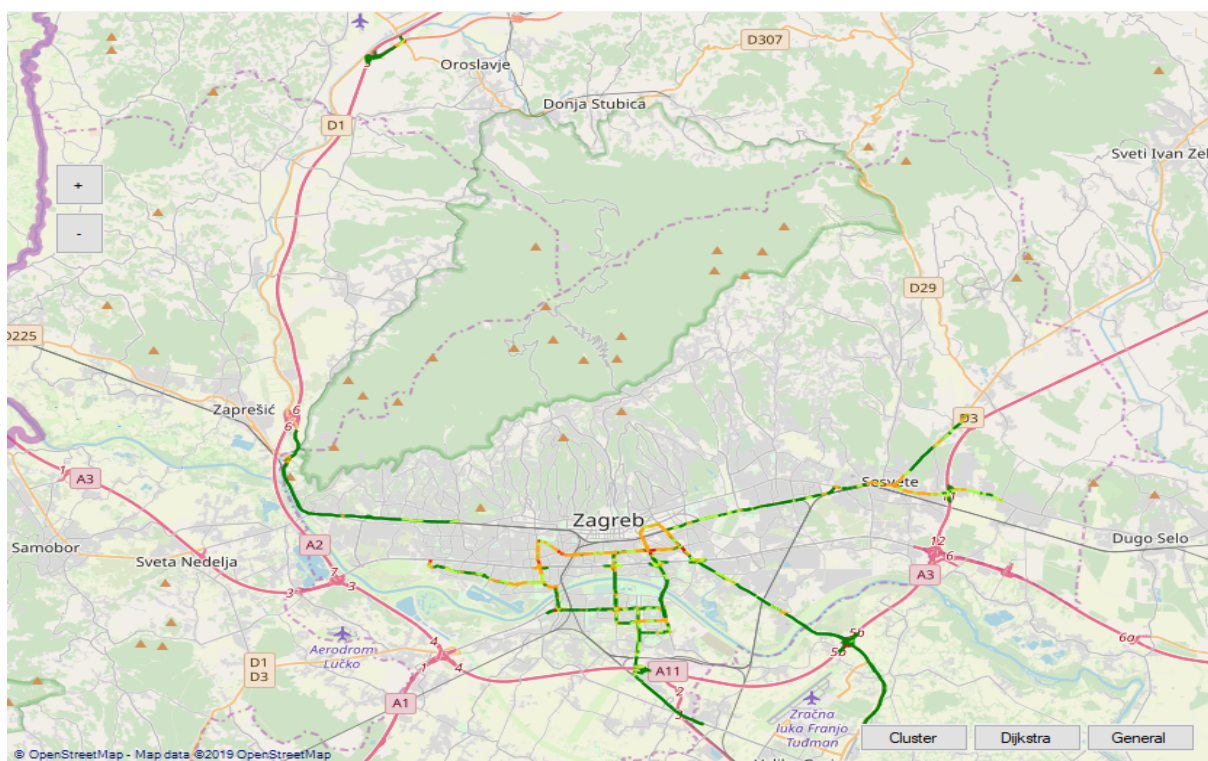
ID	Tip ceste
1010	Autocesta
1030	Brza cesta
1040	Gradske avenije i glavne ceste
1050	Državna cesta
1060	Glavne ulice
1070	Lokalna ulica



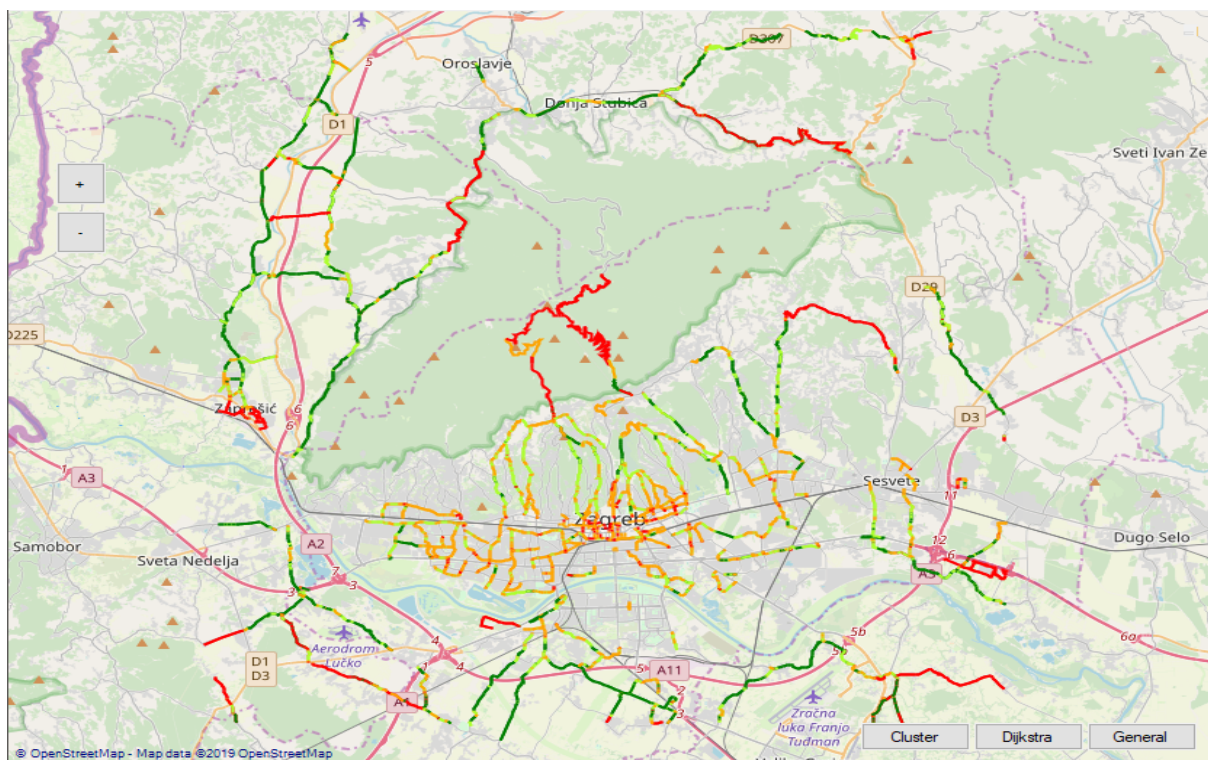
**Slika 8.37:** Vizualni prikaz grupe linkova 1010 određene od tvrtke Mireo



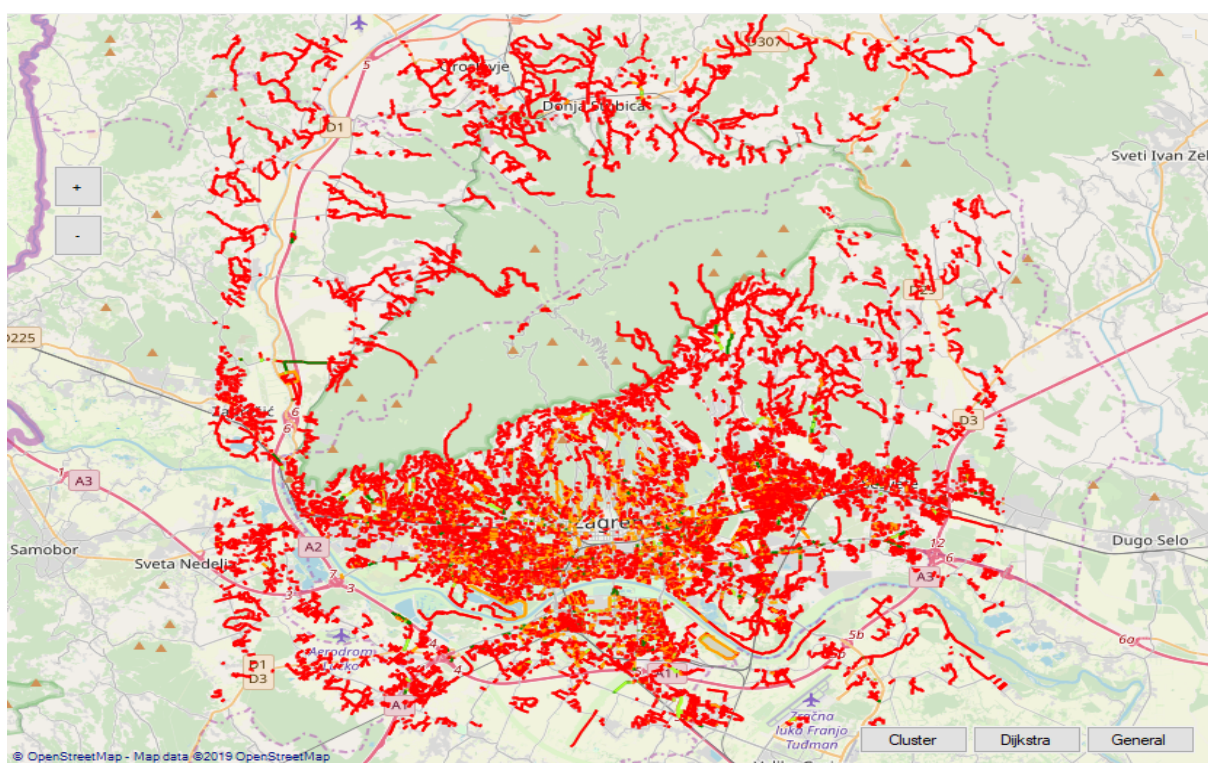
Slika 8.38: Vizualni prikaz grupe linkova 1030 određene od tvrtke Mireo



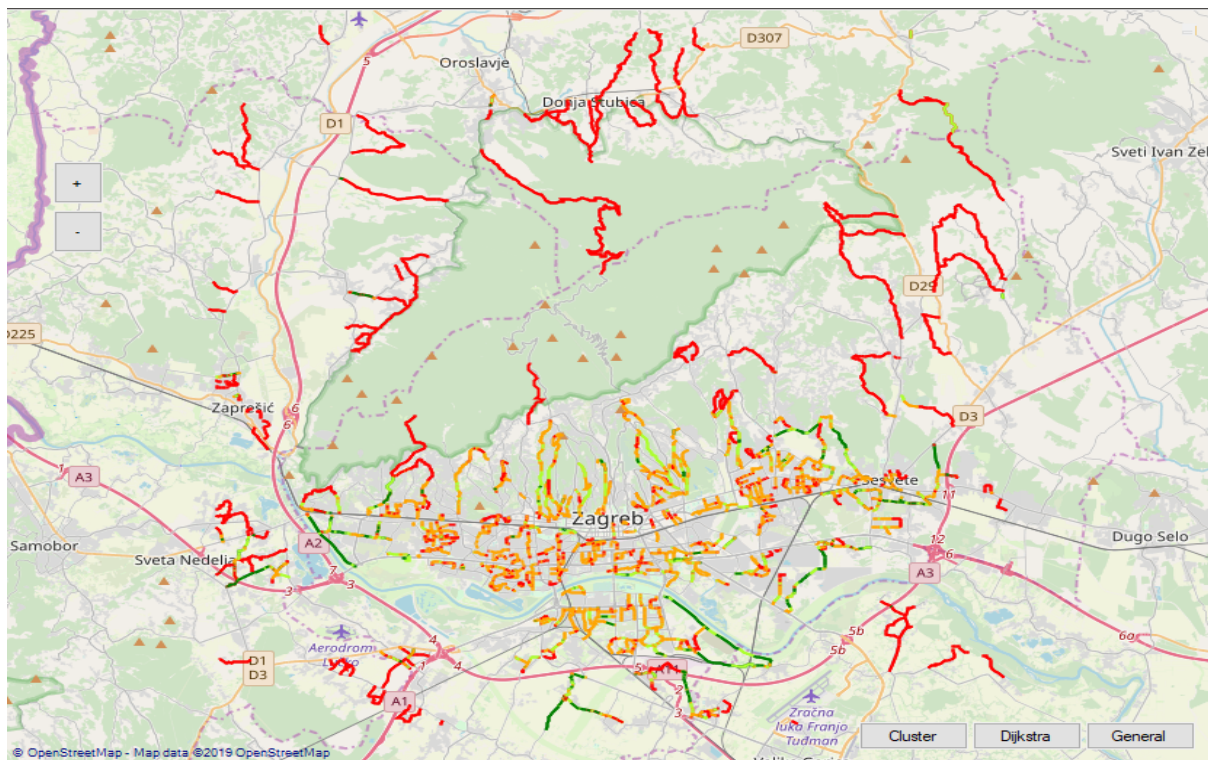
Slika 8.39: Vizualni prikaz grupe linkova 1040 određene od tvrtke Mireo



Slika 8.40: Vizualni prikaz grupe linkova 1050 određene od tvrtke Mireo



Slika 8.41: Vizualni prikaz grupe linkova 1060 određene od tvrtke Mireo



Slika 8.42: Vizualni prikaz grupe linkova 1070 određene od tvrtke Mireo

## 9. Zaključak

Ovaj rad prikazuje razvoj računalnog modela za procjenu i vizualizaciju energetskeg profila mreže prometnica. Korišteni LDM model kombinira generički model kretanja vozila temeljen na fizičkim zakonima s tehničkim specifikacijama električnog vozila. Svrha modela je pretvorba zahtjeva vučne snage preko kotača u zahtjev električne energije iz baterije vozila. Prostorno-vremenska analiza izračuna energije proizvela je rezultate sukladne s prostornom logikom područja istraživanja unutar šire okolice Grada Zagreba. Konstruirano grafičko korisničko sučelje za analizu i prikaz rezultata nudi krajnjem korisniku interaktivan i praktičan uvid u energetske učinkovitost prometnih segmenata urbanog prostora.

Rezultati izračuna potrošnje energije prometnih segmenata omogućavaju modeliranje mreže prometnica u obliku grafa. Čvorovi grafa predstavljaju početne/krajnje točke prometnog segmenta, a bridovi predstavljaju prometnu vezu. Na temelju poznavanja težina bridova grafa, tj. vrijednosti energetskeg profila prometnih segmenta, implementirana je izvedba rutirajućeg algoritama za optimizaciju troškova putovanja. Vizualni prikaz rezultata algoritma pronalaska optimalnog puta pruža krajnjem korisniku mogućnost predputnog planiranja rute te uštede vremena i energije.

Nakon izračuna energetskeg profila korištena je metoda strojnog učenja kako bi se klasterirali prometni segmenti na temelj karakteristika ponašanja, tj. dnevne varijacije energetskeg profila. Grupiranje prometnih segmenata izvršeno je na temelju usporedbe brzinskih ili energetskeg vrijednosti unutar 5-minutnih intervala tokom cijelog dana. Pomoću klasteriranja u ovom radu dobiven je uvid u strukturu i ponašanje mreže prometnica na temelju kojeg se može vidjeti koji dijelovi grada, tj. koji prometni segmenti su učinkovitiji. Ipak, s obzirom na veliku količinu prometnih segmenata analiziranih u ovom radu, ispostavilo se da je broj centara korištenih u ovom radu,  $k = 30$ , nije dovoljan. Za buduća istraživanja trebati će se povećati broj klastera ili primijeniti neka druga metoda klasteriranja poput G-means metode [26].

Konačno, rezultati ovog istraživanja mogu pomoći tvorcima javne i prometne politike razumijeti problematiku i datosti električne automobilizacije unutar područja istraživanja.

# LITERATURA

- [1] Monthly Energy Review. U.S. Energy Information Administration; 2018. Preuzeto sa: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/browser/?tbl=T02.01#/?f=M>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [2] Sources of Greenhouse Gas Emissions. United States Environmental Protection Agency; 2018. Preuzeto sa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [3] Erdelić T, Ravlić M, Carić T. Travel time prediction using speed profiles for road network of Croatia. In: 2016 International Symposium ELMAR; 2016. p. 97–100.
- [4] Rožić L, Carić T, Matulin M, Ravlić M, Fosin J, Milošević A, et al. Tehnički izvještaj rezultata eksperimentalnog razvoja projekta SORDITO. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih Znanosti; 2016.
- [5] Genikomsakis K N, Mitrentsis G. A computationally efficient simulation model for estimating energy consumption of electric vehicles in the context of route planning applications. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017;50:98–118.
- [6] Faiz A, Weaver C, Walsh M. *Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions*. World Bank Publications; 1996.
- [7] Battery Electric Vehicles (BEVs) – not IF but WHEN? x-engineer;. Preuzeto sa: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/battery-electric-vehicles-bev-automotive-industry/>. [Pristupljeno: Srpanj 2019.].
- [8] Asamer J, Anita G, Bernhard H, Mario R. Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2016;46:182–199.
- [9] Erdelić T, Carić T. A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches. *Journal of Advanced Transportation*. 2019;2019:48.



- [10] Erdelić T, Ravlić M. SORDITO-System for Route Optimization in Dynamic Transport Environment. *Promet-Traffic&Transportation*. 2016;28(2):193–194.
- [11] QGIS. QGIS - The Leading Open Source Desktop GIS; 2019. Preuzeto sa: <https://www.qgis.org/en/site/about/index.html>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [12] Tišljarić L. Analysis of Queues and Level of Service on Urban Roads Using Machine Learning Algorithms and NoSQL Database. University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences; 2018. Preuzeto sa: <https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A1285>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [13] Stojanović A. Osvrt na NoSQL baze podataka – četiri osnovne tehnologije. *Polytechnic and design*. 2016;4(1):44–53. Preuzeto sa: <https://hrcak.srce.hr/192140>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [14] MongoDB. NoSQL Databases Explained; 2019. Preuzeto sa: <https://www.mongodb.com/nosql-explained>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [15] Introduction to the C# Language and the .NET Framework. Microsoft; 2015. Preuzeto sa: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/getting-started/introduction-to-the-csharp-language-and-the-net-framework>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [16] Daka E. Parsing and Modeling C# Systems. University of Lugano, Faculty of Informatics; 2009. Preuzeto sa: <https://www.inf.usi.ch/faculty/lanza/Downloads/Daka2009a.pdf>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [17] Abiy T, Pang H, Williams C, Khim J, Ross E. Dijkstra's Shortest Path Algorithm. Brilliant.org; 2019. Preuzeto sa: <https://brilliant.org/wiki/dijkstras-short-path-finder/>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [18] Seven Bridges of Königsberg. Wikimedia Foundation; 2019. Preuzeto sa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Seven\\_Bridges\\_of\\_K%C3%B6nigsberg](https://en.wikipedia.org/wiki/Seven_Bridges_of_K%C3%B6nigsberg). [Pristupljeno: Srpanj 2019.].
- [19] Carić T, Fosin J. Osnovni pojmovi teorije grafova P1; 2016. Preuzeto sa: [https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/1846240/mod\\_resource/content/1/01\\_2012\\_10\\_16%20kineski\\_postar\\_ispravak\\_2016.pdf](https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/1846240/mod_resource/content/1/01_2012_10_16%20kineski_postar_ispravak_2016.pdf). [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [20] Marjanović A. Problem sedam mostova Koeningsberga. Prirodoslovno-Matematički Fakultet; 2012. Preuzeto sa: <http://mapmf.pmfst.unist.hr/~ani/radovi/>

zavrzni/Marijanovic\_Ana\_Problem\_sedam\_mostova.pdf. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].

- [21] Golemac A, Mimica A, Vučićić T. Od koenigsberških mostova do kineskog poštara. *mathe*. 2012;27(6). Preuzeto sa: <http://e.math.hr/category/klju-ne-rije-i/teorija-grafova>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [22] Eisner J, Funke S, Storandt S. Optimal route planning for electric vehicles in large networks. In: *Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence*; 2011. p. 1108–1113.
- [23] Carić T, Ivanjko E. Graf i Dijkstra algoritam; 2011. Preuzeto sa: [https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/1762082/mod\\_resource/content/1/012\\_2013-04-05%20P12%20ALGPRO%20-%20Graf%20i%20Dijkstra.pdf](https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/1762082/mod_resource/content/1/012_2013-04-05%20P12%20ALGPRO%20-%20Graf%20i%20Dijkstra.pdf). [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [24] Samuel A Lee. Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. *IBM Journal of Research and Development*. 1959;3(3):535–554. Preuzeto sa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.368.2254&rep=rep1&type=pdf>. [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [25] Carić T, Fosin J. Lokacijsko alokacijski problemi P5;. Preuzeto sa: [https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/1846254/mod\\_resource/content/1/%212013\\_11\\_19\\_opp\\_multi\\_source\\_weber\\_FINAL\\_v5.pdf](https://moodle.srce.hr/2018-2019/pluginfile.php/1846254/mod_resource/content/1/%212013_11_19_opp_multi_source_weber_FINAL_v5.pdf). [Pristupljeno: Srpanj, 2019.].
- [26] Erdelić T, Vrbančić S, Rožić L. A model of speed profiles for urban road networks using G-means clustering. In: *2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*; 2015. p. 1081–1086.

# POPIS SLIKA

2.1. Učinkovitost električnog vozila, [7] . . . . .	5
2.2. Učinkovitost vozila na unutarnje izgaranje, [7] . . . . .	5
2.3. Tok električne energije u tipičnom električnom vozilu, [8] . . . . .	5
2.4. Sile koje djeluju na vozilo pri kretanju uzbrdo, [8] . . . . .	7
3.1. Prikaz prikupljenih podataka na teritoriju Republike Hrvatske, [4] . . . . .	9
3.2. CSV format linkova . . . . .	10
3.3. CSV format linka . . . . .	12
3.4. C# algoritam pretvorbe UTC zapisa u čitljiv oblik . . . . .	13
3.5. Prikaz dijela konačnog zapisa obrađenih podataka . . . . .	14
3.6. Graf profila brzine na segmentu Mosta slobode u smjeru sjevera . . . . .	14
3.7. Prikaz vrijednosti nadmorskih visina na promatranom području Zagrebačke županije i Grada Zagreba . . . . .	16
4.1. Graf profila energije na segmentu autoceste A1 u smjeru juga . . . . .	22
4.2. Graf profila akceleracije . . . . .	23
4.3. Graf profila brzine . . . . .	23
5.1. C# model, [16] . . . . .	25
6.1. Raspored mostova Königsberga, [19] . . . . .	26
6.2. Prikaz mostova Königsberga pomoću grafa . . . . .	27
6.3. Prikaz simetričnog i asimetričnog grafa, [19] . . . . .	28
6.4. Vizualni prikaz rezultata rutirajućeg algoritma . . . . .	33
6.5. Statistički prikaz rezultata rutirajućeg algoritma . . . . .	34
7.1. K-Means algoritam, [25] . . . . .	36
7.2. Metoda koljena . . . . .	37
7.3. Rezultat grupiranja na temelju profila brzine . . . . .	38
7.4. Rezultat grupiranja na temelju energetskog profila . . . . .	38
8.1. Grafičko korisničko sučelje . . . . .	40

8.2.	Glavna kontrolna ploča za iscrtavanje linkova . . . . .	40
8.3.	Prozor za izmjenu osnovnih postavki promatranog vozila . . . . .	41
8.4.	Usporedba profila brzine u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom radnog dana . . . . .	43
8.5.	Usporedba profila brzine u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom vikenda	43
8.6.	Usporedba profila akceleracije u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom radnog dana . . . . .	44
8.7.	Usporedba profila akceleracije u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom vikenda . . . . .	44
8.8.	Usporedba energetskog profila u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom radnog dana . . . . .	45
8.9.	Usporedba energetskog profila u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu tijekom vikenda . . . . .	45
8.10.	Pravokutnik generiran od strane korisnika . . . . .	46
8.11.	Graf akceleracijskih vrijednosti promatranog linka . . . . .	47
8.12.	Uvećani graf akceleracijskih vrijednosti promatranog linka . . . . .	47
8.13.	Graf profila brzine na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnog dana . . . . .	48
8.14.	Graf profila brzine na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom vikenda . . . . .	48
8.15.	Graf akceleracijskog profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnog dana . . . . .	49
8.16.	Graf akceleracijskog profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom vikenda . . . . .	49
8.17.	Graf energetskog profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom radnog dana . . . . .	50
8.18.	Graf energetskog profila na segmentu Jadranskog mosta u smjeru sjevera tijekom vikenda . . . . .	50
8.19.	Kontrolna ploča Dijkstrinog algoritma . . . . .	51
8.20.	Vizualni prikaz energetski optimalne rute . . . . .	53
8.21.	Uvećani prikaz rezultata izračuna energetski optimalne rute . . . . .	53
8.22.	Izračun vremenski optimalne rute . . . . .	54
8.23.	Izračun optimalne rute prema udaljenosti . . . . .	55
8.24.	Regeneracija energije pri vožnji niz Medvednicu . . . . .	56
8.25.	Utrošak energije pri vožnji uzbrdo . . . . .	57
8.26.	Kontrolna ploča za grupiranje linkova . . . . .	58
8.27.	Grupiranje linkova tijekom radnog dana na temelju brzinskih zapisa . . . . .	60

8.28. Grupiranje linkova tijekom vikenda na temelju brzinskih zapisa . . . . .	60
8.29. Energetski klaster s pretežno pozitivnim vrijednostima . . . . .	61
8.30. Energetski klaster s pretežno negativnim vrijednostima . . . . .	61
8.31. Energetski klaster rasprostranjen na cijelom području istraživanja . . . . .	62
8.32. Energetski klaster za radni tip dana rasprostranjen na cijelom području istraživanja s pretežno pozitivnim vrijednostima . . . . .	63
8.33. Preopterećeni brzinski klaster pri $k = 30$ . . . . .	64
8.34. Raspodjela prometnih segmenata na temelju profila brzine pri $k = 30$ . . . . .	64
8.35. Raspodjela prometnih segmenata na temelju energetskog profila pri $k = 30$ . . . . .	65
8.36. Raspodjela prometnih segmenata na temelju profila brzine pri $k = 300$ . . . . .	65
8.37. Vizualni prikaz grupe linkova 1010 određene od tvrtke Mireo . . . . .	66
8.38. Vizualni prikaz grupe linkova 1030 određene od tvrtke Mireo . . . . .	67
8.39. Vizualni prikaz grupe linkova 1040 određene od tvrtke Mireo . . . . .	67
8.40. Vizualni prikaz grupe linkova 1050 određene od tvrtke Mireo . . . . .	68
8.41. Vizualni prikaz grupe linkova 1060 određene od tvrtke Mireo . . . . .	68
8.42. Vizualni prikaz grupe linkova 1070 određene od tvrtke Mireo . . . . .	69

# POPIS TABLICA

3.1. Opis atributa linka . . . . .	11
3.2. Opis podataka . . . . .	11
3.3. Usporedba relacijski i NoSQL baza podataka, [14] . . . . .	18
4.1. Parametri modela i tehničke specifikacije Nissan Leaf vozila, [5] . . . . .	19
4.2. Parametri jednadžbe za izračun sile potrebne za savladavanje otpora . . . . .	20
4.3. Oznake u algoritmu izračuna energetskega profila linka . . . . .	21
6.1. Oznake u algoritmu pronalaska najmanje energetske vrijednosti . . . . .	30
6.2. Oznake u Dijkstra algoritmu . . . . .	30
6.3. Oznake u algoritmu dohvaćanja putanje . . . . .	32
8.1. Naredbe unutar glavne kontrolne ploče . . . . .	41
8.2. Korištene boje pri iscrtavanju profila . . . . .	42
8.3. Naredbe unutar Dijkstra kontrolne ploče . . . . .	52
8.4. Naredbe unuta kontrolne ploče za grupiranje linkova . . . . .	59
8.5. Opis identifikacijskih ključeva klastera Tvrtke Mireo, [4] . . . . .	66



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom **Određivanje energetskog profila prometnice na temelju povijesnih  
zapisa o kretanju vozila**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom  
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 25.3.2019 \_\_\_\_\_

Nikola Mardešić  
\_\_\_\_\_  
(potpis)