

# Primjena GIS-a u određivanju optimalnih lokacija punjača za električna vozila

---

**Bolješić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geodesy / Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:256:142549>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-06**



*Repository / Repozitorij:*

[repozitorij.geof.unizg.hr/en](https://repozitorij.geof.unizg.hr/en)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Josip Bolješić

**PRIMJENA GIS-A U ODREĐIVANJU OPTIMALNIH  
LOKACIJA PUNJAČA ZA ELEKTRIČNA VOZILA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

**Josip Bolješić ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2024.**



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Josip Bolješić

**PRIMJENA GIS-A U ODREĐIVANJU  
OPTIMALNIH LOKACIJA PUNJAČA ZA  
ELEKTRIČNA VOZILA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

# SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

## GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br. 1\_349\_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26.10.2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenata te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

### IZJAVLJUJEM

Ja, **Josip Bolješić**, (JMBAG: 0007181518), rođen dana 26.12.1999., izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, dana 21.6.2024.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters, positioned above a horizontal line.

*Potpis studenta / studentice*

| <b>I. AUTOR</b>   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime:</b>   | Josip Bolješić  |
| <b>Datum i mjesto rođenja:</b>                                  | 26.prosinca 1999.   |
| <b>II. DIPLOMSKI RAD</b>  |   |
| <b>Naslov:</b>  | Primjena GIS-a u određivanju optimalnih lokacija punjača za električna vozila |
| <b>Broj stranica:</b>   | 49  |
| <b>Broj tablica:</b>  | 1   |
| <b>Broj slika:</b>  | 22  |
| <b>Broj bibliografskih podataka:</b>                            | 18 + 32 URL   |
| <b>Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:</b>                   | Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu                                      |
| <b>Mentor:</b>  | prof. dr. sc. Mario Miler   |
| <b>Komentor:</b>  | prof. dr. sc. Dino Dobrinić   |
| <b>Voditelj:</b>  |   |
| <b>III. OCJENA I OBRANA</b>                                     |   |
| <b>Datum zadavanja teme:</b>                                    | 12.1.2023.  |
| <b>Datum obrane rada:</b>                                       | 21.6.2024.  |
| <b>Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:</b> | Prof. dr. sc. Damir Medak   |
|   | Izv. prof. dr. sc. Mario Miler  |
|   | Doc. Dr. sc. Luka Rumora  |

## **Zahvala**

Zahvaljujem mentoru izv.prof.dr.sc. Mariu Mileru i voditelju dr.sc. Dinu Dobriniću na ukazanom povjerenju i sveukupnoj pomoći pruženoj kroz čitavo trajanje studija. Također, zahvaljujem obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i pomoći.

Posebnu zahvalu želim posvetiti svojoj majci, koja je slušala svaku moju brigu i uvijek imala riječ utjehe, znala imena teškim predmetima i ocjene s kojima sam ih položio, vjerovala u mene i onda kada ja nisam, brinula puno manje od mene i veselila se svakom mojem uspjehu više od mene.

## ***Primjena GIS-a u određivanju optimalnih lokacija punjača za električna vozila***

**Sažetak:** Električna vozila su vozila koja koriste električnu energiju umjesto fosilnih goriva za pogon, čime smanjuju emisije štetnih plinova i doprinose održivijem životnom stilu. Pad cijena električnih vozila i napredak u tehnologiji baterija doprinijeli su njihovoj sve većoj popularnosti. Nova generacija ovakvih vozila nudi vozačima veću autonomiju i brže vrijeme punjenja, što dodatno potiče njihovu upotrebu. Cilj ovog projekta je generirati nove optimalne lokacije za punionice električnih vozila (EV) koristeći Python 3.8.10 i QGIS 3.16.14. Projekt će se temeljiti na kodu koji je napisao Obed Sims, a može se pronaći na sljedećem linku: <https://towardsdatascience.com/where-should-we-be-placing>. Korištenjem Pythona i alata QGIS-a, projekt ima za cilj analizirati različite faktore kao što su gustoća prometa, potražnja za punjenjem i dostupnost potencijalnih lokacija poput parkirališta. Ti faktori će se uzeti u obzir pri identifikaciji optimalnih lokacija za nove punionice korištenjem MILP metode programirane u Pythonu. Generirane lokacije će maksimizirati iskoristivost punionica i pružiti korist lokalnoj zajednici. Gradovi poput Zagreba prepoznaju važnost razvoja infrastrukture punionica kako bi podržali rast električne mobilnosti. Ulaganja u mrežu brzih punionica duž glavnih prometnih koridora i na strateškim lokacijama unutar grada pomažu u smanjenju prepreka za vlasnike električnih vozila i potiču prijelaz na održivije oblike prijevoza.

**Ključne riječi:** električna vozila, punionica, Python 3.8.19, QGIS 3.16.14, MILP metoda

## ***The Application of GIS in Determining Optimal Locations for Electric Vehicle Chargers***

**Summary:** *Electric vehicles are vehicles that use electric power instead of fossil fuels for propulsion, thereby reducing harmful emissions and contributing to a more sustainable lifestyle. The decrease in the cost of electric vehicles and advancements in battery technology have contributed to their increasing popularity. The new generation of these vehicles offers drivers greater autonomy and faster charging times, further promoting their usage. The aim of this project is to generate new optimal locations for electric vehicle charging stations (EV) using Python 3.8.10 and QGIS 3.16.14. The project is based on the code written by Obed Sims, which can be found at the following link: <https://towardsdatascience.com/where-should-we-be-placing>. By utilizing Python and the QGIS tools, the project aims to analyze various factors such as traffic density, charging demand and availability of potential locations as parking lots. These factors will be considered in identifying optimal locations for new charging stations by using MILP method programmed in Python. The generated locations will maximize the utilization of charging stations and provide benefits to the local community. Cities like Zagreb recognize the importance of developing charging infrastructure to support the growth of electric mobility. Investments in a network of fast charging stations along major traffic corridors and strategic locations within the city help reduce barriers for electric vehicle owners and encourage a transition to more sustainable forms of transportation.*

**Keywords:** *electric vehicles, charger, Python 3.8.19, QGIS 3.16.14, MILP method*



## SADRŽAJ

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1. UVOD.....                        | 1  |
| 1.1 PREGLED DOSADAŠNJIH RADOVA..... | 3  |
| 2. MATERIJALI I METODE.....         | 9  |
| 2.1 OPENSTREETMAP.....              | 9  |
| 2.2 PORTAL OTVORENIH PODATAKA.....  | 11 |
| 2.3 MILP ALGORITAM.....             | 12 |
| 2.4 PYTHON.....                     | 22 |
| 2.5 QGIS.....                       | 27 |
| 3. REZULTATI.....                   | 31 |
| 4. DISKUSIJA.....                   | 34 |
| 5. ZAKLJUČAK.....                   | 35 |
| LITERATURA.....                     | 36 |
| POPIS URL-OVA.....                  | 37 |
| POPIS SLIKA.....                    | 39 |
| POPIS TABLICA.....                  | 39 |
| ŽIVOTOPIS.....                      | 40 |

## 1. UVOD

Programski jezik Python i QGIS softver zajedno čine moćan alat kod izvršavanja kompleksnih prostornih upita i analiza (URL 1). Dok je QGIS moćan u vizualizaciji, Python je programski jezik koji omogućuje pregledno pisanje složenih algoritama za prostornu analizu.

Glavni trošak električnog vozila je njegova baterija. Visoka cijena energetski gustih baterija znači da su električna vozila već dugo vremena značajno skuplja od svojih ekvivalenata koji koriste fosilna goriva. Unapređenja u tehnologiji i manufakturi električnih vozila uzrokovala su pad u njihovoj cijeni i porast u prodaji. Trend pada cijena električnih vozila usko je povezan sa smanjenjem troškova u proizvodnji litij-ionskih baterija za električne automobile. Prema nedavnoj analizi Goldmana Sachsa predviđa se da će cijene baterija za električne automobile kroz 2024. i 2025. samo nastaviti padati (URL 2). Proizvođači (manufakture) ovakvih baterija pronalaze načine da pojednostave proizvodnju baterija kroz inovacije u strukturi baterije koja omogućuje jednostavnije pakiranje i korištenje materijala poput silicija koji značajno smanjuje vrijeme punjenja i povećava gustoću energije. Nove strukture baterija poput povećanih cilindričnih ćelija omogućavaju jednostavniji proizvodni proces paketa i smanjenje vremena i rada stroja. Pored razvitaka u tehnologiji manufakture litij-ionskih baterija, padu njihove cijene značajno doprinosi pad cijene sirovina potrebnih za njihovu izradu. Cijene litija, nikla i kobalta, koji se obično koriste u anodama baterija, značajno pokreću ukupni pad njihove cijene (URL 3). Proizvođači baterija koriste anodne materijale na bazi silicija, koji se miješa s grafitom ili ga u potpunosti zamjenjuje. Stvoreni materijal je značajno niže cijene od prethodnih, a posjeduje kvalitetu visoke gustoće energije. Cijenama katodnih materijala također se prognozira pad u nadolazećim godinama. Zabilježen pad cijena katodnih materijala iznosi 41.9%, a anodnih materijala 17.6%. Smanjenje troškova proizvodnje baterijskih ćelija značajno ublažava pritisak izazvan visokim cijenama električne energije u Europi. Posljednji faktor koji je potrebno uzeti u obzir su poticaji i subvencije država. Rumunjska se nalazi na prvome mjestu za pružanje najviših prosječnih poticaja za kupnju električnih vozila u razdoblju 2020.-2023. (URL 4). Njihova vlada potiče vozače nudeći im bespovratna sredstva od 11 500 eura za kupnju novog električnog vozila i odlaganje starog vozila s unutarnjim izgaranjem na otpad. Ovaj korak doveo je do povećanja prodaje električnih vozila u Rumunjskoj od čak 79%. Na drugom kraju ove ljestvice podijeljenih poticaja nalazi se osam zemalja koje uopće nisu ponudile potporu u posljednje četiri godine. Te su zemlje Belgija, Bugarska, Češka, Danska, Island, Latvija, Malta i Švicarska. Motiv za uskraćivanje ovih poticaja razlikuje se s

obzirom na ekonomije i prioritete država. U razvijenijim državama nema velike potrebe za ovim poticajima, a u manje razvijenim državama poticaji za kupnju električnih automobila ne predstavljaju prioritet i nemaju svoj udio u državnoj blagajni.

Podaci pokazuju kako je rast prodaje električnih automobila u značajnom porastu u sjevernoj i zapadnoj Europi, a sličan trend je sve više prisutan i kod nas. Tržište električnih automobila u Hrvatskoj u 2021. godini poraslo je za nešto više od 150% (URL 5).

Rastuća zabrinutost radi iscrpljivosti, tj. ograničenosti fosilnih goriva ukazala je na električna vozila kao adekvatnu alternativu za razliku od vozila s unutarnjim izgaranjem (Alam i dr. 2021). Električna vozila predstavljaju prekretnicu u korištenju fosilnih goriva kao jedinog izvora energije za kretanje vozila, prvenstveno automobila. Nekoliko svjetskih velesila poput SAD-a i Kine započelo je prelazak na električne automobile kao prioritetnu mjeru za postizanje ciljeva sprječavanja i usporavanja klimatskih promjena. Do sada je čak 17 zemalja najavilo kao cilj postupno ukidanje vozila s unutarnjim izgaranjem do 2050. godine (URL 6). Električni automobili predstavljaju ekološki osviješteno rješenje za svakodnevne potrebe prijevoza, no unatoč tome ne smiju se zanemariti utjecaji na okoliš koji prate izradu električnih automobila, preciznije litij-ionskih baterija. Litij-ionske baterije, koje su najčešće primijenjene baterije u električnim automobilima, sadrže dvije energijom bogate sirovine: litij i kobalt. Rudarenje ova dva metala moralo je doseći nove, rekordne razine kako bi se zadovoljila rastuća potražnja. Eksploatacija litija je proces koji je poznat po tome što je izuzetno štetan za okoliš i troši naročito puno resursa. Vađenje jedne tone litija koristi čak 2 milijuna litara vode. Unatoč tome što proizvodnja električnih automobila ima svojih negativnih aspekata za okoliš, njihov dugoročni doprinos smanjenju emisija stakleničkih plinova i zagađenja zraka čini ih ključnim za održivu budućnost okoliša. Više od 30% zagađenja zraka proizlazi iz motora vozila koji koriste dizel kao gorivo, što jasno naznačuje gdje je potrebno raditi promjene (Lee i dr. 2021).

Porast broja vlasnika električnih automobila jasno implicira potrebu za proširenjem i optimizacijom postojeće mreže punjača za električna vozila. S obzirom na to da se sve više vozača opredjeljuje za električna vozila zbog ekoloških prednosti i smanjenja kućanskih troškova (ušteta na gorivu), infrastruktura punjača kroz prometnu mrežu mora uspjeti pratiti ovaj rast kako bi se spriječili potencijalni problemi s dostupnošću i kapacitetima punjača. Ključni izazov ovog pothvata je osigurati dovoljno punjača u sredinama gdje je gustoća stanovništva visoka (urbane sredine, velegradovi), a potreba za brzim i efikasnim punjenjem kritična. Drugi izazov predstavlja proširenje mreže na rjeđe naseljenim područjima (ruralne sredine, autoceste) kako bi se omogućilo bezbrižno putovanje na

velike udaljenosti, bez straha od nestanka energije daleko od prvog sljedećeg punjača. Konkretni slučaj u gradu Zagrebu je takav da se većina lokacija gdje su potrebni punjači nalazi u područjima izvan centra. Centar Zagreba i ostale lokacije frekventnog prometa u gradu Zagrebu imaju zadovoljene potrebe za punjačima električnih vozila. Optimizacija mreže punjača ne uključuje samo dodavanje novih punjača kako bi se povećao njihov ukupni broj, već i pozicioniranje punjača na lokacije koje su vozaču najpogodnije. Kako bi se pronašle takve optimalne lokacije, u analizu se ulazi s nekoliko relevantnih faktora za određivanje: postojeći punjači, postojeći parkinzi i garaže, cestovna infrastruktura i prometnost. Prometnost je u ovome radu definirana kao broj automobila koji prijelazi određenom dionicom ceste unutar 24 sata mjerenja.

## 1.1 PREGLED DOSADAŠNJIH RADOVA

Razvoj tržišta električnih automobila potaknuo je prva istraživanja o optimalnim lokacijama i veličini infrastruktura za punjenje. U istraživanju Bian i dr. (2018.) su prvi koristili MILP (engl. *Mixed Integer Linear Programming*) model temeljen u GIS-u (engl. *Geographic Information System*) kako bi pronašli optimalne lokacije za nove stanice za punjenje električnih automobila u gradovima. Pristup ovome problemu je u ovome znanstvenom radu uzeo u obzir prometnost ulica, klasifikaciju upotrebe zemljišta i šest različitih ograničenja. U ovome je radu objektivna funkcija MILP modela maksimalno povećati profit ostvaren novim stanicama za punjenje. Visoke cijene električnih automobila, njihov ograničeni doseg, dugo vrijeme punjenja i manjak široko rasprostranjene infrastrukture za punjenje prepoznati su kao glavne prepreke u rastu popularnosti električnih automobila. Iako već postoje različita istraživanja koja se bave ekonomijom stanica za punjenje, većina njih se prvenstveno bavi troškovima postavljanja stanica, a ne profitom koji bi se ostvario postavljanjem stanica na optimalne lokacije. Istraživanja o optimalnim lokacijama stanica za punjenje, usmjerena na maksimiziranje profita, važna su zato što veći povrati na investicije potiču veća ulaganja u budućnosti, a samim time i porast u potražnji za električnim automobilima. Varijable odlučivanja u ovome modelu su lokacije stanica za punjenje, broj brzih i sporih punjača koje je potrebno postaviti na pojedinoj stanici i potražnja za punjenjem na pojedinoj stanici. S ciljem povećanja povrata na ulaganja u stanice za punjenje, u MILP modelu koristi se funkcija za maksimiziranje ukupnog profita svih novih stanica:

$$\text{Pr}(x_j, n_j, q_j) = \sum_{j=1}^J [p_j * t_j * x_j * q_j - c_j], \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (1)$$

gdje je  $Pr$  ukupni profit ostvaren novim stanicama iz istraživanja;  $p_j$  je cijena punjenja po minuti na stanici  $j$ ;  $t_j$  je procijenjeno vrijeme punjenja do maksimalnog kapaciteta baterije na stanici  $j$ ;  $q_j$  je potražnja za punjenjem koju pokriva stanica  $j$ ;  $c_j$  je ukupni trošak stvoren stanicom  $j$  i  $x_j$  je binarna varijabla odlučivanja koja je definirana kao

$$x_j = 1 \quad (2)$$

ako na parkiralištu  $j$  postoji stanica za punjenje i

$$x_j = 0 \quad (3)$$

ako ne postoji.

S ciljem ostvarivanja maksimalnog profita, funkciji (1) potrebno je dodati ograničenja koje je potrebno zadovoljiti u modelu:

- ograničenje kapaciteta (4),
- ograničenje potražnje (5),
- ograničenje dodjeljivanja (6),
- ograničenje broja punjača po stanici (7),
- ograničenje ukupnog broja stanica (8) i
- ograničavanje broja stanica na skup pozitivnih i cijelih brojeva (10).

Formule za navedena ograničenja su sljedeće:

$$q_j \leq n_j * m_j, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (4)$$

$$q_j \leq \sum_{i=1}^I r_{ij} * dr_i, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j * r_{ij} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (6)$$

$$n_j \leq x_j, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (7)$$

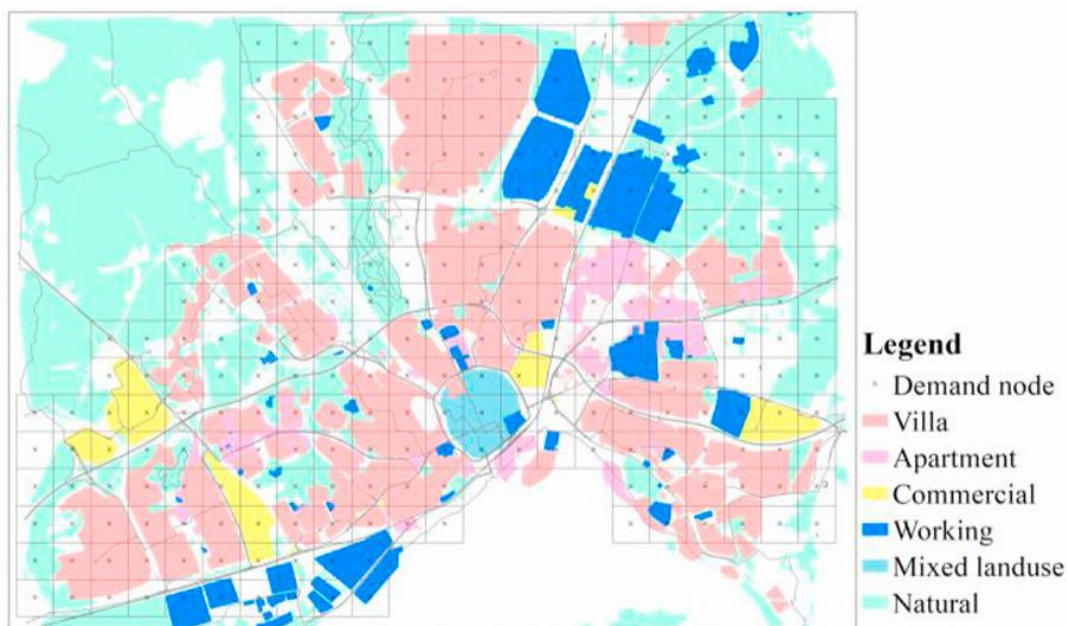
$$n_j \leq l_j * x_j, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J x_j = N, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (9)$$

$$x_j, n_j \geq 0, x_j, n_j \in \mathbf{Z}. \quad (10)$$

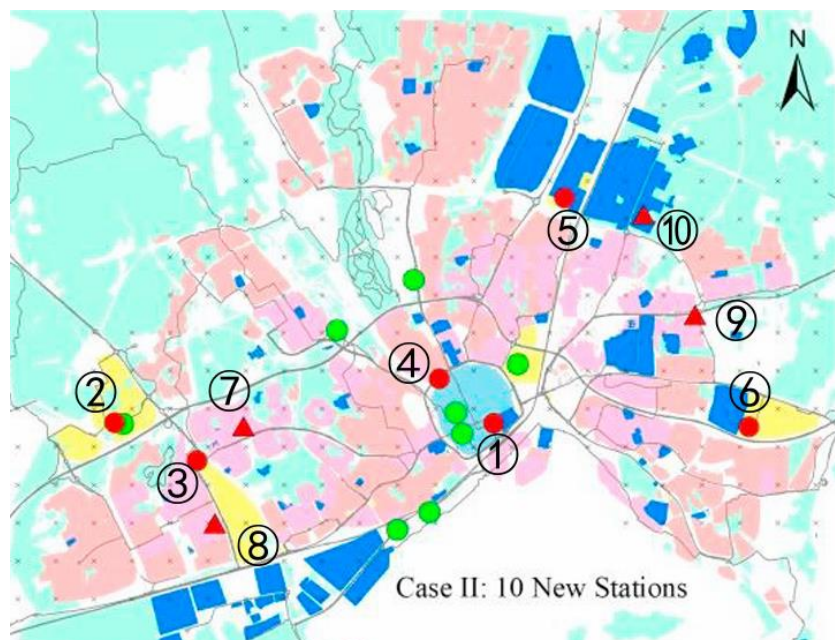
gdje je  $q_j$  broj automobila napunjenih stanicom  $j$ ;  $n_j$  je broj punjača na stanici  $j$ ;  $m_j$  je najveći mogući broj punjenja pojedinog punjača na stanici  $j$ ;  $r_{ij}$  je razina pokrivanja potražnje stanice  $j$  na čvoru potražnje  $i$ ;  $dr_i$  je preostala potražnja na čvoru potražnje  $i$ ;  $l_j$  je najveći mogući broj punjača na stanici  $j$  i  $N$  je ukupni broj stanica za punjenje koji je potrebno postaviti kako bi se zadovoljila potražnja za punjenjem.

Istraživanje je provedeno na površini od 67 km<sup>2</sup> u švedskome gradu Västerås. Područje grada podijeljeno je na 268 identičnih ćelija u čijim središtima se nalazi točka s podatkom o potražnji za punjenjem, tzv. čvor potražnje  $i$  (Slika 1.1).



Slika 1.1 Grid ćelija i pripadajući čvorovi potražnje (Bian i dr. 2018)

Provođenjem raspisanih naredbi MILP modela dobiveni su rezultati (Slika 1.2). Optimalne lokacije za brze punjače obilježene su crvenim kružićem, a za spore punjače crvenim trokutićem.

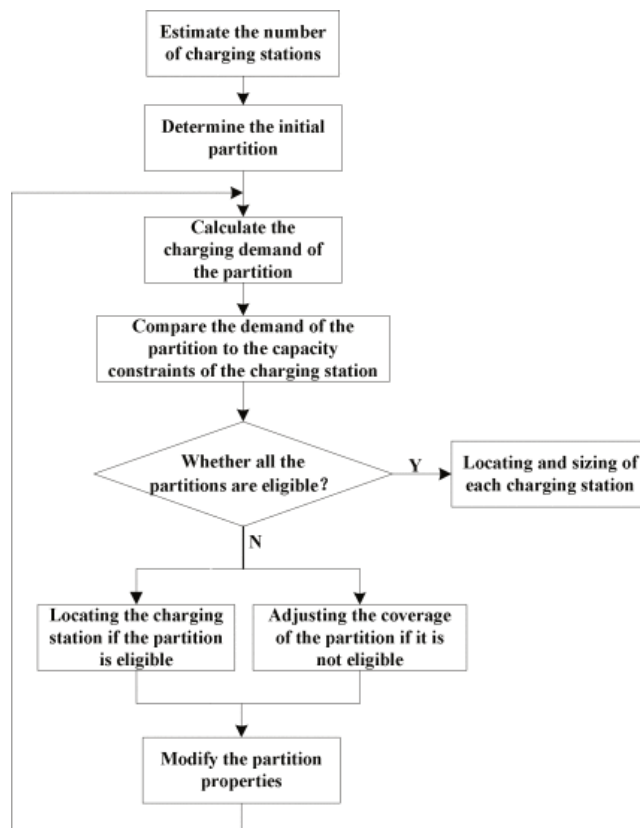


Slika 1.2 Optimalne lokacije za nove punjače

Za primijetiti je da se većina novih lokacija nalazi u vanjskim dijelovima grada, s obzirom na to da su potražnije za punjenjem u središtima grada najčešće zadovoljene, kako javnom infrastrukturom za punjenje, tako i privatnim punjačima koje vlasnici električnih automobila posjeduju.

U istraživanju Ge i dr. (2011) predložena je metoda lociranja i dimenzioniranja stanica za punjenje električnih vozila na temelju osmišljenog grida. Cilj ove metode je minimizirati gubitke korisnika na putu do stanice za punjenje, kreiranje zona pomoću grida i odabir optimalne lokacije u pojedinoj ćeliji korištenjem genetskog algoritma (engl. *genetic algorithm*), uzimajući u obzir gustoću prometa, postojeće stanice za punjenje i njihova ograničenja kapaciteta. Ponovljenim izračunima i prilagodbom pokrivenosti svake ćelije, ovaj rad je rezultirao kvalitetnim planom punionica električnih vozila na čitavom području.

Metoda podjele grida procjenjuje inicijalnu veličinu ćelije na temelju potražnje za punjenjem električnih automobila i ograničenjima (minimum i maksimum) stanica za punjenje. Grid se optimizira na način da se isprobavaju različite veličine ćelija i različito područje (površina) koju će grid obuhvatiti. Obuhvaćanjem predgrađa i pojasa oko gradova gdje se obično nalaze zaobilaznice, moguće je pronaći lokacije gdje su stanice za punjenje rijetke ili ih uopće nema. Zamišljeno je da svaka ćelija (zona) ima jednu pripadajuću stanicu za punjenje.



Slika 1.3 Shematski prikaz genetskog algoritma za odlučivanje

Ako trenutna podjela nije zadovoljavajuća, mijenjaju se veličine ćelija i njihov položaj dok se ne postigne optimalan rezultat s kojim se može nastaviti. Dakle, radi se o iterativnom procesu. Osmišljeni grid prihvaća se onda kada je moguće jednom stanicom za punjenje po ćeliji zadovoljiti izmjerenu potražnju za punjenjem.

Frade i dr. (2011) su u svojem istraživanju imali nešto drugačiji pristup. Kako bi se odredile optimalne lokacije stanica za punjenje električnih vozila, bilo je potrebno riješiti niz pitanja vezanih uz ponudu i potražnju za punjenjem kroz dnevne i noćne sate. U ovome se radu krenulo s poznatim brojem stanica za punjenje jer je lokalna vlada grada Lisabona sama odredila koliko je stanica potrebno da bi se zadovoljila rastuća potražnja. Gustoća stanovništva kroz gradske četvrti uzeta je kao težinski faktor gdje će se postaviti više, a gdje manje stanica za punjenje. S obzirom na to da je broj novih stanica unaprijed određen, moglo se krenuti s određivanjem lokacija. U analizu se ušlo s pretpostavkom da svako parkiralište zadovoljava uvjete za instalaciju stanica za punjenje ili, ako ne zadovoljava, situacija se može riješiti povećanjem kapaciteta postojeće mreže stanica za punjenje. Sljedeći korak bio je određivanje granica u broju punjača po stanici za punjenje. Prihvaćeno je rješenje od najmanje dva i najviše deset punjača po stanici kako bi se izbjeglo preveliko opterećenje



električne mreže grada. Konačno, određeno je područje koje će ovim radom biti pokriveno i način na koji će to područje biti podijeljeno. Za razliku od prethodno opisanog rada gdje je MILP metoda primijenjena na pravilan grid, ovdje je grad podijeljen u dogovorene zone različitih oblika i površina, ovisno o potražnji za punjenjem unutar njih. U ovome radu se koristi koncept postepene pokrivenosti, odnosno razine pokrivenosti koja može poprimiti vrijednosti između 0 i 1:

$$r_{jk} = 1 \text{ ako je } d_{jk} \leq 350 \quad (11)$$

$$r_{jk} = 2.75 - 0.005 * d_{jk} \text{ ako je } 350 < d_{jk} \leq 550 \quad (12)$$

$$r_{jk} = 0 \text{ ako je } d_{jk} > 550 \quad (13)$$

Gdje je  $r_{jk}$  razina pokrivenosti zone  $j$  lokacijom stanice za punjenje  $k$ , a  $d_{jk}$  je udaljenost između centroida zone  $j$  i stanice za punjenje  $k$ . Različite udaljenosti i različita količina stanica za punjenje po pojedinoj zoni rezultira i različitim razinama pokrivenosti.



Slika 1.4 Karta dogovorenih zona, njihovih centroida i optimalnih lokacija stanica za punjenje (Frade i dr. 2011)

## 2. MATERIJALI I METODE

Kroz sljedeća poglavlja prolazi se kroz prikupljanje potrebnih podataka i metode kojima su obrađeni kako bi se došlo do rezultata.

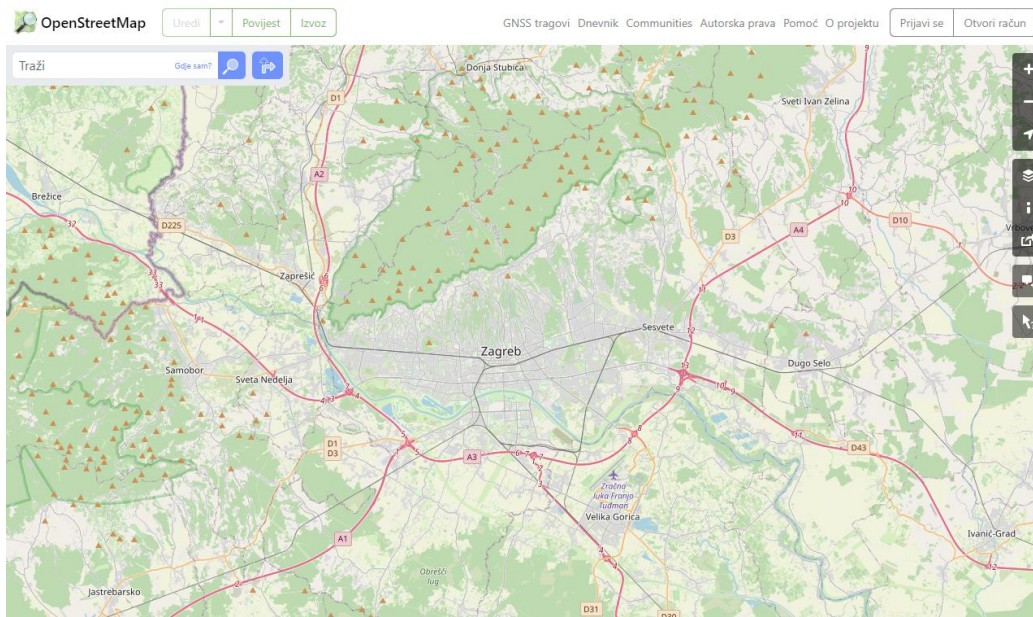
### 2.1 OPENSTREETMAP

OpenStreetMap je otvorena platforma koja omogućava korisnicima da zajednički prikupljaju i dijele geografske podatke. Ova platforma nastala je zato što većina karata koje se smatraju slobodnim za korištenje ustvari imaju ograničenja pravne ili tehničke prirode, što sprječava širi krug korisnika u korištenju tih karata na kreativne, produktivne i neočekivane načine (URL 7). Sudionik u izradi OpenStreetMap karata može biti svatko, s obzirom na to da je OpenStreetMap slobodno licenciran. Njegove najčešće primjene su izrada elektroničkih karata, informiranje o navigaciji, humanitarna pomoć i vizualizacija podataka. Jedina obaveza kod korištenja OSM podataka je da korisnik dozvoli drugima da koriste i dijele dalje podatke koje je on sam preuzeo (Bennet 2010).



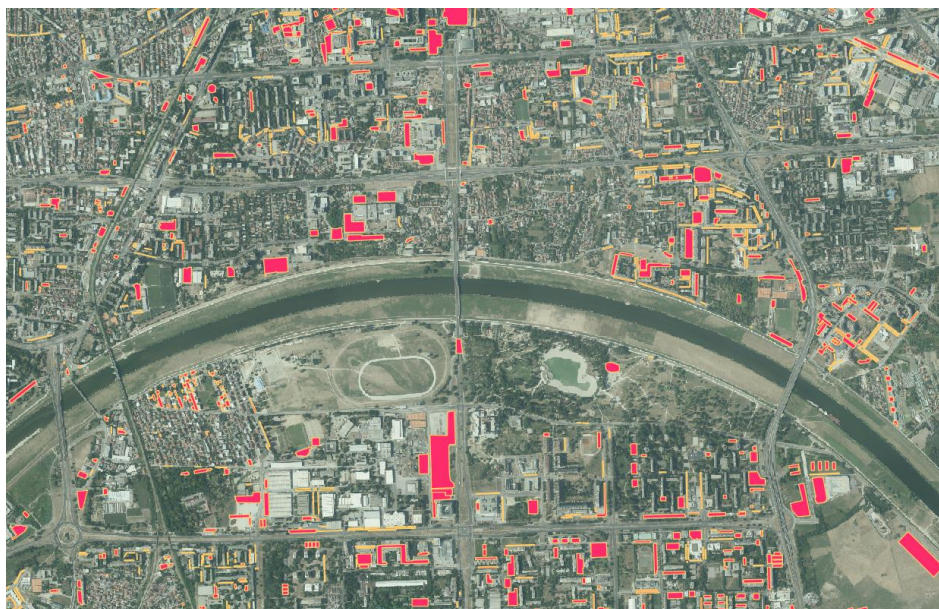
*Slika 2.1 OSM logo*

OSM podaci su slobodno dostupni podaci koje ažurira čitava zajednica OSM korisnika i pružaju visoku razinu detalja, što će biti korisno u analizi kojom se ovaj rad bavi. Podaci OSM-a koji su korišteni u ovome radu su parkinzi grada Zagreba, a preuzeti su korištenjem funkcionalnosti za izvoz na sučelju OpenStreetMap-a (Slika 2.1) (URL 8).



Slika 2.2 Sučelje platforme OpenStreetMap

Kako bi se izveli samo relevantni podaci, područje je ručno odabrano i korištena je oznaka 'amenity=parking' koja označava različite vrste parkirališta, uključujući javna parkirališta, garaže i ulična parkirna mjesta. Podaci su preuzeti u standardnom OpenStreetMap XML formatu i zatim uneseni u QGIS za daljnju obradu i analizu (Slika 2.3). Kako bi se reducirala količina elemenata u sloju parkirališta i kasnije dobio relevantniji rezultat, u QGIS-u se provelo filtriranje prema veličini parkinga.



Slika 2.3 Isječak sloja parkirališta prije obrade

## 2.2 PORTAL OTVORENIH PODATAKA

Portal otvorenih podataka Republike Hrvatske služi za prikupljanje, kategorizaciju i distribuciju otvorenih podataka javnog sektora, a koji se objavljuju u obliku koji je računalno čitljiv i otvoren što znači da ga računalo može samostalno pročitati i interpretirati neovisno o korištenoj platformi (URL 9). Otvoreni podaci su javno dostupni i besplatni podaci s mogućnošću ponovne uporabe u različite komercijalne ili nekomercijalne svrhe koje se razlikuju od prvobitne namjene za koju su prikupljeni ili izrađeni. Ovi podaci imaju široku primjenu u javnom, neprofitnom i poslovnom sektoru te su ključni za razvoj društva. Korištenje otvorenih podataka može značajno unaprijediti kvalitetu života i potaknuti sveukupni rast i razvoj. Otvoreni podaci omogućuju inovacije, povećavaju transparentnost i potiču učinkovito donošenje odluka.



*Slika 2.4 Logo Portala otvorenih podataka (URL 9)*

Otvoreni podaci po samoj definiciji označavaju one koje bilo tko može slobodno koristiti, upotrijebiti za ponovo korištenje i ponovo distribuirati, uz uvjet da se navede izvor podataka i omogući dijeljenje pod sličnim uvjetima (URL 9). Njihova je bitna značajka da ne sadrže osobne podatke niti druge zakonom zaštićene podatke. Osnovna svojstva otvorenih podataka Portala otvorenih podataka su:

- otvorenost,
- dostupnost i pristupačnost,
- ponovna uporaba i redistribucija i
- globalna uključenost.

Otvorenost je transparentnost prema javnosti, podizanje svijesti odgovornih u tijelima javne vlasti što su otvoreni podaci i zašto je važno redovito objavljivati te stjecanje navike javnosti o korištenju otvorenih podataka i čemu služe (URL 9).

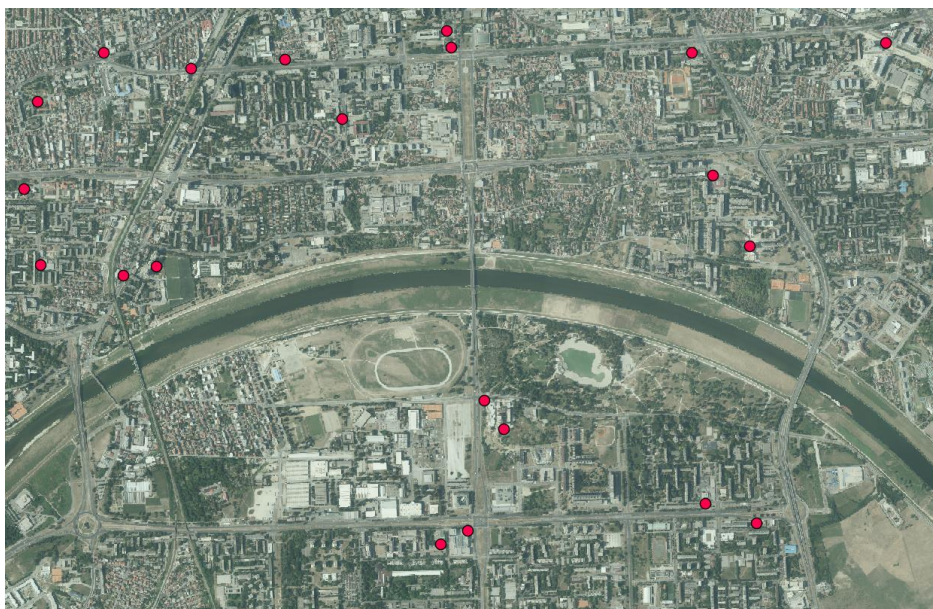


Otvoreni podaci trebaju biti lako dostupni, jednostavni za pronalazak i korištenje, te omogućavati pristup bez ograničenja kako bi imali stvarnu vrijednost. Njihov značaj je ograničen ako korisnici ne mogu lako doći do njih, koristiti ih ili ih mijenjati prema svojim potrebama.

Podaci trebaju imati dopuštenje za korištenje izvan svoje izvorne namjene i redistribuciju, uključujući kombiniranje s drugim bazama podataka.

Kako bi se ostvario potencijal otvorenih podataka, potrebno je poduzeti nekoliko ključnih koraka. To uključuje donošenje adekvatnih zakona i propisa, poticanje i podržavanje uporabe otvorenih podataka u svim sektorima, proaktivno objavljivanje setova podataka i aktivno sudjelovanje građana, neprofitnih organizacija i tijela javne vlasti.

Podaci koji su za ovaj rad preuzeti s Portala otvorenih podataka su električne punionice grada Zagreba (Slika 2.5) (URL10).



Slika 2.5 Isječak sloja postojećih punjača grada Zagreba

### 2.3 MILP ALGORITAM

MILP (engl. *Mixed Integer Linear Programming*), ili mješovito cjelobrojno linearno programiranje, je suvremeni matematički okvir koji se koristi za optimizaciju energetske sustava poput mreža punjača za električna vozila (URL 11). Smatramo ga dobrom opcijom kada postoji dovoljno kvalitetnih informacija i povezanih djelatnosti kojima je dobro poznata priroda razmatranog slučaja (Veintimilla-Reyes i dr. 2016). Glavi izazov MILP algoritama je vjerodostojno opisati tehnologije i

granice sustava: s jedne strane linearno modeliranje, a s druge strane broj varijabli s kojima se sustav može nositi. Potrebno je voditi računa o kompromisu između razine detalja podataka i vremena računanja. MILP algoritmi omogućuju modeliranje raznih tehnologija kroz strogo linearne funkcije i postavljena ograničenja (Mansini i dr. 2015). Promatra li se konkretno slučaj ovog rada, kod planiranja novih optimalnih lokacija za punjače električnih automobila, MILP može uzeti u obzir ograničenja poput potražnje za napajanjem, pristupačnosti za korisnike, troškova instalacije i sl. MILP koristi varijable koje mogu biti kontinuirane (npr. količina energije koju punjač može isporučiti) i cjelobrojne (npr. broj punjača na određenoj lokaciji). Cjelobrojne varijable posebice su korisne kod donošenja konačnih, „binarnih“ odluka kao npr. hoće li se na određenom mjestu postaviti punjač ili ne.

MILP algoritamski modeli sposobni su riješiti velike i kompleksne probleme, pri čemu je radi praktičnosti i efikasnosti izuzetno važno paziti na kompromis između preciznijih, detaljnijih rezultata i vremena računanja koje će softver trebati. Implementacijom MILP modela za optimizaciju infrastrukture punjača u Zagrebu može se osigurati učinkovita i održiva mreža punionica koja zadovoljava postojeće i nadolazeće potrebe korisnika električnih vozila. Ovaj pristup omogućava detaljno planiranje infrastrukture za punjenje, osiguravajući optimalnu dostupnost i iskorištenost resursa.

MILP algoritam se u ovome radu koristi jer je idealan za traženje optimalnih rješenja u prostoru s mnogo linearnih faktora koji se mogu mijenjati i prilagođavati onda kada je to potrebno. Primjerice, zatvaranje određenih ulica za promet motornih vozila će značajno utjecati na rezultate optimizacije kada se traže lokacije za punjače električnih automobila. Također, svojstvo MILP algoritma koje je nužno za ovaj rad je mogućnost dobivanja više od jednog optimalnog rješenja s jednakom objektivnom vrijednošću (URL 12).

Ishodi optimizacije MILP algoritmom mogu poprimiti tri različita oblika:

- pronađeno optimalno rješenje
- neizvediv model
- neograničeni cilj.

Optimalno rješenje je ono koje je u stvarnosti izvedivo i zadovoljava sve uvjete, međutim, optimalno rješenje nije uvijek zajamčeno. Neizvedivi modeli su oni za koje ne postoji izvedivo rješenje koje bi zadovoljilo sva postavljena ograničenja. U tome slučaju potrebno je proučiti postavljena ograničenja

i prilagoditi ih ondje gdje je moguće, na način da se stvori prostor u kojemu je moguće pronaći optimalno rješenje. U nastavku će biti opisan jedan primjer neizvedivog modela.

Model:

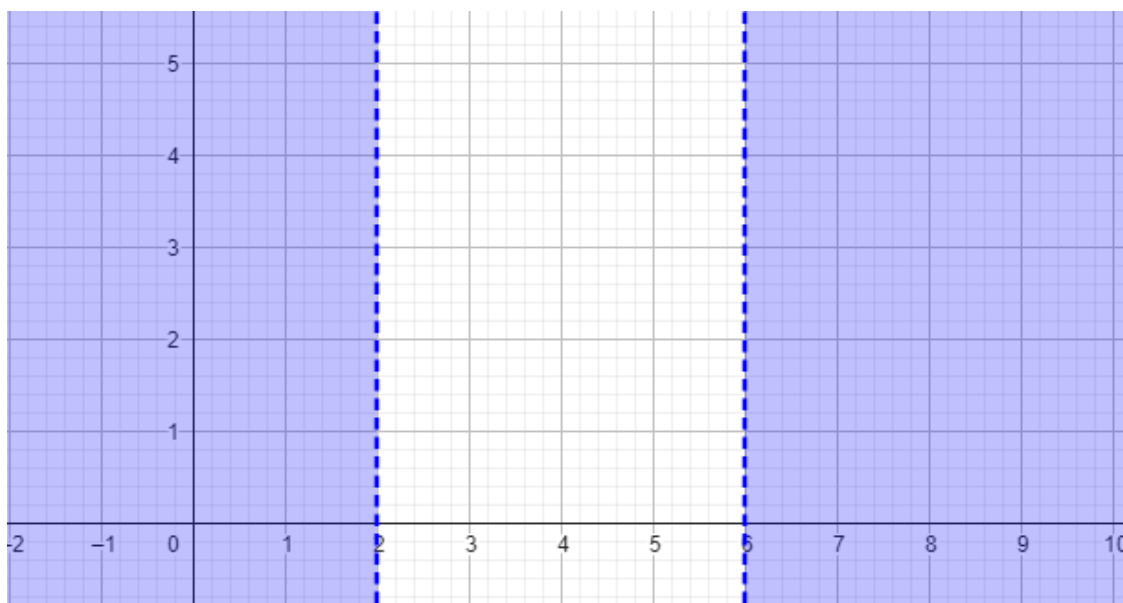
$$x_1 + x_2 \quad (14)$$

$$x_1 \geq 6 \quad (15)$$

$$x_1 \leq 2 \quad (16)$$

$$x_1, x_2 \in \mathbf{Z} \quad (17)$$

U ovakvom modelu ne postoje vrijednosti za  $x_1$  koji bi zadovoljili uvjete postavljene u jednadžbama (2) i (3). Sjecište ovih poluprostora je prazan skup.



Slika 2.6 Grafički prikaz uvjeta iz jednadžbi (2) i (3)

Treći mogući ishod, naizgled neobičan, je neograničeni cilj. Neograničeni cilj znači da za svako izvedivo rješenje postoji drugo izvedivo rješenje koje ima manju objektivnu vrijednost. Drugim riječima, postoji beskonačno mnogo objektivnih optimalnih vrijednosti. Ovakav ishod je znak loše definiranog modela u kojemu je propušteno postavljanje nekog bitnog ograničenja. Primjer neograničenog cilja je:

$$-x_1 - x_2 \quad (18)$$

$$x_1 \geq 0 \quad (19)$$

$$x_1, x_2 \in \mathbf{Z} \quad (20)$$

Rješenje ovakvog modela je beskonačno veliko i ne omogućuje pronalaženje objektivnog optimalnog rješenja u praksi.

U ovome se radu MILP algoritam koristi za optimizaciju ciljne funkcije koja uključuje balansiranje troškova i zadovoljava potražnju za stanicama za punjenje električnih vozila. Cilj je pronaći rješenje koje maksimizira ukupnu korist i pritom minimizira ukupne troškove, uzimajući u obzir definirane parametre i ograničenja. Rješenje koje algoritam generira jesu optimalne lokacije i broj punjača koji će se na njima postaviti.

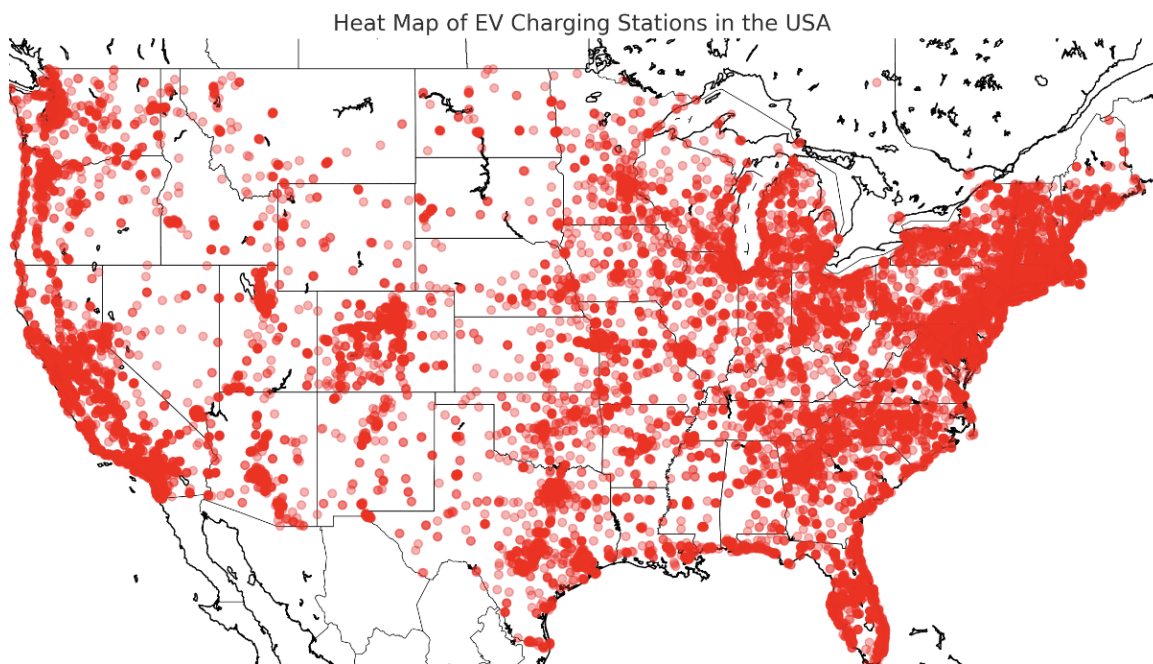
Parametri koji su uključeni u ovaj MILP algoritam su sljedeći:

- **di** – vektor u kojemu su vrijednosti koje predstavljaju potražnju za punjenjem na različitim lokacijama
- **m** – maksimalan broj punjenja koji se mogu obaviti u jednome danu
- **p** – profit koji se može ostvariti po jedinici vremena na pojedinoj potencijalnoj stanici za punjenje
- **t** – vrijeme koje je potrebno za punjenje na različitim lokacijama
- **ci<sub>j</sub>, cr<sub>j</sub>, ce<sub>j</sub>** – troškovi instalacije i rada:
  - **ci<sub>j</sub>** – troškovi instalacije punjača na lokaciji **j**
  - **cr<sub>j</sub>** – fiksni troškovi rada punjača na lokaciji **j**
  - **cr<sub>j</sub>** – operativni troškovi punjenja na lokaciji **j**
- **pe** – cijena električne energije po jedinici
- **alpha** – faktor koji se koristi za prilagodbu cijene energije u kalkulacijama troškova
- **lj** – kapacitet lokacije, odnosno maksimalni broj punjača koji se mogu instalirati na toj lokaciji
- **N** – ukupni broj novih stanica za punjenje koje treba postaviti
- **distance\_matrix** – matrica koja sadrži udaljenosti između svake lokacije potražnje i svake potencijalne lokacije za novu stanicu za punjenje; vrijednosti u matrici su euklidske udaljenosti
- **diz** – vektor u kojemu vrijednosti izražavaju trenutnu potražnju za punjenjem na svakoj lokaciji, uzimajući u obzir postojeće lokacije za punjenje



Svaki element vektora  $\mathbf{d}_i$  odgovara potražnji za punjenjem na specifičnoj lokaciji. Potražnja za punjenjem na različitim lokacijama može varirati radi čitavog niza faktora: gustoća naseljenosti, pristup infrastrukturi za punjenje, vrsta lokacije, vrijeme i doba dana, prometne rute i ponašanje vozača, prisutnost alternativnih opcija prijevoza, sezonalni trendovi i ekonomski faktori (URL 13).

Urbana područja s većom gustoćom naseljenosti obično imaju veću potražnju za punjenjem radi većeg broja vozača električnih vozila. Unatoč tome što veća gustoća stanovništva implicira veću potrebu za punjenjem, urbane sredine su zapravo vrlo rijetko područja na kojima nedostaje stanica za punjenje. Potrebe vozača električnih automobila najčešće su zadovoljene u urbanim sredinama jer su infrastrukture punjača tamo značajno razvijenije nego u područjima izvan grada. Pored toga, važan faktor za razmotriti je činjenica da mnogo vlasnika električnih automobila posjeduje punjače za svoja vozila u vlastitome domu.



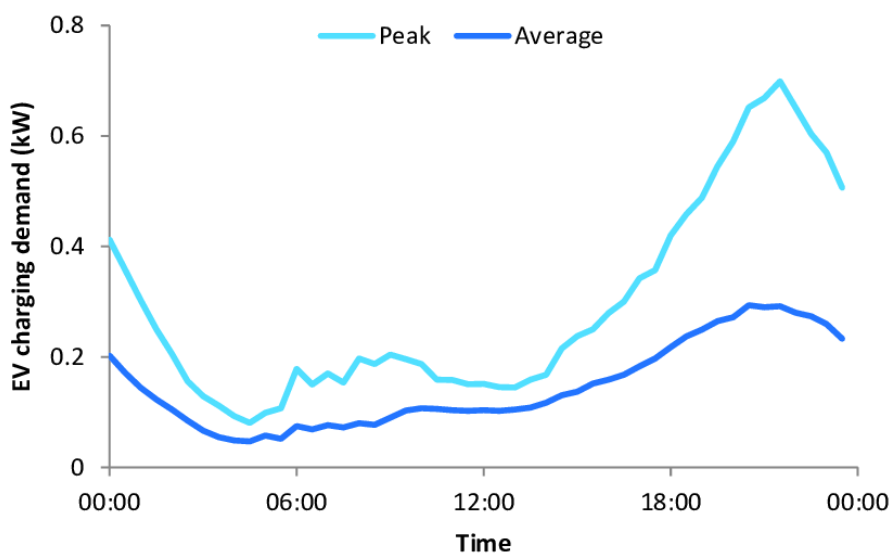
Slika 2.7 Karta punionica električnih automobila u SAD-u (URL 14)

Iz slike 2.3.2 vidljivo je na primjeru SAD-a da se punionice električnih automobila postavljaju u puno većem broju ondje gdje je gustoća stanovništva velika, odnosno u urbanim sredinama. Postavljanje punionica u urbane sredine osigurava njihovu maksimalnu dostupnost. Punionice koje se nalaze izvan urbanih sredina prvenstveno služe punjenju u slučajevima dugih putovanja, kako bi se kod vozača električnih automobila spriječio strah od ostanka bez energije.

Drugi faktor koji je važno razmotriti je činjenica da pristup infrastrukturi za punjenje privlači korisnike iz sredina slabijih pristupa i time povećava potražnju u urbanim sredinama koje su najčešće dovoljno opskrbljene punionicama električnih automobila.

Treći faktor je vrsta lokacije na kojoj se punionica nalazi. Komercijalne, rekreativne i turističke zone, trgovački centri i poslovne četvrti obično imaju značajno veću potražnju za punionicama električnih automobila radi velikog protoka ljudi na svakodnevnoj razini.

Četvrti faktor predstavlja vrijeme i doba dana. Ovaj faktor je od izuzetnog značaja kod razmatranja potražnje za punionicama električnih automobila. Primjerice, u poslovnim četvrtima je potražnja veća tijekom standardnog radnog vremena dok u stambenim područjima potražnja raste u večernjim satima.



Slika 2.8 Ovisnost potražnje punionica o dobu dana (URL 15)

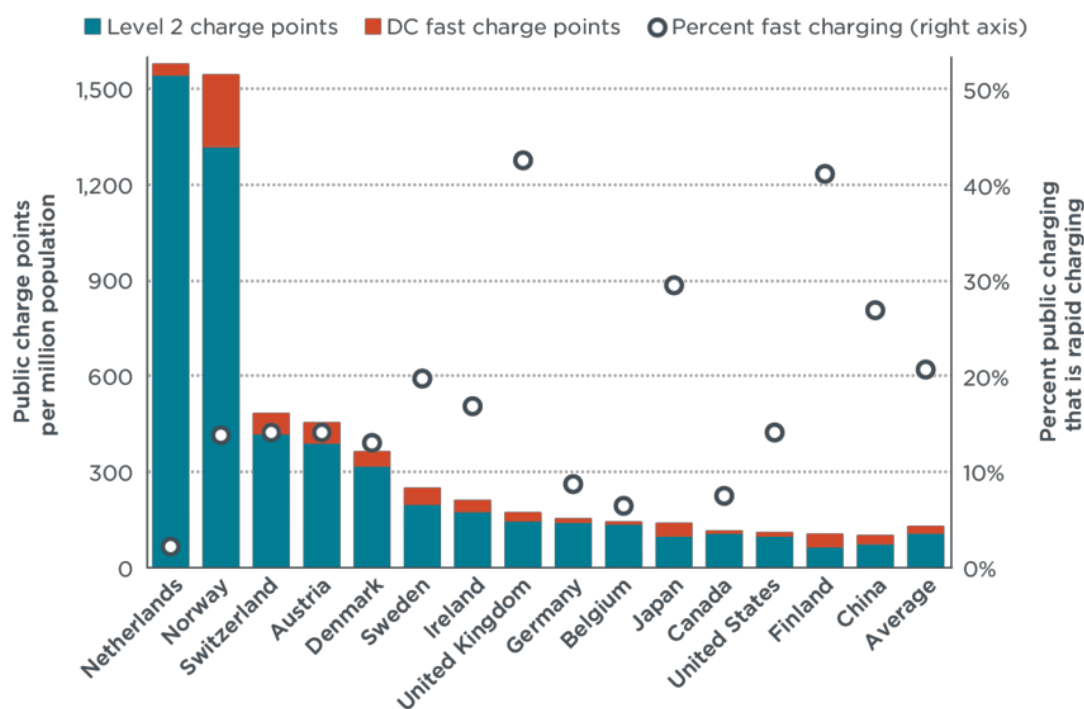
Slika 2.8 (URL 15) grafički prikazuje promjenu potražnje za punionicama električnih automobila kroz različita doba dana. Najveća potražnja zabilježena je u večernjim satima iza 18:00. Može se pretpostaviti da se većina zaposlenih vlasnika električnih automobila u ovo doba vraća s posla i priključuje svoje automobile na punjače.

Peti faktor su prometne rute i navike vozača (Qin i dr. 2022). Lokacije blizu glavnih prometnica ili autocesta često imaju veću potražnju jer su pogodne za punjenje bez značajnih skretanja sa željene rute.

Šesti faktor je prisutnost alternativnih opcija prijevoza. U područjima gdje je javni prijevoz kvalitetno isplaniran i razvijen, potražnja za punjenjem električnih automobila bit će nešto manja.

Sedmi faktor su sezonalni trendovi. Radi se o turističkim mjestima u kojima potražnja za punjenjem varira sezonski, ovisno o turističkoj sezoni. S obzirom na to da grad Zagreb nije isključivo ljetna turistička destinacija, ovaj faktor ne bi trebao biti od velikog značaja za ovo istraživanje.

Konačno, osmi i posljednji faktor koji je potrebno razmotriti jest ekonomski faktor. Regije gdje stanovništvo ima veće prihode obično će imati povećanu potražnju za punjenjem.



Slika 2.9 Broj punjača na milijun stanovnika (URL 16)

Slika 2.9 (URL 16) grafički je prikaz broja punjača električnih automobila po milijunu stanovnika. Vidljivo je da u visokorazvijenim državama visokih BDP-a broj punjača po milijunu stanovnika značajno veći od prosjeka koji iznosi oko 140 punjača na milijun stanovnika. Također je vidljivo da Nizozemska i Norveška značajno istupaju s čak 1500 punjača po milijunu stanovnika. Moguće je raspravljati o tome da se radi o rezultatu veće osviještenosti o klimatskim promjenama i nužnosti prelaska na čiste i obnovljive izvore energije.

Vrijednost  $m$  predstavlja broj punjenja koji se može obaviti u jednome danu na određenoj lokaciji. Radi se o ograničenju koje proizlazi iz kapaciteta punionica i drugih faktora poput vremenskih

ograničenja. Primjerice, punjenje jednog električnog automobila traje određeno vrijeme i iz toga proizlazi ograničenje broja punjenja koje je moguće obaviti u jednome danu na jednome punjaču.

Vrijednost  $p$  predstavlja profit koji je moguće ostvariti po jedinici vremena u potencijalnoj novoj punionici. To ponajviše ovisi o:

- cijeni punjenja
- opterećenosti punionica i
- troškovima održavanja i upravljanja (Palanisamy i dr. 2023).

Cijena punjenja po minuti mora biti postavljena na iznos veći od troška punjenja po minuti kako bi se stvorila razlika između naplate i ukupnog troška, odnosno profit. Naravno, to nije faktor koji je moguće beskonačno povećati, s obzirom na to da postoje konkurencije na tržištu i ograničenje u cijeni koju je prosječan vlasnik električnog automobila spreman platiti za punjenje. Drugi faktor ovdje je opterećenost punionica, odnosno broj korisnika punjača koji prođu kroz punionicu u jedinici vremena, npr. u jednome danu. Troškovi održavanja i upravljanja vrlo su često nepredvidivi po učestalosti i količini. Nabavka kvalitetnih, preciznije robusnih punjača uobičajena je predostrožnost kojom se sprječava često kvarenje i troškovi popravka koji to prate.

Vrijednost  $t$  predstavlja vrijeme koje je na pojedinoj punionici (punjaču) potrebno da se baterija električnog automobila napuni. Vrijeme punjenja ovisi o:

- vrsti punjača,
- kapacitetu baterije vozila i
- stanju baterije vozila.

Različite vrste punjača pune različitom brzinom, a one su:

- AC punjači,
- DC punjači i
- brzi punjači (engl. *fast chargers*).

AC punjači koriste izmjeničnu struju (engl. *alternating current*) i obično se koriste za sporo punjenje. Vrijeme punjenja ovakvim punjačima značajno je veće, pogotovo za baterije velikih kapaciteta. DC punjači koriste istosmjernu struju (engl. *direct current*) i omogućuje brže punjenje od AC punjača. Brzi punjači mogu izuzetno brzo napuniti bateriju električnog vozila, za svega 20 do 60 minuta. Brzi punjači izvršavaju punjenje sa 240 V, dok standardni punjači pune na 120 V (URL 17).

Tablica 2.3.1 Tipovi punjača i njihova svojstva (URL 17)

| Vrsta punjača         | Brzina punjenja                       | Raspon snage | Uobičajene lokacije                       | Vrijeme punjenja                    |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------|---|-------------------------------------|
| <b>Brzi punjač</b>    | Brži od standardnih kućnih punjača    | 7 – 22 kW    | Javne stanice za punjenje, rjeđe u kućama | 20 – 60 minuta                      |
| <b>Spori punjač</b>   | Sporiji od standardnih kućnih punjača | 3 – 6 kW     | Kuće i radna mjesta                       | Čitavu noć za punu bateriju         |
| <b>Rapidni punjač</b> | Izuzetno velika brzina punjenja       | 50+ kW       | Namjenske stanice za punjenje             | 30 – 60 minuta za 80% punu bateriju |

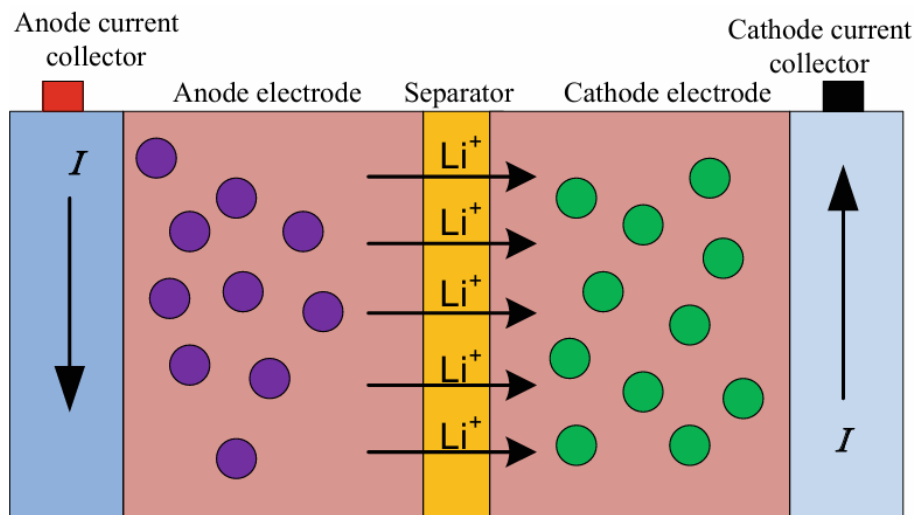
U teoriji, jedini nedostatak brzih punjača je u tome što ne može svaki električni automobil koristiti ovakav tip punjača. Za korištenje brzih punjača potrebno je imati posebnu vrstu priključka s velikim prijenosom snage, stoga je za zaključiti da bi u idealnom slučaju svaka stanica za punjenje trebala pored brzih punjača imati i spore.

Kapaciteti baterija električnih automobila kreću se od 20 kWh do 120 kWh, s prosjekom od 72.1 kWh (URL 18).

$$\frac{\text{kapacitet baterije [kWh]}}{\text{snaga punjača [kW]}} = \text{vrijeme punjenja [h]} \quad (21)$$

Uzmemo li da je prosječni kapacitet baterije 72.1 kWh (URL 18), a prosječna snaga kućnog punjača 7.2 kW (URL 19), većina vlasnika kućnih sporih punjača trebat će oko 10 sati kako bi potpuno napunili svoj električni automobil i to se obično obavlja punjenjem preko noći (vidi tablicu 2.2.1). Na taj način koristi se električna energija noćne (jeftinije) tarife. Ipak, u ovome radu razmatraju se javne stanice za punjenje gdje je većina punjača brze vrste i većina vlasnika električnih automobila ne dolazi s ciljem punjenja baterije do maksimalnog kapaciteta.

Posljednji faktor koji utječe na vrijeme punjenja je stanje baterije. Litij-ionske baterije za električne automobile imaju prosječni životni vijek između 12 i 15 godina (Liu i dr. 2022). Približavanjem kraju životnog vijeka, svaka baterija prolazi kroz pad kapaciteta i efikasnosti punjenja, s obzirom na to da se katodni i anodni elementi baterije troše svakim punjenjem.



Slika 2.10 Shematski prikaz litij-ionske baterije (Liu i dr. 2022)

Korištenje brzih punjača, ako se provodi prečesto, može dodatno opteretiti bateriju i skratiti njen životni vijek. Baterije električnih automobila preporučljivo je uvijek držati u intervalu 10-90% napunjenosti, kako bi se maksimalno produžio životni vijek baterije i time sačuvao novac i okoliš.

Vrijednosti  $\mathbf{ci}_j$ ,  $\mathbf{cr}_j$  i  $\mathbf{ce}_j$  predstavljaju različite troškove koje je potrebno uzeti u obzir kako bi se što preciznije mogla predvidjeti potencijalni profit, odnosno razlika između zarade i troškova. Vrijednost  $\mathbf{ci}_j$  je trošak instalacije punionice na parkiralištu  $j$ . To uključuje troškove poput postavljanja potrebne infrastrukture i električne instalacije. Vrijednost  $\mathbf{cr}_j$  je trošak parkiranja na parkiralištu  $j$ . To je cijena koju korisnici punionica električnih vozila plaćaju za korištenje parkirališta tijekom dana, a značajna je jer parkirališta mogu svojom cijenom parkiranja pozitivno ili negativno utjecati na mogućnost izbora te lokacije. Konačno, vrijednost  $\mathbf{ce}_j$  je cijena punionice na parkiralištu  $j$ . Radi se o cijeni koju korisnici plaćaju za punjenje svojih električnih automobila na toj lokaciji.

Vrijednost  $\mathbf{pe}$  predstavlja cijenu električne energije po jedinici vremena kWh. S obzirom na to da je prosječna cijena struje u Republici Hrvatskoj 0.20 € / kWh (URL 20), u kodu je ta vrijednost postavljena na 0.17 £.

Faktor **alpha** predstavlja prosječni kapacitet baterije električnih automobila izraženu u kWh. Kod planiranja postavljanja stanica za punjenje električnih automobila, važno je uzeti u obzir kapacitet baterije vozila jer to utječe na potrebnu količinu električne energije za punjenje. Ovaj faktor se koristi za izračun troškova punjenja na temelju cijene električne energije i kapaciteta baterije.

Vrijednost **Ij** predstavlja ograničenje u broju punjača koje je moguće postaviti na potencijalnoj stanici za punjenje. Ova vrijednost ovisi o nekoliko faktora:

- dostupan prostor,
- električna infrastruktura i
- regulatorni uvjeti.

Dostupan fizički prostor predstavlja najveće ograničenje u maksimalnom broju punjača koje je na nekoj lokaciji moguće postaviti. Pored toga, postojeća električna infrastruktura u okolici same punionice mora moći podržati količinu instaliranih punjača. Konačno, faktor koji je ovdje od značaja su lokalni zakoni i regulative koji mogu postaviti ograničenje na broj punjača koji se smije instalirati po jednoj punionici. Grad Zagreb nema zabilježenih regulativa koje bi ograničile maksimalan broj punjača po jednoj punionici, stoga u ovome radu to neće biti od značaja.

Vrijednost **N** predstavlja ukupni broj novih stanica za punjenje koje treba postaviti. Radi se o broju punionica koje je potrebno dodati postojećoj mreži kako bi se zadovoljila potražnja za punjenjem, uzevši u obzir različite faktore poput kapaciteta punjenja, ograničenja lokacija i drugih troškova. Broj punionica (punjača) koji će zadovoljiti potrebe za punjenjem razlikuje se među državama ovisno o njihovoj ekonomiji, veličini države, osviještenosti o zaštiti okoliša i sl. (vidi Sliku 2.3.4).

Vektor **diz** sadrži vrijednosti koje izražavaju trenutnu potražnju za punjenjem na svakoj lokaciji, uzimajući u obzir postojeće lokacije za punjenje. Ovim vektorom se pomaže modelirati trenutnu situaciju na način da se odredi broj dodatnih stanica za punjenje kojima bi se potpuno zadovoljila potreba za punjenjem.

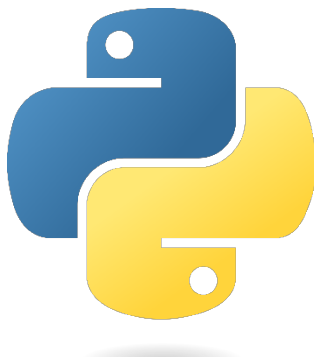
## 2.4 PYTHON

Python je programski jezik opće namjene kojeg je stvorio Guido van Rossum 1990. godine (URL 21). Radi se o programskom jeziku koji programerima omogućava korištenje nekoliko stilova programiranja:

- objektno orijentirano programiranje,

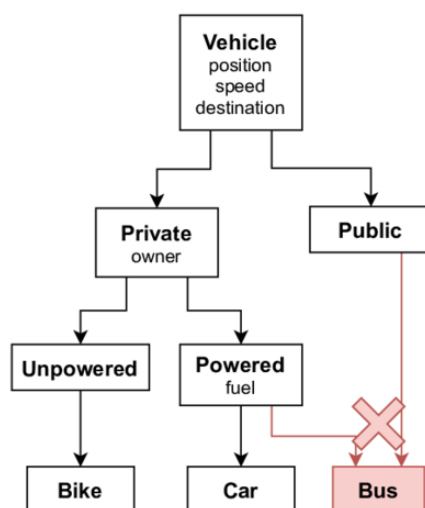
- strukturno orijentirano programiranje i
- aspektno orijentirano programiranje.

Ova fleksibilnost korištenja čini Python sve popularnijim programskim jezikom među njegovim konkurentima. Pythonova sintaksa je čitljiva i jednostavna za razumjeti, što ga čini odličnim programskim jezikom za pisanje skripti, gradnju web aplikacija i razvitak softvera (Patterson 2015).



Slika 2.11 Logo programskog jezika Python (URL 22)

Iako su u ovome radu prisutna svojstva svakog stila programiranja, ipak se većina može pripisati stilu objektno orijentiranog programiranja. Objektno orijentirano programiranje ili kraće OOP (engl. *Object Oriented Programming*) je stil programiranja u kojemu je težište na projektiranju aplikacije kao skupa objekata koji međusobno izmjenjuju poruke, odnosno ovise jedan o drugome (URL 23).



Slika 2.12 Shematski prikaz objektno orijentiranog programiranja (Jensen i dr. 2021)



Kod kojim se ovaj rad bavi koristi funkcije za obuhvaćanje nizova zadataka, što čini kod lakim za razumijevanje i podešavanje. Primjera radi, u kodu se nalaze tri odvojene funkcije koje kreiraju različite objekte za potrebe optimizacije:

- **gen\_sets()** koja generira skupove (lokacije s potražnjom za punjenjem vozila),
- **gen\_parameters()** koja generira relevantne parametre i
- **gen\_demand()** koja generira trenutnu potražnju za punjenjem u pojedinoj ćeliji grida.

Definirane funkcije mogu se ponovo koristiti s različitim skupovima podataka bez promjene unutarnjeg rada, što potiče ponovnu upotrebu koda.

Python kod koji je korišten kao osnova pripada podatkovnom znanstveniku Obedu Simsu. Njegov cilj bio je odrediti optimalne lokacije za punjače električnih automobila u Manchesteru, s nadom da će razvitak infrastrukture punjača potaknuti vozače da se opredijele za električne automobile (URL 24). Kod kojim su se dobili rezultati u ovome radu izmijenjen je i prilagođen formatima podataka koji su bili dostupni za grad Zagreb. Repozitorij s originalnim skriptama i podacima za Manchester nalazi se na priloženom URL-u (URL 25).

Kako bi se potrebi objekti mogli kreirati i koristiti, nužno je uvesti niz programskih paketa za rukovanje podacima i geometrijama, a to su:

- PuLP,
- Pandas,
- Geopandas,
- NumPy,
- Seaborn,
- Matplotlib,
- SciPy i
- Math

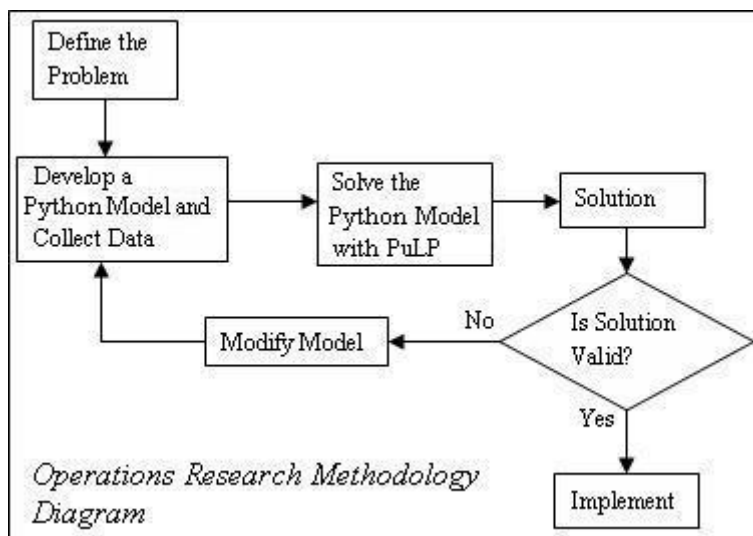
PuLP je programski paket koji je napisan u Pythonu i pruža skup naredbi i tipova objekata koji se mogu koristiti za sastavljanje matematičkih modela.

Rješavanje optimizacijskog problema korištenjem PuLP paketa može se podijeliti u pet koraka:

- opisivanje problema,
- formuliranje matematičkog modela,

- rješavanje matematičkog modela,
- izvođenje analize dobivenih optimalnih rezultata i
- predstavljanje rješenja analize (URL 26).

U ovakvim postupcima često postoje „petlje povratnih informacija“ (vidi sliku 2.4.3). Primjerice, nakon formuliranja i rješavanja optimizacijskog problema, često postoji potreba za razmatranjem valjanosti dobivenog rješenja (po mogućnosti u prisutnosti osobe koja je pružila opis problema). Ako je dobiveno rješenje nevaljano, potrebno je izmijeniti dijelove koda ili ažurirati podatke kako bi se u kod uključilo novo razumijevanje optimizacijskog problema.



Slika 2.13 Shematski prikaz koraka optimizacije PuLP paketom (URL 26)

Proces modeliranja započinje s dobro definiranim opisom modela, zatim koristi matematiku za formuliranje problema. Sljedeći korak je unos matematički formuliranog programa u neki softver za rješavanje, npr. Python ili Excel. Nakon rješavanja modela, rezultati se prevode u stvarne odluke u skladu s izvornim opisom modela.

Opisivanje problema je korak u kojemu je cilj izraditi detaljni formalni opis modela. Kako bi se problem optimizacije što bolje razumio, često je potrebno provesti neko vrijeme razgovarajući s osobom koja je iznijela problem za koji traži rješenje. Razgovorom s klijentom i razmatranjem dostupnih podataka postiže se viša razina detalja u opisu modela. Ograničenja u dostupnim podacima mogu značajno promijeniti formulaciju opisa modela i dovesti do kompromitiranog rezultata.

Formuliranjem matematičkog modela u Pythonu, program se već stavlja u oblik koji PuLP može lako riješiti. U ovome koraku identificiraju se ključne kvantitativne odluke, ograničenja i ciljevi, te se

njihova međuovisnost prevodi u matematički model. Ulazni podaci obično nisu konkretne vrijednosti koje se unose u formulaciju, već se model popunjava korištenjem podatkovnih datoteka, što zahtijeva određeni rad na stvaranju odgovarajuće podatkovne datoteke. Prednost korištenja podatkovnih datoteka je mogućnost ponovnog korištenja modela s različitim skupovima podataka.

Dobivene rezultate koji su u teoriji optimalni, potrebno je dodatno analizirati kako bi se utvrdilo da su ostvarivi i zaista isplativi. Primjerice, rezultat ovoga rada može biti optimalna lokacija za novu punionicu koja zadovoljava sve uvjete, a ipak ne predstavlja dobro rješenje jer se nalazi na dionici ceste koja će u budućnosti biti zatvorena za promet motornih vozila. Ovakva povratna informacija je od velike vrijednosti kod izmijene modela vodeći računa o novim saznanjima.

Predstavljanje rješenja analize mora biti jednostavno i nedvosmisleno. Ako rješenje nije predstavljeno na način koji je razumljiv i atraktivan klijentu, ono bi moglo biti odbačeno.

Pandas je programski paket koji u ovome kodu služi prvenstveno za čitanje podataka iz CSV datoteka, stvaranje DataFrame objekata, manipulaciju njihovim podacima i spajanje s drugim DataFrame objektima.

GeoPandas je projekt koji svojim funkcijama olakšava rad s geoprostornim podacima u Pythonu (URL 27). GeoPandas proširuje tipove podataka koje koristi Pandas kako bi omogućio prostorne operacije na geometrijskim tipovima podataka. Geometrijske operacije izvode se pomoću funkcija iz paketa Shapely. GeoPandas dodatno ovisi o paketu Fiona za pristup datotekama s podacima i paketu Matplotlib za izradu grafova. U ovome radu GeoPandas koristi se za učitavanje SHP datoteka i vizualizaciju geoprostornih podataka.

NumPy (engl. *Numerical Python*) je paket s matematičkim funkcijama i objektima za rad u raznim područjima matematike, znanosti i inženjerstva (Chin i dr. 2016). U ovome radu NumPy se koristi za postavljanje širine ispisa, generiranje prazne matrice i računanje udaljenosti koje se unose kao vrijednosti u matrice.

Seaborn je paket koji pruža dodatne vrste grafova koje pojedinci smatraju vizualno privlačnijima. U ovome radu Seaborn se koristi za kreiranje dijagrama raspršenosti s optimalnim lokacijama, postavljanje granica grafova, dodavanje naslova i tekstualnih oznaka svakoj optimalnoj lokaciji.

Matplotlib je Pythonov paket za kreiranje dvodimenzionalnih grafova. Podržava interaktivno i neinteraktivno plotanje, te može spremi slike u nekoliko različitih formata: PNG, PS i dr. (Tosi 2009).

U ovome kodu Matplotlib se prvenstveno koristio za prikazivanje SHP datoteka korištenjem GeoPandas objekata i kreiranje grafova zajedno sa svim njihovim vizualnim elementima.

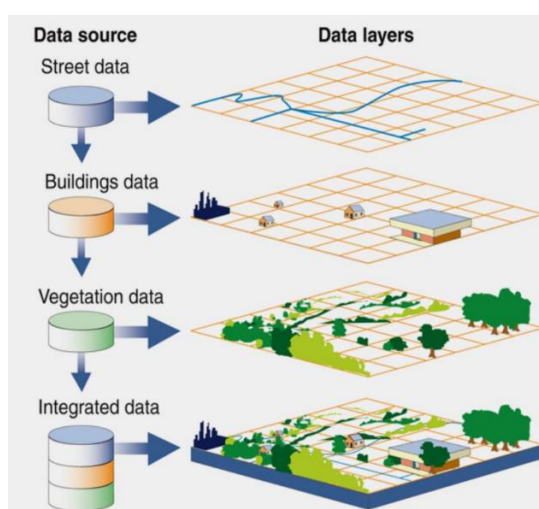
SciPy paket je izgrađen na NumPy sustavu nizova i podiže znanstveno programiranje na sasvim novu razinu, pružajući napredne matematičke funkcije poput integracije, rješavanja običnih diferencijalnih jednadžbi, posebnih funkcija, optimizacije i još mnogo toga (Bressert 2012). U ovome kodu SciPy paket se koristio za računanje Euklidske udaljenosti između lokacija parkirališta (kandidata za buduće punionice) i lokacija visoke potražnje za punjenjem (centroida potražnje). Ovim vrijednostima ispunjena je prethodno stvorena matrica udaljenosti.

Math je paket koji pruža osnovne matematičke funkcije, kao što su eksponencijalne funkcije, logaritmi, trigonometrijske funkcije, konstante  $\pi$  i  $e$  (URL 28).

## 2.5 QGIS

GIS je skraćenica za geografski informacijski sustav (engl. *geographic information system*). Cilj GIS-a je razvoj zajedničke namjene sustava za donošenje odluka pri upravljanju i planiranju prostornih aktivnosti. GIS je usko povezan s prostornim podacima, što omogućuje integraciju prostornih i drugih informacija unutar jednog sustava za potrebe analize prostora (Tutić i dr. 2002). Svjetski poznata geoinformacijska tvrtka ESRI definirala je GIS ovako: Geografski informacijski sustav (GIS) je okvir za prikupljanje, upravljanje i analizu podataka (URL 29).

GIS predstavlja integraciju tehnika prostornih analiza i digitalnih prostornih podataka s računalnom tehnologijom.



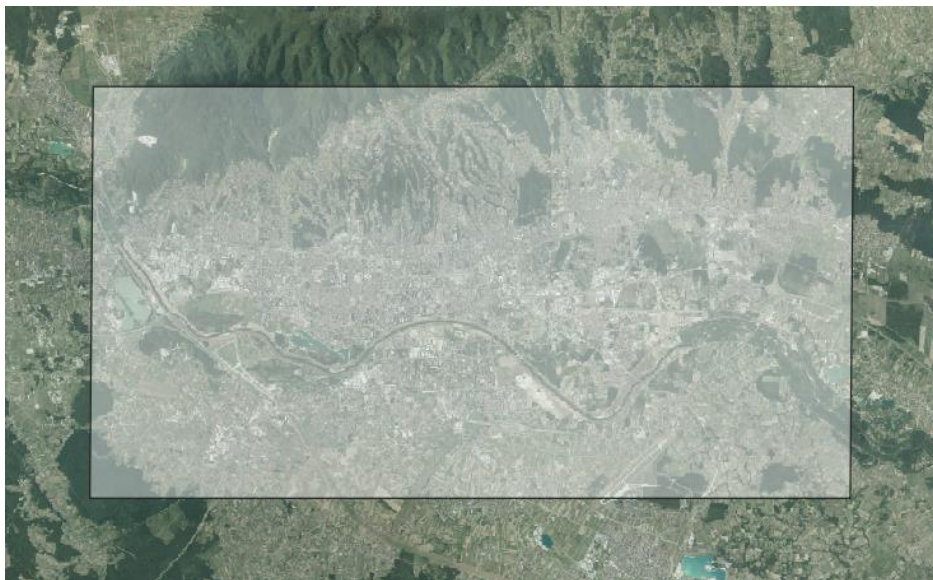
Slika 2.14 Shematski prikaz integracije podataka u GIS-u (Thamir Ibraheem 2011)

QGIS (engl. *quantum GIS*) je softver geografskog informacijskog sustava koji je besplatan i otvorenog koda (URL 30). Radi se o softveru koji podržava pregled, uređivanje, ispis i analizu geoprostornih podataka u nizu različitih formata. Inženjeri QGIS-a definirali su ga kao softver za geografski informacijski sustav koji korisnicima omogućuje analizu i uređivanje prostornih informacija, uz sastavljanje i izvoz grafičkih karata. QGIS podržava rasterske, vektorske, mrežaste slojeve i oblake točaka. Implementacijom QGIS tehnologije na kreiranu presliku stvarnosti moguće je dobiti kvalitetne rezultate i njihovu vizualizaciju. U radu s prostornim podacima, izuzetno je važna vizualizacija rezultata kako bi se oni mogli interpretirati.

QGIS je u ovome radu primijenjen za uređivanje podataka s kojima će se ući u kod:

- definiranje područja istraživanja,
- rezanje podataka na područje istraživanja,
- kreiranje grida,
- filtriranje objekata prema veličini,
- dodavanje stupaca s koordinatama i
- vizualizacija rezultata.

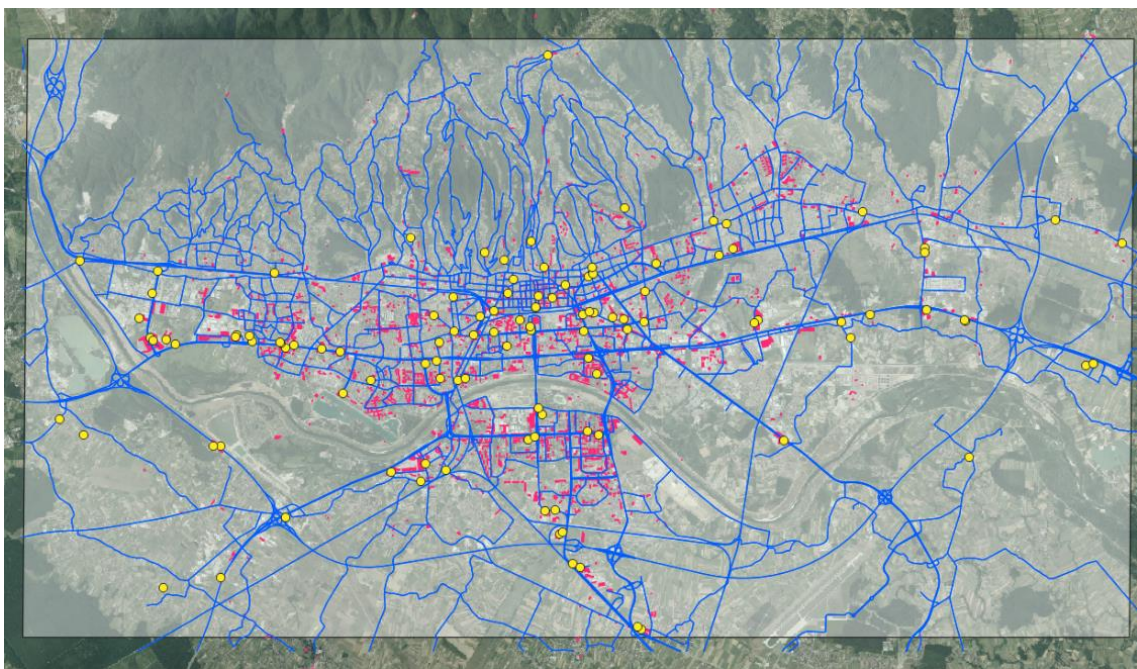
Područje istraživanja u ovome radu obuhvaća grad Zagreb i njegovu okolicu. Kao granice su uzete  $X$  i  $Y$  koordinate  $X_{min} = 382181$ ,  $X_{max} = 389681$ ,  $Y_{min} = 393634$  i  $Y_{max} = 402134$ .



Važno je da definirano područje obuhvaća širu okolicu grada Zagreba, zato što je za pretpostaviti da bi rezultat optimizacije mogao biti upravo izvan samog centra grada. Većina europskih infrastruktura

stanica za punjenje električnih automobila započinje pokrivanjem potražnje u samome centru grada, a tek onda uslijedi planiranje proširenja mreže u vanjske dijelove grada. Područja s manjom gustoćom stanovništva su upravo područja gdje najviše nedostaju stanice za punjenje. Ovakvim planiranjem mreže je također moguće riješiti problem straha od nestanka energije daleko od prvog sljedećeg dostupnog punjača (engl. *anxiety range*).

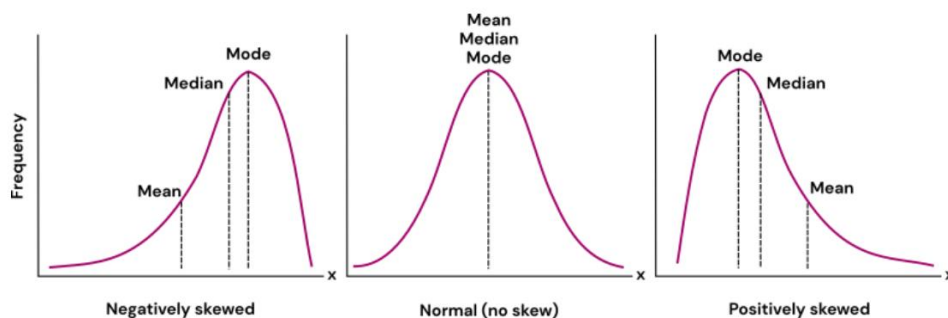
Prikupljeni ulazni podaci odrezani su u ručno izrađeni pravokutnik. Plavim linijama prikazane su prometnice, žutim točkama postojeće stanice za punjenje električnih automobila, a crvenim poligonima parkirna mjesta.



*Slika 2.15 Ulazni podaci odrezani u definirano područje interesa*

Sljedeći korak bio je izrada grida koji će obuhvatiti definirano područje. Odlučeno je da će veličina jedne ćelije biti  $750 * 750$  m. Ova dimenzija ćelije odgovara gustoći ostalih podataka koji se nalaze u definiranom području istraživanja (punjači, prometnice, parkirališta...). Klasifikacijom grida prema medijanu potražnje kreira se preslika stanja s optimalnom razinom detalja. Za razliku od izvornog koda gdje je korištena aritmetička sredina, u ovome kodu je optimizacija provedena korištenjem medijana, s obzirom na to da je medijan vrijednost koja je otpornija na ekstremne vrijednosti (vidi sliku 2.5.3) (URL 31).

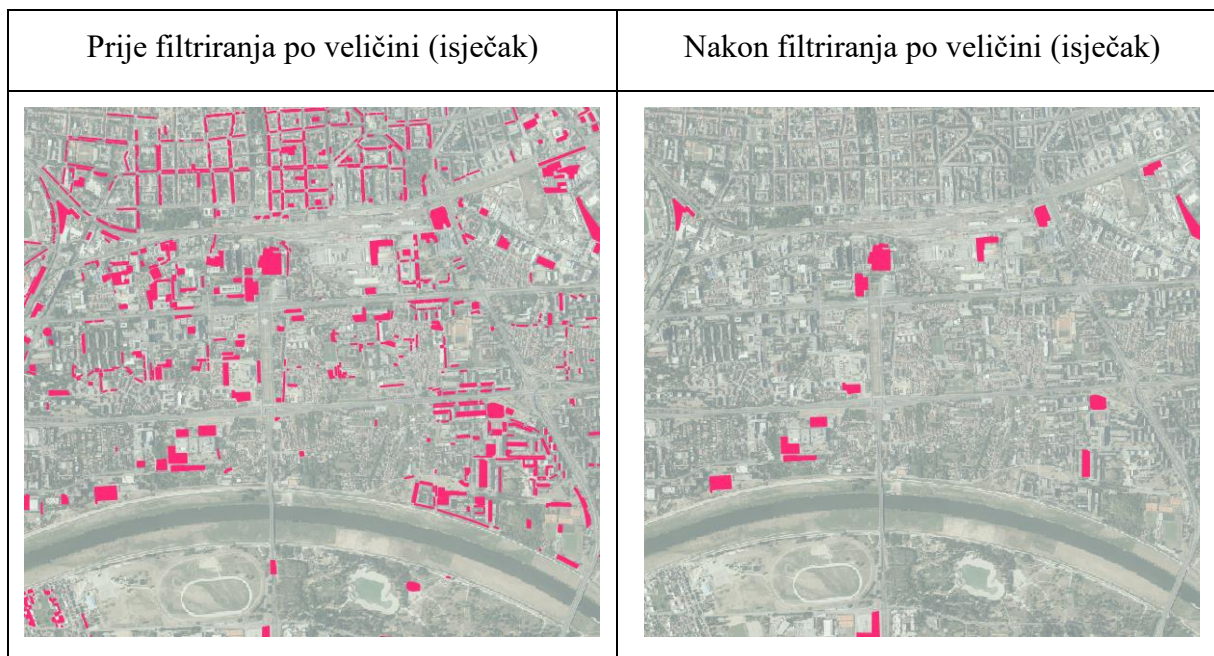




Slika 2.16 Usporedba vrijednosti aritmetičke sredine, medijana i moda (URL 31)

Većom veličinom ćelije izgubila bi se značajna količina detalja i rezultati bi bili oštećeni. Važno je da svaka ćelija vjerodostojno predstavlja četvrt koju pokriva. Ćelija manjih dimenzija značajno bi otežala računalnu izvedivost ovog koda, s obzirom na to da veći obujam ulaznih podataka iziskuje na većim računalnim resursima. Za zaključiti je da odabrana veličina ćelije predstavlja kompromis između preciznosti analize i računalne izvedivosti.

Kako bi se smanjio obujam podataka parkirališta s kojima će se ući u provedbu koda, izbačena su parkirališta površine manje od 5000 m<sup>2</sup>. Na taj način kod će se provesti značajno brže, a rezultati će biti relevantniji s obzirom na to da veće parkirne površine imaju kapacitet za instalaciju većeg broja stanica za punjenje, odnosno punjača.



Svakom parkiralištu bilo je potrebno izračunati centroid i dodati stupce koordinata centroida u atributnu tablicu sloja. Nakon ovog koraka, sloj s parkiralištima je pripremljen za rad u Python kodu.

### 3. REZULTATI

U ovome poglavlju bit će predstavljeni rezultati: optimalne nove lokacije stanica za punjenje električnih vozila. Radi lakšeg donošenja zaključaka, dobivene lokacije bit će postavljene s različitim ulaznim podacima u pozadini (gustoća postojeće mreže stanica za punjenje, prometnost). Svaka dobivena lokacija nalazi se na parkiralištu ili u garaži.

Rezultati su dobiveni pokretanjem koda koji se temelji na MILP algoritmu prethodno opisanom u ovome radu, a rezultat predstavlja sloj sa 16 predloženih optimalnih lokacija za stanice za punjenje električnih vozila. Kako bi se dobiveni rezultati mogli interpretirati, oni su uneseni u QGIS. Ono što dobivene lokacije čini optimalnima je:

- pokrivanje postojeće potražnje za punjenjem na mjestima gdje nije adekvatno pokrivena,
- rješavanje straha od ostanka bez energije kod vozača (engl. *anxiety range*),
- veliki kapaciteti stanica (veličina parkinga),
- blizina prometnica i
- povećanje profita.

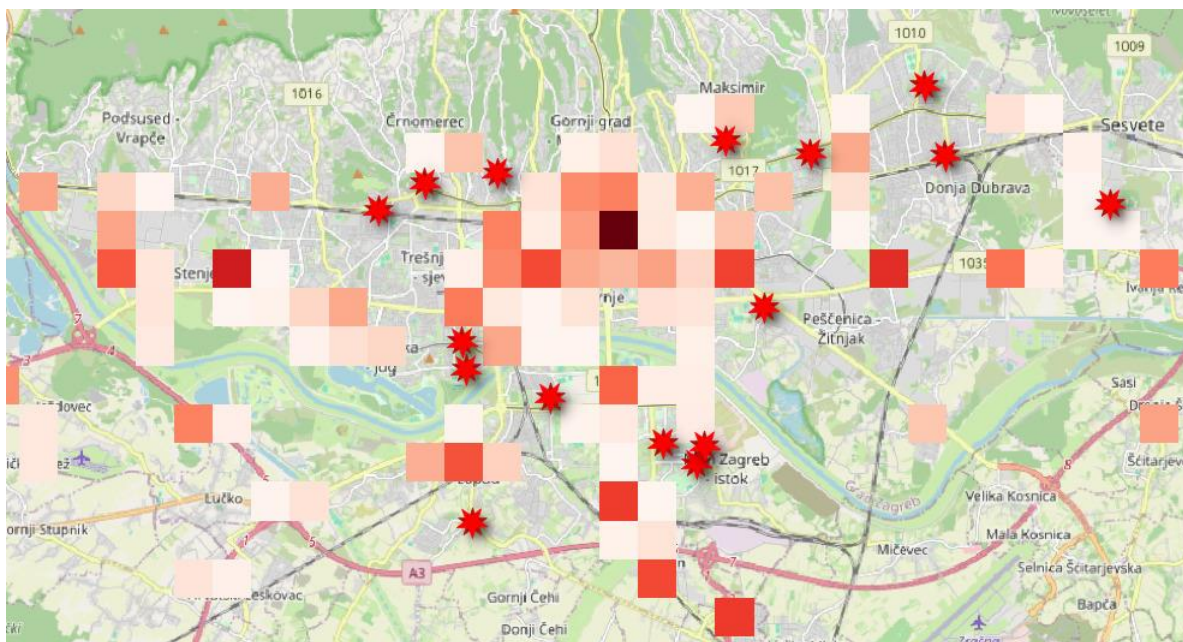
Većina optimalnih lokacija nalaze se na parkiralištima uz veće trgovačke centre, što je veoma pogodno jer su to lokacije velikog protoka kroz gotovo čitav dan. Dostupnost je jedan od vodećih faktora koji određuje koliko će pojedina stanica za punjenje biti posjećena i samim time ostvariti veći profit. Vozači električnih automobila na ovaj način ne bi trebali skretati sa svoje uobičajene putanje i mijenjati svoju dnevnu rutinu da bi napunili svoj automobil. Mjesta velikog protoka ljudi poput trgovačkih centara, poslovnih četvrti i centra grada su optimalna upravo zato što su to mjesta koja su dio svakodnevnih rutina većine ljudi, neovisno o potrebi za punjenjem automobila. Također, većina velikih trgovačkih centara nalazi se u vanjskom pojasu grada, što su slučajno upravo područja gdje je manjak stanica za punjenje i potreba za punjenjem nije zadovoljena. Za pretpostaviti je i da bi značajan broj vozača ostavilo svoj automobil na punjenju dok obavljaju kupovinu u obližnjem trgovačkom centru i samim time pozitivno utjecalo na njegovu ekonomiju. Iako je za punjenje baterije do maksimalnog kapaciteta potrebno izdvojiti i do nekoliko sati, može se pretpostaviti da većina vozača ne dolazi potpuno prazne baterije i nema namjeru puniti bateriju do maksimalnog kapaciteta. Velika parkirališta i garaže oko trgovačkih centara idealne su zone za postavljanje stanica za punjenje velikih kapaciteta (10 i više punjača po stanici). Vlasnici električnih automobila u kvartovima gdje



potražnja za punjenjem nije zadovoljena imali bi mjesto gdje bi mogli napuniti svoj automobil bez dodatnih troškova i gubljenja vremena na odlazak do udaljenih stanica za punjenje.

Slika 3.1 prikazuje optimalne lokacije (crvene zvjezdice) i gustoću postojećih stanica za punjenje u mreži prikazanu nijansama crvene kojima su klasificirane ćelije grida koje sadrže informaciju o barem jednom punjaču. Svjetlije nijanse crvene impliciraju manju gustoću, a tamnije nijanse visoku gustoću. Za primijetiti je da se u centru grada, gdje je visoka gustoća stanovništva, nalazi velik broj stanica za punjenje i potražnja za punjenjem je zadovoljena. Nijedna od predloženih optimalnih stanica za punjenje ne nalazi se u „crvenim zonama“. Za zaključiti je da se u gradu Zagrebu infrastruktura punionica započela razvojem iz centra (područja visokog protoka i dostupnosti) prema vanjskim pojasevima grada. Četvrti u kojima je potrebno nadodati predložene lokacije stanica za punjenje kako bi se zadovoljila potražnja su sljedeće: Botinec, Črnomerec, Donja Dubrava, Kajzerica, Knežija, Maksimir, Novi Zagreb istok, Peščenica i Sesvete.

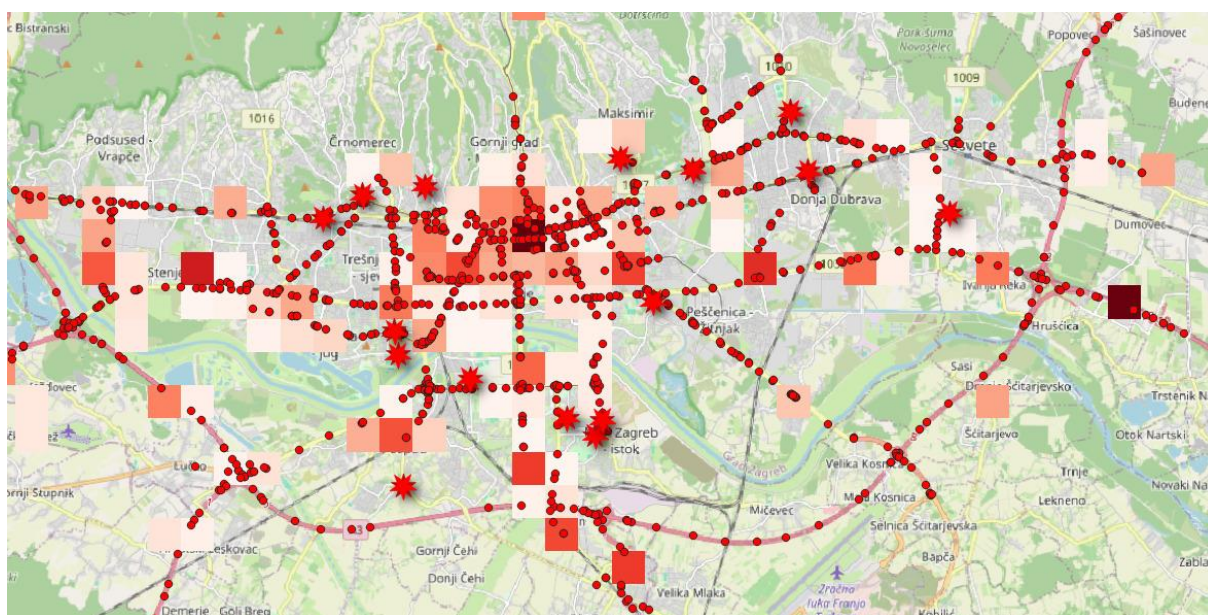
Svaka predložena optimalna lokacija okružena je ćelijama svijetlih nijansi ili neobojenim ćelijama, čime se može zaključiti da kod temeljen na MILP metodi funkcionira i ispravno koristi relevantne faktore u donošenju odluka.



Slika 3.1 Optimalne lokacije i gustoća postojećih punjača

Slika 3.2 prikazuje sve što i Slika 3.1, no ovdje su radi dodatnog razumijevanja dodani podaci o zabilježenoj prometnosti. Jasno je da gustoća prometa značajno raste približavanjem centru grada,

odnosno pada udaljavanjem od centra i duž zaobilaznica. Također, važno je primijetiti i uzeti u obzir da područja oko trgovačkih centara imaju visoku prometnost i time se podiže prethodno spomenut faktor dostupnosti. Područja u kojima se nalaze optimalne lokacije su upravo ona područja u kojima nedostaje stanica za punjenje, a imaju visoku prometnost. Analogno tome, primjetljivo je i da optimalne lokacije nisu generirane u područjima visoke prometnosti koje imaju bar nekoliko punjača u okolici. Konačno, moguće je pretpostaviti da bi stanice za punjenje postavljene na predložene lokacije značajno smanjile opterećenje postojećih stanica, vrijeme čekanja dolaska na red u svim stanicama i prometnu gužvu u obližnjim prometnicama.



*Slika 3.2 Optimalne lokacije i podaci o prometu*

Predložene lokacije predstavljaju kompromis između svih značajnih faktora. Primjerice, postavljanje stanice malog kapaciteta u područje visoke potražnje rezultirat će stvaranjem reda čekanja i frustracijom vozača električnih automobila koji bi morali pronaći sljedeću najbližu stanicu za punjenje. Okrenemo li situaciju, postavljanjem stanice velikog kapaciteta u područje niske potražnje rezultirat će stanicom koja ne uspijeva napuniti svoje kapacitete i ostvariti predviđeni profit.

## 4. DISKUSIJA

Istraživanje provedeno za švedski grad Västerås (Bian i dr. 2018). proizvelo je rezultate usporedive s rezultatima ovog rada. Za razliku od ovog rada, u Bianovom istraživanju u optimizaciju je kao faktor uključena namjena određenog područja (stambena, komercijalna, prirodno-rekreativna, miješana namjena i sl.). U ovome radu to nije uzeto kao faktor radi pojednostavljivanja koda i povećanja njegove računalne izvedivosti. Dok je Bianovo istraživanje rezultiralo s 10 optimalnih lokacija, rezultat ovog rada je nešto brojniji sa 16 optimalnih lokacija. Uzevši u obzir da je u Bianovom radu područje istraživanja nešto manje nego u ovome, rezultat je proporcionalan površini područja istraživanja i tome se može pripisati razlika u kvantiteti rezultata. Usporede li se Slika 3.1 i Slika 1.2, može se primijetiti da je rezultat veoma sličan. U oba slučaja se većina optimalnih lokacija nalazi u vanjskim pojasevima grada gdje je potražnja za punjenjem raste, a infrastruktura za punjenje ju ne uspijeva pratiti. Prateći tumač u vizualizaciji Bianovih rezultata (Slika 1.2), može se primijetiti da je značajan udio optimalnih lokacija u komercijalnim zonama što su zapravo iste zone u kojima se nalazi većina rezultata ovoga rada. Može se zaključiti da su obje metode valjane i donose kvalitetne rezultate, unatoč značajnim razlikama u pristupu istome problemu.

Rezultati istraživanja na području Lisabona (Frade i dr. 2011) poprilično su različiti od rezultata ovog rada i time dobro ilustriraju utjecaj izbora metode na dobivene rezultate. Za razliku od ovog rada gdje se kreirao pravilan grid, u Fradeovom radu je područje grada podijeljeno u oblikom i površinom nejednake zone, te je svakoj zoni dodijeljen „centroid potražnje“. To je točka koja je geometrijski centroid pojedine zone i sadrži podatak o potražnji za punjenjem unutar te zone. Pored toga, matematička metoda koja stoji u pozadini takve optimizacije ponešto je različita od one primijenjena u ovome radu. Usporede li se Slika 3.1 i 1.4, odmah je primjetljivo da postoji značajna razlika u kvantiteti rezultata. To je zato jer se u Fradeovom istraživanju optimizaciji pristupilo kao postupku koji mora donijeti više rezultata između kojih će se naknadno provesti izbor na temelju nekih drugih faktora kojima se želi dati prednost. Lokalna vlada grada Lisabona unaprijed je odredila broj stanica koji bi trebao pokriti potražnju za punjenjem, stoga je iz rezultata ovakve optimizacije potrebno odabrati samo one koji su „najbolji od najboljih“. Na taj način će se broj optimalnih lokacija reducirati da ispoštuje ograničenje propisano od vlade, a potražnja za punjenjem bit će zadovoljena. Ovakva optimizacija može se protumačiti kao „optimizacija otvorenog kraja“.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovome radu istražene su mogućnosti upotrebe GIS-a u pronalasku optimalnih lokacija za postavljanje novih stanica za punjenje električnih automobila. Korištenjem Pythona kao platforme za programiranje algoritma i QGIS-a za vizualizaciju, dobiveni su kvalitetni rezultati koje je lako interpretirati. Odabrani ulazni podaci odnose se na grad Zagreb, preciznije na područje istraživanja ranije definirano u materijalima i metodama.

Za određivanje optimalnih lokacija odabrana je MILP metoda (engl. *Mixed Integer Linear Programming*), koja se u dosadašnjim radovima slične prirode pokazala korisnom i kvalitetnom. MILP metoda omogućuje uključivanje niza faktora u donošenje odluka, što je izuzetno važno za stvaranje rezultata koji će biti ostvarivi u svakome aspektu (financijski, prostorni, kapacitivni...). Kao rezultat je dobiveno 16 optimalnih lokacija koje su uglavnom pravilno raspoređene u vanjskom pojasu grada, blizu trgovačkih centara i zaobilaznica. Područja u kojima se pojavilo najviše rezultata su parkirališta trgovačkih centara koja su površinom velika i nemaju stanica za punjenje u blizini. Ovakva parkirališta predstavljaju optimalno rješenje, jer radi svoje prostranosti imaju mogućnost instalacije većeg broja punjača, a samim time i povećanja kapaciteta stanice.

Važnost optimizacije u pronalasku potencijalnih lokacija ponajviše se očitava u povećanju dostupnosti i efikasnosti, smanjenju zagušenja i maksimalnom iskorištavanju dostupnih resursa. Ako bi se lokacije stanica za punjenje nesmotreno odabrale, njihov potencijal u pokrivanju potražnje i ostvarivanju profita ne bi bio ostvaren.

Budućnost razvoja infrastrukture stanica za punjenje može se odviti u nekoliko različitih scenarija od kojih se jedan čini najvjerojatnijim. Unaprjeđenje manufakture električnih automobila dovesti će do pada njihovih cijena i porasta interesa za kupnju. Udio električnih automobila u prometu bit će sve veći, a proporcionalno tome rasti će potražnja za punjenjem. Infrastruktura bi se mogla proširiti na način da se nadoda još stanica duž zaobilaznica grada i povećaju kapaciteti postojećih stanica za punjenje kroz čitav grad, ovisno o prostornim, financijskim i ostalim ograničenjima. Električni automobili predstavljaju korak u budućnost pametnih i održivih gradova, smanjenja stakleničkih plinova, poboljšanja kvalitete zraka i samim time zdravlja građana. Pravilno planiranje daljnjeg razvoja infrastrukture stanica za punjenje jedno je od ključnih koraka u ohrabriranju prelaska na čiste i održive izvore energije.

## LITERATURA

- Alam M. S., Pillai R. K., Murugesan N. (2021): Developing Charging Infrastructure and Technologies for Electric Vehicles
- Bennet J. (2010): OpenStreetMap, Be Your Own Cartographer
- Bian C., Li H., Wallin F., Avelin A., Lin L., Yu Z. (2018): Finding the optimal location for public charging stations – a GIS-based MILP approach
- Bressert E. (2012): SciPy and Numpy
- Chin L. L. H., Dutta T. (2016): NumPy Essentials
- Frade I., Ribeiro A., Goncalves G., Antunes A. P. (2011): Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal
- Ge S., Feng L., Liu H. (2011): The planning of electric vehicle charging station based on Grid partition method
- Jensen M., Dignum F., Vanhee L. (2021): Agile Social Simulations for Resilience
- Lee J., An M., Kim Y., Seo J. (2021): Optimal Allocation for Electric Vehicle Charging Stations
- Liu K., Wang Y., Lai X. (2022): Data Science-Based Full-Lifespan Management of Lithium-Ion Battery
- Mansini R., Ogryczak W., Speranza M. G. (2015): Linear and Mixed Integer Programming for Portfolio Optimisation
- Palanisamy S., Chenniappan S., Sanjeevikumar P. (2023): Fast-Charging Infrastructure for Electric and Hybrid Vehicles
- Patterson C. (2015): Python: Learn the Basics FAST From Python Programming Experts
- Qin J., Qiu J., Chen Y., Wu T., Xiang L. (2022): Charging Stations Selection Using a Graph Convolutional Network from Geographic Grid

Thamir Ibraheem A. (2011): Development and Use of Large-Scale Land Information System (LIS) by Using Geographic Information System (GIS) and Field Surveying

Tosi S. (2009): Matplotlib for Python Developers

Tutić D., Vučetić N., Lapaine M. (2002): Uvod u GIS, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Veintimilla-Reyes J., Cattrysse D., De Meyer A., Van Orshoven J. (2016): Mixed Integer Linear Programming (MILP) approach to deal with spatio-temporal water allocation

## POPIS URL-OVA

URL 1. <https://mapscaping.com/qgis-with-python/> (23.5.2024.)

URL 2. <https://cleantechnica.com/2024/03/18/ev-battery-prices-dropping-a-lot-this-year-next/> (5.6.2024.)

URL 3. <https://eepower.com/news/examining-the-impact-of-falling-ev-battery-prices/#> (5.6.2024.)

URL 4. <https://www.motorfinanceonline.com/news/incentives/?cf-view> (5.6.2024.)

URL 5. <https://pcchip.hr/elektricna-vozila/najpopularnija-elektricna-vozila-u-hrvatskoj/> (23.5.2024.)

URL 6. <https://earth.org/electric-cars-environment/> (23.5.2024.)

URL 7. <https://wiki.openstreetmap.org/> (6.6.2024.)

URL 8. <https://www.openstreetmap.org/#map=11/45.7934/15.9975> (6.6.2024.)

URL 9. <https://data.gov.hr/o-portalu-otvorenih-podataka-i-sto-su-otvoreni-pod> (8.6.2024.)

URL 10. <https://data.gov.hr/ckan/dataset/geoportal-elektricne-punionice> (8.6.2024.)

URL 11. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/mixed-integer-linear-programming> (6.6.2024.)

URL 12. <https://towardsdatascience.com/mixed-integer-linear-programming-formal-definition-and-solution-space-6b3286d54892> (6.6.2024.)



- URL 13. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (7.6.2024.)
- URL 14. <https://www.kdnuggets.com/leveraging-ai-to-design-fair-and-equitable-ev-charging-grids> (7.6.2024.)
- URL 15. [https://www.researchgate.net/figure/Average-and-peak-EV-charging-demand-profiles-from-LCL-trials\\_fig9\\_299490655](https://www.researchgate.net/figure/Average-and-peak-EV-charging-demand-profiles-from-LCL-trials_fig9_299490655) (7.6.2024.)
- URL 16. [https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-electric-vehicle-charging-infrastructure-per-million-population-in-selected\\_fig1\\_320211098](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-electric-vehicle-charging-infrastructure-per-million-population-in-selected_fig1_320211098) (7.6.2024.)
- URL 17. <https://1charging.com/slow-vs-fast-ev-charging-types-of-ev-charging/> (7.6.2024.)
- URL 18. <https://ev-database.org/cheatsheet/useable-battery-capacity-electric-car> (8.6.2024.)
- URL 19. <https://www.energysage.com/electricity/house-watts/how-many-watts-does-an-electric-car-charger-use/> (8.6.2024.)
- URL 20. <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547> (9.6.2024.)
- URL 21. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Python\\_\(programski\\_jezik\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Python_(programski_jezik)) (8.6.2024.)
- URL 22. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Python-logo-notext.svg> (9.6.2024.)
- URL 23. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Objektno\\_orijentirano\\_programiranje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Objektno_orijentirano_programiranje) (8.6.2024.)
- URL 24. <https://towardsdatascience.com/where-should-we-be-placing-ev-charging-stations-using-ggis-and-pulp-d2bb7b664a55> (9.6.2024.)
- URL 25. <https://github.com/obedsims/Musk-Model> (9.6.2024.)
- URL 26. [https://coin-or.github.io/pulp/main/the\\_optimisation\\_process.html](https://coin-or.github.io/pulp/main/the_optimisation_process.html) (9.6.2024.)
- URL 27. <https://geopandas.org/en/stable/> (9.6.2024.)
- URL 28. <https://docs.python.org/3/library/math.html> (9.6.2024.)
- URL 29. <https://www.esri.com/en-us/home> (12.6.2024.)
- URL 30. <https://en.wikipedia.org/wiki/QGIS> (12.6.2024.)
- URL 31. <https://ledidi.com/academy/measures-of-central-tendency-mean-median-and-mode> (13.6.2024.)

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1.1 Grid ćelija i pripadajući čvorovi potražnje (Bian i dr. 2018).....   | 5  |
| Slika 1.2 Optimalne lokacije za nove punjače .....   | 6  |
| Slika 1.3 Shematski prikaz genetskog algoritma za odlučivanje .....  | 7  |
| Slika 1.4 Karta dogovorenih zona, njihovih centroida i optimalnih lokacija stanica za punjenje (Frade i dr. 2011)..... | 8  |
| Slika 2.1 OSM logo.....  | 9  |
| Slika 2.2 Sučelje platforme OpenStreetMap.....   | 10 |
| Slika 2.3 Isječak sloja parkirališta prije obrade .....  | 10 |
| Slika 2.4 Logo Portala otvorenih podataka (URL 9) .....  | 11 |
| Slika 2.5 Isječak sloja postojećih punjača grada Zagreba.....  | 12 |
| Slika 2.6 Grafički prikaz uvjeta iz jednadžbi (2) i (3) .....  | 14 |
| Slika 2.7 Karta punionica električnih automobila u SAD-u (URL 14).....   | 16 |
| Slika 2.8 Ovisnost potražnje punionica o dobu dana (URL 15) .....  | 17 |
| Slika 2.9 Broj punjača na milijun stanovnika (URL 16).....   | 18 |
| Slika 2.10 Shematski prikaz litij-ionske baterije (Liu i dr. 2022).....  | 21 |
| Slika 2.11 Logo programskog jezika Python (URL 22) .....   | 23 |
| Slika 2.12 Shematski prikaz objektno orijentiranog programiranja (Jensen i dr. 2021).....                              | 23 |
| Slika 2.13 Shematski prikaz koraka optimizacije PuLP paketom (URL 26).....   | 25 |
| Slika 2.14 Shematski prikaz integracije podataka u GIS-u (Thamir Ibraheem 2011) .....                                  | 27 |
| Slika 2.15 Ulazni podaci odrezani u definirano područje interesa .....   | 29 |
| Slika 2.16 Usporedba vrijednosti aritmetičke sredine, medijana i moda (URL 31).....                                    | 30 |
| Slika 3.1 Optimalne lokacije i gustoća postojećih punjača.....   | 32 |
| Slika 3.2 Optimalne lokacije i podaci o prometu.....   | 33 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 2.3.1 Tipovi punjača i njihova svojstva (URL 17)..... | 20 |
|---|----|



## ŽIVOTOPIS

## Josip Bolješić

Datum rođenja: 26/12/1999

Državljanstvo: hrvatsko

Spol: Muško

## KONTAKT

Malin 44  
51550 Mali Lošinj, Hrvatska  
(Kućna)

✉ [josip.boljke@gmail.com](mailto:josip.boljke@gmail.com)

☎ (+385) 915628271



## RADNO ISKUSTVO

19/07/2020 – 30/07/2020 Mali Lošinj, Hrvatska

**Katastarski geodet** Geodetske usluge TERRA, Braće Ivana i Stjepana Vidulića 115a

Obavljanje studentske prakse u sklopu preddiplomskog studija geodezije i geoinformatike. Praksa je uključivala opći uvid u rad i organizaciju geodetskog ureda, prikupljanje podataka na terenu GNSS metodom, kartiranje prikupljenih podataka i pripremu parcelacijskog elaborata.

10/11/2022 – 13/01/2023 Zagreb, Hrvatska

**Službenik za unos podataka** Multisoft d.o.o., Ulica Milana Ogrizovića 34

Unos i ažuriranje podataka internetske mreže Republike Hrvatske korištenjem programskog sustava *SmallWorld*.

25/01/2023 – 26/04/2023 Zagreb, Hrvatska

**Službenik za unos podataka** LIST LABS d.o.o., Selska cesta 50

Digitalizacija i ažuriranje podataka topografskih karata Republike Hrvatske korištenjem programskog sustava QGIS. Kontrola usklađenosti izrađenih prikaza s pravilima topografskog ključa.

## OBRAZOVANJE I OSPOSOBLJAVANJE

20/09/2021 – 21/06/2024 Zagreb, Hrvatska

**Magistar inženjerstva geodezije i geoinformatike** Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Adresa Kačićeva ulica 26, 10000, Zagreb, Hrvatska |

Internetske stranice <https://www.geof.unizg.hr/>

18/07/2018 – 13/07/2021 Zagreb, Hrvatska

**Sveučilišni prvostupnik (baccalaureus) inženjer geodezije i geoinformatike** Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Adresa Kačićeva ulica 26, 10000, Zagreb, Hrvatska |

Internetske stranice <https://www.geof.unizg.hr/>

07/09/2014 – 14/06/2018 Mali Lošinj, Hrvatska

**Srednja školska sprema** Srednja škola Ambroza Haračića

Adresa Omladinska ulica 12, 51550, Mali Lošinj, Hrvatska |

Internetske stranice <https://www.ss-aharacica-malilosinj.com.hr/>

## JEZIČNE VJEŠTINE

MATERINSKI JEZIK/JEZICI: hrvatski

Drugi jezici:

engleski

Slušanje C1

Čitanje C1

Pisanje C1

Govorna produkcija C1

Govorna interakcija C1

Razine: A1 i A2: temeljni korisnik; B1 i B2: samostalni korisnik; C1 i C2: iskusni korisnik

## DIGITALNE VJEŠTINE

QGIS (program za vizualizaciju, upravljanje, uređivanje i analizu geopodataka) | osnove programskih jezika Python, PostgreSQL i R | dobro poznavanje AutoCAD-a | MS Office (Word, Excel, PowerPoint) | komunikacijski programi (MS Teams, Zoom, Skype) | Internet

## VOZAČKA DOZVOLA

- **Vozačka dozvola:** AM
- **Vozačka dozvola:** B

## KOMUNIKACIJSKE I MEĐULJUDSKE VJEŠTINE

- **Vještine**  
Spreman sam za timski rad, prilagodljiv, komunikativan i rado prihvaćam kritiku.