

# Optimalni izbor lokacija za punionice električnih vozila

---

Islamović, Adnan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:258802>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**OPTIMALNI IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE  
ELEKTRIČNIH VOZILA**

Rijeka, rujan 2023.

Adnan Islamović

00690668905

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**OPTIMALNI IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE**  
**ELEKTRIČNIH VOZILA**

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2023.

Adnan Islamović

00690668905

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Tehnika visokog napona**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Adnan Islamović (0069066890)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike  
Modul: Elektroenergetika

Zadatak: **OPTIMALNI IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA**

### Opis zadatka:

Tehnički zahtjevi za punjenje električnih vozila. Pregled vrsta i tehnologija za punjenje električnih vozila. Kriteriji za izbor lokacija za punionice električnih vozila, sa aspekta mreže i sa aspekta korisnika. razrada modela za optimalni izbor lokacija za punionice električnih vozila.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*A. Islamović*

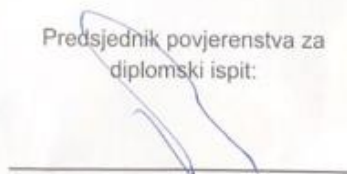
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Dubravko Franković

## IZJAVA

Sukladno članku 9. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci izjavljujem da sam izradio ovaj diplomski rad samostalno, koristeći vlastito znanje i navedenu literaturu, u razdoblju od datuma zadavanja zadatka do datuma predaje.

Adnan Islamović

*A. Islamović*

## **ZAHVALA**

Neizmjerne sam zahvalan svojoj obitelji na potpori i strpljenju tokom ovih godina. Također zahvala prijateljima koji su studiranje učinili puno lakšim i ugodnijim.

Također zahvalu upućujem i svom mentoru prof. dr. sc. Vitomiru Komeni koji je svojim savjetima i uputama pomogao pri izradi ovog rada.

## Sadržaj

1.	UVOD .....	1
2.	TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA .....	2
2.1.	Općenito o električnim vozilima i punionicama za električna vozila.....	3
2.1.1.	Baterije električnih vozila .....	9
2.1.2.	Punionice električnih vozila.....	12
2.2.	Priključak za punjenje električnih vozila.....	14
2.3.	Snaga punjenja električnih vozila .....	18
2.4.	Kabeli za punjenje električnih vozila .....	19
2.5.	Konstrukcija i veličina punjača .....	21
3.	TEHNOLOGIJE PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA .....	22
3.1.	Punjenje putem kućne utičnice .....	23
3.2.	Brzo punjenje .....	24
3.3.	Super brzo punjenje .....	25
3.4.	Induktivno punjenje .....	26
4.	KRITERIJI ZA IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA .....	28
4.1.	Sa aspekta distribucijske mreže .....	29
4.1.1.	Planiranje potražnje .....	31
4.1.2.	Razine napona .....	35
4.2.	Sa aspekta vlasnika punionica .....	38
4.3.	Sa aspekta korisnika punionica .....	41
5.	RAZRADA MODELA ZA OPTIMALNI IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA .....	43
5.1.	Optimizacijski model .....	50
5.2.	Numerički rezultati .....	52
6.	PREGLED TEHNIKA ZA OPTIMALNI ODABIR LOKACIJA PUNIONICA ELEKTRIČNIH VOZILA NA PRIMJERU IRSKE .....	59
6.1.	Primjer simulacije .....	60
7.	ZAKLJUČAK.....	64
	LITERATURA.....	65
	SAŽETAK.....	69
	SUMMARY .....	70

# 1. UVOD

Rastuća popularnost i razvoj električnih vozila nametnulo je novu problematiku što, a to je problem izbora lokacija punionica električnih vozila. Ubrzanju nalaženja rješenja što se ovog problema tiče pridonijelo je i današnje limitirano postojanje fosilnih goriva i ekološki problemi vezani uz emisije stakleničkih plinova. Istraživanja za optimalnu lokaciju stanica za punjenje električnih vozila su nezaobilazna prepreka ka postupku elektrifikacije prometne infrastrukture. Naravno, postoje brojni izazovi s kojima se treba suočiti pri implementaciji električnih vozila u velikim razmjerima. Štoviše, postojeće benzinske postaje prvenstveno su namijenjene punjenju automobila s motorima s unutarnjim izgaranjem, pa kombinacija infrastrukture za punjenje s konvencionalnim benzinskim postajama možda neće biti prikladno jer će relativno dulji proces punjenja zasititi ograničeni prostor benzinske postaje. Morat će se pažljivo planirati gradnja punionica za punjenje električnih vozila kako bi se modernizirala prometna infrastruktura. Potrebno je proučavati kako će električna vozila biti integrirana neprimjetno u prometni sustav s fokusom na stanice za punjenje te će se tako pomoći da gradovi postanu "pametni". Stoga, na najosnovnija pitanja o električnim vozilima, kao što su cijena i domet vozila, djelomično se može odgovoriti samo uz pomoć dobro razvijene strukture punionica električnih vozila. Istraživanja su pratila različite vrste pristupa, ciljne funkcije, ograničenja za formuliranje problema. Osim toga, bitno je razmatranje i o utjecaju opterećenja električnih vozila na distribucijsku mrežu, utjecaju na okoliš i gospodarskom utjecaju. Broj i raspored punionica važan je čimbenik koji utječe na razvoj industrije električnih vozila, a koji je povezan s različitim gospodarskim i društvenim čimbenicima. Sve navedeno utječe na rad samog poslovanja električnih automobila.

U ovom radu obradit će se različiti čimbenici koji utječu na optimalnu lokaciju stanica za punjenje električnih vozila, izazove uključene u izgradnju robusne mreže punionica i potencijalna rješenja za rješavanje ovih problema. Udubljujući se u složenost infrastrukture punionica, nadam se da će se steći dublje razumijevanje uloge koju te stanice imaju u usvajanju električnih vozila i prijelazu prema održivijoj budućnosti.



## 2. TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA

Dani su određeni tehnički zahtjevi za punjenje električnih vozila koje treba uzeti u obzir kako bi se osigurala sigurnost, pouzdanost i učinkovitost punjenja električnih vozila. Tehnički zahtjevi su ključni za izbor punionica za električno vozilo. Prvi zahtjev koji se dotiče je priključak za punjenje koji nije univerzalan za sva električna vozila, stoga se obično koristi priključak tipa 1 (J1772) ili tipa 2 (Mennekes) za izmjenično punjenje, dok se za istosmjerno brzo punjenje koriste CCS (Combined Charging System) ili CHAdeMO priključci. Snaga punjenja može se razlikovati ovisno o vrsti punjača. Na primjer, punjači za kućnu uporabu mogu pružati snagu od oko 3,7 kW, dok javni punjači za brzo punjenje mogu pružiti od 50 kW do 350 kW snage. Električna vozila zahtijevaju odgovarajuće napajanje kako bi se adekvatno opskrbili energijom. U slučaju kućne uporabe, to je obično standardna kućna struja od 230 V, a za javne punjače to bi mogla biti trofazna struja na visokom naponu. Punjači moraju biti sigurni za uporabu, kako za korisnika, tako i za vozilo. To može uključivati zaštitu od preopterećenja, zaštitu od kratkog spoja i zaštitu od visokog napona. Važan zahtjev je i kompatibilnost te stoga električna vozila mogu koristiti različite vrste punjača. Tako je važno osigurati da je punjač kompatibilan s električnim vozilom kako bi se osigurao uspješan proces punjenja. Konstrukcija i veličina punjača zahtijevaju dovoljnu izdržljivost i otpornost punjača na vanjske uvjete, te potrebu da budu prikladni za svrhu i mjesto postavljanja. Komunikacija zahtjeva da punjač mora biti u stanju komunicirati s električnim vozilima i imati mehanizme za kontrolu procesa punjenja, kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost punjenja.

## **2.1. Općenito o električnim vozilima i punionicama za električna vozila**

Klasifikacija električnih automobila temeljena na tehnologiji pogonskog sklopa pomaže u razlikovanju različitih vrsta električnih vozila dostupnih na tržištu. Temelji se na načinu uzajamnog funkcioniranja električnog motora i baterije sa ostalim komponentama električnog vozila. Svaka vrsta ima svoje prednosti i razmatranja, ali je bitno naglasiti razliku jer uvelike utječe na kasniji izbor punjenja električnih vozila. Nailazimo na različite vrste konstrukcije električnih vozila, tako su jedna od vrsti ,koja će kasnije biti pobliže objašnjena, električna vozila na baterije koja nude vožnju bez emisija, ali zahtijevaju pristup infrastrukturi za punjenje električnom energijom jer koriste izričito taj način napajanja. Tu su i plug-in hibridna električna vozila pružaju fleksibilnost načina vožnje na električni i benzinski pogon. Hibridna električna vozila nude poboljšanu učinkovitost goriva i smanjene emisije bez potrebe za vanjskim punjenjem. Odabir vrste električnog automobila ovisi o čimbenicima kao što su potrebe vožnje, pristup infrastrukturi za punjenje i individualne preferencije korisnika. Podjela električnih vozila temeljem pogonskog sklopa je idući:

1.) Električna vozila na baterije (BEV) vrsta su električnih vozila (EV) koja rade isključivo na električnu energiju pohranjenu u punjivim baterijama velikog kapaciteta. Baterijska električna vozila nemaju motor s unutarnjim izgaranjem i proizvode nultu emisiju iz ispušne cijevi, što ih čini ekološki prihvatljivima i pridonosi smanjenju onečišćenja zraka i emisija stakleničkih plinova. Također, ovakva konfiguracija vozila je prilično smanjila kompleksnost izvedbe vozila te tako i potrebu za redovitijim održavanjem. Obično koriste velike pakete baterija kako bi vozilu dali prihvatljivu autonomiju. Ovi paketi baterija obično se sastoje od više litij-ionskih baterijskih ćelija spojenih u serijsku i paralelnu konfiguraciju, dajući potreban napon i kapacitet za napajanje vozila. Kapacitet baterije određuje domet vožnje BEV-a. Tipični domet vožnje koju dostiže je od 160 do 250 km, iako neki od njih mogu prijeći čak 500 km sa samo jednim punjenjem. Primjer ovakvog vozila je Nissan Leaf koji je u potpunosti električno vozilo sinkronog motora sa najvećom postignutom snagom od 160 kW sa litij-ionskom baterijom od 59 kWh koja korisnicima omogućuje autonomiju od 360 km.[12]



*Slika 2.1. Primjer baterijskog električnog vozila marke Nissan Leaf [1]*

2.) Plug-In hibridna električna vozila ili kraće PHEV su vozila koja pokreću konvencionalni zapaljivi motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor koji koristi električnu energiju iz baterije koja se napaja vanjskim punionicama. PHEV-ovi mogu pohraniti dovoljno električne energije iz mreže za značajno smanjenje potrošnje goriva u uobičajenim uvjetima vožnje. Ovakva konfiguracija vozila nudi samo određenu fleksibilnost električnog upravljanja, a ostatak relacije preuzima motor sa unutarnjim izgaranjem. Mitsubishi Outlander PHEV ima litij-ionsku bateriju od 13.8 kWh, koja mu omogućuje vožnju oko 50 km samo s električnim motorom. Međutim, također je važno napomenuti da je potrošnja goriva PHEV-a veća nego što navode proizvođači automobila.



*Slika 2.2. Primjer plug-in hibridnog vozila marke Mitsubishi Outlander [2]*

3.) Hibridna električna vozila (HEV) pokreće kombinacija konvencionalnog motora s unutarnjim izgaranjem i električnog motora. Jasna je sličnost sa plug-in hibridnim vozilima, ali razlika je u tome se HEV ne mogu priključiti na mrežu, a PHEV mogu. Zapravo, baterija koja daje energiju električnom motoru puni se zahvaljujući snazi koju stvara motor s unutarnjim izgaranjem vozila. U modernim modelima, baterije se također mogu puniti zahvaljujući energiji koja se stvara tijekom kočenja, pretvarajući kinetičku energiju u električnu energiju. Toyota Prius, u svom hibridnom modelu iz 2023. godine ima sinkroni motor snage 83 kW te litij ionsku bateriju koja teoretski omogućuje autonomiju od čak 25 km u svom potpuno električnom načinu rada.



*Slika 2.3. Primjer hibridnog električnog vozila marke Toyota Prius [3]*

4.) Električna vozila s gorivim ćelijama (Fuel Cell Electric Vehicle ili FCEV) opremljena su električnim motorom koji koristi mješavinu komprimiranog vodika i kisika dobivenog iz zraka, a voda je jedini otpad koji proizlazi iz ovog procesa. Električna energija koju stvara sklop gorivih ćelija pokreće električni motor koji pokreće kotače vozila i osigurava pogon. Električni motor radi slično kao i kod električnih vozila na baterije (BEV). FCEV-ovi zahtijevaju opskrbu vodikovim plinom kao svoje gorivo. Vodik je vrlo rasprostranjen element i može se proizvesti iz različitih izvora, uključujući pretvorbu prirodnog plina, elektrolizu vode korištenjem obnovljive energije i pretvorbu biomase. Vodikov plin pohranjen je u visokotlačnim spremnicima na FCEV-u. Ovi su spremnici dizajnirani za sigurno zadržavanje vodikovog plina i isporuku ga u sklop gorivih ćelija kada je to potrebno. Sustavi za pohranjivanje mogu koristiti komprimirani vodikov plin ili kriogeni tekući vodik, ovisno o dizajnu vozila. Iako se za ovakva vozila smatra da imaju "nultu emisiju", važno je naglasiti da, iako postoji zeleni vodik, većina korištenog vodika dobiva se iz prirodnog plina. Hyundai Nexo FCEV snage 95 kW i litij-ionske baterije od 1.56 kWh je primjer ove vrste vozila, koji može prijeći 620 km bez dolijevanja goriva.



*Slika 2.4. Primjer električnog vozila s gorivim ćelijama marke Hyundai Nexo [4]*



5.) Električna vozila s produženim dometom (Extended-Range-Electrical Vehicles ili ER-EV) su vozila vrlo slična onima u kategoriji BEV. Međutim, ER-EV također imaju dodatni motor s unutarnjim izgaranjem, koji puni baterije vozila ako je potrebno. Ovaj tip motora, za razliku od onih koje nude PHEV i HEV, koristi se samo za punjenje, tako da nije povezan s kotačima vozila. EV s produženim dometom opremljena su baterijama velikog kapaciteta koje pohranjuju veću količinu energije. Ovi paketi baterija koriste naprednu tehnologiju litij-ionskih baterija ili druge tehnologije baterija u nastajanju za postizanje veće gustoće energije. Iako točan domet varira ovisno o modelu i uvjetima vožnje, ova vozila često pružaju domet veći od 320 kilometara ili čak 480 kilometara s jednim punjenjem. Primjer ove vrste vozila je BMW i3, koji ima litij-ionsku bateriju od 42.2 kWh koja rezultira autonomijom od 260 km u električnom načinu rada, a korisnici mogu imati koristi od dodatnih 130 km od načina rada s produženim dometom.



*Slika 2.5. Primjer električnog vozila s produženim dometom marke BMW i3 [5]*

### 2.1.1. Baterije električnih vozila

Jako bitna stavka što se tiče kasnije problematike punionica električnih vozila su baterije. Baterije su ključni dio svakog električnog vozila te tako diktiraju sam razvoj tehnologije i uspješnost električnog prijevoza. Direktno su razlog povećanja porasta broja električnih vozila u svijetu.[7] I dalje su baterije najskuplji dio električnog vozila što samo pokazuje važnost istih. Konstantno se radi na smanjenju troškova proizvodnje, poboljšanju glavnih karakteristika i postojećih tehnologija. Posljednjih godina dalo je velike napredke u razvoju baterija. Shodno tome je i da se svjetska proizvodnja baterija za električna vozila povećala se za 66% . Litij-ionske baterije postale su industrijski standard zbog svoje povoljne kombinacije gustoće energije, izlazne snage i trajnosti. Litij-ionske baterije (Li-Ion) moraju raditi unutar sigurnog i pouzdanog radnog područja koji je ograničen iznosima temperature i napona. Prekoračenje ograničenja ovih iznosa će uzrokovati brzo smanjenje performansi baterije i čak rezultirati sigurnosnim rizicima. Ove baterije osiguravaju potrebnu električnu energiju za napajanje elektromotora vozila i drugih sustava. Osim litij-ionskih baterija postoje i olovne baterije (Pb-PbO<sub>2</sub>). Ove baterije su izumljene 1859. godine i one su najstarija vrsta punjive baterije. Iako je ova vrsta baterije vrlo česta kod konvencionalnih vozila, također se koristi u električnim vozilima. Ima vrlo niske specifične energije i omjere gustoće energije. Akumulator nastaje talogom sumporne kiseline i skupina olovnih ploča. Tu su i nikal-kadmijeve baterije (Ni-Cd). Ova tehnologija je korištena u 90-ima, kao ove baterije imaju veću gustoću energije, ali imaju visok memorijski učinak, nizak životni vijek, a kadmij je vrlo skup i zagađujući element te se zbog tih razloga koristi nikal-metalne-hidridne baterije (Ni-MH). U ovoj vrsti baterija, legura koja pohranjuje vodik se koristi za negativne elektrode umjesto kadmija (Cd). Iako oni imaju višu razinu samopražnjenja od nikal-kadmijskih baterija koriste mnoga hibridna vozila, kao što su Toyota Prius i druga verzija GM EV1. Tu su još i cink-bromne baterije (Zn-Br<sub>2</sub>). Ove vrste baterija koriste otopinu cinka i broma pohranjenu u dva spremnika, i u kojem se bromid pretvara u brom u pozitivnoj elektrodi. Ovu tehnologiju koristio je prototip, nazvan "T-Star", 1993. godine. Baterije natrijeva klorida i nikala (NA-NiCl). Također se nazivaju Zebra, one su vrlo slične natrijevim sumpornim baterijama. Njihova prednost je što se mogu ponuditi do 30% više energije pri niskim temperaturama, iako je njihov optimalni radni raspon između 260°C i 300°C. Natrij-sumporne baterije (Na-S), koje sadrže tekući natrij (Na) i sumpor (S). Ova vrsta baterije ima visoku gustoću energije, visoku učinkovitost punjenja i pražnjenja (89–92%) i dug životni ciklus. Osim toga, njihova je prednost što su ti materijali prilično niske cijene. Mogu



doseći radne temperature između 300°C i 350°C. Ovaj tip baterija koristi se u Ford Ecostaru, modelu koji pokrenut je 1992–1993.

Poteškoće i troškovi skladištenja jedan su od glavnih problema električne energije. Stoga, je skladištenje jako bitan aspekt baterije. Kapacitet baterije predstavlja maksimalnu količinu energije koju je moguće izvući iz baterije pod određenim uvjetima i obično se mjeri u kilovat-satima (kWh), ali moguće je mjeriti i u amper satima (Ah). Baterije većeg kapaciteta omogućuju duže vožnje prije nego što je potrebno ponovno punjenje. Trenutno to rezultira izdvajanjem velikih količina novca u razvoj novih baterija s većom učinkovitošću i pouzdanošću, čime se poboljšava kapacitet skladištenja baterija. U tablici 2.1. prikazan je napredak u kapacitetu baterije vozila kroz godine, te se mogu očekivati još veći uspjesi u budućnosti.

Tablica 2.1. Kapaciteti baterija električnih vozila kroz zadnjih 40 godina [6]

<b>Vozilo</b>	<b>Godina</b>	<b>Kapacitet baterije (kWh)</b>
Audi duo	1983	8
Volkswagen Golf	1987	8
Audi duo	1997	10
General Motors EV1	1999	18.7
General Motors EV1	2000	26.4
Smart ed	2007	13.2
Tesla Roadster	2007	53
Mercedes-Benz SLS AMG E-Drive	2010	60
Tesla Model S	2012	40,60,85
Tesla Roadster	2014	80
Tesla Model S	2015	70,90
BYD e6	2016	82
Tesla Model X	2017	90,100
Jaguar I-Pace	2017	90
Audi e-tron	2018	95
Renault ZOE 2 rs	2018	100
Volvo 40 series	2019	100
Mercedes EQC	2020	93
Ford Mustang Mach-E	2021	99
Tesla Roadster	2022	200

## 2.1.2. Punionice električnih vozila

Nakon saznanja o osnovnim funkcijama električnih vozila i baterija, slijedi infrastruktura bez koje ne funkcionira sustav električnog vozila, a to je stanica za punjenje električnom energijom. Stanica za punjenje je samostojeća struktura, često nalik stupu ili kompaktnom kiosku. Zahvaljujući integriranim sigurnosnim značajkama, stanice za punjenje dramatično smanjuju rizik od požara i strujnog udara. Ukoliko dođe do el. pogreške, stanica za punjenje momentalno prekida prijenos energije i isključuje kabel iz rada. Tako se osigurava korisnik i spašava električno vozilo te kućna i mrežna infrastruktura od naponskih naprezanja. Punionica je obično izrađena od izdržljivih materijala kao što su metalni ili kompozitni paneli kako bi se izdržalo vanjske uvjete. Vanjski dizajn je elegantan i moderan, s čistim linijama i vidljivim logotipom ili natpisom stanice za punjenje koji označava njezinu svrhu. Punionice imaju različite podjele te tako mogu biti privatnog ili javnog vlasništva te ovisno o napajanju jednofazne ili trofazne na izmjeničnoj ili istosmjernoj struji. U središtu stanice za punjenje nalazi se jedinica za punjenje u kojoj se nalaze električne komponente potrebne za punjenje EV-a. Jedinica je opremljena s jednim ili više priključaka, ovisno o kapacitetu punionice i kompatibilnosti s različitim vozilima. Uobičajeni priključci uključuju J1772 utikač za punjenje razine 2 i CCS (kombinirani sustav punjenja) ili CHAdeMO za brzo punjenje istosmjernom strujom. Na jedinicu za punjenje je pričvršćen kabel, uredno smotan ili visi sa sustava za upravljanje kabelima. Kabel je dovoljno dugačak da dosegne priključak za punjenje EV-a. Ima konektor na kraju, koji odgovara vrsti konektora koju zahtijeva EV. Konektor je dizajniran za jednostavno i sigurno pričvršćivanje na priključak za punjenje u vozilu. Sigurnost je najvažniji faktor u dizajnu punionice. Stanice za punjenje uključuju različite sigurnosne značajke za zaštitu i EV-a i korisnika. Ove značajke mogu uključivati zaštitu od zemljospoja, prekostrujnu zaštitu, zaštitu od prenapona i nadzor temperature. Stanica za punjenje također može imati vidljiv gumb za hitno zaustavljanje za trenutno zaustavljanje punjenja ako je potrebno. Stanice za punjenje često nude više opcija plaćanja kako bi se olakšao pristup i plaćanje usluga punjenja. To može uključivati čitače kreditnih kartica, aplikacije za mobilno plaćanje, sustave beskontaktnih kartica ili pristup temeljen na pretplati. Neke stanice za punjenje mogu imati ugrađenu Wi-Fi ili mobilnu vezu, što omogućuje daljinsko praćenje, održavanje i ažuriranje softvera. Stanice za punjenje obično imaju ugrađenu rasvjetu kako bi se osigurala vidljivost i sigurnost tijekom punjenja, čak i u uvjetima slabog osvjetljenja. To može uključivati ambijentalno osvjetljenje oko jedinice za punjenje, kao i osvijetljene znakove ili indikatore za usmjeravanje korisnika i označavanje statusa punjenja. Mnoge stanice za punjenje dizajnirane

su tako da budu dostupne svim korisnicima, uključujući one s invaliditetom. Mogu uključivati značajke kao što su dostupna visina za kontrole i konektore, taktilne indikatore za korisnike oštećena vida i jasne znakove s međunarodnim simbolima za punjenje EV-a. U skladu s predanošću održivosti, stanice za punjenje mogu sadržavati ekološke značajke. To može uključivati energetske učinkovite LED rasvjete, solarne panele za djelomičnu proizvodnju energije ili materijale koji se mogu reciklirati i materijale s malim utjecajem u konstrukciji punionice.

Ukratko, tipična stanica za punjenje kombinira funkcionalnost, lakoću korištenja i sigurnosne značajke kako bi vlasnicima električnih vozila pružila praktično i pouzdano iskustvo punjenja. Njegov dizajn i značajke imaju za cilj promovirati usvajanje EV-a, poboljšati pristupačnost i podržati rast održive prometne infrastrukture.



*Slika 2.6. Punionica za električna vozila [7]*

## 2.2. Priključak za punjenje električnih vozila

Jedna od tema koja najviše zbunjuje vozače električnih vozila je oko kabela i utikača za punjenje. Budući da još uvijek ne postoji univerzalni konektor za električna vozila, stanice za punjenje, kabeli za punjenje i utikači dolaze u mnogim oblicima i veličinama. Razlikuju se ovisno o zemlji u kojoj se korisnik nalazi, vozilu koje se koristi i vrsti stanice za punjenje koja se namjerava koristiti. [5] Priključak za punjenje električnih vozila čini komponentu koja služi za spajanje punjača na električno vozilo kako bi se napunila baterija. Naravno, postoje različiti priključci koji se koriste za punjenje, ovisno o standardima punjenja u određenoj regiji ili za određene marke i modele vozila. Priključci mogu biti različitih oblika i veličina, ovisno o standardima koji se koriste. Određeni priključci imaju i komunikacijske mogućnosti kako bi se osiguralo učinkovito, ali i sigurno punjenje. Vrste priključaka se dakako razvrstavaju i na izmjenične i istosmjerne tipove.



Slika 2.7. Prikaz priključaka s obzirom na regiju i vrstu podržane struje [8]

Jedan često korišten konektor je konektor tipa 1 (J1772). Ima dizajn s pet pinova i prvenstveno se koristi u Sjevernoj Americi i Japanu. Priključak tipa 1 prikladan je za punjenje izmjeničnom i istosmjernom strujom, pri čemu se za punjenje izmjeničnom strujom obično koristi standardna kućanska utičnica ili namjenska stanica za punjenje. DC brzo punjenje zahtijeva dodatnu infrastrukturu i često se nalazi na javnim stanicama za punjenje.

Drugi široko prihvaćeni konektor je konektor tipa 2 (Mennekes). To je sedmopinjski konektor koji se obično koristi u Europi i kompatibilan je s AC i DC punjenjem. Jedna od njegovih prepoznatljivih značajki je mehanizam za automatsko zaključavanje, pri čemu se konektor automatski zaključava na svoje mjesto kada se spoji na EV radi punjenja. Ova

značajka osigurava da se kabel za punjenje ne odspoji slučajno tijekom procesa punjenja, poboljšavajući sigurnost i praktičnost. Priključak tipa 2 postao je standard za punjenje električnih vozila u Europi i sve se više prihvaća na globalnoj razini.

Kombinirani sustav punjenja (CCS) je jedan od najraširenijih opcija punjenja. CCS tip 1 konektor je poboljšanje J1772 standarda, jer dodaje dvije brze istosmjerne igle za punjenje na J1772 tip 1 utikač, što omogućuje brže punjenje. Ovaj se konektor obično koristi u Sjevernoj Americi i kompatibilan je s većinom stanica za brzo punjenje razine 2 i istosmjernog punjenja. Uz sposobnost da isporuči veliku snagu velikom brzinom, CCS tip 1 konektor je popularan izbor za vlasnike električnih vozila koji žele brzo i učinkovito puniti svoja vozila. CCS konektori integriraju mogućnosti punjenja izmjeničnom i istosmjernom strujom u jedan utikač, omogućujući vozilima da se pune s različitih stanica za punjenje. CCS kombinira konektor tipa 2 ili tipa 1 s dodatnim pinovima za istosmjerno punjenje, pružajući fleksibilnost za različite scenarije punjenja. Konektor CCS tipa 2 primarni je standard za brzo punjenje istosmjernom strujom koji se koristi u Europi, a brzo dobiva na popularnosti i u drugim dijelovima svijeta. Ovaj konektor kombinira Mennekesov utikač tipa 2 s dva dodatna igla za brzo punjenje, što omogućuje brže punjenje i veću praktičnost. Uz mogućnost pružanja do 500 ampera i 1000 volti istosmjerne struje, CCS 2 punjač može isporučiti maksimalnu izlaznu snagu od 360 kW, što ga čini jednom od najsnažnijih i najučinkovitijih opcija punjenja dostupnih za električna vozila. CCS tip 2 konektor dizajniran je za korištenje s punjačima razine 2 i razine 3, što ga čini prikladnim za širok raspon modela električnih vozila.

Tesla konektori čine još jednu raširenu granu konektora za električna vozila, a razlikuju se ovisno o regiji i modelu. U Sjevernoj Americi Tesla koristi svoj vlastiti NACS konektor koji može isporučiti do 250 kW i kompatibilan je samo s Teslama. U Europi i većini dijelova svijeta, Tesla Model 3 i Y koriste CCS konektor tipa 2, dok Model S i X koriste modificirani utikač tipa 2 s urezima kako bi se spriječile utičnice koje nisu Tesla. Međutim, Tesla je nedavno svoj priključak za punjenje EV-a stavio na raspolaganje drugim proizvođačima EV-a kako bi promicao usvajanje EV-a i razvoj infrastrukture za punjenje.

U Sjevernoj Americi svaki proizvođač električnih vozila (osim Tesle) koristi SAE J1772 konektor, poznat i kao J-utikač, za razinu 1 (120 volti) i razinu 2 (240 volti) punjenja. Tesla uz svaki automobil koji prodaje daje Tesla kabel adaptera za punjenje koji omogućuje njihovim automobilima korištenje stanica za punjenje koje imaju J1772 konektor. To znači da svako električno vozilo prodano u Sjevernoj Americi može koristiti bilo koju stanicu za punjenje koja dolazi sa standardnim J1772 priključkom. To je važno znati jer svaka stanica za punjenje razine 1 ili razine 2 koja nije Tesla prodana u Sjevernoj Americi koristi konektor J1772. Na primjer, svi

naši JuiceBox proizvodi koriste standardni J1772 konektor. Tesla vozila mogu se puniti na bilo kojoj stanici za punjenje, koristeći adapterski kabel koji Tesla prilaže uz automobil. Tesla proizvodi vlastite stanice za punjenje koje koriste vlastiti Teslin konektor, a električna vozila drugih marki ne mogu ih koristiti ako ne kupe adapter. Svako električno vozilo koje se danas kupi može koristiti stanicu za punjenje koja ima J1772 konektor, a svaka stanica za punjenje razine 1 ili razine 2 koja je danas dostupna koristi J1772 konektor, osim onih koje je izradio Tesla. Malo je kompliciranije za brzo punjenje istosmjernom strujom, što je brzo punjenje električnog vozila koje je dostupno samo na javnim površinama, najčešće uz glavne autoceste gdje su putovanja na velike udaljenosti uobičajena. Brzi punjači istosmjernom strujom nisu dostupni za punjenje kod kuće, budući da potrebe za električnom energijom obično nisu dostupne u stambenim zgradama. Također, nije preporučljivo koristiti stanice za brzo punjenje istosmjernom strujom više od jednom ili dva puta tjedno jer visoka brzina punjenja može negativno utjecati na životni vijek baterije električnog automobila ako se vrši prečesto. Brzi punjači istosmjerne struje koriste 480 volti i mogu napuniti električno vozilo brže od standardne jedinice za punjenje (za samo 20 minuta) omogućujući tako praktično putovanje električnim vozilima na velike udaljenosti. Nažalost, umjesto samo dva različita konektora, koja se koriste u punjenju razine 1 i razine 2 (J1772 i Tesla), DC brzi punjači koriste tri različite vrste konektora.

U Europi su tipovi priključaka za punjenje električnih vozila slični onima u Sjevernoj Americi, ali postoji nekoliko razlika. Prvo, standardna električna energija u kućanstvu je 230 volti, što je gotovo dvostruko više od napona koji se koristi u Sjevernoj Americi. Iz tog razloga u Europi ne postoji naplata "razine 1". Drugo, umjesto konektora J1772, standard koji koriste svi proizvođači osim Tesle u Europi je konektor IEC 62196 tipa 2, koji se obično naziva mennekes. Međutim, Tesla se nedavno prebacio sa svog vlasničkog konektora na konektor tipa 2 za Model 3. Vozila Tesla Model S i Model X koja se prodaju u Europi i dalje koriste Tesla konektor, ali nagađa se da će i oni na kraju prijeći na konektor tipa 2 u Europi.

DC brzo punjenje u Europi također je isto kao i u Sjevernoj Americi, gdje je CCS standard koji koriste gotovo svi proizvođači, osim Nissana i Mitsubishija. Sustav CCS u Europi kombinira konektor tipa 2 s pinovima za brzo punjenje istosmjernom strujom na isti način kao što to čini u Sjevernoj Americi s konektorom J1772, pa iako se također naziva CCS, to je malo drugačiji konektor. Tesla Model 3 sada koristi europski CCS sustav punjenja u Europi, a Tesla je opremio svoje Supercharger stanice tako da također imaju CCS konektor.

Azijski standardi imaju neke svoje posebnosti tako je u Kini, GB/T konektor, također poznat kao Type 2 GB/T, je prevladavajući standard. Koristi nešto drugačiji dizajn u usporedbi s

konektorom tipa 2 koji se koristi u Europi. GB/T konektor podržava AC i DC punjenje i kompatibilan je s kineskom infrastrukturom za punjenje. GB/T konektori nacionalni su standardi s odvojenim verzijama za AC i DC punjenje. AC konektor može isporučiti do 7,4 kW izlazne snage, dok DC konektor može isporučiti do 237,5 kW. GB/T DC konektor trenutno je jedini protokol za brzo punjenje koji se koristi u Kini, s planovima za razvoj konektora sljedeće generacije u partnerstvu s CHAdeMO za postizanje izlazne snage od 900 kW. Unatoč nekompatibilnosti s europskim Mennekes utikačem, izgled GB/T AC konektora je sličan. Dodatno, tu je CHAdeMO konektor, razvijen od strane CHAdeMO Association. CHAdeMO konektor je standard za brzo punjenje istosmjernom strujom koji su prvobitno razvili japanski proizvođači automobila i koji je objavljen prije CCS-a. Može puniti električna vozila do 400 ampera, pružajući maksimalnu izlaznu snagu od 400 kW. Protokol CHAdeMO nije tako univerzalan ili široko rasprostranjen kao CCS, ali u tijeku je razvoj kako bi se omogućilo još brže punjenje. Međutim, budući da japanski proizvođači automobila prilagođavaju modele CCS konektorima za sjevernoamerička i europska tržišta, možda ćemo u budućnosti vidjeti manje CHAdeMO punjača na tržištima izvan Japana. Prvenstveno se koristi za brzo punjenje istosmjernom strujom., dakle brzo punjenje.



### 2.3. Snaga punjenja električnih vozila

Snaga punjenja električnog vozila odnosi se na brzinu kojom se baterija vozila može puniti i mjeri se u kilovatima (kW). Snaga punjenja električnog vozila može varirati ovisno o nekoliko čimbenika, kao što su veličina baterije vozila, vrsta stanice za punjenje koja se koristi i sposobnost punjenja vozila. Električna vozila obično dolaze s jednom od tri vrste ugrađenih punjača: Razina 1, Razina 2 i Razina 3 (brzo punjenje istosmjernom strujom).

Punjači razine 1 su najsporiji i obično se koriste za punjenje električnih vozila preko noći ili dok su parkirana dulje vrijeme. Ovi punjači koriste standardnu kućnu utičnicu od 120 volti i može im trebati od 8 do 20 sati da potpuno napune bateriju vozila.

Punjači razine 2 brži su od punjača razine 1 i obično se nalaze na javnim stanicama za punjenje ili se mogu postaviti u kućnu garažu. Ovi punjači koriste utičnicu od 240 volti i mogu napuniti bateriju vozila za 4 do 8 sati, ovisno o veličini baterije.

Punjači razine 3, također poznati kao DC brzi punjači, najbrži su tip punjača i obično se nalaze na javnim stanicama za punjenje uz autoceste ili u komercijalnim područjima. Ovakvi punjači mogu napuniti bateriju vozila do 80 % u trideset minuta ili manje, što ih čini idealnim za putovanja na velike udaljenosti. Vrijedno je napomenuti da nisu sva električna vozila sposobna prihvatiti punjenje razine 3 zbog ograničenja u njihovim sustavima punjenja ili tehnologiji baterija. Osim toga, na snagu punjenja mogu utjecati čimbenici kao što su temperatura, starost baterije i učestalost punjenja.

Snaga punjenja električnog vozila važan je čimbenik koji treba uzeti u obzir pri kupnji električnog vozila ili postavljanju kućne punionice. Vrsta punjača koji se koristi i sposobnost punjenja vozila odredit će brzinu kojom se baterija može puniti, što utječe na domet vozila i ukupne performanse.

## 2.4. Kabeli za punjenje električnih vozila

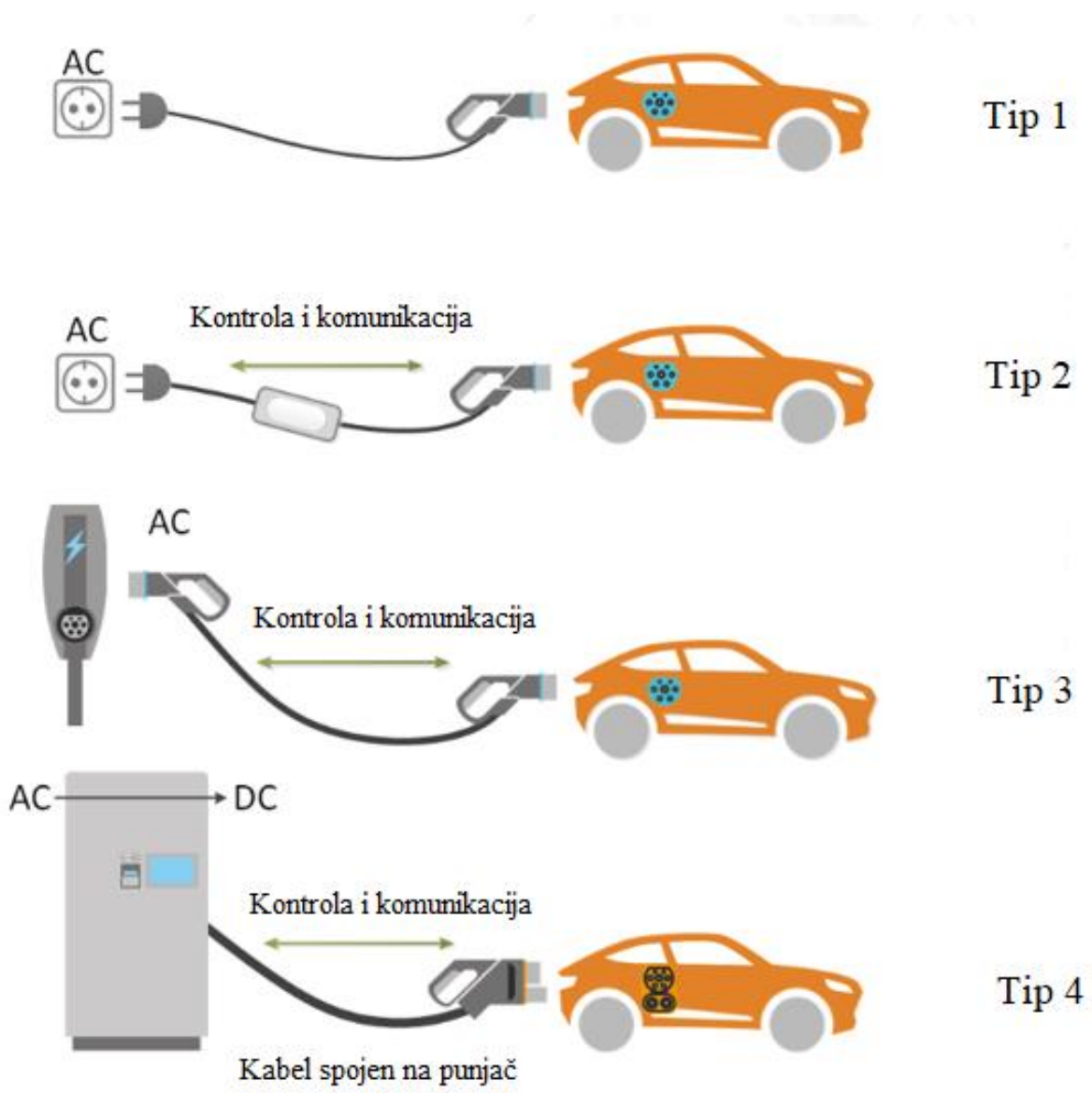
Određene stanice za punjenje dolaze s priključenim kabelima, a druge zahtijevaju da se korisnik opskrbi svojim. Kabeli za punjenje dolaze u četiri oblika ili "moda" te se svaki koristi za određenu vrstu punjenja. Može biti malo zbunjujuće, jer način rada nije nužno u korelaciji s "razinom" punjenja. Postoje primjetne razlike između kabela za punjenje tipa 1, tipa 2, tipa 3 i tipa 4.

S kabelom tipa 1 je jednostavno spajanje električnog vozila na standardnu AC utičnicu pomoću produžnog kabela i standardnog utikača. Zbog toga nema komunikacije između vozila i mjesta za punjenje, što znači da nema posebnih sigurnosnih sustava ili zaštite od udara. Ova vrsta punjenja korisna je za laka električna vozila poput e-bicikala i skutera, ali se ne smatra sigurnom za električne automobile i zabranjena je u mnogim dijelovima svijeta.

Pri kupnji električnog vozila obično standardno dolazi s onim što je poznato kao tip 2 kabel za punjenje. Ovi se kabeli na jednom kraju priključuju u električno vozilo, a na drugom u standardnu kućnu utičnicu, a kabel dolazi s In-Cable Control and Protection Device (IC-CPD) koji je odgovoran za kontrolu i komunikaciju između i zaštitu standarda zidnog utikača i električnog vozila. Iako je ovaj način punjenja nedvojbeno prikladan, problem je što većina kućanskih utičnica isporučuje samo do 2.3 kW snage što čini punjenje ovom metodom dugotrajno. Također može biti opasno ako se radi na pogrešan način. Stoga je preporuka da se ova vrsta kabela koristi samo za punjenje ako je hitno.

Kabeli tipa 3 trenutno su najčešći način punjenja električnih vozila diljem svijeta. Kabel za punjenje tipa 3 povezuje vozilo s namjenskom stanicom za punjenje električnih vozila, poput onih koje se nalaze na radnim mjestima i uredima, domovima i stambenim lokacijama te komercijalnim i javnim parkiralištima. Ovi kabeli su zaduženi za kontrolu, komunikaciju i zaštitu procesa punjenja i obično se spajaju na utikače za punjenje kao što su tip 1 ili tip 2.

Budući da prva tri načina rada šalju izmjeničnu struju u vozilo i ta se snaga pretvara putem ugrađenog AC/DC pretvarača, oni su odvojeni od tipa 4. Kabeli za punjenje tipa 4, s druge strane, posebno se koriste za istosmjerno punjenje, a snaga se pretvara prije nego što se prenese na vozilo. Često poznato kao brzo ili ultrabrzo punjenje, kada se puni električno vozilo s istosmjernom strujom, može se značajno skratiti vrijeme punjenja. Međutim, budući da ova vrsta punjenja prenosi puno više energije izravno na bateriju električnog vozila, kabeli moraju biti trajno povezani sa stanicom za punjenje i često su hlađeni tekućinom kako bi podnijeli toplinu.



Slika 2.8. Prikaz punjenja u različitim tipovima [10]

## 2.5. Konstrukcija i veličina punjača

Kao što je ranije spomenuto, punjači za električna vozila su uređaji koji opskrbljuju električnom energijom baterije električnih vozila. Dolaze u različitim vrstama, uključujući punjače razine 1, razine 2 i razine 3. Punjači za električna vozila razine 1 su najsporiji, daju do 120 volti izmjenične struje i do 2,4 kW. Punjači razine 2 brži su, daju do 240 volti izmjenične struje i 19 kW. Punjači razine 3 su najbrži te daju do 480 volti istosmjerne struje i do 350 kW snage. Istosmjerni brzi punjači obično se koriste u komercijalne svrhe i mogu u potpunosti napuniti električno vozilo za samo 30 minuta.[11]

Veličina punjača za električna vozila može varirati ovisno o razini punjenja, vrsti punjača i proizvođaču. Punjači razine 1 obično su najmanji i najosnovniji tip punjača za električna vozila. Dizajnirani su da budu prijenosni i mogu se uključiti u standardnu električnu utičnicu od 120 V. Punjači razine 1 obično su kompaktni i lagani, slični običnom strujnom adapteru ili maloj kutiji. Punjači razine 2 zahtijevaju namjenski krug i nude veće brzine punjenja u usporedbi s punjačima razine 1. Obično se koriste za stambene, poslovne i javne punionice. Punjači razine 2 mogu se razlikovati po veličini i faktoru oblika. Mogu varirati od malih, zidnih jedinica koje nalikuju utičnici do većih stanica s dodatnim značajkama i mogućnostima povezivanja. Veličina punjača razine 2 može biti slična malom Wi-Fi usmjerivaču ili malo veća, ovisno o proizvođaču i dizajnu. DC brzi punjači, poznati i kao punjači razine 3, pružaju mogućnosti brzog punjenja za električna vozila. Ovi punjači zahtijevaju složeniju infrastrukturu i veći kapacitet napajanja. DC brzi punjači znatno su veći od punjača razine 1 i razine 2 zbog potrebnih dodatnih komponenti i energetske elektronike. Često nalikuju velikom metalnom ormariću ili postolju za punjenje s istaknutom pločom zaslona.

Fizička veličina punjača nije nužno u korelaciji s njegovim kapacitetom punjenja ili izlaznom snagom. Kapacitet punjenja prvenstveno je određen električnim specifikacijama i mogućnostima punjača, kao što su napon i struja. Stoga je važno obratiti pozornost na specifikacije proizvođača kako bi se odredili kapacitet punjenja i veličina određenog modela punjača.

### **3. TEHNOLOGIJE PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA**

Punjenje električnog vozila uključuje prijenos električne energije iz izvora punjenja u bateriju vozila. Dostupno je nekoliko vrsta metoda i opreme za punjenje, od kojih svaka ima različite stope punjenja, razine napona i zahtjeve kompatibilnosti. Najčešći tipovi opreme za punjenje električnih vozila uključuju su punjenje izmjeničnom strujom, istosmjernom strujom i bežično punjenje. Punjenje izmjeničnom strujom strujom obično se koristi za kućno punjenje i sporije javno punjenje. Jedinica za punjenje obično se postavlja na zid i može isporučiti snagu od 3,7 kW do 22 kW. Vozilo se na punjač spaja pomoću kabela s konektorom tipa 1 ili tipa 2. Istosmjerno ili DC punjenje je brži način punjenja i obično se koristi na javnim stanicama za punjenje. DC punionice opremljene su višim naponom i izlaznom snagom od AC punjača, u rasponu od 50 kW do 350 kW. DC punjenje kompatibilno je sa standardima CCS, CHAdeMO i Tesla Supercharger. Bežično punjenje koristi elektromagnetsko polje za prijenos energije od punjača do zavojnice prijemnika vozila. Bežično punjenje je obično sporije od žičanog punjenja, ali pruža praktičnost i eliminira potrebu za kabelima.

### 3.1. Punjenje putem kućne utičnice

Punjenje električnog vozila iz kućne utičnice, također poznato kao punjenje razine 1, najosnovnija je i široko dostupna metoda za punjenje električnog automobila. Punjenje razine 1 relativno je sporo u usporedbi s opcijama punjenja viših razina. Vrijeme potrebno za potpuno punjenje električnog automobila pomoću punjača razine 1 može značajno varirati ovisno o veličini baterije vozila, stanju napunjenosti i brzini punjenja. Može potrajati od 8 do 24 sata ili više da se potpuno napuni pomoću standardne kućne utičnice. Stoga je punjenje razine idealno za punjenje preko noći.

U mnogim zemljama standardne kućne električne utičnice daju izmjeničnu struju na naponu od 120 V (u SAD-u) ili 230 V (u mnogim drugim zemljama). Ove se utičnice obično koriste za svakodnevne električne uređaje poput svjetiljki, prijenosnih računala i pametnih telefona. Većina električnih automobila dolazi s kabelom za punjenje razine 1 koji ima utikač za standardnu kućnu utičnicu na jednom kraju i konektor koji se uklapa u priključak za punjenje električnog vozila na drugom kraju. Kabel za punjenje obično ima ugrađen adapter koji odgovara određenom priključku za punjenje električnog vozila. Ugrađeni punjač u vozilu pretvara izmjeničnu struju iz utičnice u istosmjernu koju baterija može pohraniti. Započinje proces punjenja i struja počinje teći u bateriju vozila. Bitno je izbjeći opasnost punjenja preko produžnog kabla jer takvi kablovi nisu adekvatni za takvu snagu punjenja.



Slika 3.1. Punjenje električnog vozila putem kućne utičnice električnog vozila [12]

### 3.2. Brzo punjenje

Brzo punjenje kritičan je aspekt električnih vozila koji ima za cilj značajno smanjiti vrijeme punjenja u usporedbi s tradicionalnim metodama punjenja. Kako usvajanje električnih vozila nastavlja rasti, tehnologija brzog punjenja igra ključnu ulogu u rješavanju jedne od glavnih briga potencijalnih kupaca, a to je zabrinutosti za domet. Nudeći mogućnosti brzog punjenja, električna vozila postaju praktičnija i praktičnija za svakodnevnu upotrebu, što ih čini održivijom alternativom vozilima s motorom s unutarnjim izgaranjem. Tehnologija brzog punjenja omogućuje električnim vozilima da se pune puno većom snagom od standardnih metoda punjenja. Dok obični AC punjači obično isporučuju snagu od 3 do 22 kW, brzi punjači mogu pružiti snagu u rasponu od 50 kW do čak 350 kW ili više. Za podršku brzom punjenju potrebna je široka mreža stanica za punjenje. Vlade, privatne tvrtke i proizvođači električnih vozila ulažu velika sredstva u proširenje ove infrastrukture kako bi punjenje električnih vozila učinili dostupnijim i raširenijim. Stanice za punjenje strateški su postavljene duž autocesta, u urbanim područjima i u blizini popularnih odredišta kako bi zadovoljile potrebe putovanja na velike udaljenosti i svakodnevnih putovanja na posao.

Kao što je prije spomenuto, za brzo punjenje koriste se različite vrste priključaka, a njihova dostupnost ovisi o regiji i modelu električnog vozila. Najčešći tipovi su CCS (Combined Charging System) i CHAdeMO. Tesla ima vlastitu Supercharger mrežu koja radi s Tesla vozilima. Međutim, neki noviji punjači dizajnirani su za prilagodbu više vrsta priključaka, što ih čini svestranijima za različite modele električnih vozila. Vrijeme potrebno za brzo punjenje električnog vozila ovisi o izlaznoj snazi punjača i kapacitetu baterije vozila. Na primjer, s punjačem od 350 kW, neka moderna električna vozila mogu se napuniti od 0 do 80% za oko 20-30 minuta, čime se znatno povećava doseg vožnje u kratkom razdoblju.

Brzo punjenje može znatno opteretiti bateriju vozila. Kako bi učinkovito upravljali brzom isporukom energije, proizvođači neprestano poboljšavaju tehnologiju baterija kako bi izdržali veće stope punjenja i smanjili degradaciju baterije. Osiguravanje zdravlja i dugovječnosti akumulatora ključno je za maksimiziranje ukupnog životnog vijeka vozila.

Dok brzo punjenje nudi praktičnost i smanjuje zabrinutost oko dometa, često je skuplje u usporedbi sa standardnim metodama punjenja. Pružatelji infrastrukture za punjenje mogu primijeniti različite modele određivanja cijena, uključujući naplatu po kilovatsatu ili po minuti punjenja. Međutim, kako se tehnologija razvija i usvajanje raste, očekuje se da će cijena brzog punjenja postati konkurentnija.

### 3.3. Super brzo punjenje

Super brzo punjenje, koje se često naziva "ultra-brzo" ili punjenje velike snage, predstavlja sljedeću evoluciju tehnologije brzog punjenja za električna vozila. Cilj mu je dodatno smanjiti vrijeme punjenja i učiniti putovanje na velike udaljenosti još praktičnijim, učinkovito premošćujući jaz između vremena potrebnog za punjenje tradicionalnih vozila na benzin i ponovnog punjenja električnih vozila. Super brzi punjači dizajnirani su za isporuku iznimno velike izlazne snage, koja obično prelazi 350 kW i ide do 800 kW ili čak i više u nekim slučajevima. Ove stanice za punjenje mogu dati puno više energije bateriji električnog vozila, značajno smanjujući ukupno vrijeme punjenja. Super brzi punjači često koriste konektore poput CCS (Combined Charging System) ili CHAdeMO, koji se također koriste u brzim punjačima. Teslina Supercharger mreža koristi vlastiti konektor, ali neki noviji Tesla Superchargeri podržavaju CCS, što ih čini kompatibilnima i s drugim modelima električnih vozila.

Super brzo punjenje zahtijeva sofisticirane sustave baterija koji mogu podnijeti veliku ulaznu snagu i učinkovito odvoditi toplinu. Napredna kemija baterije i sustavi upravljanja toplinom ključni su za sprječavanje propadanja baterije i održavanje ispravnosti baterije tijekom sesija brzog punjenja. Dok obični brzi punjači mogu napuniti bateriju vozila od 0 do 80% u otprilike 20-30 minuta, super brzo punjenje može dodatno značajno skratiti to vrijeme. Ovisno o kapacitetu baterije i izlaznoj snazi punjača, neka električna vozila mogu postići slične razine punjenja za samo 10-15 minuta.

Zbog velike izlazne snage i potrebne naprednije tehnologije, super brze stanice za punjenje mogu biti skuplje za instaliranje i rad od običnih brzih punjača. Kao rezultat toga, cijena po kWh ili minuti punjenja na tim postajama mogla bi biti relativno viša. Međutim, kako tehnologija napreduje i ekonomija razmjera ulazi u igru, očekuje se da će cijena super brzog punjenja s vremenom postati konkurentnija.



### 3.4. Induktivno punjenje

Induktivno punjenje električnih vozila je inovativna tehnologija koja nudi prikladan i bežični način punjenja električnih vozila bez potrebe za fizičkim priključcima ili kabelima. Uključuje prijenos električne energije od stanice za punjenje do baterije vozila stvaranjem magnetskog polja između dvije zavojnice: jedne ugrađene u tlo ili podlogu za punjenje i druge integrirane u vozilo. Električna vozila će se puniti samo ako su unutar zona punjenja. Zona punjenja je područje na tom raskrižju koje je opremljeno opremom za bežično punjenje. Bežično će se puniti samo vozila koja se ne kreću i koja su unutar zone punjenja. Model pražnjenja energije je linearna funkcija prijedene udaljenosti vozila i stope potrošnje.

Jedna od ključnih komponenti induktivnog punjenja je stanica za punjenje (podloga za punjenje) koja se sastoji od zavojnice ili više zavojnica koje su ukopane ili postavljene u ravnini s površinom tla. Ove zavojnice stvaraju izmjenično magnetsko polje kada električna struja prolazi kroz njih. Druga komponenta je zavojnica prijavnika u vozilu koja je instalirana na donjoj strani ili unutar određenog područja električnog vozila, a djeluje kao prijelnik. Kada se postavi preko podloge za punjenje, zavojnica vozila hvata magnetsko polje i pretvara ga natrag u električnu struju.

Postupak punjenja započinje tako što vozač postavlja električno vozilo postavlja preko podloge za punjenje, osiguravajući pravilno poravnanje između zavojnice prijavnika vozila i zavojnice odašiljača stanice za punjenje. Zavojnica odašiljača stanice za punjenje stvara izmjenično magnetsko polje, koje inducira napon u zavojnici prijavnika vozila zbog elektromagnetske indukcije. Inducirani napon u zavojnici prijavnika pretvara se u električnu struju pomoću ugrađenog sustava energetske elektronike. Ta se struja zatim koristi za punjenje akumulatora vozila. Ugrađeni sustav punjenja upravlja protokom energije i osigurava sigurno i učinkovito punjenje baterije. Proces se nastavlja sve dok baterija ne postigne željeno stanje napunjenosti.

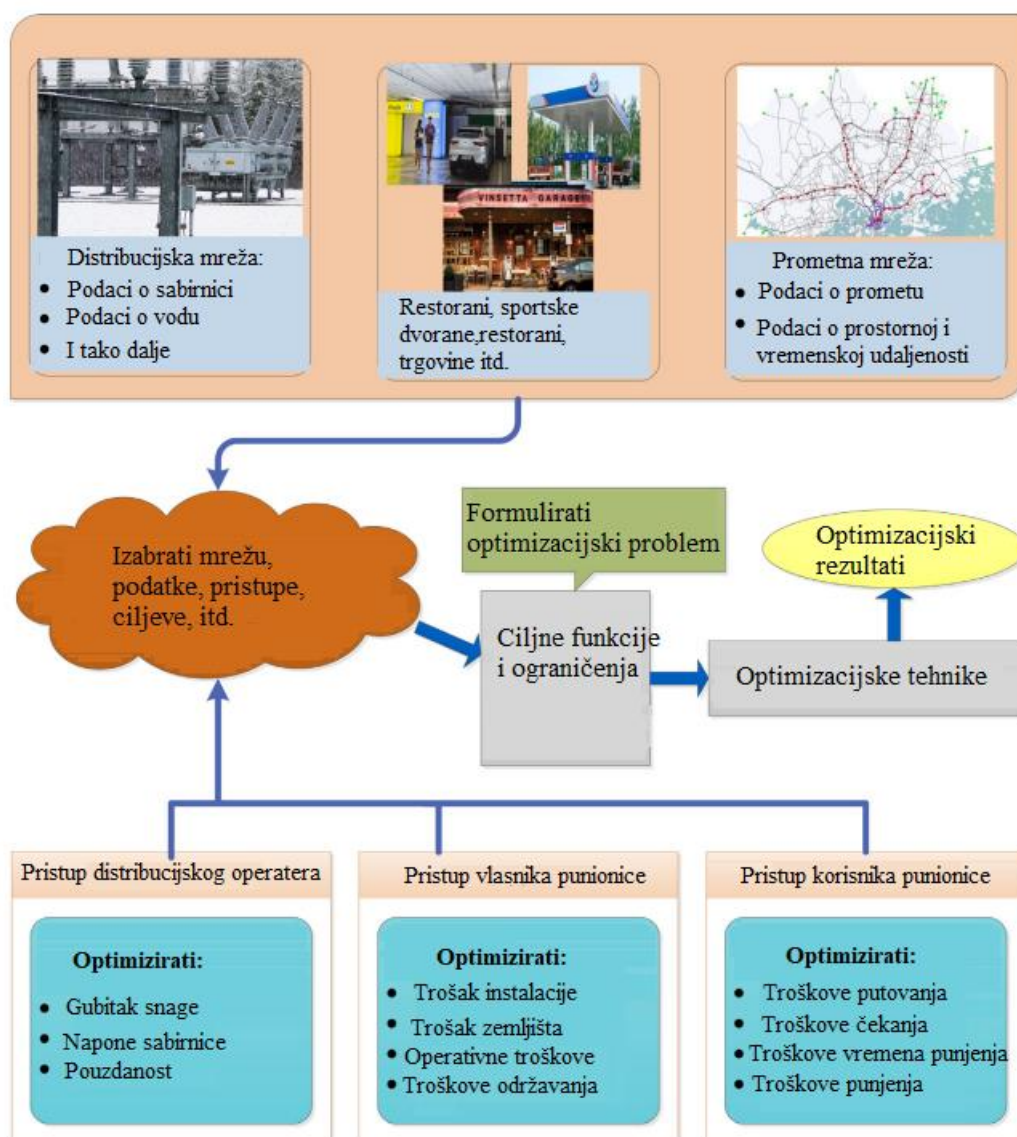


*Slika 3.2. Induktivno punjenje električnog vozila [13]*

Mana ovog načina punjenja su veći gubici u odnosu na kablско punjenje iz čega proizlazi kao posljedica sporije punjenje. Ovaj način punjenja je još u začetku i ima mnoge limite zbog velike potrebe snage punjenja za električna vozila. Trenutno je moguće samo statičko punjenje koje traži da vozilo bude u stanju mirovanja, ali se sve više radi na tome da se razvije i dinamičko punjenje koje bi bilo najpraktičnije za korisnika. Za dinamičko punjenje potrebno je veliko ulaganje jer u principu ideja je da se postave odašiljači za stvaranje elektromagnetskog polja striktno ispod ceste te se na taj način vozila pune dok su u vožnji.

## 4. KRITERIJI ZA IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA

Investitori stanica za punjenje zahtijevaju postavljanje punionica električnih vozila kako bi smanjili troškove instalacije i maksimizirali profit punjenjem električnih vozila. S druge strane, vozači električnih vozila postavljanjem punionica očekuju: smanjenje troškova putovanja, smanjenje vremena punjenja, kraće vrijeme čekanja punjenja, manje troškove korištenja, i tako dalje. Dok operator distribucijske mreže želi postaviti punionice električnih vozila za smanjenje utjecaja na parametre distribucijskog sustava. Stoga, postoje tri različite problematike ugrađivanja punionica za električna vozila koje su prikazane u slici 4.1.



Slika 4.1. Razrada različitih pristupa postavljanju punionica za električna vozila [14]

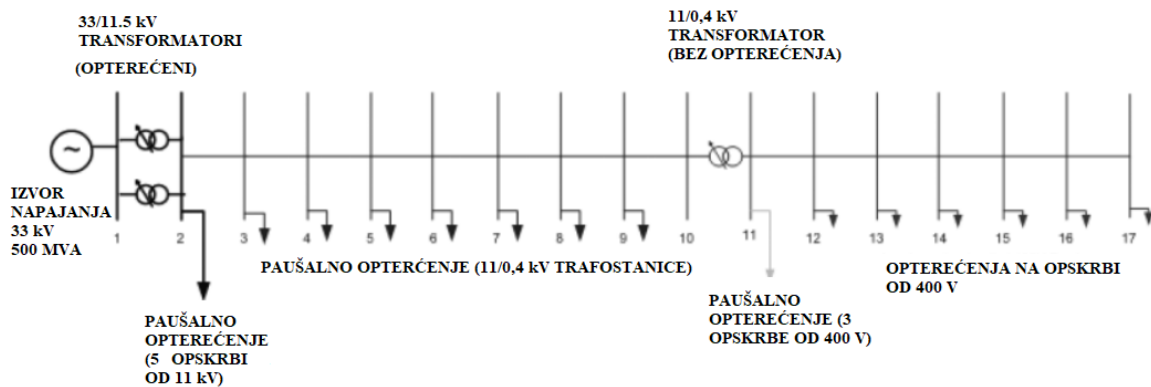
#### 4.1. Sa aspekta distribucijske mreže

Distribucijske mreže su odgovorne za distribuciju električne energije za sva priključena električna trošila u stambenim, komercijalnim i industrijskim područjima. Lokacijom novih opterećenja bi se utjecalo na parametre distribucijske mreže. Stoga, aktivni trošak gubitka snage, trošak gubitka jalove snage, trošak odstupanja napona, trošak pouzdanosti i trošak stabilnosti distribucijskog sustava optimiziran je za postavljanje punionica električnih vozila prema distribucijskom mrežnom pristupu. Pouzdanost analize distribucijske mreže je izazovno područje istraživanja nekoliko posljednjih godina. Konkretno, indeksi pouzdanosti distribucijskih mreža izračunavaju se na temelju statističkih podataka o kvaru popravka, stanju kvara, prosječnom trajanju prekida i o broju potrošača. Značajna implementacija distribuirane proizvodnje stvara obrnuti tok snage u distribucijskim mrežama i taj dvosmjerni tok energije može utjecati na kvalitetu napajanja i naponske razine. Distribuirana proizvodnja također može dovesti do povećanih struja kvara, kvara mrežnog zaštitnog sustava i neravnoteže faza.

Električna vozila koriste kontrolere energetske elektronike koji povezuju elektroenergetski sustav vozila s mrežom. Ovi kontroleri obično uključuju ugrađeni AC/DC pretvarač koji je spojen na mrežu preko jednofaznog ili trofaznog konektora. Pretvarač može biti ili ispravljač s diodnim mostom za punjenje baterije ili pretvarač s prekidačem koji ne samo da kontrolira punjenje baterije, već je također sposoban hraniti struju iz vozila u mrežu (regeneracija). Ako su pravilno projektirana i kontrolirana, električna vozila mogu pružiti pomoćne usluge i podržati opskrbnu mrežu, kao što je usklađivanje ponude/potražnje i potpora za jalovu snagu. Električna vozila se mogu smatrati aktivnim opterećenjem, povećavajući potražnju na mreži tijekom punjenja te kao generatori kada rade u načinu regeneracije. Stoga je potrebno analizirati utjecaj električnih vozila kada rade u oba načina, tijekom punjenja i regeneracije. Očekuje se da će učinak biti značajan zbog velikog energetske kapaciteta i masovne primjene električnih vozila u budućnosti. Rezultirajući učinci će diktirati dizajn uređaja sučelja električnih vozila i način na koji će buduće električne mreže biti projektirane i kontrolirane. Dakle, uređaji sučelja električnog vozila mogu biti dizajnirani tako da minimiziraju ili čak eliminiraju učinke električnog vozila na razinu grešaka mreže i zaštitnog sustava. Međutim, njihovi učinci na opterećenje mreže, profil napona, neravnotežu faza i kvalitetu električne energije mogu biti značajni i potrebno ih je odgovarajuće procijeniti.

Za nekoliko idućih analiza korišten je tipični model distribucijske mreže na slici 4.2. Model mreže uključuje distribucijsku mrežu od primarne naponske razine 33 kV do niskonaponske razine 400/230 V. Trafostanica 33/11 kV ima šest izlaznih vodova 11 kV, od kojih svaki napaja osam trafostanica 11/0,4 kV. Trafostanica 11/0,4 kV sastoji se od četiri izlazna radijalna voda

od 400 V. Kako bi se pojednostavila analiza, detaljno je modeliran samo jedan 400 V napojni vod zajedno sa svojim povezanim opterećenjima i električnim vozilom. Ostali odvodnici zajedno sa svojim priključenim opterećenjima predstavljeni su kao pojedinačno paušalno opterećenje spojeno na glavnu trafostanicu. Model pretpostavlja da svaki dovod od 400 V opskrbljuje ekvivalent za sto pojedinačnih domaćih kupaca.

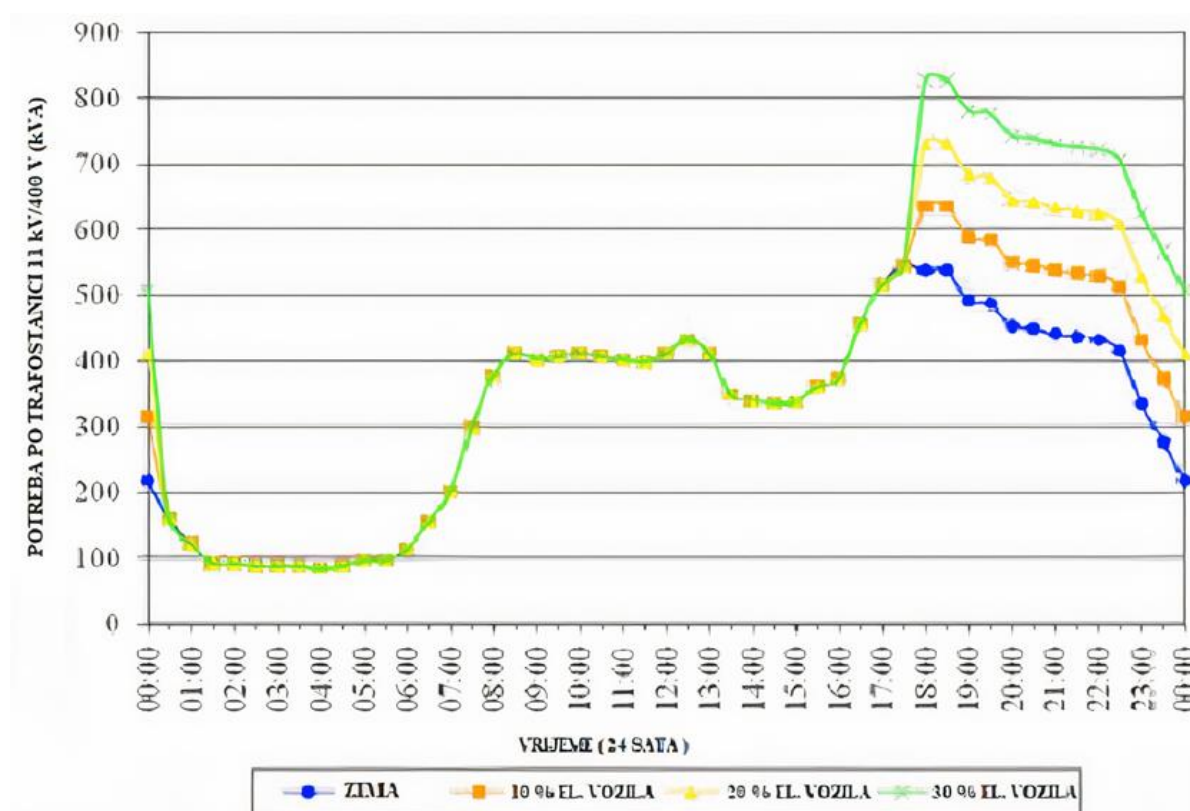


Slika 4.2. Shema tipične distribucijske mreže[15]

#### 4.1.1. Planiranje potražnje

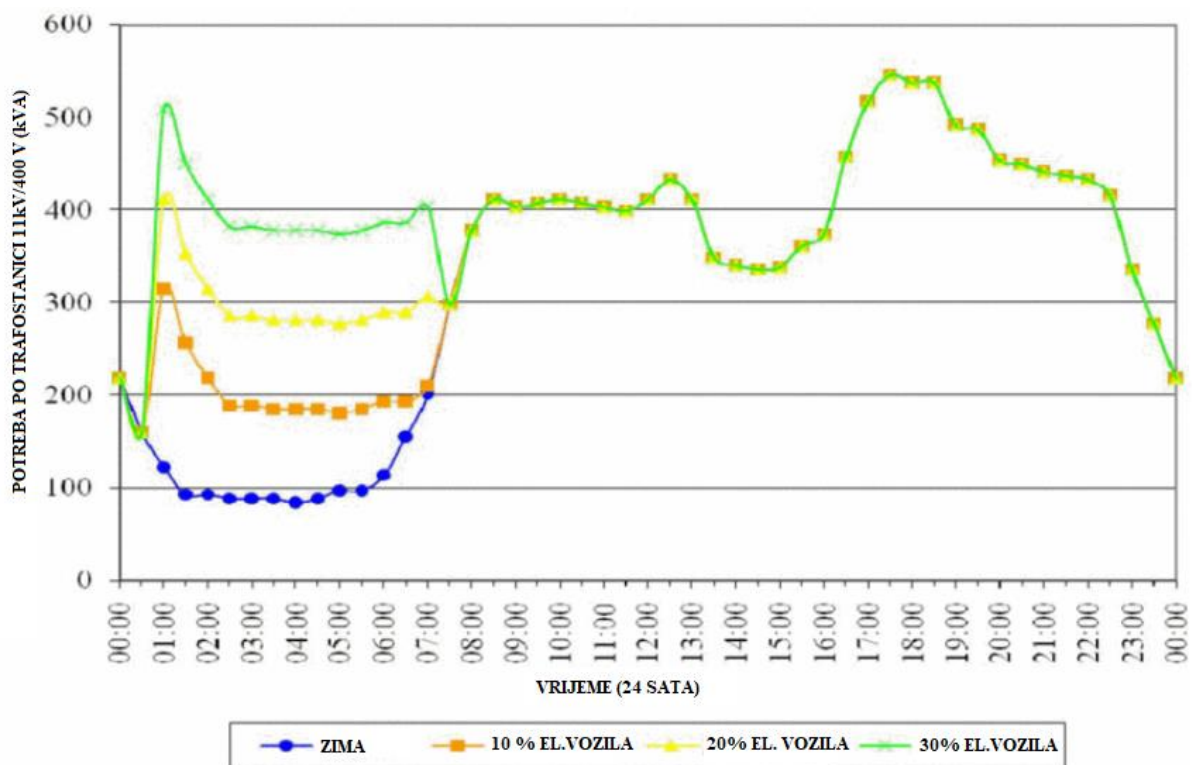
Bitan segment u aspektu distribucijske mreže je planiranje potražnje, odnosno punjenja baterije električnog vozila, kako bi se smanjile dnevne varijacije u potražnji, čime se osigurava bolje usklađivanje s mrežnim kapacitetom. Budući da je maksimalna potražnja u Ujedinjenom Kraljevstvu i Europi najveća zimi, ovaj profil opterećenja prvo se uzima u obzir za sljedeću analizu. Razmatraju se tri slučaja, a to su da 10%, 20% i 30% kuća ima električna vozila i svako punjenje pri konstantnoj struji od 10 A tijekom šest sati.

Slučaj 1 obuhvaća nekontrolirano domaće punjenje, odnosno pretpostavlja da ne postoje kontrole/poticaji za izmjenu rasporeda opterećenja. Stoga će korisnici svoja vozila priključiti na utičnice za punjenje čim dođu s posla što je otprilike oko 18 sati. Rezultat je da se punjenje električnog vozila pridodaje već postojećem vršnom opterećenju i daje još veće vršno opterećenje, kao što je prikazano na slici 4.3. Primijećeno je da je povećanje od oko 18% u maksimalnoj potražnji rezultat svakih 10% povećanja u kućama s električnim vozilom. Očito, ovo je najgori mogući scenarij.



Slika 4.3. Graf prikazuje zimsko dnevno opterećenje (neplanirano kućno punjenje)

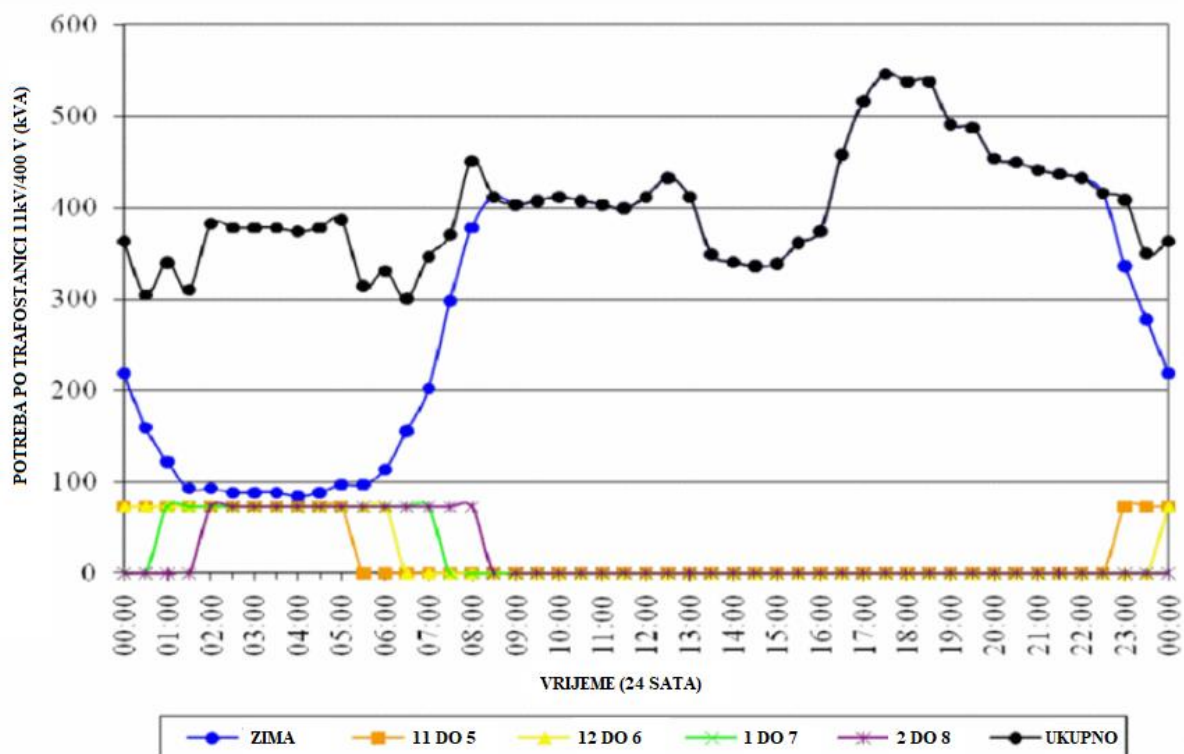
Slučaj 2 govori o kućnom punjenju izvan vršne sezone, a pretpostavlja da se krugu punjenja dodaje jednostavan vremenski regulator koji zakazuje početak punjenja u 1:00 ujutro i ostaje uključen do 7:00 ujutro. Slika 4.4. prikazuje poboljšanje krivulje opterećenja i nema utjecaja na kapacitet distribucijske mreže. Iako je očigledno poboljšanje na grafu opterećenja, još uvijek postoji vrhunac nakon ponoći i pad oko 7:00 ujutro.



Slika 4.4. Graf prikazuje zimsko dnevno opterećenje (vremenski zakazano kućno punjenje) [15]



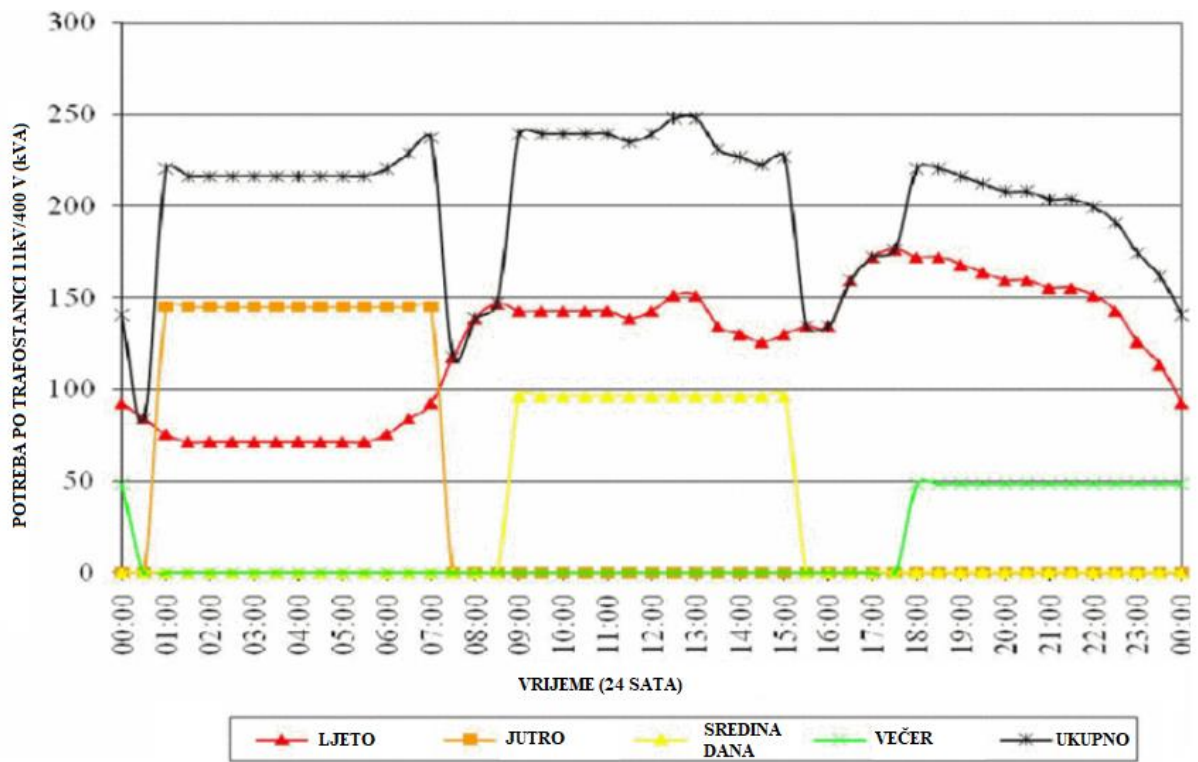
3. slučaj pretpostavlja da se potražnja može učiniti ujednačenijom postupnim rasporedom naplate. Ovo se smatra "pametnim" punjenjem. Slika 4.5. prikazuje 30 % opterećenja el. vozila, podijeljeno u četiri rasporeda - svaki 1/4 ukupnog opterećenja punjenja.



Slika 4.5. Graf prikazuje zimsko dnevno opterećenje u fazama (ponovno zakazano kućno punjenje) [15]

Raspored punjenja potreban za ljeto razlikuje se od onog potrebnog za zimu, budući da bi punjenje tijekom ranih jutarnjih sati rezultiralo vršnom potražnjom u tom razdoblju. Stoga, kako bi se izgladila krivulja opterećenja i izbjeglo stvaranje novih vršnih zahtjeva, trebalo bi programirati 'pametni' kontrolni sustav ili stvoriti poticaje za korisnike da raspodijele punjenje tijekom dana. Takav raspored je prikazan slikom 4.6.



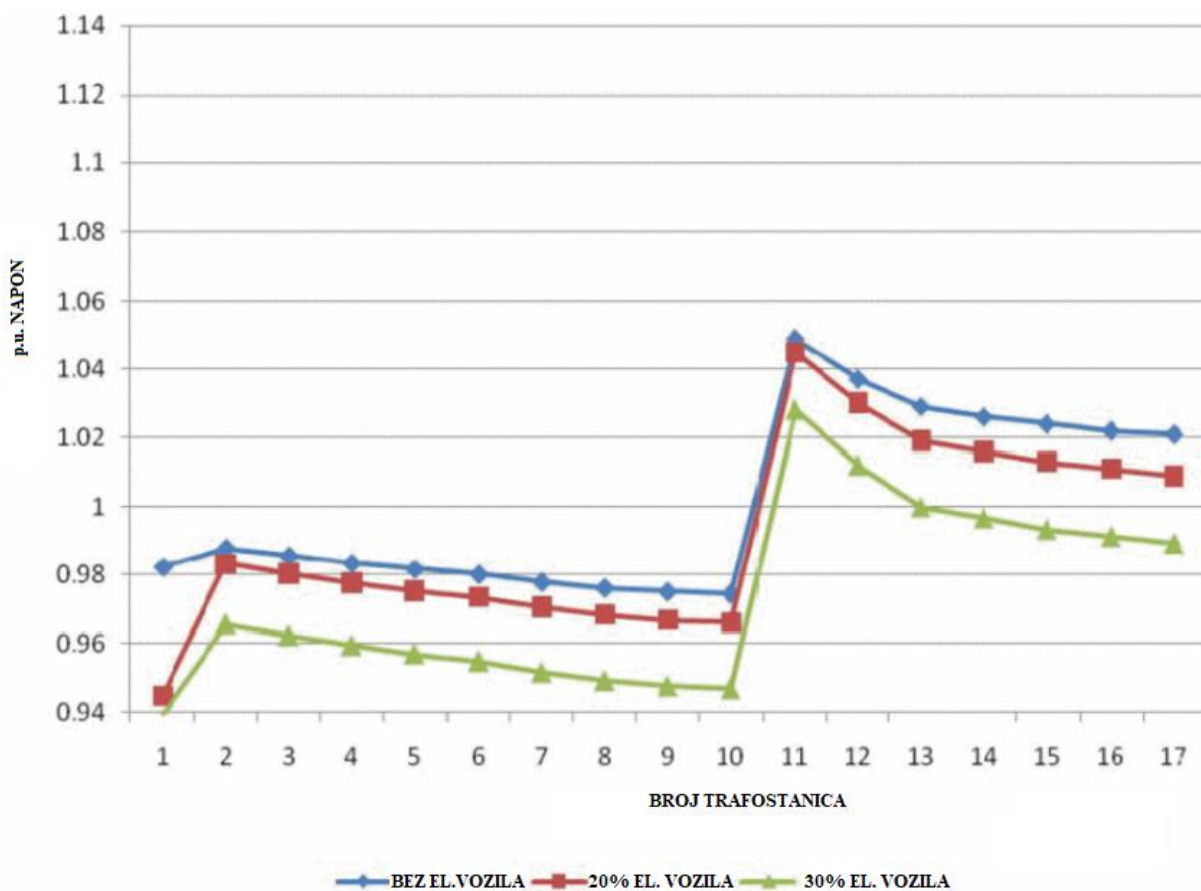


Slika 4.6. Graf prikazuje ljetno opterećenje u fazama (kućno punjenje) [15]

#### 4.1.2. Razine napona

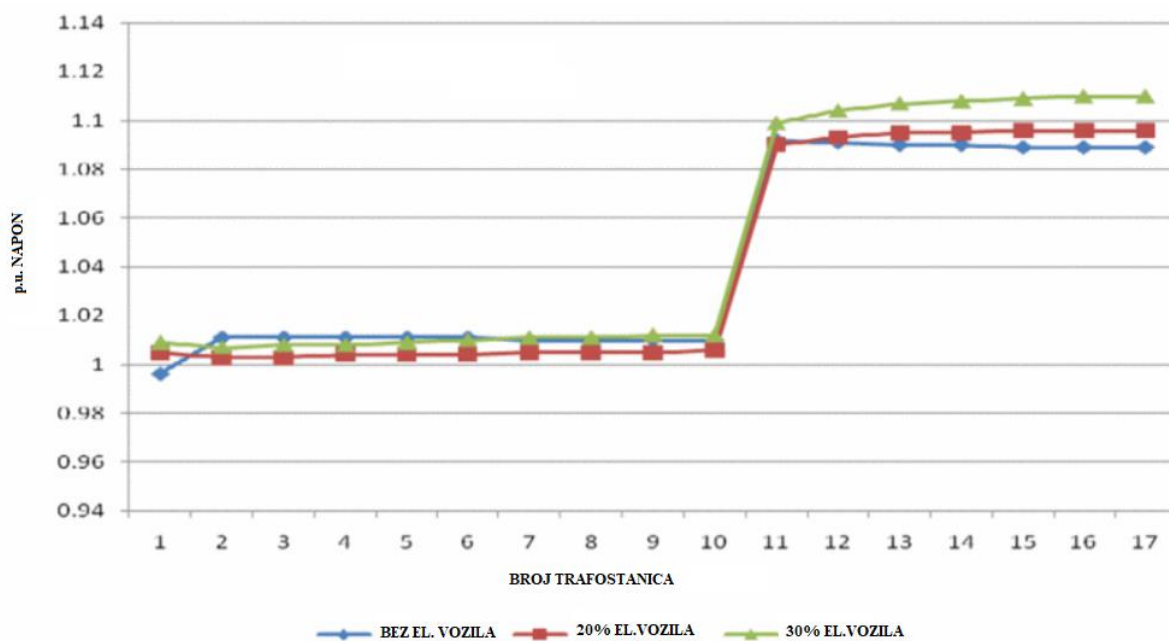
Razine napona na različitim trafostanicama prikazane na shemi distribucijske mreže danom na slici 4.1., analizirane su za minimalne i maksimalne uvjete opterećenja s različitim razinama prodora električnih vozila (za koje se pretpostavlja da su ravnomjerno raspoređeni). Pretpostavljaju se dva slučaja penetracije električnih vozila, a to su 20 % i 30 % kuća koje imaju električna vozila priključena na napajanje. Prate se rezultati dva ekstremna stanja, a to su električna vozila koja se pune pri uvjetima maksimalnog opterećenja i električna vozila koja rade u regeneracijskom načinu rada tijekom uvjeta minimalnog opterećenja.

Slika 4.7. prikazuje profile napona za uvjete maksimalnog opterećenja kada su električna vozila u stanju punjenja. Kao što se može primijetiti, punjenje električnih vozila stvorilo je dodatno opterećenje na priključak. Na razini od 20 %, rad mjenjača pod opterećenjem održava naponske razine unutar granice od -5 % za razinu od 11 kV. Međutim, s razinom od 30%, regulacijska sklopka doseže svoju granicu i naponi na trafostanicama 8, 9 i 10 padaju ispod granice.



Slika 4.7. Graf prikazuje punjenje pri maksimalnom opterećenju [15]

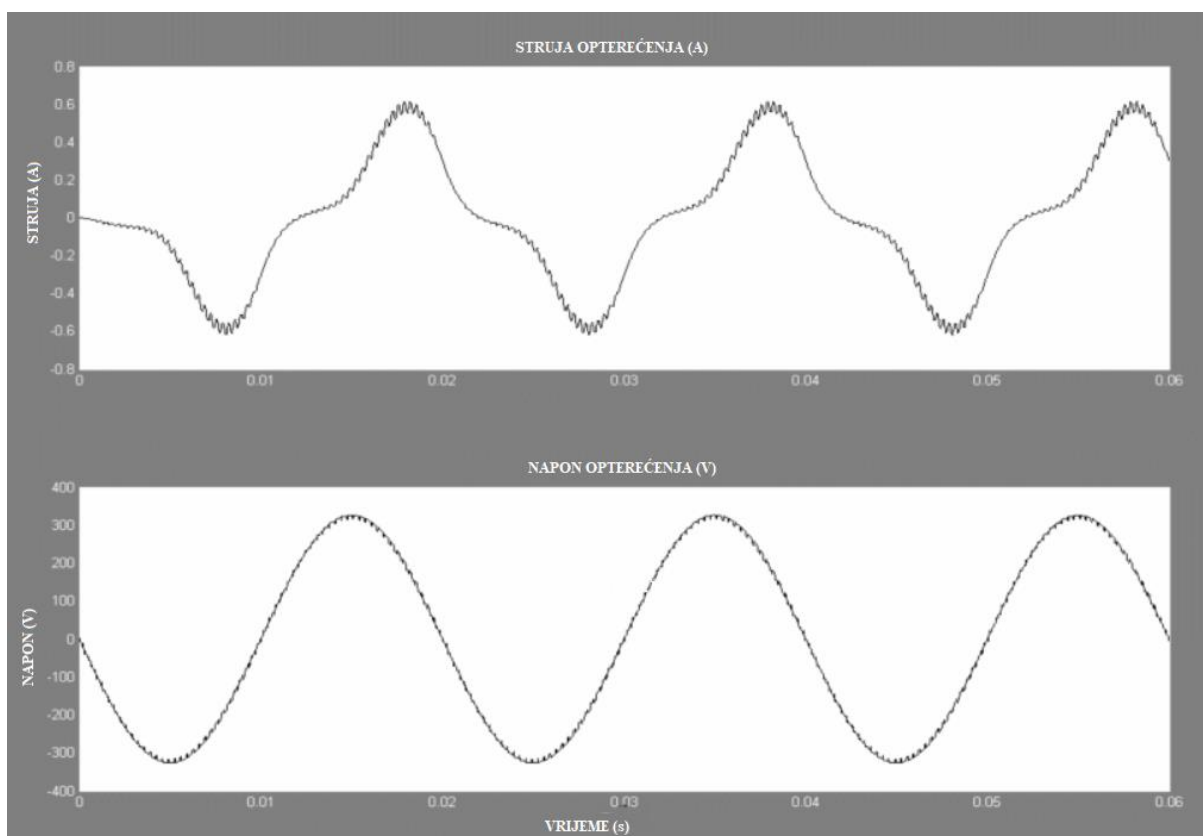
Slika 4.8. prikazuje napone za minimalne uvjete opterećenja i električna vozila koja rade u regeneracijskom načinu rada. Sa spojenih 20% električnih vozila, napon na udaljenom kraju je malo ispod najveće dopuštene granice od 10% za razinu od 400 V samo uz rad regulacijske sklopke transformatora. Međutim, za 30% razine električnih vozila, regulacijska sklopka doseže svoju granicu i razine napona na svim točkama na niskonaponskom dovodu prelaze dopuštenu granicu.



Slika 4.8. Graf prikazuje punjenje pri minimalnom opterećenju [15]

Slika 4.9. prikazuje sličan scenarij kao na slici 4.8., ali s lokaliziranom distribucijom električnih vozila što znači da je isti ukupni broj na svakom priključku spojenog na domaće potrošače koji se napajaju samo iz točaka 16 i 17 iz dane sheme distribucijske mreže. Kao što se može vidjeti, zbog lokalizirane distribucije, granica napona je prekoračena čak i na razini od 20%. Ovo pokazuje da bi opseg utjecaja električnih vozila bio specifičan za mrežu i ovisi o njihovoj distribuciji unutar mreže.

Uređaji sučelja električnog vozila koriste energetske elektroničke pretvarače i to su izrazito nelinearni uređaji zbog svojih principa rada i prisutnosti prekidačkih energetskih poluvodičkih elemenata. Stoga ulazna struja pretvarača općenito sadrži visoke razine harmonika i oni se obično rješavaju pomoću modulacije širine impulsa (PWM) i filtriranja. Proizvođači tvrde da njihovi pretvarači proizvode dobru kvalitetu električne energije s obzirom na harmonike i faktor snage, kako u načinu punjenja tako i u regeneraciji. Stoga se ne bi trebali pojaviti značajniji problemi s kvalitetom snage tijekom normalnog rada sustava. Što se tiče kvalitete snage u stanju greške prikazano je na slici 4.9. gdje se prikazuje filtrirana struja mreže električnog vozila u amperima i napon u voltima za stanje greške unutar pretvarača. Kao što se može primijetiti, struja je jako izobličena i to bi moglo utjecati na lokalnu mrežu, osobito ako postoji mnogo električnih vozila koja imaju slične probleme. Imajući na umu da takve greške obično ne bi otkrio sustav prekostrujne zaštite pretvarača.



Slika 4.9. Prikaz mrežne struje i napona el. vozila za stanje kvara unutar pretvarača [15]

## 4.2. Sa aspekta vlasnika punionica

Značajke od jednostavne jedinice koja se uključuje i isključuje do jedinica koje prikupljaju podatke, komuniciraju s korisnicima i pružaju mogućnost naplate za vlasnika punionice. Vrsta i količina punionica odabranih za mjesto će ovisiti o korisnicima, uvjetima specifičnim za lokaciju, upravljanju podacima i poslovnom scenariju za stanicu. Prilikom kupnje jedinice punionice, vlasnik može odlučiti kupiti i produženo jamstvo koje pokriva potencijalne popravke nakon isteka jamstvenog roka standardne jedinice.

Sva Plug-In električna vozila imaju kabel koji se priključuje na razinu 1 utičnice od 110 do 120V i spaja se na vozilo preko priključka za punjenje. Pružanje punjenja razine 1 je najjeftinija opcija punjenje te ima ponudu utičnice koji uključuje kabel razine 1 i sustav punjenja s konektorom. Jedinice razine 2 su opcije srednjeg ranga, a istosmjerno punjenje spada u najvišu razinu troškova. Povećanje snage punjenja također povećava trošak jedinice zbog viših troškova prilagodbi većem iznosu struje. Na primjer punionica razine 2 od 48 A košta više od punionice razine 2 od 30 A.

Punionice s jednim priključkom omogućuju pristup samo jednom vozilu za punjenje u isto vrijeme. Jedinice s više priključaka (obično 2, 3 ili 4 priključka) dostupne su kako bi se omogućilo punjenje više vozila istovremeno ili uzastopno. Treba pažljivo razmotriti ove mogućnosti kako bi punionica bila kompatibilna s električnim vozilima koja će ga koristiti kao i s potencijalnom budućom procijenjenom upotrebom. Jedinice s više priključaka skuplje su od jedinica s jednim priključkom, ali su i jedinični trošak i troškovi instalacije jeftiniji po priključku za jedinice s više priključaka.

Tablica 4.1. Cijene punionica s obzirom na tip punjenja [16]

TIPOVI PUNIONICA ZA ELEKTRIČNA VOZILA (JEDAN PRIKLJUČAK )	RASPON CIJENA PUNIONICA ( \$ )
Razina 1	300 - 1500
Razina 2	400 - 6500
DC punjenje	10000 - 40000

Jedinice su obično dostupne na zidu ili na postolju. Dostupne su i stropne jedinice, ali su češće za stambenu upotrebu. Jedinica montirana na postolje košta više od one montirane na zid zbog materijala i troškova proizvodnje postolja. Također postoje dodatni troškovi izgradnje za ugradnju jedinice montirane na postolje (npr. izlivanje betonske podloge na uporište). Tipično, vlasnici mjesta odabiru zidnu jedinicu ako su parkirna mjesta koja će se koristiti za

punjenje blizu zida, budući da jedinica i instalacija koštaju manje od postolja. Međutim, jedinice montirane na postolje pružaju veću fleksibilnost dizajna, kao što je mogućnost postavljanja punionice na sredinu parkirališta ili ispred pločnika. Također mogu držati više jedinica.

Potencijalni vlasnici punionice za električna vozila potiču se da imaju izvođača radova za elektrotehniku da dovrši procjenu proračuna za instalaciju punionice na određenoj lokaciji. Početna procjena lokacije trebala bi uključivati određivanje električnog kapaciteta lokacije, mjesto distribucijskih ili uslužnih vodova, potrebni električni kapacitet za vrstu i količinu i najbolje mjesto za jedinice punionica. Najbolja lokacija za jedinice uzet će u obzir minimiziranje troškova instalacije i zahtjeve pristupačnosti. Tijekom postupka instalacije, izvođač će nabaviti jedinicu ili jedinice za punjenje, instalirati novu ili nadograđenu električnu uslugu ili spojiti postojećem električnom servisu koji će prekrižiti parkirna mjesta prema potrebi kako bi se ispunili zahtjevi za parkiranje. Možda će biti potrebno uključiti lokalnu elektroprivredu ako su potrebna poboljšanja opskrbe električnom energijom u objektu (npr. opskrbne žice većeg kapaciteta, transformatori itd.). Za komercijalnu punionicu razine 2, analiza troškova instalacije iznosi za rad od 55 do 60 % , za materijal od 30 do 35 % , za dozvole i porez 5 % proračuna.

U većini slučajeva, svaka jedinica punionice mora imati dostupan namjenski krug. Postoje neki slučajevi u kojima se više jedinica može spojiti na namjenski krug, kao na primjer kada krugom upravlja sustav upravljanja energijom. Mjesto također mora imati dovoljan električni kapacitet pri odgovarajućem naponu koji teče od instalacija do električne ploče mjesta kako bi se zadovoljile potrebe energije. Ako mjesto ne ispunjava te zahtjeve, trebat će nadogradnje električne usluge. Električni radovi mogu varirati od jednostavne modifikacije električne ploče do skupljih nadogradnji ili instalacija transformatora. Međutim, kako bi se smanjili troškovi, potrebno je razmotriti dizajn koji ne zahtijeva više snage od raspoloživog električnog kapaciteta. Ako su potrebne električne nadogradnje, troškovi se mogu minimizirati postavljanjem jedinica u blizini elektro servisa. Velika udaljenost od punionice do elektro servisa može dovesti do većih troškova kopanja rovova. To također može dovesti do većih troškova materijala kako bi se zadovoljili električni zahtjevi (npr. veća žica koja bi uračunala padove napona).

Operativni troškovi punionica uključuju trošak električne energije za punjenje vozila. Potiču se domaćini koji vrše naplatu da kontaktiraju elektroprivredu kako bi pregledali opcije za cijenu strukturu i sve implikacije korištenja stope naplate električnih vozila ili stope vremena korištenja na objektu kao cjeline. Općenito, godišnji trošak potrošnje električne energije za vlasnika punionice određuje se na temelju cijene električne energije po kilovatsatu i količine potrošene električne energije. Potrošnja električne energije varirat će ovisno o broju vozila koja

koriste punionicu, izlaznoj snazi punionice, stopi prihvaćanja snage vozila, klimi i vremenu punjenja vozila.

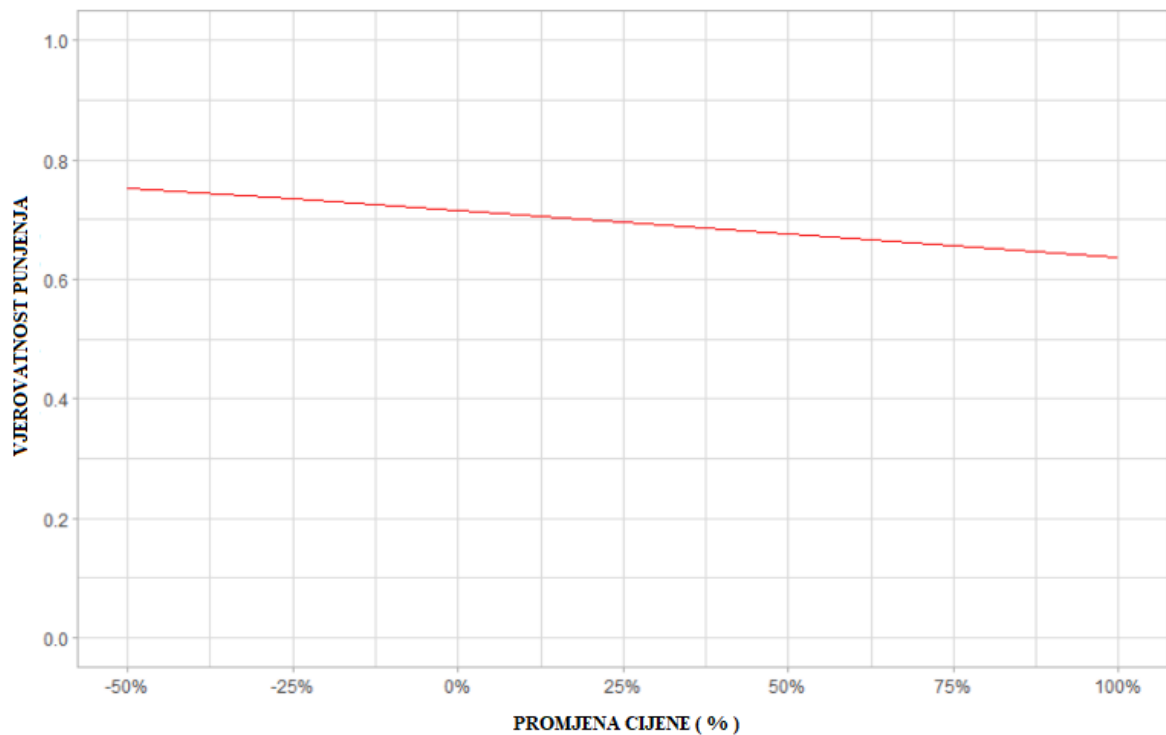
Uz troškove električne energije koji se temelje na potrošnji energije, mnogi komercijalni i industrijski objekti mogu podlijevati naknadi za potrošnju električne energije od komunalnog poduzeća. Korištenje stanica razine 2 i DC punjenje smještenih u tim objektima može rezultirati većim troškovima električne energije povećanjem vršne potražnje za električnom energijom objekta. Neke lokacije koje ranije nisu podlijevate naknadi potražnje mogu otkriti da će dodatna potrošnja energije od punionica sada rezultirati naplatom potražnje.

### 4.3. Sa aspekta korisnika punionica

Logično je pretpostaviti da će vozači električnih vozila odabrati najbližu stanicu za punjenje kada odluče puniti. U stvarnoj situaciji, najbliža stanica za punjenje nije uvijek najbolji izbor. Vrijeme punjenja električnih vozila je dugo. Potrajat će duže od 20 minuta čak i u načinu rada brzog punjenja. Kada ima puno električnih vozila za punjenje, vozači moraju čekati u redu. Za vozače električnih vozila, vrijeme potrebno za čekanje na punjenje je nepodnošljivije od vremena punjenja. U ovom trenutku, ako vozači odaberu stanicu za punjenje s neoptimalnom udaljenošću, bit će malo vremena za čekanje na punjenje. Tada će ukupni vremenski trošak biti manji od situacije odabira najbliže stanice za punjenje. Stoga je vrijeme čekanja na stanici za punjenje važan faktor pri optimizaciji lokacije stanice za punjenje. Lokacija punionice osmišljena je kako bi se vozačima električnih vozila pružila bolja usluga. A zbog važnosti vremena čekanja na punionici i dugog vremena punjenja, vozač električnog vozila će izabrati najbolju punionicu za sebe. Prije optimizacije lokacije stanice za punjenje, predviđa se ponašanje vozača po izboru kako bi stanica za punjenje mogla pružiti bolju uslugu za više vozača. Pod različitim shemama lokacije stanica za punjenje, ponašanje vozača pri izboru bit će drugačije. Svaka punionica ima različit broj kupaca u isto vrijeme, a prosječno vrijeme čekanja na svakoj punionici je različito. Stoga je potrebno predvidjeti ponašanje korisnika punionica električnih vozila. Kada se utvrdi ponašanje vozača pri punjenju, utvrđuje se i prosječno vrijeme čekanja za svaku stanicu za punjenje.

Karakteristike punionica, kao što su cijena punjenja, brzina dostupnih punjača, dostupnost u smislu vremena čekanja u redu prije punjenja, te objekti poput kafića ili trgovačkog centra u kombinaciji sa stanicom za punjenje su izrazito važni kada se odlučuje koristiti punionicu za električna vozila. Slika 4.10. prikazuje kako je gotovo linearan odnos između vjerojatnosti naplate i cijene, jer se cijena mijenja od 50 % smanjenja na 100 % poskupljenja cijene. Cjenovna elastičnost od  $-0,108$  vrlo je niska, što ukazuje da čak i ako vozači preferiraju jeftinije punjenje, oni su manje osjetljivi na promjene cijene kada odlučuju o punjenju. Nepobitno je da brzina punjenja direktno utječe na vrijeme punjenja te se opcije brzih punjenja preferiraju kod korisnika električnih vozila. Kako se veličina baterija povećava, povećava se i vrijeme potrebno za potpuno punjenje baterija, ali potrebno je manje zaustavljanja punjenja jer početni rasponi su duži. S druge strane, veće baterije i popratni duži domet vožnje mogu povećati broj dugih putovanja koja provode električna vozila i posljedično produžiti vrijeme punjenja električnih vozila na stanicama za punjenje.





*Slika 4.10. Prikaz pada vjerovatnosti punjenja s porastom cijene [17]*

Vrijeme punjenja je često predvidljivo. Vrijeme potrebno za punjenje do određene razine baterije najvećim je dijelom funkcija brzine punjenja i stanja napunjenosti električnog vozila prije punjenja. Dakle, oba faktora koji se mogu procijeniti unaprijed prilikom planiranja putovanja. Brzina punjenja i dalje može varirati ovisno o potražnji, jer većina brzih punjača dijeli učinak između električnih vozila koja pune istovremeno, što rezultira sporijom brzinom punjenja. To znači da ako se dva električna vozila pune na punjaču od 100 kW, električna vozila dobivaju po 50 kW pojedinačno. S druge strane, vrijeme čekanja puno je nepredvidljivije i manje fleksibilno nego vrijeme punjenja budući da ovisi o drugim ljudima koji već pune električna vozila. Dok dugi redovi mogu staviti blagi društveni pritisak na ljude koji zauzimaju punjače da bi završili prije, dugi redovi također ukazuju na vrijeme čekanja za punjenje i mogu poslužiti kao vizualni znak i poticaj za nastavak vožnje umjesto da se zaustavi radi punjenja.

Objekti na stanicama za punjenje važni su za donošenje odluka o punjenju. Prvo, sadržaji mogu povećati udobnost tijekom punjenja i pružiti priliku da se vrijeme tijekom punjenja iskoristi za druge aktivnosti kao što su jelo, odmor, kupnja itd. Drugo, objekti također mogu biti glavni razlog za zaustavljanje, npr. prijeko potreban odmor, vrijeme za jelo ili kupnju namirnica. Mogućnost punjenja, čak i ako nije nužno potrebno, prikladni su i mogu smanjiti potrebu za dodatnim zaustavljanjima ili smanjiti vrijeme provedeno na sljedećim stanicama za punjenje.

## 5. RAZRADA MODELA ZA OPTIMALNI IZBOR LOKACIJA ZA PUNIONICE ELEKTRIČNIH VOZILA

Model diskretnog skupa se odnosi na matematički ili računalni model koji se koristi za opisivanje skupa elemenata koji su diskretni, odnosno razdvojeni i odvojeni jedan od drugoga. Ovaj skup se može sastojati od zasebnih i jasno definiranih elemenata, pri čemu svaki element može biti određenim svojstvima povezan s drugima u skupu. U usporedbi s kontinuiranim skupom, gdje su elementi međusobno povezani u neprekidnom rasponu (npr. brojevi između 1 i 10), diskretni skup ima jasno razlučive elemente, kao što su: cijeli brojevi (1, 2, 3, itd.), riječi u rječniku ili skupovi objekata koji su dobro definirani i razdvojeni. Model diskretnog skupa koristi se za rješavanje problema koji uključuju diskretne vrijednosti ili odluke. Na primjer, u optimizacijskim problemima, moguće vrijednosti varijabli su ograničene na diskretne vrijednosti, a cilj je pronaći najbolje moguće rješenje unutar tog skupa.

Pokrivenost diskretnog modela lokacije odnosi se na problem pokrivanja diskretnog skupa, a naveden je kao problem pokrivanja diskretnog skupa lokacije, gdje je po definiciji problem pronaći minimalni broj objekata za pokrivanje potražnje (predstavljena kao prolazni tokovi ili potencijalni kupci agregirani kao točke područja). Dodatno je provedena analiza osjetljivosti kako bi se potražilo minimalno vrijeme punjenja i duljina boravka na svakom mjestu. Ciljna funkcija je minimizirati trošak ugradnje punionica. Model optimizacije za postavljanje punionice kako bi se ukupni trošak sveo na minimum zadovoljavajući pouzdanost punjenja i kvalitetu usluge koju očekuju vozači električnih vozila. Da bi se bolje razumjelo složenost problema, koriste se modelirani skupovi za predstavljanje cestovne mreže i električne putanje vožnje vozila. Uključujući euklidsku udaljenost, ovaj optimizacijski model također uzima u obzir pouzdanost punjenja kao i ograničenje dometa vožnje električnih vozila. Jednokratno vrijeme punjenja električnog vozila odražava se uključivanjem novog indeksa kvalitete usluge. Numerički rezultati ilustriraju primjenu predložene optimizacije u postizanju minimalnih troškova lokacija stanica za punjenje, a također i postizanje pouzdanosti punjenja i očekivane kvalitete usluge kroz analizu ponašanje vozača kroz korištenje električnog vozila.

Cilj je minimizirati udaljenost kretanja vozila te da se vozilo može puniti izravno. Sva električna vozila kreću se linearno. Problematika dijeljenja lokacije za punionicu električnog vozila je da mora biti unutar zadanog vremena, zadani broj punjenja stanice je nasumično raspoređen u određenim područjima te mora biti određeno kako minimizirati udaljenost kretanja za njih. Kao što je ranije spomenuto, električna vozila se pune na temelju: kapaciteta baterije, položaja stanice za punjenje i položaja vozača te točke potražnje (pozicije željenog

vozača) i njenog prioriteta itd. Ograničena kilometražom, električna vozila moraju prije posjetiti stanice za punjenje baterija nego li se baterija isprazni. Jedan kriterij za razumno dijeljene lokacije je da postoji beznačajna varijacija u pristupnim frekvencijama različitih stanica za punjenje. Postoje dvije vrste ograničenja vozila i putnika u proces dostizanja točke potražnje: fizičko stanje i operativno stanje.

Dakle, za prezentaciju cestovne mreže koristi se ranije spomenuti model diskretnog skupa, a koristi se kako bi se smanjila kompleksnost modeliranja lokacije i kako bi se podaci pripremili za postupak optimizacije. Uključivanjem teorije skupova, cestovna mreža se predstavlja prema izrazu 5.1:

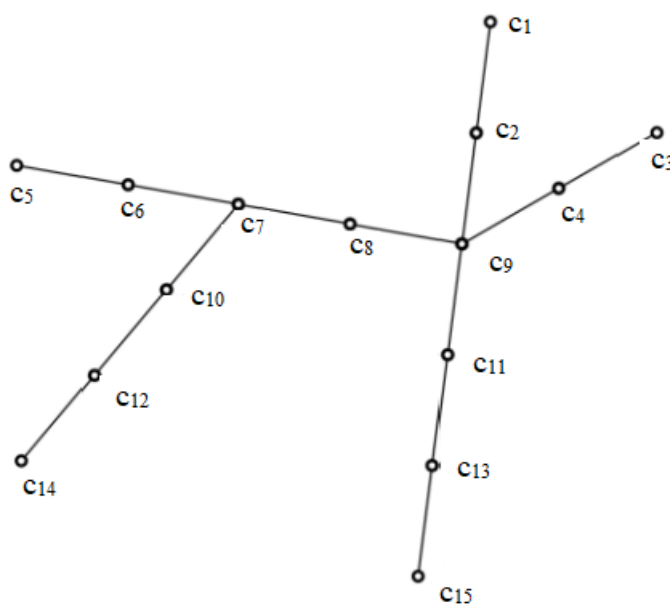
$$C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_i, \dots, c_I\}; i = 1, 2, 3, \dots, I \quad (5.1)$$

gdje je:

$C$  konačan skup  $I$  diskretnih točaka cestovne mreže

$c_i$   $i$ -ta lokacija kandidata za postavljanje punionice

Na slici 5.1. se može vidjeti prostorni prikaz cestovne mreže i konačni skupni prikaz diskretne točke ceste, prema tom prikazu vrijedi  $I=15$ . Stoga, cesta se uzorkuje na jednako razmaknutim diskretnim točkama, koje su označene kao elementi skupa  $C$ , što predstavlja skup točaka kandidatskih lokacija.



Slika 5.1. Diskretni prikaz cestovne mreže [20]

Individualno ponašanje vozača električnih vozila bilježi se reprezentacijom konačnog skupa, koristi se isti princip kao i prije za prikaz točaka lokacije kandidata. Izraz je idući:

$$P_{v,t} = \{p_{v,1,t}, p_{v,2,t}, \dots, p_{v,j,t}, \dots, p_{v,J_{v,t},t}\}; j = 1, 2, \dots, J_{v,t}; \forall v = 1, 2, \dots, V; \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (6.2)$$

gdje je:

$P_{v,t}$	$t$ -ti konačni skup diskretnih točaka potražnje putanje $v$ -tog vozača el. vozila
$n_{v,j,t}$	$j$ -ta putanja diskretne točke potražnje
$t$	vremenska instanca
$J_{v,t}$	ukupan broj točaka putanje $v$ -tog vozača el. vozila u $t$ -toj vremenskoj instanci
$V$	ukupan broj vozača električnog vozila

Udaljenost između točke lokacije kandidata i točke zahtjeva putanje definirana je euklidskom udaljenosti, a navedeno je definirano izrazom 5.3:

$$\xi = \sqrt{(c_i - p_{v,j,t})^2 dx + (c_i - p_{v,j,t})^2 dy}; c_i \in C; p_{v,j,t} \in P_{v,t} \quad (5.3)$$

gdje je:

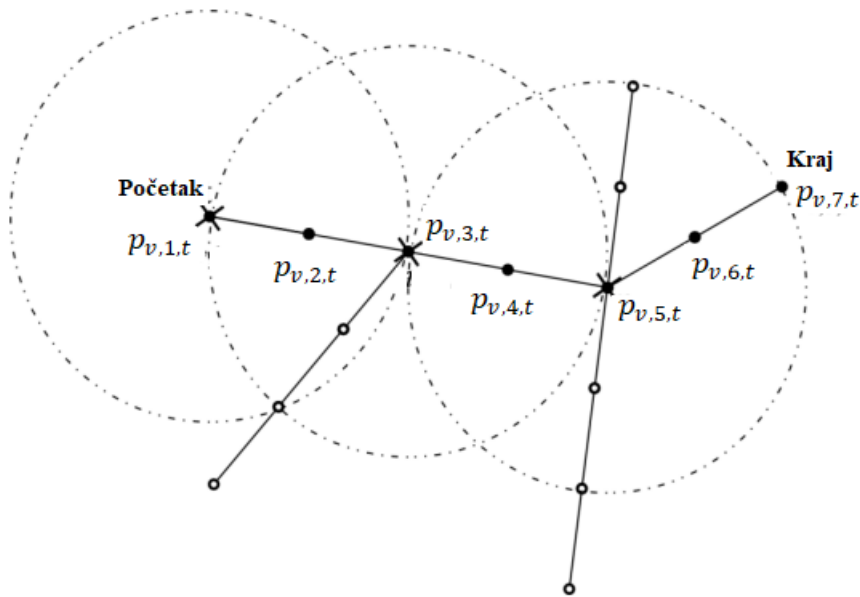
$c_i$	$i$ -ta lokacija kandidata za postavljanje punionice
$\xi$	euklidska udaljenost između točke $c_i$ i tražene točke putanje $p_{v,j,t}$
$p_{v,j,t}$	$j$ -ta putanja diskretne točke potražnje

Ovaj problem optimizacije lokacije, sadrži skupove  $O_{v,j,t}$ , a oni su definirani u smislu udaljenosti između diskretne potražnje putanje točke  $n_{v,j,t}$  i mjesta kandidata  $c_i$ :

$$O_{v,j,t} = \{c_i \in M : \xi \leq R_v\}; j = 1, 2, \dots, J_{v,t}; \forall v = 1, 2, \dots, V; \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5.4)$$

gdje je:

$O_{v,j,t}$	kandidati za lokacijske točke $c_i$ koje zadovoljavaju kriterij udaljenosti $\xi \leq R_v$
$R_v$	raspon vožnje



Slika 5.2. Opća shema za formiranje skupova  $O_{v,j,t}$ [20]

Slika 5.2. pokazuje da se potpuna pouzdanost punjenja (s obzirom na udaljenost) postiže kada se barem jedna punionica nalazi unutar dometa vožnje  $v$ -tog vozača električnog vozila, što iznosi 200 km. Inicijalni  $v$ -ti domet vožnje vozača električnog vozila  $R_{v,0}$ , ovisi o stanju napunjenosti  $v$ -tog električnog vozila  $SoC_v$ , a  $\eta$  je učinkovitost pretvorbe energije.

$$R_{v,0} = \eta \cdot SoC_v; \forall v = 1, 2, \dots, V \quad (5.5)$$

gdje je:

$R_{v,0}$  inicijalni  $v$ -ti domet vožnje vozača električnog vozila

$SoC_v$  stanje napunjenosti  $v$ -tog električnog vozila

Što se tiče početne točke vozača električnih vozila, ona može biti bilo gdje unutar mreže modelirane ceste, ali ne izvan nje, međutim ovaj slučaj je riješen neizravno s  $v$ -tim vozačem  $SoC_v$ . U skladu s izrazom 5.5 s obzirom na vozače električnih vozila koji dolaze izvan modelirane cestovne mreže, moraju se odrediti ulazne točke i trenutni  $SoC_v$  te  $v$ -ti identificirani vozač električnog vozila, kako bi mogli odrediti lokacije točki kandidata koje će biti uključene u potonju optimizaciju.

U ovom primjeru se može vidjeti da je kriterij udaljenosti  $\xi$  jednak dometu vožnje  $R_v$ , dakle elementi od pojedinačnog skupa  $O_{v,j,t}$  bio bi kandidat za lokacijsku točku koja ispunjava zadani kriterij  $\xi \leq R_v$ . Za kasniju upotrebu u optimizacijskom modelu upotrebljava se izraz 5.6:

$$b_{i,v,j,t} \begin{cases} 1, & \text{ako } \xi \leq R_v \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.6)$$

gdje je:

- $b_{i,v,j,t}$  matematički koeficijent
- $R_v$  raspon vožnje
- $\xi$  euklidska udaljenost između točke  $c_i$  i tražene točke putanje  $p_{v,j,t}$

Koeficijent u  $b_{i,v,j,t}$  ima vrijednost 1 ako je euklidska udaljenost od  $i$ -tog mjesta kandidata za postavljanje punionice na  $j$ -toj diskretnoj točki putanje  $v$ -tog vozača električnog vozila u  $t$ -toj vremenskoj instanci unutar dometa vožnje vozača električnog vozila, a inače je vrijednost 0.

Drugi važan ekonomski parametar koji se kasnije koristi u postupku optimizacije je individualna težina  $i$ -te kandidatske lokacijske točke. Težine su identificirane s obzirom na prometni tok, definiran brojem korisnika električnih vozila koji putuju uz točku kandidatske lokacije cestovne mreže, odražavajući njezinu važnost. Da bi se izračunale težine, prvo se definira koeficijent:

$$Z_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{ako } c_i \in P_{v,t} \\ 0, & \text{inače} \end{cases} ; \forall t = 1, 2, \dots, T; \forall v = 1, 2, \dots, V; i = 1, 2, \dots, I \quad (5.7)$$

gdje je

- $Z_{i,t}$  matematički koeficijent
- $P_{v,t}$   $t$ -ti konačni skup diskretnih točaka potražnje putanje  $v$ -tog vozača el. vozila
- $c_i$   $i$ -ta lokacija kandidata za postavljanje punionice

$Z_{i,t}$  je koeficijent koji uzima vrijednost 1 ako je  $i$ -ta lokacijska točka kandidata dio skupa potražnje putanje točaka  $v$ -tog vozača električnog vozila u  $t$ -toj vremenskoj instanci, a inače je vrijednost 0. Težina  $i$ -te kandidatske točke lokacije za postavljanje punionice, označena s  $w_i$ , izračunava se kao zbroj koeficijenata  $Z_{i,t}$ , u promatranom razdoblju optimizacije s vremenom  $T$ , a izraz za navedeno je idući:

$$w_i = \sum_{t=1}^T W_{i,t}; \forall i = 1, 2, \dots, I \quad (5.8)$$

gdje je:

- $w_i$       težina i-te kandidatske točke lokacije za postavljanje punionice
- $Z_{i,t}$      matematički koeficijent

Vrsta tehnologije punjenja postavljene na mjesto punionice kandidata igra vitalnu ulogu u elektromobilnosti jer nameće trajanje vremena punjenja. Općenito, tehničko-ekonomsko poboljšanje infrastrukture punjenja bilo bi skraćivanje vremena punjenja i instaliranje tehnologije punjenja po najnižoj cijeni mjesta kandidata. Budući da su sada dostupne različite tehnologije punjenja, K kandidatske tehnologije punjenja definirane su za postavljanje na i-tu kandidatsku lokaciju za sljedeći postupak optimizacije. Ova definicija zadovoljit će traženu kvalitetu usluge naplate primjenom postupka optimizacije. Ulazni parametar  $L_{k,v}$  definiran je uzimajući u obzir vrijeme punjenja  $CT_k$ , korištenjem k-te tehnologije punjenja kandidata za postizanje udaljenosti jednakoj dometu vožnje v-tog vozača električnog vozila  $R_v$ . Parametar je pojašnjen idućim izrazom:

$$L_{k,v} = \frac{CT_k}{R_v}; \forall v = 1, 2, \dots, V; \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (5.9)$$

gdje je:

- $L_{k,v}$       ulazni parametar
- $CT_k$       vrijeme punjenja
- $R_v$         raspon vožnje

Ekonomski parametar povezan je s investicijskim troškovima za postavljanje k-tog kandidata tehnologija punjenja na i-toj lokaciji kandidata, a označen je s  $c_{i,k}$ . Investicijski trošak povezan s k-tom kandidatskom tehnologijom naplate uključuje osnovnu opremu, trošak zemljišta i druge troškove kako je prikazano u modelu optimizacije. Troškovi instalacije uračunati su u funkciju cilja optimizacije.

Prema lokacijskim modelima koji pokrivaju skupove, lokacijske točke kandidata također se mogu smatrati i točkama usluga, a u tom slučaju infrastruktura za punjenje može se promatrati kao objekt tražene razine usluge, budući da kandidatske tehnologije punjenja koje će se instalirati na mjestima kandidata nude različita vremena punjenja. Uveden je novi indeks koji

se naziva Quality of Service ili kvaliteta usluge ( $QoS_v$ ) za  $v$ -tog vozača električnog vozila.  $QoS_v$  je definiran izrazom 5.10:

$$QoS_v = \frac{DCT_v}{L_v}; \forall v = 1, 2, \dots, V \quad (5.10)$$

gdje je:

$QoS_v$  indeks za kvalitetu usluge  $v$ -tog vozača

$DCT_v$  ukupno vrijeme jednokratnog punjenja  $v$ -tog vozača električnog vozila

$L_v$  ukupna udaljenost putovanja

Ako  $v$ -ti vozač električnog vozila ima na raspolaganju duže vrijeme čekanja za punjenje, to znači da postoji veća vrijednost  $QoS_v$  indeks, tj. niži trošak postavljanja infrastrukture za punjenje, kao posljedica ugradnje  $k$ -tog kandidata tehnologije punjenja s dužim vremenima punjenja na  $i$ -tom mjestu kandidata.



## 5.1. Optimizacijski model

Ciljna funkcija je minimiziranje ukupnih troškova za postavljanje infrastrukture za punjenje:

$$\text{Min} \left\{ F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \frac{1}{w_i} \cdot c_{i,k} \cdot x_{i,t} \right\} \quad (5.11)$$

gdje je:

- $x_{i,t}$  binarna varijabla odluke povezana s i-tom kandidatskom točkom lokacije u t-toj vremenskoj instanci
- T vremenske instance

Ograničenja optimizacije su realizirana izrazima:

$$\sum_{i=1}^I b_{i,v,j,t} \cdot x_{i,t} \geq 1; j = 1, 2, \dots, J_{v,t}; t = 1, \dots, T; v = 1, 2, \dots, V \quad (5.12)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K L_{k,v} \cdot x_{i,t} \leq Q_o S_v; t = 1, \dots, T; v = 1, 2, \dots, V; \quad (5.13)$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t}; t = 1, \dots, T - 1; i = 1, 2, \dots, I \quad (5.14)$$

$$x_{i,t} \in \{0,1\}; t = 1, 2, \dots, T; i = 1, 2, \dots, I \quad (5.15)$$

gdje je:

- $b_{i,v,j,t}$  matematički koeficijent za optimizaciju modela
- $L_{k,v}$  ulazni parametar uzimajući u obzir vrijeme punjenja

Ciljnom funkcijom zapisanom u izrazu 5.11 minimizira se ukupni trošak za postavljanje infrastrukture za punjenje, s  $K$  kandidatskim tehnologijama naplate,  $I$  kandidatskim lokacijskim točkama cestovne mreže i razdobljem optimizacije  $T$  točke u vremenu. Parametar  $w_i$  predstavlja važnost i-te kandidatske lokacijske točke za postavljanje punionice, a  $c_{i,k}$  su investicijski troškovi za postavljanje tehnologije punjenja k-tog kandidata na i-tu lokaciju kandidata. Ograničenje iz izraza 5.12 uvodi se kako bi se osigurala pouzdanost punjenja infrastrukture za punjenje korištenjem koeficijenta  $b_{i,v,j,t}$ . Lijeva strana izraza 5.13 ograničenja osigurava postavljanje tehnologije punjenja k-tog kandidata na lokaciju i-tog kandidata s vremenom punjenja k-te tehnologije  $CT_k$  po v-tom rasponu vozača električnog vozila kako bi se postigla razina kvalitete usluge koju vozač električnog vozila zahtijeva, kako je definirano u izrazu

5.10. Ograničenje jednakosti u izrazu 5.14 uključeno je kako bi se postigao kontinuitet varijabli odluke o lokaciji  $i$ -tog kandidata tijekom perioda optimizacije  $T$  vremenskih instanci. Prema tome, izraz 5.14 navodi: ako je  $i$ -ta lokacija kandidata odabrana u  $t$ -tom trenutku, odluka o odabiru mora biti predana nakon  $t+1$  vremenske instance za promatrano vremensko razdoblje s  $T$  instanci. Ograničenje u izrazu 5.15 navodi binarnu definiciju varijable odluke o  $i$ -toj lokaciji kandidata u  $t$ -toj vremenskoj instanci, tj. binarnoj definiciji  $I$  lokacije kandidata točke optimizacijskog razdoblja  $T$  vremenskih instanci.

## 5.2. Numerički rezultati

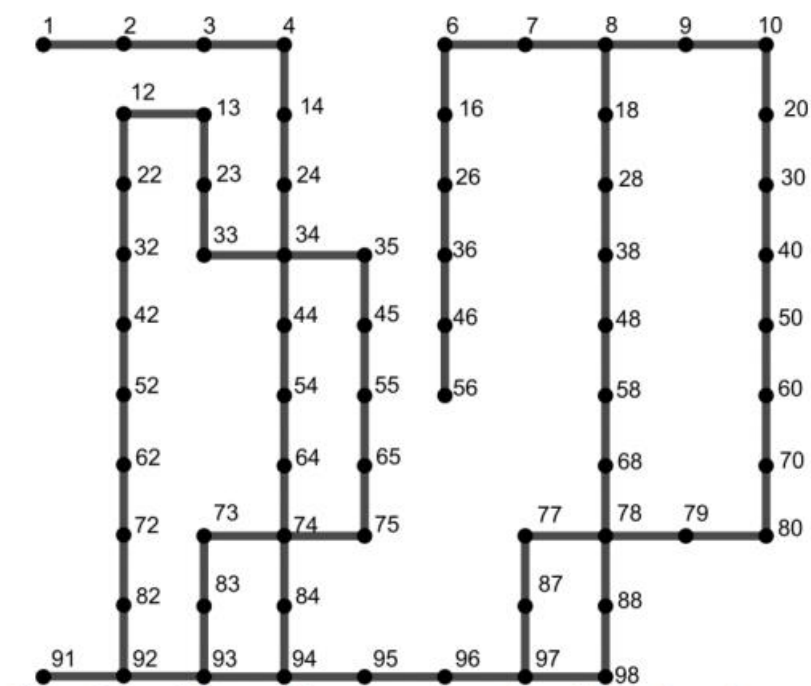
Optimizacijski model primijenjen je na testnoj cestovnoj mreži od  $I = 100$  diskretnih točaka, kao što je prikazano na slici 5.3. Svaka točka cestovne mreže ima oznake od 1 do 100 i predstavlja mjesto kandidata za postavljanje punionice. Pretpostavlja se da je udaljenost između dvije točke 100 km. Na početku svakog rada, pretpostavlja se da je početni  $v$ -ti vozač električnog vozila  $S_{0Cv,0}$  potpuno napunjen i omogućuje vozaču potpuni raspon vožnje ( $R_v$ ) tako da je predstavljeni primjer jasniji i jednostavniji.

U tablici 5.1. navedene su putanje pojedinačnih vozača električnih vozila u  $t$ -tom trenutku. Mora se napomenuti da početna točka pojedinačnog vozača električnog vozila može biti bilo gdje unutar diskretne mreže koja je također prikaz cestovne mreže. Za bilo kojeg drugog vozača električnog vozila koji dolazi izvan modelirane mreže, mora se identificirati ulazna točka  $i$   $v$ -ti  $S_{0Cv}$  (stanje napunjenosti) vozača električnog vozila u toj točki, kako bi se odredile lokacije kandidata koje će biti uključene u optimizaciju. Period optimizacije je  $T = 24$ .

Tablica 5.1. Trajektorije vozača električnih vozila u vremenskim instancama [20]

VOZAČ EV	VREMENSKE INSTANCE	TRAJEKTORIJE
<b>1</b>	$t = 1$	1 2 3 4 14 24 34 44 54 64 74 84 94 95
	$t = 8$	95 96 97 87 77
	$t = 12$	77 78 79 80
	$t = 16$	80 70 60 50 40 30 20 10 9 8 7 6
	$t = 22$	6 16 26 36 46 56
<b>2</b>	$t = 1$	22 32 42 52 62 72 82 92 93 83 73
	$t = 15$	73 74 75 65 55
	$t = 21$	55 45 35 34 33 23 13 12 22
<b>3</b>	$t = 8$	8 18 28 38 48 58 68 78 88 98
	$t = 17$	98 97 96 95 94 93 92 91

Slika 5.3. prikazuje cjelokupni prostorni raspored putanja u cestovnoj mreži. Točke putanje označene su punim crnim crtama. U ovom primjeru, broj tehnologija punjenja je  $K = 2$ . Prvi kandidat za tehnologiju punjenja, to jest  $k = 1$ , je tehnologija sporog punjenja s vremenom punjenja  $CT_1 = 240$  minuta, a druga tehnologija punjenja, odnosno  $k = 2$ , je tehnologija brzog punjenja s vremenom punjenja  $CT_2 = 20$  minuta.



Slika 5.3. Prostorni cjelokupni prikaz putanja [20]

U tablici 5.2. u stupcu 1 prikazane su lokacije  $i$ -tih kandidata brojevima od 1 do 100. Prema izračunima temeljenim na izrazima 5.7 i 5.8, povezane težine lokacija kandidata prikazane su u stupcu 2. Vrijednost težine predstavlja protok prometa, koji je definiran kao broj korisnika električnih vozila koji putuju kroz lokaciju kandidata. Kao što se i očekivalo, težine u ovom primjeru su male, kao posljedica razmatranog rasporeda prostorne putanje i broja vozača električnog vozila koji je jednak 3. Kandidatske lokacije nulte težine nisu dio nijedne putanje vozača električnog vozila, lokacije kandidata s težinom 1 dio su jedne putanje, a kandidatska lokacija s težinom 2 značila bi da dvije različite točke putanje sijeku tu kandidatsku lokaciju. Točke veće težine su interesantne jer imaju veći protok prometa. Troškovi ulaganja za postavljanje kandidata za sporu tehnologiju punjenja i kandidata za brzu tehnologiju punjenja na  $i$ -toj kandidatskoj točki cestovne mreže prikazani su u stupcima 3 i 4. Maksimalni investicijski trošak s obzirom na kandidata za tehnologiju sporog punjenja je na kandidatskim lokacijama 13 i 77 s maksimalnim investicijskim troškovima od 100000 €, a maksimalni investicijski trošak s obzirom na tehnologiju brzog punjenja nalazi se na kandidatskim lokacijama 5 i 9 s investicijskim troškovima 991000 €. Također se može zaključiti i naglasiti da razlika u troškovima ulaganja između kandidata za tehnologiju punjenja sporog i brzog punjenja je faktor 10.

Tablica 5.2. Troškovi investicija po lokacijama i-tih kandidata [20]

Lokacije i-tih kandidata	Protok prometa (težine)	Troškovi investicije	
		Tehnologija sporog punjenja (€)	Tehnologija brzog punjenja (€)
1	1	34000	727000
2	1	38000	625000
3	1	20000	834000
4	1	95000	891000
5	0	68000	991000
6	1	53000	100000
7	1	68000	879000
8	2	59000	651000
9	1	68000	991000
10	1	59000	575000
11	0	75000	532000
12	1	57000	822000
13	1	100000	305000
14	1	29000	548000
15	0	19000	911000
16	1	19000	617000
17	0	15000	861000
18	1	46000	765000
19	0	50000	627000
20	1	43000	322000
21	0	79000	700000
22	2	67,000	175000
23	1	80000	663000
24	1	94000	695000
25	0	98000	757000
26	1	27000	902000
27	0	22000	985000
28	1	73000	792000
29	0	18000	623000
30	1	57000	936000
31	0	58000	622000
32	1	88000	115000
33	1	54000	208000
34	2	45000	877000
35	1	71000	536000
36	1	77000	861000
37	0	57000	288000
38	1	41000	597000
39	0	23000	667000
40	1	63000	128000
41	0	33000	653000
42	1	14000	426000
43	0	78000	144000
44	1	32000	541000
45	1	50000	273000

46	1	72000	210000
47	0	42000	285000
48	1	77000	232000
49	0	45000	270000
50	1	72000	138000
51	0	74000	672000
52	1	50000	353000
53	0	11000	585000
54	1	40000	726000
55	1	48000	549000
56	1	34000	582000
57	0	27000	501000
58	1	84000	211000
59	0	49000	541000
60	1	90000	868000
61	0	45000	887000
62	1	79000	343000
63	0	46000	287000
64	1	83000	609000
65	1	78000	676000
66	0	44000	475000
67	0	29000	285000
68	1	81000	954000
69	0	96000	173000
70	1	39000	195000
71	0	71000	227000
72	1	49000	249000
73	1	85000	659000
74	2	79000	616000
75	1	25000	146000
76	0	88000	939000
77	1	100000	756000
78	2	56000	764000
79	1	90000	157000
80	1	63000	875000
81	0	24000	941000
82	1	28000	986000
83	1	47000	873000
84	1	78000	807000
85	0	85000	562000
86	0	81000	260000
87	1	38000	459000
88	1	58000	220000
89	0	18000	127000
90	0	20000	946000
91	1	22000	371000
92	2	71000	366000
93	2	55000	399000
94	2	27000	520000
95	2	55000	684000

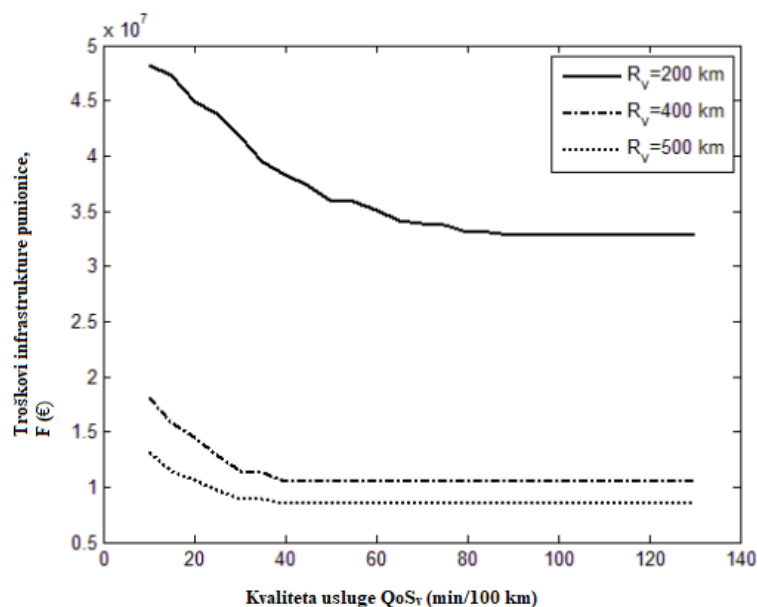
96	2	23000	122000
97	2	15000	858000
98	1	87000	603000
99	0	61000	869000
100	0	94000	413000

U tablici 5.3. prikazana su tri različita slučaja vrijednosti  $QoS_v$  i dometa vožnje električnog vozila. Prvi slučaj smatra da vozač električnog vozila ima malo raspoloživog vremena za punjenje, odnosno nisku vrijednost indeksa. Kratko jednokratno vrijeme punjenja vozača električnog vozila može biti značajan odraz toga da se vozač žuri ili je vremenski ograničen, npr. kasni na posao, sastanak itd. Drugi slučaj razmatra duže raspoloživo vrijeme punjenja, a treći slučaj razmatra slučaj u kojem vozač električnog vozila ima jako dugo vrijeme čekanja na raspolaganju za punjenje. Treći slučaj odražava situaciju bez ograničenja dolaska. Ovo je opušten oblik putovanja, bez pritiska da se stigne točno na vrijeme ili u slučaju kada postoji duga vremenska rezerva za ispunjenje ture. U ovom radu se pretpostavlja da je domet vožnje ( $R_v$ ) svih vozača električnih vozila isti. Promatraju se tri slučaja različitog dometa vožnje od  $R_v = 200, 400$  i  $500$  km, kao što je prikazano u tablici 5.3. Imati jednak domet vožnje podrazumijeva da svi vozači električnih vozila imaju isto električno vozilo. U stvarnosti, postoji niz modela i tipova električnih vozila, koji imaju različit domet vožnje, međutim, za model optimizacije u ovom radu, pretpostavlja se da vozači električnih vozila voze isti model električnih vozila i voze jednak domet vožnje kako bi se izvršila optimizacija jasnije i jednostavnije. Unatoč tome, vozači električnih vozila također mogu imati različit domet vožnje, no mijenjati ovaj ulazni parametar nije problem. Promatrajući stupac I u tablici 5.3, može se zaključiti da što je vrijednost indeksa  $QoS_v$  viša, to je niži trošak postavljanja infrastrukture za punjenje, kao posljedica postavljanja kandidata za tehnologiju punjenja duljeg vremena punjenja i nižih investicijskih troškova na mjestu i-tog kandidata. Ostale vrijednosti prikazane su u stupcima II i III. Što se tiče stupca I, ako se uspoređuju pojedinačni slučajevi, rezultati pokazuju da se ukupni trošak ugradnje, analizirajući slučajeve broj 1 i 2, smanjio za -21,2 %, slučajevi broj 1 i 3 za -32,11 %, a slučajevi broj 2 i 3 za -13,8 %. Za stupac II slučajevi broj 1 i 2 su se smanjili za -37,78 %, slučajevi broj 1 i 3 -42,17 % i slučajevi broj 2 i 3 7,04 %. Stupac III, slučajevi broj 1 i 2 za -29,85 %, slučajevi broj 1 i 3 za -36,43 % i slučajevi broj 2 i 3 za -9,38 %. Pokazalo se da je najveće smanjenje ukupnih troškova postavljanja infrastrukture za punjenje uspoređujući slučajeve broj 1 i 3, kao posljedica veće vrijednosti tražene kvalitete usluge vozača električnih vozila. Kada je vrijednost troškova infrastrukture najveća, optimalni broj punionica je 34, 13 i 11.

Tablica 5.3. Troškovi investicija po lokacijama i-tih kandidata [20]

Case No.	EV driver	I			II			III		
		QoS <sub>v</sub> min/100km	R <sub>v</sub> km	F €	QoS <sub>v</sub> min/100km	R <sub>v</sub> km	F €	QoS <sub>v</sub> min/100km	R <sub>v</sub> km	F €
1	1	10	200	48,403,000.00	9	400	18,157,000.00	6	500	13,328,000.00
	2	11			5			4		
	3	12			4			5		
2	1	42		38,140,500.00	35		11,295,500.00	25		9,349,500.00
	2	45			38			33		
	3	34			26			24		
3	1	130	32,856,000.00	70	10,500,000.00	51	8,472,000.00			
	2	121		60		83				
	3	117		50		65				

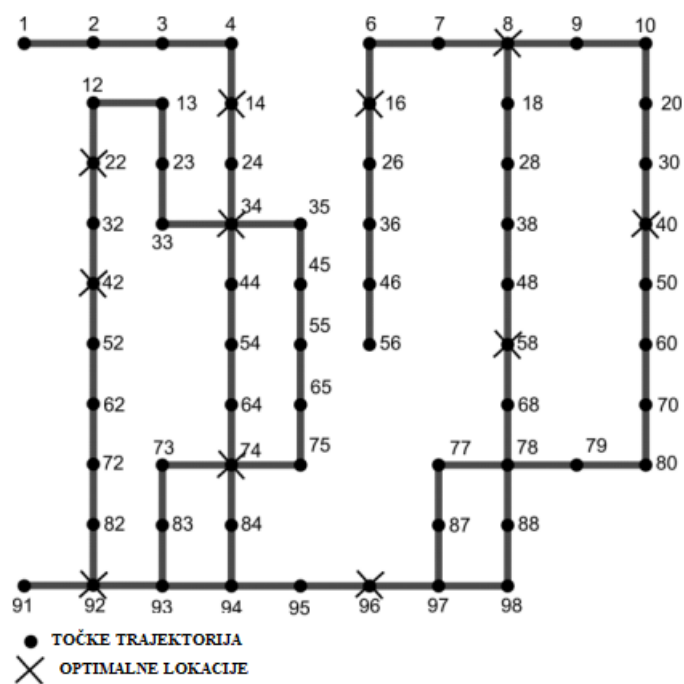
Vrijednost QoS<sub>v</sub> počinje od 10 min/100 km i raste s konstantnim korakom kao što je vidljivo na slici 5.4. Prikazano je, da što je veća vrijednost kvalitete usluge, niži su ukupni investicijski troškovi plasmana. Konstantni dio krivulje troškova infrastrukture punionice F, javlja se kao posljedica uključenog kriterija osiguranja pouzdanosti punjenja infrastrukture. Prikazana konstantnost F znači da, iako tražena kvaliteta usluge punjenja od strane vozača električnih vozila podrazumijeva smanjenje ukupnih troškova postavljanjem stanica za punjenje s nižim troškovima ulaganja, ograničenje u modelu optimizacije uočava kriterij održavanja pouzdanosti punjenja infrastrukture.



Slika 5.4. Prikaz ovisnosti troškova infrastrukture punionice i kvalitete usluge [20]



Na slici 5.5. prikazan je primjer odabira optimalnih lokacija za slučaj 1.III. Broj odabranih lokacija iznosi 11, a ukupni trošak postavljanja infrastrukture za punjenje je 8472000 €.



Slika 5.5. Optimalni izbor lokacija za slučaj 1.III. [20]

## **6. PREGLED TEHNIKA ZA OPTIMALNI ODABIR LOKACIJA PUNIONICA ELEKTRIČNIH VOZILA NA PRIMJERU IRSKE**

Broj i raspored punionica važan je čimbenik koji utječe na razvoj industrije električnih vozila, a koji je povezan s različitim gospodarskim i društvenim čimbenicima. To također utječe na rad samog poslovanja električnih automobila. Analiza i studija maksimalne racionalizacije broja i lokacijskog rasporeda punionica od velikog je usmjeravajućeg značaja za popularizaciju električnih vozila. U ovom dijelu rada opisana problematika se uzima na primjeru Irske. Za istraživanje i prikupljanje podataka uzima se pet velikih gradova u Irskoj kako bi se uspostavio model smještaja i model distribucijske optimizacije stanica za punjenje električnih vozila na temelju stvarnih i simuliranih rezultata te na taj način sprovesti zaključke. Iz perspektive ukupnog društvenog troška, model optimalne distribucije punionice temeljen na ukupnom društvenom trošku konstruiran je kako bi pružio teoretsku osnovu za simulaciju optimalne distribucije punionice. Uvodi se koeficijent savijanja ceste za izračunavanje udaljenosti između električnog vozila i stanice za punjenje kako bi rezultati modela bili u skladu sa stvarnom potražnjom. Uvođenjem koeficijenta potražnje za stanice smatra se da bolje simulira stvarnu distribuciju potražnje za punjenjem električnih vozila u svakom gradu.

Geografski informacijski podaci Irske korišteni u ovom primjeru potječu iz Instituta za istraživanje sustava okoliša. Nakon što su podaci snimljeni, obrađuju se na sljedeći način: uklanjaju se podaci s previše nedostajućih vrijednosti. Za podatke s pojedinačnim nedostajućim vrijednostima koristi se Lagrangeova interpolacija za uklanjanje nedostajućih vrijednosti.

Standardiziraju se jedinice i formati raznih vrsta podataka. U isto vrijeme, kako bi se osiguralo standardizirano istraživanje donose se sljedeće pretpostavke kako bi se isključilo uplitanje drugih čimbenika u istraživanje kretanja svakog električnog vozila pojedinačno. Korisnici električnih automobila optimizirat će svoju potrošnju energije tako što će nakon što se baterija isprazni istu napuniti. Kao što je u prethodnom poglavlju pojašnjeno korisnici će odabrati najbolje mjesto za punjenje. Odnosno, korisnici preferiraju lokaciju bez vremena čekanja. Punionice su optimalno raspoređene, što znači da lokacije punionica uvijek mogu pružiti najbolji kapacitet usluge. Potreba za punjenjem proporcionalna je udaljenosti vožnje. Potražnju za punjenjem u gradu zadovoljavaju odredišne punionice, a potražnju za punjenjem na cestama zadovoljavaju superpunjači. Punionica nije hijerarhijska, što znači da je broj punionica na svim punionicama jednak prosjeku od 6,4.

## 6.1. Primjer simulacije

Prvo, pojednostavi se kopneno područje Irske u pravokutnik duljine 350 km i širine 200 km. Zatim ga se fragmentira u male kvadrate, a na svakoj točki raskrižja postoje potrebe za punjenjem. Uspostavlja se koordinatni sustav s donjim lijevim kutom pravokutnika kao ishodištem. Međutim, nije svaka točka jednaka, s obzirom na to da Irska ima pet glavnih gradova kao prometnih čvorišta. Ako se napravi pet kružnica radiusa od 20 kilometara s ovih pet gradova kao središtem, tada bi te točke koje pokriva područje trebale postaviti više stanica za punjenje kao odgovor na više zahtjeva. Stoga  $r$  definiramo kao koeficijent potražnje. Može se izraziti na sljedeći način:

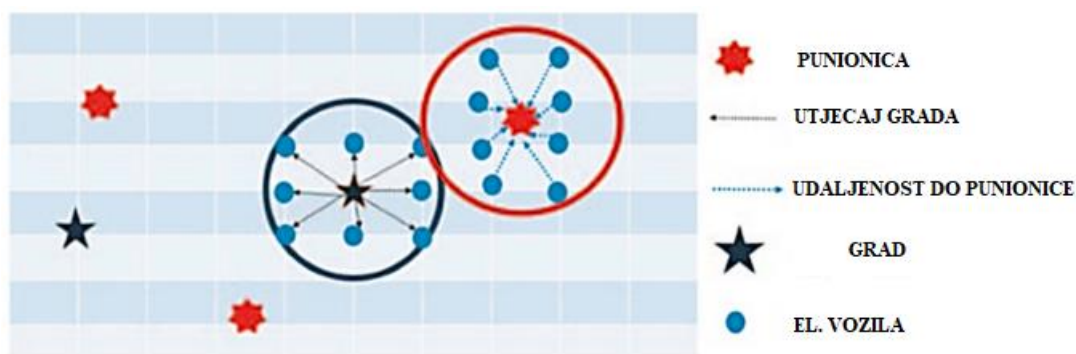
$$r = \begin{cases} \frac{1}{d_0 - d_i} & d_i \leq 20 \\ 1 & d_i \geq 20 \end{cases} \quad (6.1)$$

gdje je:

- $r$  koeficijent potražnje
- $d_0$  prag
- $d_i$  udaljenost između točke i pripadajućeg grada

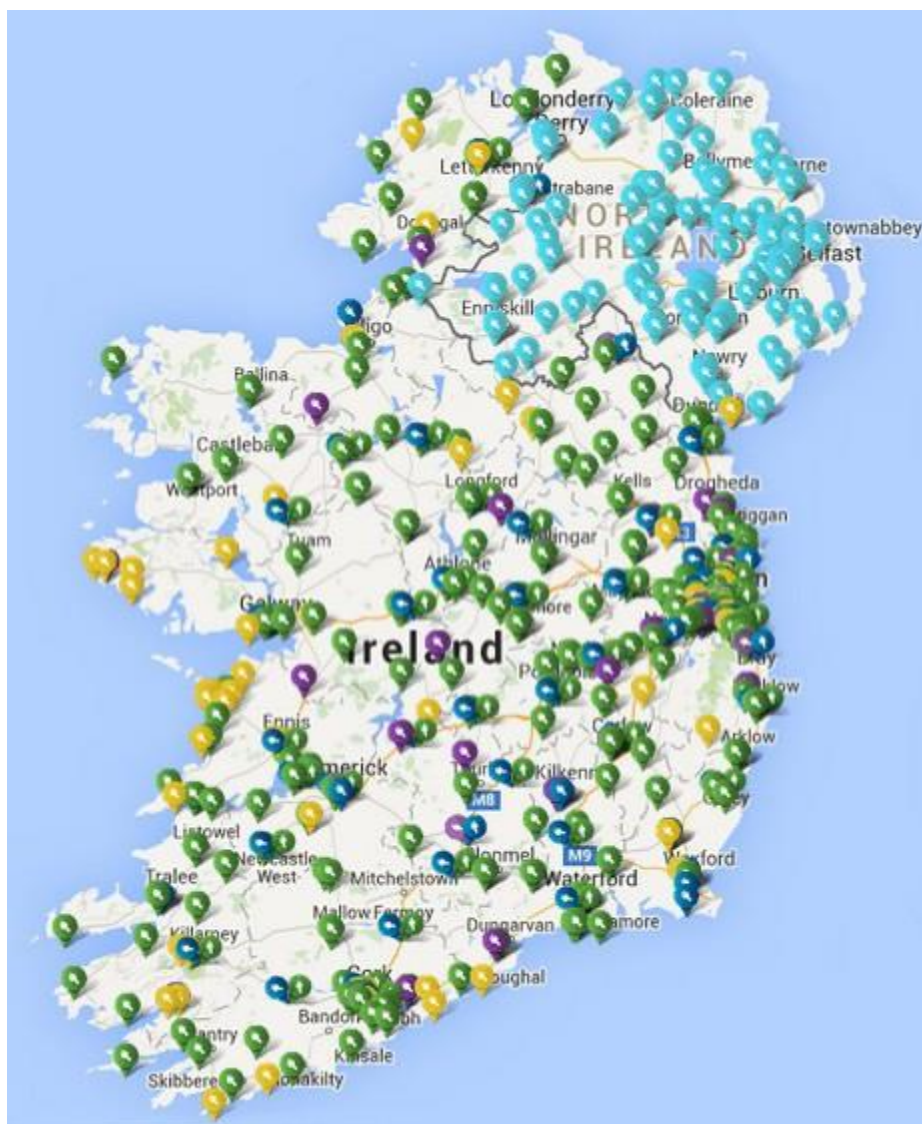
Generiramo 670 točaka nasumično u području pravokutnika ( $0 \leq Y \leq 350$ ,  $0 \leq X \leq 200$ ) i zatim zamijenimo  $X_{ij}$  u jednadžbi (x) njihovim koordinatama. Nakon toga, pomnožimo trošak s koeficijentom potražnje koji smo prethodno definirali i dobijemo prilagođeni trošak putovanja od točke A do punionice B. Ukupni trošak u prvom krugu može se izraziti na taj način. Imajući na umu da je svrha smanjiti ukupnu cijenu u nekoliko krugova, koristi se genetski algoritam za optimizaciju. Kada se algoritam prekine, dobiju se koordinate od 670 točaka. Distribucija ovih točaka je upravo optimalan ishod. Nakon toga projiciraju se tih 670 točaka na kartu Irske tako što vodoravne i okomite koordinate odgovaraju zemljopisnoj širini i dužini. Zemljopisna distribucija stanica za punjenje u Irskoj je po cijeloj zemlji, ali je stupanj koncentracije različit, uglavnom koncentriran u Dublinu, Athenryju, Thuriesu, New Rossu, Corku i ostalih pet najvećih gradova. To pokazuje da ključni gradovi s velikim urbanim razmjerom, velikom populacijom, praktičnim prijevozom i razvijenim gospodarstvom imaju veliku potražnju za stanicama za punjenje. Ovo je u osnovi u skladu s karakteristikama izgleda stanice za punjenje. Stoga su rezultati irske simulacije u velikoj mjeri primjenjivi na gospodarski razvijene lučke gradove svake zemlje. Iz perspektive reljefa, Irski otok je dug 475 km od sjevera prema jugu i

275 km širok od istoka prema zapadu. Cijeli otok zauzima površinu od 84000 četvornih kilometara. Središnji dio Irske je ravnica s mnogo jezera i močvara, s prosječnom nadmorskom visinom od oko 100 m. Sjever, sjeverozapad i jug su visoravni i planine. U sredini su brda i ravnice, a većina obalnih područja su gorja. Stoga se rezultati simulacije Irske mogu primijeniti na otoke s malim površinama i složenim terenom, kao što su Šri Lanka, Madagaskar, Malezija, Indonezija, Filipini, Novi Zeland, Japan, Južna Koreja, Kuba, Florida u SAD-u.



*Slika 6.1. Shematski prikaz sustava gradova, punionica i električnih vozila [19]*

U prometnom smislu, uz razvijen morski i zračni prijevoz, unutarnji prijevoz u Irskoj odvija se uglavnom cestom i željeznicom. Ukupna duljina autoceste je 96000 km. Velika većina međunarodne trgovine robom odvija se morem. Dublin, Shannon i Cork imaju velike luke i međunarodne zračne luke. Irska ima vrlo razvijenu cestovnu mrežu, ispresijecanu cestama. To olakšava masovnu upotrebu električnih vozila kao prijevoznog sredstva, ali postavlja i veće zahtjeve za raspored punionica. Irska je razvijena zemlja s visokim BDP-om po glavi stanovnika i velikom potrošnjom električne energije. Stoga, rezultati simulacije optimalnog rasporeda punionica u Irskoj imaju veliku referentnu vrijednost za izgradnju punionica u zemljama s razvijenim gospodarstvom, visokim dohotkom po glavi stanovnika i velikim brojem posjedovanja električnih vozila.



*Slika 6.2. Prikaz rasprostranjenosti punionica u Irskoj [18]*

Kako bi se otkrili ključni čimbenici koji oblikuju model, napraviti će se test osjetljivosti. Izdvajaju se tri važna parametra, a to su: broj stanica za punjenje, potražnja za punjenjem na svakoj točki raskrižja i vjerojatnost punjenja svaki dan. Radi se analiza osjetljivosti na protok vozila za punjenje. Kada se protok vozila za punjenje poveća za 5 %, ukupni trošak izgradnje punionice povećat će se za 8 %. Kada se protok vozila za punjenje smanji za 5 %, ukupni trošak izgradnje punionice smanjit će se za 4 %. Stoga protok vozila za punjenje nije osjetljiv faktor na trošak. Također radi se analiza osjetljivosti na vjerojatnost punjenja. Kada se vjerojatnost punjenja promijeni za 5 %, ukupni trošak izgradnje punionice promijenit će se za 11 %. Može se zaključiti da je vjerovatnost punjenja bitan faktor ukupnog troška punionice. Rezultati su prikazani u tablicama 6.1. i 6.2..

*Tablica 6.1. Prikaz rezultata simulacije analize osjetljivosti el. vozila [19]*

El. vozila	Promjena vrijednosti	Ukupan društveni trošak	Promjena troška
67	5 %	1967216017	8 %
60	0 %	1852037265	0 %
57	-5 %	1773852596	4 %

*Tablica 6.2. Prikaz rezultata simulacije vjerovatnosti punjenja [19]*

Vjerovatnost punjenja	Promjena vrijednosti	Ukupan društveni trošak	Promjena troška
0.105	5 %	2091100356	11 %
0.1	0 %	1852037265	0 %
0.095	-5 %	1629792793	12 %

Dakle, postotak promjene ukupnog društvenog troška je veći od postotka promjene tri faktora. Stoga se zaključuje da je ukupni društveni trošak punionice osjetljiv na broj stanica za punjenje, potražnju za punjenjem na točkama raskrižja i vjerojatnost punjenja svaki dan, što implicira da su tri čimbenika upravo ključni čimbenici za oblikovanje ovog modela. Ukupni društveni trošak u pozitivnoj je korelaciji s brojem punionica i vjerojatnošću punjenja. Međutim, nije toliko osjetljiv na zahtjev za naplatu na točkama raskrižja.

Ograničenja modela su maksimalna količina punjenja koju može osigurati svaka stanica za punjenje, mogućnost punjenja za svako vozilo te udaljenost punjenja. Rezultati imaju važne implikacije za kreatore politike u Irskoj i drugim zemljama u smislu razumijevanja ponašanja potencijalnih korisnika električnih vozila prilikom punjenja. Takve informacije mogu pomoći u usmjeravanju donošenja odluka što se tiče pametnog punjenja te također pomoći u pružanju novčanih ili drugih poticaja koji bi mogli biti korisni za upravljanje opterećenjem mreže. Rezultati također pomažu u pružanju informacija o mogućem potencijalu obnovljivih izvora energije da zadovolje potražnju za električnim vozilima, na temelju predviđenih budućih scenarija rasta. Jedno ograničenje ovog rada je opseg probe, što je skupa značajka praćenja koja zahtjeva mnogo resursa i potrebna je za bilježenje ponašanja korisnika u stvarnom okruženju. Iako je zaključak primjera Irske u velikoj mjeri od univerzalnog značaja, postoje značajne razlike u umjerenom gospodarskom razvoju, veličini stanovništva i političkoj stabilnosti svake zemlje, a ti su čimbenici glavni čimbenici koji određuju opseg i raspored naplate stanice.

## 7. ZAKLJUČAK

Određivanje optimalnog izbora lokacija za stanice za punjenje električnih vozila ključni je aspekt poticanja širokog usvajanja električne mobilnosti. Ovaj proces uključuje višestruku analizu, uzimajući u obzir različite čimbenike za stvaranje dobro uravnotežene i učinkovite mreže infrastrukture za punjenje. Optimalan izbor lokacija za punionice električnih vozila uključuje uravnotežen pristup koji uzima u obzir dostupnost, održivost, skalabilnost i suradnju. Strateškim postavljanjem stanica za punjenje na prikladnim područjima, integracijom s obnovljivim izvorima energije i planiranjem budućeg rasta, možemo utrti put čišćoj, zelenijoj i održivijoj budućnosti prijevoza. Uz dobro osmišljenu infrastrukturu za punjenje, može se ubrzati usvajanje električnih vozila i pridonijeti ublažavanju klimatskih promjena, istovremeno pružajući besprijekorno i ugodno iskustvo vlasnicima električnih vozila.

Prvotno razmatranje je pristupačnost i praktičnost stanica za punjenje. Strateško postavljanje stanica za punjenje u gusto naseljenim urbanim područjima, trgovačkim centrima, stambenim kompleksima i duž glavnih autocesta može osigurati da vlasnici električnih vozila imaju lak pristup objektima za punjenje. Dodatno, integracija punjenja električnih vozila s postojećom infrastrukturom kao što su parkirališta, trgovački centri i čvorišta javnog prijevoza može dodatno poboljšati praktičnost i potaknuti usvajanje električnih vozila. Navedena problematika je pobliže prikazana na primjeru Republike Irske.

Naravno, integracija obnovljivih izvora energije igra ključnu ulogu u osiguravanju održivosti i ekoloških prednosti punjenja električnih vozila. Postavljanje stanica za punjenje u blizini mjesta za proizvodnju obnovljive energije, kao što su solarne ili vjetroelektrane, može smanjiti ugljični otisak povezan s punjenjem električnih vozila. Ovaj pristup usklađen je sa širim ciljem prelaska na transportni ekosustav s niskim udjelom ugljika. Razmatranje skalabilnosti infrastrukture za punjenje ključno je za prilagođavanje sve većoj potražnji za električnim vozilima. Predviđanjem budućeg rasta i tehnološkog napretka, planiranjem se mogu razviti mreže za punjenje koje su prilagodljive i fleksibilne, udovoljavajući rastućim potrebama korisnika električnih vozila. Učinkovit i jednostavan sustav plaćanja i naplate također bi trebao biti dio jednadžbe. Standardizirana platforma za plaćanje može pojednostaviti postupak punjenja za vlasnike električnih vozila, ulijevajući povjerenje u tržište električnih vozila i potičući više ljudi da prijeđu na električna vozila. Javno-privatna partnerstva i suradnja između vlada, komunalnih poduzeća i privatnih poduzeća ključni su za uspješnu implementaciju optimalne mreže punionica.

## LITERATURA

[1] Specifikacije vozila Nissan Leaf

[https://www.nissan.hr/vozila/nova-vozila/leaf.html#C402\\_cmp\\_feature\\_7303-modal](https://www.nissan.hr/vozila/nova-vozila/leaf.html#C402_cmp_feature_7303-modal)

[2] Specifikacije vozila Mitshubishi Outlander

<https://mitsubishi-motors.co.uk/>

[3] Specifikacije vozila Toyota Prius

<https://www.toyota.com/prius/>

[4] Specifikacije vozila Hyundai Nexa

<https://www.hyundaiusa.com/>

[5] Specifikacije vozila BMW i3

<https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0284828EN/415571>

[6] Electric cars: technical characteristics and environmental impacts; Eckard Helmers, Patrick Marx

[7] A review on electric vehicles: Technologies and Challenges; Julio A. Sanguesa, Vicente Torres-Sanz, Piedad Garrido, Francisco J. Martinez, Johann M. Marquez-Barja

[8] S interneta: <https://spectrum.ieee.org/the-ev-transition-explained-2658463735>

[9] S interneta : <https://www.enelxway.com/us/en/resources/blog/ev-charging-connector-types>

[10] S interneta: <https://blog.evbox.com/charging-cables-and-plugs>

[11] Electric cars as the cars of the future; F. A. Omonov, O. U. Sotvoldiyev, Q. M. Dehqonov

[12] S interneta: <https://epunjaci.hr/2021/10/14/kako-sigurno-napuniti-elektricni-automobil-kod-kuce/>

[13] S interneta:

[http://ekospark.com/info/02\\_tehnologija/01\\_automobili/vesti/bezicno\\_punjenje/bezicno\\_punjenje.html](http://ekospark.com/info/02_tehnologija/01_automobili/vesti/bezicno_punjenje/bezicno_punjenje.html)

[14] – Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network, Fareed Ahmad, Atif Iqbal, Imtiaz Ashraf, Mousa Marzband, Irfan Khan;

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722001809/pdf?md5=8b294b939be84d56d251f04ef388ef19&pid=1-s2.0-S2352484722001809-main.pdf>

[15] Impact of electric vehicles on power distribution networks; G. A. Putrus, P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E. C. Bentley, M. Narayana

[16] Charging electric vehicles on long trips and the willingness to pay to reduce waiting for charging. Stated preference survey in Norway; Fredrik Solvi Hoen, Maria Diez- Gutierrez, Sahar Babri, Stephane Hess, Trude Torset



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856423001945>

[17] Impact of electric vehicles on power distribution networks, IEEE

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5289760/figures#figures>

[18] S interneta: <https://www.burren.ie/getting-here/travel-around-the-burren/esb-e-car-charging/>

[19] Location optimization of electric vehicle charging stations: Based on cost model and genetic algorithm; Guangyou Zhou, Zhiwei Zhu, Sumei Luo

[20] – Optimal location selection for charging electric vehicles with power system reliability consideration, dr. Sreten Davidov, prof. dr. Miloš Pantoš

[\(R\) OPTIMALNA IZBIRA LOKACIJ ZA POLNJENJE ELEKTRIČNIH VOZIL OB UPOŠTEVANJU ZANESLJIVOSTI OMREŽJA - Slovensko združenje elektroenergetikov \(cigre-cired.si\)](#)

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Primjer baterijskog električnog vozila marke Nissan Leaf [1] .....	4
Slika 2.2. Primjer plug-in hibridnog vozila marke Mitsubishi Outlander [2] .....	5
Slika 2.3. Primjer hibridnog električnog vozila marke Toyota Prius [3].....	6
Slika 2.4. Primjer električnog vozila s gorivim ćelijama marke Hyundai Nexo [4].....	7
Slika 2.5. Primjer električnog vozila s produženim dometom marke BMW i3 [5] .....	8
Slika 2.6. Punionica za električna vozila [7] .....	13
Slika 2.7. Prikaz priključaka s obzirom na regiju i vrstu podržane struje [8] .....	14
Slika 2.8. Prikaz punjenja u različitim tipovima [10].....	20
Slika 3.1. Punjenje električnog vozila putem kućne utičnice električnog vozila [12] .....	23
Slika 3.2. Induktivno punjenje električnog vozila [13].....	27
Slika 4.1. Razrada različitih pristupa postavljanju punionica za električna vozila [14].....	28
Slika 4.2. Shema tipične distribucijske mreže[15] .....	30
Slika 4.4. Graf prikazuje zimsko dnevno opterećenje (vremenski zakazano kućno punjenje) [15] .....	32
Slika 4.5. Graf prikazuje zimsko dnevno opterećenje u fazama (ponovno zakazano kućno punjenje) [15] .....	33
Slika 4.6. Graf prikazuje ljetno opterećenje u fazama (kućno punjenje) [15] .....	34
Slika 4.7. Graf prikazuje punjenje pri maksimalnom opterećenju [15] .....	35
Slika 4.8. Graf prikazuje punjenje pri minimalnom opterećenju [15] .....	36
Slika 4.9. Prikaz mrežne struje i napona el. vozila za stanje kvara unutar pretvarača [15] .....	37
Slika 4.10. Prikaz pada vjerovatnosti punjenja s porastom cijene [17] .....	42
Slika 5.1. Diskretni prikaz cestovne mreže [20].....	44
Slika 5.2. Opća shema za formiranje skupova Ov,j,t [20].....	46
Slika 5.3. Prostorni cjelokupni prikaz putanja [20].....	53
Slika 5.4. Prikaz ovisnosti troškova infrastrukture punionice i kvalitete usluge [20] .....	57
Slika 5.5. Optimalni izbor lokacija za slučaj 1.III. [20].....	58
Slika 6.1. Shematski prikaz sustava gradova, punionica i električnih vozila [19] .....	61
Slika 6.2. Prikaz rasprostranjenosti punionica u Irskoj [18] .....	62

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Kapaciteti baterija električnih vozila kroz zadnjih 40 godina [6] .....	11
Tablica 4.1. Cijene punioinica s obzirom na tip punjenja [16] .....	38
Tablica 5.1. Trajektorije vozača električnih vozila u vremenskim instancama [20] .....	52
Tablica 5.2. Troškovi investicija po lokacijama i-tih kandidata [20] .....	54
Tablica 5.3. Troškovi investicija po lokacijama i-tih kandidata [20] .....	57
Tablica 6.1. Prikaz rezultata simulacije analize osjetljivosti el. vozila [19] .....	63
Tablica 6.2. Prikaz rezultata simulacije vjerovatnosti punjenja [19] .....	63

## SAŽETAK

Za optimalan izbor lokacija punionica električnih vozila važno je imati temeljno znanje sa samom konstrukcijom svakog segmenta funkcioniranja električnog vozila vezanog za punjenje električnom energijom kao što je tip baterije vozila, tip priključka punjača, način punjenja, snaga punjenja i sigurnost. Razrađen je aspekt pristupa sa strane operatera distribucijske mreže, vlasnika punionica i korisnika punionica te se na taj način uviđa kompleksnost adekvatnog rješenja za gradnju infrastrukture punjenja. Nakon toga razrađuje se pregled tehnika za optimalni odabir lokacija punionica električnih vozila na primjeru 5 najvećih gradova republike Irske. Primjenom diskretnog optimizacijskog modela na testnoj cesti od 100 točaka dolazi se do zaključka, na temelju numeričkih rezultata modela, da što je veća vrijednost kvalitete usluge, niži su ukupni investicijski troškovi ugradnje punionica.

*Ključne riječi: Optimalan izbor lokacija punionica, električno vozilo, baterija, operater distribucijske mreže, kvaliteta usluge, optimizacijski model*

## SUMMARY

For the optimal choice of the location of electric vehicle charging stations, it is important to have basic knowledge with the very construction of each segment of the operation of an electric vehicle related to electric charging, such as the type of vehicle battery, type of charger connection, charging method, charging power and safety. The aspect of access from the side of the distribution network operator, the owner of the charging station and the user of the charging station has been elaborated, and in this way the complexity of an adequate solution for the construction of the charging infrastructure can be seen. After that, an overview of the technique for the optimal selection of the location of electric vehicle charging stations is elaborated on the example of the 5 largest cities of the Republic of Ireland. Applying a discrete optimization model on a 100-point test road leads to the conclusion, based on the numerical results of the model, that the higher the value of service quality, the lower the total investment costs of installing filling stations.

*Keywords: Optimum choice of charging station locations, electric vehicle, battery, distribution network operator, service quality, optimization model*