

Optimizacija investicije i pogona hibridne punionice za baterijska i vodikova vozila

Viduka, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:264866>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 124

**OPTIMIZACIJA INVESTICIJE I POGONA HIBRIDNE
PUNIONICE ZA BATERIJSKA I VODIKOVA VOZILA**

Marko Viduka

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 124

**OPTIMIZACIJA INVESTICIJE I POGONA HIBRIDNE
PUNIONICE ZA BATERIJSKA I VODIKOVA VOZILA**

Marko Viduka

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 124

Pristupnik: **Marko Viduka (0036521678)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder

Zadatak: **Optimizacija investicije i pogona hibridne punionice za baterijska i vodikova vozila**

Opis zadatka:

Deakarbonizacija transporta trenutno je jedna od najslabijih karika energetske tranzicije. Ostvarivanje očekivanih ciljeva pokazuje prespor napredak, većinom zbog nedostatne i neprimjerene infrastrukture te visokog investicijskog troška što u infrastrukturu za punjenje, ali i u sama vozila. Pasivno punjenje vozila, nedovoljno točna predviđanja i loša interakcija s potrebama samog elektroenergetskog sustava impliciraju visoki trošak punjenja koji je nužan kako bi se opravdala investicija u infrastrukturu za punjenje niskougličnog prometa. U diplomskom radu će se definirati koncept hibridne punionice koja se sastoji od sustava za punjenje vodikovih vozila i sustava za punjenje baterijskih električnih vozila te povezne infrastrukture između dva sustava. Biti će razvijen matematički i optimizacijski model koji opisuje navedenu punionicu, temeljen na cjelobrojnom mješovitom matematičkom programiranju. Kroz analizu sudjelovanja na različitim tržištima, ali i analizu interakcije s mrežom u smislu ovisnosti o priključku, definirati će se ekonomski pokazatelji koji ubrzavaju povrat investicije u navedenu punionicu i opravdavaju investiciju.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 124

**OPTIMIZACIJA INVESTICIJE I POGONA
HIBRIDNE PUNIONICE ZA BATERIJSKA I
VODIKOVA VOZILA**

**Optimization of investment and operation of hybrid charging
stations for battery and hydrogen vehicles**

Marko Viduka

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 124

**OPTIMIZACIJA INVESTICIJE I POGONA
HIBRIDNE PUNIONICE ZA BATERIJSKA I
VODIKOVA VOZILA**

**Optimization of investment and operation of hybrid charging
stations for battery and hydrogen vehicles**

Marko Viduka

Zagreb, rujan 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 124

Pristupnik: **Marko Viduka (0036521678)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder

Zadatak: **Optimizacija investicije i pogona hibridne punionice za baterijska i vodikova vozila**

Opis zadatka:

Deakarbonizacija transporta trenutno je jedna od najslabijih karika energetske tranzicije. Ostvarivanje očekivanih ciljeva pokazuje prespor napredak, većinom zbog nedostatne i neprimjerene infrastrukture te visokog investicijskog troška što u infrastrukturu za punjenje, ali i u sama vozila. Pasivno punjenje vozila, nedovoljno točna predviđanja i loša interakcija s potrebama samog elektroenergetskog sustava impliciraju visoki trošak punjenja koji je nužan kako bi se opravdala investicija u infrastrukturu za punjenje niskouglijčnog prometa. U diplomskom radu će se definirati koncept hibridne punionice koja se sastoji od sustava za punjenje vodikovih vozila i sustava za punjenje baterijskih električnih vozila te povezne infrastrukture između dva sustava. Biti će razvijen matematički i optimizacijski model koji opisuje navedenu punionicu, temeljen na cjelobrojnom mješovitom matematičkom programiranju. Kroz analizu sudjelovanja na različitim tržištima, ali i analizu interakcije s mrežom u smislu ovisnosti o priključku, definirati će se ekonomski pokazatelji koji ubrzavaju povrat investicije u navedenu punionicu i opravdavaju investiciju.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Sadržaj

Uvod	7
1. Općenito o električnim vozilima	8
1.1. Podjela električnih vozila	9
1.1.1. Električna vozila na baterije	11
1.1.2. Električna vozila s gorivnim ćelijama.....	13
1.2. Konektor za punjenje električnih vozila.....	15
1.3. Punionice za električna vozila	16
1.3.1. Punjenje na kućnoj punionici.....	17
1.3.2. Brze punionice.....	18
1.3.3. Punionice s baterijskim spremnicima	19
1.3.4. Punjenje vozila s gorivnim ćelijama	20
1.4. Lokacija punionica.....	21
2. Model optimizacije investicije i pogona	22
2.1. Troškovi izgradnje	23
2.2. Raspored dolaska vozila.....	24
2.3. Vrste vozila koja dolaze.....	29
2.4. Uređaji koji povezuju električnu energiju i vodik.....	30
2.4.1. Elektrolizator.....	30
2.4.2. Gorivni članak.....	32
2.5. Integracija obnovljivih izvora energije	33
2.6. Spremnici energije	34
2.6.1. Baterija.....	34
2.6.2. Spremnik vodika	35
2.7. Vršna snaga	36
2.8. Različiti modeli naplate	37
2.9. Jednadžbe koje opisuju model.....	38
2.9.1. Jednadžbe elektrolizatora i gorivne ćelije.....	38

2.9.2.	Jednadžbe spremnika energije.....	39
2.9.3.	Jednadžba jednakosti energije	40
2.9.4.	Funkcija cilja.....	41
3.	Rezultati za različite scenarije	42
3.1.	Rezultati baznog modela.....	42
3.2.	Rezultati različitih slučajeva.....	46
3.2.1.	Usporedba različitog kapaciteta baterije.....	46
3.2.2.	Usporedba različite snage solarnih panela	47
3.2.3.	Usporedba različitih snaga elektrolizatora	48
3.2.4.	Usporedba različitih snaga gorivne ćelije	48
3.2.5.	Usporedba različitih modela naplate.....	49
4.	Dimenzioniranje komponenti.....	52
5.	Zaključak.....	56
	Literatura	57
	Sažetak.....	60
	Summary	61

Uvod

Porast broja električnih vozila na cestama, uz zakonske inicijative koje podržavaju električna vozila i niskougljične izvore energije, ubrzava energetske tranziciju. No, izgradnja infrastrukture za takvu tranziciju je tek u počecima. Većina punionica je izgrađena na mjestima gdje je postojeća punionica za goriva za motore s unutarnjim izgaranjem. Stoga se pruža prilika za izgradnju električne punionice koja bi pružala punjenje samo za električna vozila i vozila s gorivnim člankom na vodik bez tradicionalnih goriva. Takva punionica mora zadovoljiti niz tehničkih zahtjeva korisnika, uključujući brzo punjenje, sigurno dugotrajno punjenje i dostupnost punjenja u bilo koje doba dana. Izgradnja ovakvog sustava zahtijeva napredne predikcije vezane uz rast broja električnih vozila na cestama, kao i prognoze budućih cijena električne energije. Ključno je uključiti razne tehnologije koje optimiziraju rad sustava, smanjuju operativne troškove i povećavaju fleksibilnost punionice. Primjer takvih tehnologija su uređaji za pretvorbu električne energije u vodik i obrnuto, poput elektrolizatora i gorivnih ćelija. To su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u vodik i obrnuto kao što su elektrolizator i gorivna ćelija. Također je korisno imati baterijski spremnik kako bi isporuka električne energije bila sigurnija te jeftinija jer je sa spremnikom moguće energiju uzimati iz mreže u jeftinijim satima. Dakle, potrebno je uključiti sve komponente u model te ih optimalno dimenzionirati kako bi električna punionica imala što niže troškove. Ovakva punionica bi bila korisna ne samo za vlasnika nego i za čitavu regiju jer bi učinila prelazak na niskougljične oblike energije lakšim te tako omogućila energetske tranziciju.

1. Općenito o električnim vozilima

Električna vozila (EV) su inovativna tehnologija koja transformira automobilsku industriju i način na koji se vozimo. Za razliku od tradicionalnih motora s unutarnjim izgaranjem, električna vozila koriste elektromotore koji su pokretani električnom energijom. Prednosti električnih vozila uključuju smanjene emisije i manju ekološku štetu, što je ključno za smanjenje onečišćenja zraka i za borbu protiv klimatskih promjena. Ovaj pomak potiču brojni regulatorni okviri i politike koje podržavaju razvoj infrastrukture, financijske poticaje za potrošače te restrikcije za vozila s unutarnjim izgaranjem. U Europskoj uniji, Europski zeleni plan (European Green Deal) te propisi kao što su Uredba (EU) 2019/631 [1] i Uredba (EU) 2021/1119 [2], postavljaju stroge ciljeve za smanjenje emisija ugljikovog dioksida za vozila, potičući proizvodnju i usvajanje EV-ova.

Glavni tehnički elementi električnog vozila uključuju baterijski sustav, elektromotor, sustav za upravljanje energijom (BMS - Battery Management System), pretvarače snage te sustave za regenerativno kočenje. Baterijski sustav sastoji se od stotina ili tisuća pojedinačnih ćelija koje su povezane u module i složene u baterijski paket. Elektromotor pretvara električnu energiju iz baterije u mehaničku energiju potrebnu za pokretanje vozila. Pretvarač snage pretvara DC energiju u AC energiju potrebnu za pokretanje motora. Sustav za upravljanje baterijom (BMS) ključan je za nadzor stanja baterije, uključujući razinu napunjenosti, temperaturu, napone pojedinačnih ćelija. Kod kočenja elektromotor djeluje kao generator i pretvara kinetičku energiju vozila natrag u električnu energiju, koja se potom pohranjuje u bateriju. Ovaj proces povećava energetske učinkovitost vozila i produljuje domet.

Električna vozila mogu pridonijeti smanjenju buke u urbanim područjima zbog tišeg rada elektromotora u usporedbi s tradicionalnim motorima s unutarnjim izgaranjem. No, postoje mnogi izazovi koje je nužno prijeći kako bi električna vozila bila češća na cestama. Jedan problem je domet koji je znatno manji nego na vozilima na fosilna goriva što znači da ih je potrebno češće puniti. Tako se javlja još jedan nedostatak, a to je da se električna vozila dugo pune, a infrastruktura nije još na dovoljnoj razini kako bi podnijela veliku količinu električnih vozila. Brzo punjenje koje traje otprilike oko pola sata zahtjeva velike količine električne snage što utječe na električnu mrežu. Stoga je potrebno još dosta ulagati kako i u same punionice tako i u električnu mrežu. Međutim, industrija EV-a raste brzo, potaknuta tehnološkim napretkom i

promjenama u svijesti o zaštiti okoliša. Očekuje se da će u budućnosti električna vozila preuzeti bitan dio prometa te će tako infrastruktura izgledati znatno drugačije nego danas.

1.1. Podjela električnih vozila

U posljednjem desetljeću svjedoci smo naglog rasta i evolucije električnih vozila, što je uvelike potaknuto napretkom tehnologije baterija. S napretkom baterija postignut je i veći domet. Prosječni domet modernih EV-a iznosi oko 320-480 km po punjenju. Njihova maksimalna brzina je oko 200-250 km/h koja je ograničena zbog učinkovitosti, ali EV-ovi imaju visoko ubrzanje zato što električni motori pružaju trenutačni okretni moment te najbolji motori postižu ubrzanje od 0-100 km/h za manje od 3 sekunde. Također, EV-ovi imaju oko 3 do 4 puta veću energetska učinkovitost od motora s unutarnjim izgaranjem jer se u njima većina energije gubi kao toplina. Cijena električnih vozila pada s napretkom tehnologije te je u 2023. prodano više od 10.5 milijuna vozila globalno. Najveći udio je u Kini koja znatno ulaže u električna vozila.

Električna vozila dijele se u nekoliko kategorija, Svaka kategorija ima različite tehničke karakteristike i način rada.

- **Hibridno električno vozilo (HEV)**

HEV-ovi automatski kombiniraju korištenje motora s unutarnjim izgaranjem i električnog motora, ovisno o uvjetima vožnje. Motor s unutarnjim izgaranjem puni bateriju tijekom vožnje, a električni motor se koristi pri niskim brzinama i laganu

vožnju. Ne mogu se puniti iz vanjskih izvora električne energije; baterija se puni regenerativnim kočenjem i motorom s unutarnjim izgaranjem.

- **Prednosti** - Manja potrošnja goriva u usporedbi s tradicionalnim vozilima s unutarnjim izgaranjem. Ne zahtijevaju vanjske punionice.
- **Nedostaci** - Ne nude vožnju isključivo na električni pogon na većim udaljenostima. Ovisni su o gorivu za duge vožnje.

- **Baterijsko električno vozilo (BEV)**

BEV-ovi su potpuno električna vozila koja za rad koriste isključivo električnu energiju. Pokreću ih jedan ili više elektromotora napajanih iz baterije. BEV-ovi se pune isključivo putem vanjskih izvora električne energije (kućne ili javne punionice).

- **Prednosti** - Nula emisija iz ispušnih plinova i vrlo visoka energetska učinkovitost.
- **Nedostaci** - Ograničen domet ovisan o kapacitetu baterije i infrastrukturi punionica. Dulje vrijeme punjenja u usporedbi s punjenjem goriva kod vozila s unutarnjim izgaranjem.

- **Plug-in hibridno električno vozilo (PHEV)**

PHEV-ovi kombiniraju karakteristike HEV-a i BEV-a. Imaju motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor s baterijom koja se može puniti iz vanjskih izvora. Mogu voziti na električni pogon, ali imaju i klasični motor koji se uključuje kad je potrebno. Na kraćim udaljenostima (30-50 km) mogu koristiti električni motor. Mogu se puniti putem vanjskih izvora električne energije (kao BEV), ali i regenerativnim kočenjem te motorom s unutarnjim izgaranjem (kao HEV).

- **Prednosti** - Fleksibilnost korištenja električnog pogona za kratke vožnje i goriva za duže vožnje. Manje emisije i veća učinkovitost od klasičnih HEV-ova.
- **Nedostaci** - Složeniji sustavi, veća cijena zbog dvostrukih pogonskih sklopova. Kratki domet vožnje samo na električni pogon.

- **Električno vozilo s gorivnim ćelijama (FCEV)**

FCEV-ovi koriste vodik kao gorivo za stvaranje električne energije u gorivnim ćelijama. Vodik reagira s kisikom u gorivnim ćelijama, pri čemu se proizvodi električna energija

za pogon elektromotora i voda kao nusprodukt. Umjesto punjenja baterije, FCEV-ovi se pune vodikom na posebnim vodikovim stanicama. Proces punjenja traje nekoliko minuta, slično kao točenje goriva.

- **Prednosti** - Dugi dolet vožnje i kratko vrijeme punjenja. Nula emisija iz ispušnih plinova (osim vode).
- **Nedostaci** - Nedostatak vodikove infrastrukture, visoka cijena tehnologije i ograničena dostupnost vozila. Proizvodnja vodika može biti energetski zahtjevna i ekološki upitna ako se ne koristi obnovljiva energija.

1.1.1. Električna vozila na baterije

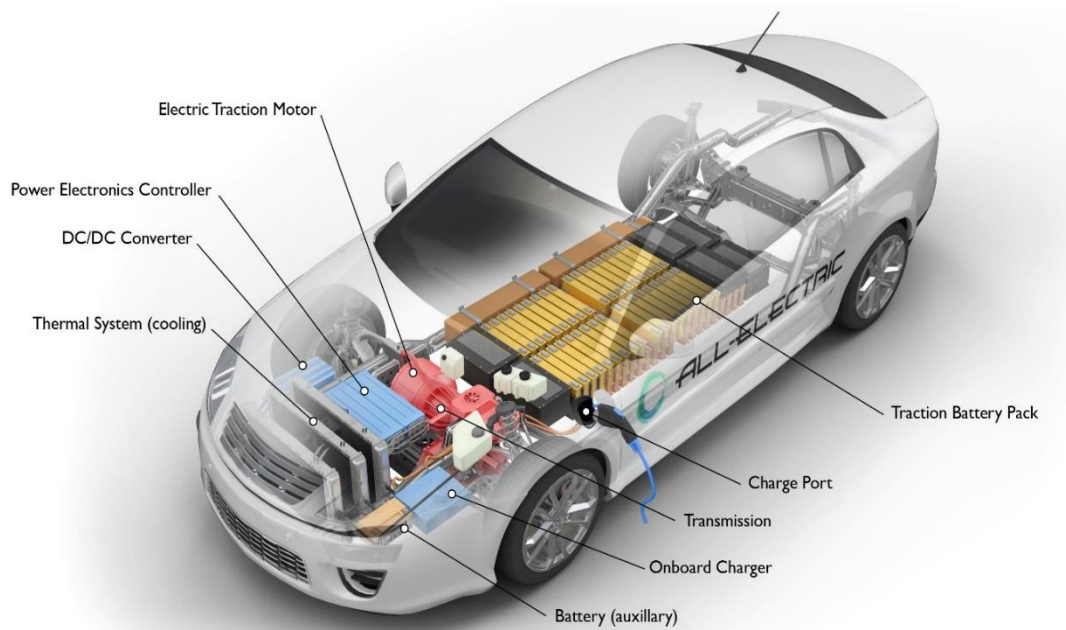
Baterije igraju ključnu ulogu u električnim vozilima jer omogućuju pohranu energije koja pokreće vozila, nudeći ekološki prihvatljivu alternativu tradicionalnim vozilima s unutarnjim izgaranjem. Baterijski sustav je najskuplja komponenta električnog vozila. Razlog tome je upotreba materijala kojima je cijena zadnjih godina višestruko narasla. Trenutačno, visoka cijena baterija predstavlja glavnu prepreku širokoj usvajanju električnih vozila. Kako bi prevladali ovaj izazov, neki proizvođači istražuju alternativne metode za pohranu električne energije, poput tehnologije čvrstih baterija. Ove baterije koriste čvrste elektrode i elektrolite umjesto tekućih ili polimernih, što bi ih trebalo učiniti manjima, lakšima, s većom gustoćom energije i, najvažnije od svega, jeftinijima od sadašnjih litij-ionskih baterija. Postoje različiti tipovi baterija koji se često koriste u električnim vozilima:

- **Olovna baterija (Pb)** - Olovna baterija je stariji tip punjive baterije koji je poznat po svojoj robusnosti i ekonomičnosti. Međutim, ima nisku specifičnu energiju i ograničen broj punjenja i pražnjenja. Također, njezin vijek trajanja značajno opada kada se koristi za velike struje pražnjenja ili pri niskim temperaturama. Olovne baterije zahtijevaju sporije punjenje, jer brzo punjenje može uzrokovati oštećenja.
- **Nikal Kadmij baterija (NiCd)** - NiCd baterije koriste se kada je potreban dug vijek trajanja, visoke struje pražnjenja i otpornost na ekstremne temperature. Iako su vrlo izdržljive i omogućuju brzo punjenje, glavni nedostatak im je upotreba kadmija, koji je

otrovan i štetan za okoliš. Zbog toga se danas sve više zamjenjuju drugim vrstama baterija.

- **Nikal Metalhidrid baterija (NiMH)** - NiMH baterije koriste se kao zamjena za NiCd baterije jer sadrže manje toksičnih metala, ali imaju veću specifičnu energiju. Ipak, imaju ograničeniji vijek trajanja u usporedbi s drugim vrstama baterija.
- **Litij-ionska baterija (Li-ion)** - Litij-ionske baterije su lagane baterije s visokom gustoćom energije, dugim vijekom trajanja i velikim kapacitetom. Međutim, cijena im je obično viša u usporedbi s drugim vrstama baterija. Za sigurnu upotrebu litij-ionskih baterija potrebno je zaštitno elektroničko sklopovlje (BMS).

Svaka od ovih vrsta baterija ima svoje prednosti i nedostatke, a odabir ovisi o potrebama električnog vozila u pogledu performansi, cijene i ekoloških faktora. No, daleko najzastupljenija je litij-ionska baterija koja ima najbolji tehnički i ekološki učinak, kao i dobar životni vijek.



Slika 2.1. Unutrašnjost električnog vozila s baterijom [3]

1.1.2. Električna vozila s gorivnim ćelijama

Vozilo s gorivnim ćelijama koristi vodik kao gorivo za pogon. Ova kategorija vozila uključuje svemirske rakete, automobile i druga prijevozna sredstva. Sustavi u tim vozilima pretvaraju kemijsku energiju vodika u mehaničku energiju, i to ili sagorijevanjem vodika u motorima s unutarnjim izgaranjem, ili reakcijom vodika i kisika u gorivnim ćelijama koje pokreću elektromotore. Široka upotreba vodika kao goriva za prijevoz smatra se ključnim dijelom buduće energetske slike.

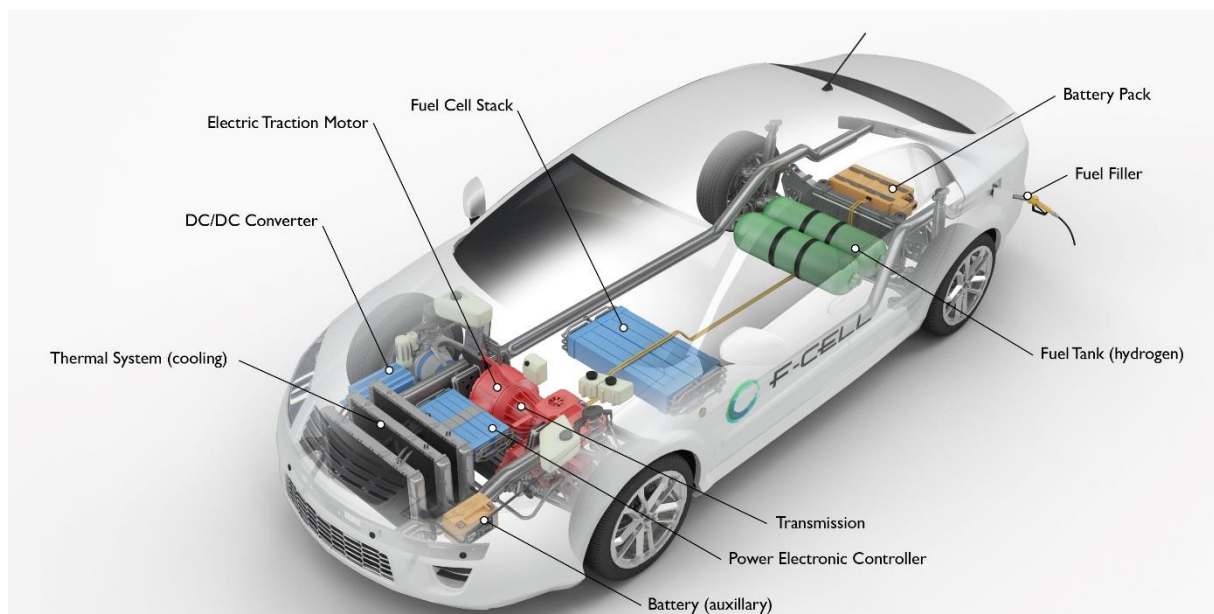
Motori s unutarnjim izgaranjem vodika (engl. hydrogen internal combustion engines, HICE) predstavljaju vrstu uređaja koja koristi vodik kao gorivo za pretvorbu energije. Slično konvencionalnim motorima s unutarnjim izgaranjem, HICE pretvaraju kemijsku energiju vodika u mehaničku energiju putem izgaranja. Djeluju prema istim principima kao i tradicionalni benzinski ili dizelski motori, tako da se vodik unosi u komoru za izgaranje, gdje se miješa sa zrakom i potom zapali. Izgaranje vodika stvara plinove pod visokim tlakom koji pokreću klipove motora, stvarajući mehaničku snagu. No, kako vodik ima 6 do 7 puta manju energetska gustoću u odnosu na klasični benzin ili dizel, potrebno je imati znatno veći spremnik ili koristiti metode kao što su komprimiranje vodika pod visokim tlakom ili ohladiti vodik dovoljno da se može spremati kao tekući, ali oba ta postupka znatno povećavaju trošak. Ti problemi zajedno s činjenicom da je potrebno znatno ulagati u distribuciju i punionice vodika čine ovakve HICE motore trenutno neodrživim.

Trenutno se jedino pojavljuje vodikovo vozilo na gorivne ćelanke. Princip rada gorivnog ćelanka može se najlakše objasniti korištenjem sustava koji koristi vodik kao gorivo i kisik kao oksidans. Kada se vodik i kisik u plinovitom stanju dovedu u kontakt i aktiviraju, oni reagiraju stvarajući vodu i oslobađajući energiju. U gorivnom ćelanku, ova ukupna reakcija sastoji se od dvije zasebne reakcije, svaka na jednoj elektrodi. Na anodi, vodik se oksidira i oslobađa elektrone. Elektroni zatim putuju kroz vanjske vodiče, preko potrošača, do katode, gdje se kisik reducira. Dok elektroni putuju kroz vodiče oni stvaraju električnu energiju koja se troši na elektromotoru koji pokreće vozilo. Najčešća podjela gorivnih ćelanaka je po vrsti elektrolita:

- Gorivni ćelanci s alkalnim elektrolitom
- Gorivni ćelanci s fosfornom kiselinom (PAFC)
- Gorivni ćelanci s polimernom membranom kao elektrolitom (PEMFC)

- Gorivni članci s rastaljenim karbonatima kao elektrolitom (MCFC)
- Gorivni članci s čvrstim oksidima kao elektrolitom (SOFC)

Gorivni članci se intenzivno proučavaju, a istraživanja su dobila novi zamah zbog pogoršanja globalne energetske krize. Ipak, trenutno ne postoje tehnička rješenja za gorivne članke koja bi ispunila sve zahtjeve za visokom specifičnom snagom, pouzdanošću i ekonomičnošću, kako bi mogli konkurirati konvencionalnim procesima s neposrednim izgaranjem goriva. Buduća opravdanost upotrebe gorivnih članaka temelji se na dva ključna faktora: visokom stupnju učinkovitosti i niskom negativnom utjecaju na okoliš. Učinkovitost gorivnih članaka je znatno veća od svih trenutno korištenih termičkih procesa za proizvodnju električne energije. Količina otpadne topline iz gorivnih članaka manja je nego iz konvencionalnih postrojenja, a produkti izgaranja ne sadrže štetne tvari. Prije široke primjene gorivnih članaka, potrebno je riješiti dva ključna problema uz nekoliko manjih poteškoća. Prvi je zamjena plemenitih metala, poput platine i njoj srodnih metala, s jeftinijim i dostupnijim materijalima za elektrode. Drugi problem je trajnost i pouzdanost gorivnih članaka. Ako se navedeni problemi uspješno riješe, gorivni članci će najvjerojatnije najprije biti korišteni za pogon cestovnih vozila.



Slika 2.2. Unutrašnjost električnog vozila na vodik [4]

1.2. Konektor za punjenje električnih vozila

Budući da univerzalni konektor za električna vozila još uvijek ne postoji, stanice za punjenje, kabeli i utikači dolaze u različitim oblicima i veličinama. Oni se razlikuju ovisno o zemlji u kojoj se nalazite, vrsti vozila koje koristite i vrsti stanice za punjenje koju namjeravate koristiti. Konektor za punjenje električnih vozila je komponenta koja povezuje punjač s električnim vozilom kako bi se napunila baterija. Postoje različiti konektori za punjenje, ovisno o standardima punjenja u određenoj regiji ili za određene marke i modele vozila. Konektori mogu biti različitih oblika i veličina prema standardima koji se primjenjuju. Neki konektori također imaju komunikacijske mogućnosti kako bi se osiguralo učinkovito i sigurno punjenje. Vrste konektora dijele se na one za izmjeničnu (AC) i istosmjernu (DC) struju. Konektori se klasificiraju prema standardima, a najčešći su Type 1, Type 2, CHAdeMO, CCS i Tesla priključak.

- **Type 1 (SAE J1772)**

Koristi se najviše u Sjevernoj Americi i Japanu. Jednofazni je AC priključak maksimalne snage punjenja 7.4 kW. Stoga se koristi najčešće za sporije punjenje kući.

- **Type 2 (Mennekes)**

Najčešće korišten konektor u Europi. Podržava jednofazno i trofazno AC punjenje što omogućuje veću fleksibilnost. Maksimalna snaga punjenja mu je 22 kW za kućne punionice i 43 kW za javne punionice.

- **CHAdeMO**





Japanski standard za brzo DC punjenje. Maksimalna snaga punjenja je 100 kW, no ima novijih standarda do 400 kW. Namijenjen je za brzo punjenje na posebnim stanicama.

- **Combined Charging System (CCS)**

Kombinirani sustav punjenja koji podržava AC i DC punjenje. Maksimalna snaga punjenja je 350 kW. Omogućuje sporije AC punjenje na kućnim punionicama te brzo punjenje na DC punionicama: Zbog te mogućnosti punjenja za oba tipa jedno je od najboljih rješenja na tržištu.

- **Tesla konektor**

Tesla koristi svoj vlastiti konektor za punjenje u Sjevernoj Americi s tipom AC i DC. Maksimalna snaga punjenja je 250 kW na Tesla Supercharger stanicama. Ekskluzivan je za Tesla vozila te omogućava brzo punjenje na Tesla punionicama ili sporije punjenje kući.

	Japan	N. America	Europe	China	All Markets (except EU)
AC	 J1772 (Type 1)	 J1772 (Type 1)	 Mennekes (Type 2)	 GB/T	 Tesla
DC	 CHAdeMO	 CCS1	 CCS2	 GB/T	

Slika 2.3. Različiti punjači električnih vozila [5]

1.3. Punionice za električna vozila

Stanica za punjenje je uređaj za napajanje koji opskrbljuje električnom energijom električna vozila. Postoje dvije glavne vrste punjača za električna vozila: stanice za punjenje s izmjeničnom strujom (AC) i stanice za punjenje s istosmjernom strujom (DC). Baterije električnih vozila mogu se puniti samo istosmjernom strujom, dok većina mrežne električne energije dolazi iz elektroenergetskog sustava kao izmjenična struja. Iz tog razloga, većina električnih vozila ima ugrađeni pretvarač iz AC u DC. Na AC stanici za punjenje, AC struja iz mreže se dovodi do ovog ugrađenog punjača, koji je zatim pretvara u DC struju za punjenje baterije. DC punjači omogućuju punjenje veće snage (što zahtijeva mnogo veće pretvarače iz AC u DC) ugrađivanjem pretvarača u stanicu za punjenje umjesto u vozilo, kako bi se izbjegla ograničenja veličine i težine. Stanica tada izravno opskrbljuje vozilo DC strujom, zaobilazeći ugrađeni pretvarač. Vrijeme punjenja ovisi o kapacitetu baterije, gustoći snage i snazi punjenja.

Što je kapacitet veći, to više naboja baterija može zadržati (analogno veličini spremnika za gorivo). Veća gustoća snage omogućava bateriji prihvat više naboja po jedinici vremena (veličina otvora spremnika). Veća snaga punjenja isporučuje više energije po jedinici vremena (analogno protoku pumpe). Važan nedostatak brzog punjenja je to što također povećava opterećenje elektroenergetske mreže.

1.3.1. Punjenje na kućnoj punionici

Punjenje električnog vozila iz kućne utičnice najosnovnija je i široko dostupna metoda za punjenje električnog automobila. 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 struju koju baterija može pohraniti. Važno je izbjegavati punjenje putem produžnog kabela jer takvi kabele nisu prikladni za snagu potrebnu za punjenje. Ovo je najsporiji tip punjenja te punjenje u utičnici koja je na 230 V, što je standard u Europi potrebno je od 4 do 8 sati da se napuni do kraja ovisno o specifikacijama baterije i vozila. Zato je ovo često najbolje vrijeme da se automobil puni preko noći kada se ne vozi te kada je jeftinija električna energija. Nažalost, ovaj oblik zahtjeva da vlasnik ima dovoljno prostora za garažu te mjesto gdje je moguće sigurno puniti vozilo što je zahtjevno imati u velikom urbanom mjestu.



Slika 3.1. Punjenje kući [6]

1.3.2. Brze punionice

S obzirom na to da većina ljudi nema mogućnost puniti kući te s ograničenim dometom električnih vozila stvara se potreba za brzim javnim punionicama. Brzi punjači mogu puniti čitavu bateriju vozila za do pola sata. Za podršku brzom punjenju potrebna je opsežna mreža stanica za punjenje. Vlade, privatne tvrtke i proizvođači električnih vozila ulažu značajna sredstva u proširenje ove infrastrukture kako bi punjenje električnih vozila učinili dostupnijim i raširenijim. Stanice za punjenje strateški su smještene duž autocesta, u urbanim područjima i blizu popularnih odredišta kako bi zadovoljile potrebe za putovanjem na velike udaljenosti i svakodnevnim putovanjima na posao. No, kao i sve brze punionice imaju svoje nedostatke. Brzo punjenje može štetno utjecati na bateriju vozila te smanjiti njezin životni vijek. Također brzo punjenje zahtjeva veliku snagu i do 500 kW što negativno utječe na električnu mrežu što znači da su potrebne investicije i u pogledu prijenosa i distribucije električnih mreža.



Slika 3.2. Brze punionice [7]

1.3.3. Punionice s baterijskim spremnicima

Kako je jedan od najvećih problema električnih punionica velika snaga u nekom trenutku koju povlači brzo punjenje automobila. Jedan od bitnih utjecaja je baterijski spremnik vezan na samu punionicu koji bi spremao energiju kada dolazi manji broj vozila (uglavnom noću) te bi se praznio kada je potrebno puno energije (uglavnom danju). Tako baterijski spremnik daje bitnu fleksibilnost te smanjuje potrebna dodatna ulaganja u mrežu. Također postoji sustav naplate maksimalne vršne snage u mjesecu. Baterijski spremnik bi pomagao i u tom aspektu. Moguće ga je kombinirati sa sunčanim panelima koji mogu spremati energiju u spremnik ako ju nije moguće potrošiti u tome trenutku.



Slika 3.3. Baterijski spremnik [8]

1.3.4. Punjenje vozila s gorivnim ćelijama

Punjenje vozila s gorivnim ćelijama (FCEV) koje koriste vodik kao gorivo bitno se razlikuje od punjenja klasičnih električnih vozila s baterijama. U FCEV vozilima, vodik se pohranjuje u spremnicima pod visokim tlakom, a zatim se, kroz kemijsku reakciju u gorivnoj ćeliji, kombinira s kisikom iz zraka kako bi stvorio električnu energiju koja pogoni elektromotor. Punionice za FCEV vozila funkcioniraju slično kao klasične benzinske postaje. Vozač stane uz pumpu za vodik i spoji mlaznicu za vodik na vozilo. Mlaznica za punjenje vodikom je specifična za vodik i ima sigurnosni mehanizam kako bi se spriječilo curenje vodika. Vozač povezuje mlaznicu s vozilom, koja se pričvrsti na poseban ventil na spremniku vodika u vozilu. Ovisno o punionici, vodik može biti pohranjen pod tlakom od 350 bara ili 700 bara. Vozila modernijeg dizajna obično koriste vodik pohranjen pod većim tlakom (700 bara), što omogućuje veću količinu vodika u spremniku te se tako postigne veći domet. Punjenje traje između 3 do 5 minuta, što je znatno brže od punjenja klasičnih električnih vozila s baterijama. Ventili i spojke osiguravaju sigurno zatvaranje kada punjenje završi. Spremnici u FCEV vozilima su izrađeni od karbonskih vlakana ili drugih laganih, ali izdržljivih materijala kako bi izdržali visoke tlakove i osigurali sigurnost u slučaju nesreće. Nakon što je spremnik napunjen, mlaznica se automatski odvoji. S punim spremnikom, vozilo s gorivnim ćelijama može prijeći od 500 do 700 kilometara, ovisno o kapacitetu spremnika i učinkovitosti vozila.



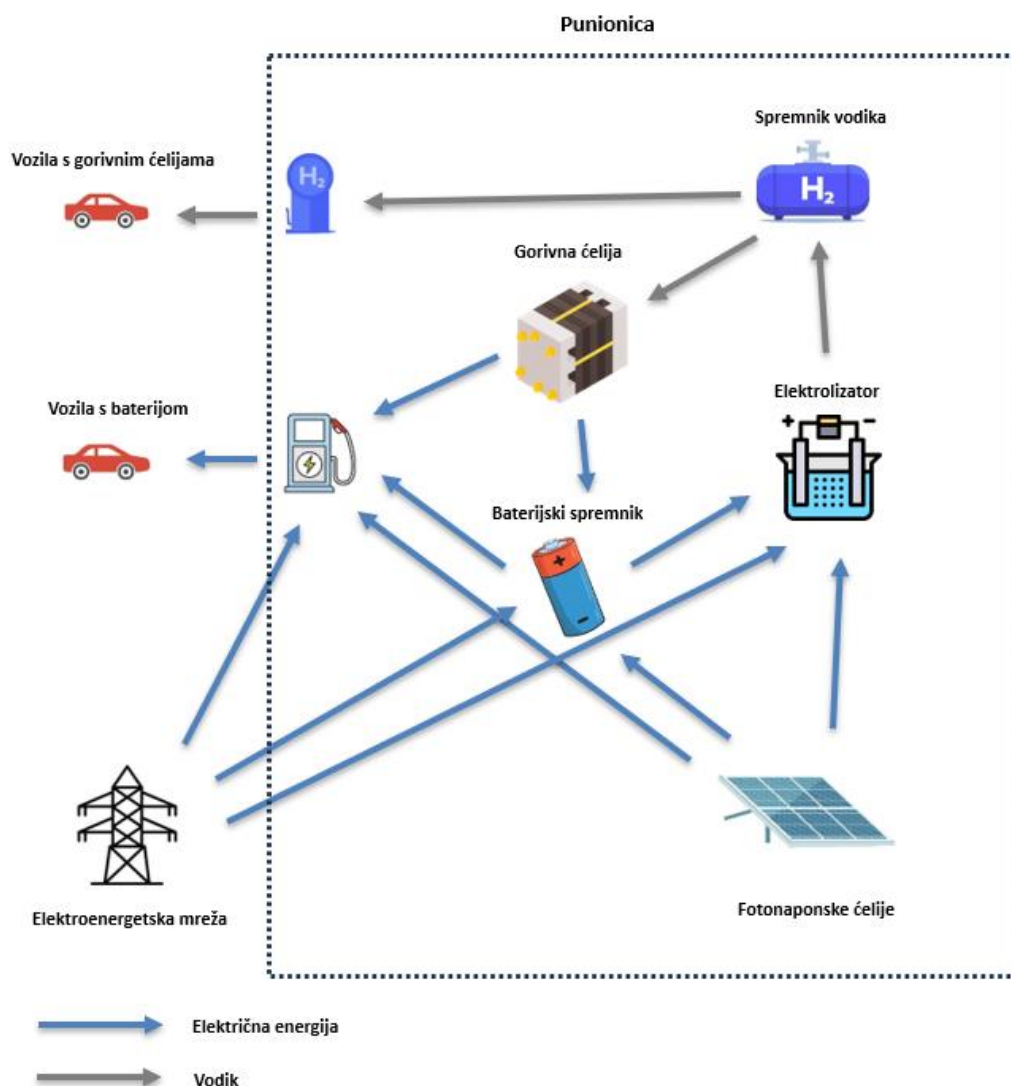
Slika 3.4. Punjenje vozila s gorivnim ćelijama [9]

1.4. Lokacija punionica

Ključno je izabrati optimalnu lokaciju za punionicu električnih vozila kako bi se zadovoljili interesi svih koji imaju neku korist od nje, a to su operator distribucijske mreže, vlasnik i investitori punionice te korisnici punionice. Operator distribucijske mreže je odgovoran za svako trošilo koje je priključeno na distribucijsku mrežu. Izgradnja nove punionice uvelike utječe na parametre distribucijske mreže te je potrebno optimirati lokaciju i priključak na mrežu kako bi bili zadovoljeni svi uvjeti operatora. Vlasnik i investitori punionice od punionice žele ostvariti profit. To uključuje značajne analize kako bi se smanjio trošak investicije te povećao prihod. Ako nisu zadovoljeni svi uvjeti koje je zadao operator distribucijske mreže za neku lokaciju potrebno je ili mijenjati lokaciju ili uložiti u izgradnju i pojačanje distribucijske mreže o trošku vlasnika. S obzirom na to da električne punionice troše veliku snagu u kratkom roku zbog brzog punjenja potrebno je posebnu pozornost obratiti na vršnu snagu punionice. Što se tiče korisnika punionice njemu je bitno znati troškove punjenja te dostupnost i blizina punionice. Stoga je potrebno imati punionicu na dovoljno prometnom mjestu kako bi korisnicima predstavljala dobar odabir.

2. Model optimizacije investicije i pogona

Cilj modela je analizirati isplativost izgradnje punionice za električna vozila i vozila s gorivnim ćelijama. Optimira se rad svake komponente takve punionice kako bi godišnja zarada bila što veća. Dakle, Model se sastoji od više komponenti koje su detaljnije opisane u sljedećim poglavljima. Naravno s obzirom na to da su punionice za električna vozila tek počele imati pravi utjecaj u svijetu treba imati na umu kako je teško imati točne pretpostavke o tome kako će se dalje razvijati ova tematika. Koristi optimizacijski paket Gurobi u programskom jeziku Python. Razmatrano je više slučajeva u svrhu usporedbe utjecaja različitih dijelova modela. Za cilj modela je postavljena funkcija koja predstavlja trošak koja se minimizira.



Slika 5.1. Dijagram tokova električne energije i vodika

Glavni dio modela se sastoji od 12 punjača za električna vozila te 4 punjača za vodik. Od tih 12 punjača za električna vozila 4 imaju mogućnost brzog punjenja (punjenje traje 1 sat), 4 imaju mogućnost srednje brzog punjenja (punjenje traje 3 sata) te 4 imaju mogućnost sporog punjenja (punjenje traje 8 sati). S obzirom na to da se vozila na vodik znatno brže pune svi takvi punjači se mogu napuniti unutar jednog sata. Punionica uzima energiju iz elektroenergetske mreže kako bi se zadovoljila potreba punjenja električnih vozila. Dodatan izvor električne energije su fotonaponske ćelije. Baterijski spremnik koristi punionici tako da je moguće kupiti električnu energiju u satima kada je jeftina, a trošiti ju u satima kada je skuplja. Elektrolizator i gorivni članak služe kako bi se električna energija mogla pretvoriti u vodik i obrnuto kako bi se mogla zadovoljiti potreba automobila kojima je gorivo vodik.

2.1. Troškovi izgradnje

Prije razrade samog modela i njegovih komponenti potrebno je imati na umu troškove izgradnje te potrebnog priključka za električnu energiju. Pretpostavlja se da će sve lokacije razrađene imati iste troškove izgradnje koji se sastoje od infrastrukturnih, troškova opreme, troškovi softwarea te ostali. Infrastrukturni troškovi se odnose na moguće potrebno proširenje infrastrukture jer je punionica veliki potrošač. Troškovi opreme se odnose na cijenu konektora i ovise o maksimalnoj snazi punjača. Troškovi softwarea predstavljaju trošak ugradnje softwarea koji se ugrađuje kako bi punionica mogla imati uvid u to koliko se i kada troši energije. Ostali troškovi se odnose na znakove i ograde koji ukazuju na punionicu. Troškovi infrastrukture, softwarea i opreme bi iznosili od 12 000 EUR do 15 000 EUR po punjaču [10]. Troškovi opreme predstavljaju trošak punjača koji ovise o njihovoj snazi. Kako raste snaga punjača njegova cijena još više raste, tako brzi punjač od 100 kW košta od 28 000 EUR do 141 000 EUR [11], srednje brzi punjač snage 30 kW od 3 000 EUR do 10 000 EUR, a normalni punjač snage 11 kW od 700 EUR do 2 000 EUR. S obzirom na to da punionice za električne vozila troše veliku količinu energije često u istom trenutku potrebno je imati priključak na mrežu koji je visoke maksimalne snage. Pretpostavlja se da vršna snaga neće iznositi više od 1 MW te se uzima ta snaga kao zakupna. Prema tome trošak priključka bi iznosio 225 900 EUR

za lokacije van Zagreba, a 284 700 EUR unutar Zagreba [12].Cijenu punjača i općenito punionice za vodik je teško procijeniti s obzirom na to da u Hrvatskoj trenutno ne postoji nijedna takva punionica. Stoga, cijene će znatno varirati te se očekuje da će kroz vrijeme postepeno padati, pogotovo ako se pojača promet vozila na vodik u svijetu. Trenutno se uzima brojka za punionicu vodika od 1 100 EUR do 2 900 EUR za kilogram vodika potrošen u danu [13].



Slika 5.2. Električna punionica [14]

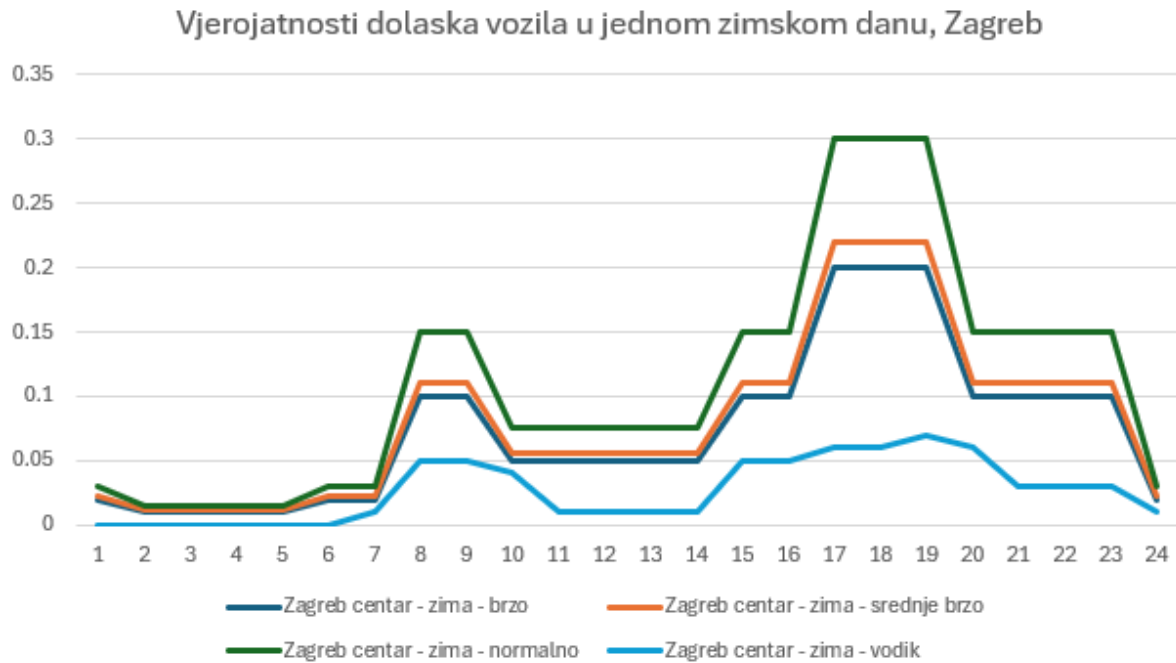
2.2. Raspored dolaska vozila

Vozila se modeliraju tako da je izrađen očekivani raspored dolaska vozila. Svako vozilo ima mogućnost biranja jednog od punjača (brzo, srednje brzo ili normalno). Brzo punjenje se najviše naplaćuje jer ono ima najveću vršnu snagu što je najmanje povoljno za distribucijsku mrežu. Dok se normalno punjenje najmanje naplaćuje, ali traje najduže vremenski. Također su razmatrane tri lokacije. Prema tim lokacijama razmatrat će se različit raspored dolaska vozila.

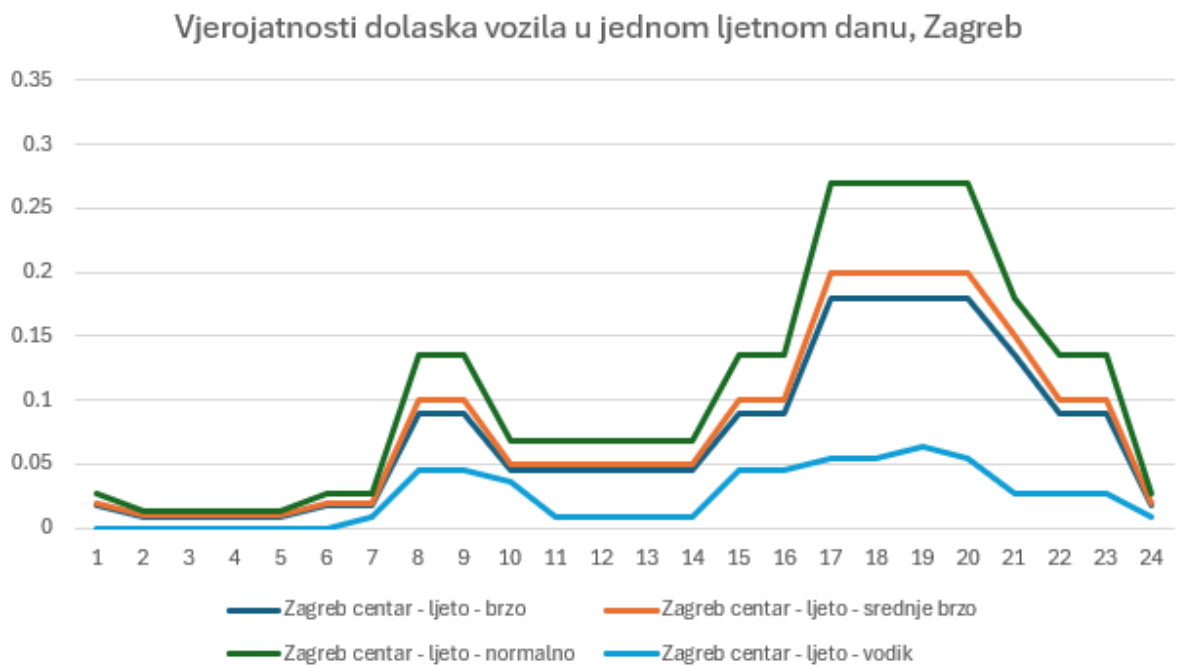
- **Zagreb centar, u blizini poslovnih prostora** – veća je potražnja za normalnim punjenjem jer će ljudi koji rade ili žive u blizini imati mogućnost ostaviti vozilo tokom radnog vremena ili noći, dok će ljudi koristiti srednje brzo punjenje u večernjim satima nakon posla, također se očekuje manja potražnja za brzim punjenjem nego na drugim lokacijama, očekuje se manji promet ljeti
- **Autocesta A1, u ličkoj-senjskoj županiji** – znatno je veća potražnja za brzim metodama punjenja jer ljudima nije u interesu čekati popriličan broj sati na autoputu, također se očekuje da će ova lokacija imati najmanje ukupnog prometa jer će većina ljudi imati već napunjeno vozilo prije kako bi izbjegli punjenje na autoputu, očekuje se malo veći promet ljeti nego zimi
- **Dubrovnik, česta turistička destinacija** – očekuje se da će jednako često biti srednje brzo punjenje kao i normalno punjenje, najčešće vrijeme punjenja se očekuje u večernjim satima kada ljudi ne idu nigdje dalje nego im je potrebno napunjeno auto za sutradan, očekuje se znatno veći promet ljeti

Dolazak vozila je modeliran na načina da je svakom satu pridodana šansa da u tome satu dođe vozilo ako je punionica slobodna. A punionica je zauzeta ako je na njoj vozilo koje se puni i dalje od prethodnog sata. Zimski dani se gledaju od 1.1. do 31.3. te od 1.10. do 31.12., a ljetni dani su od 1.4. do 30.9. kako bi mogli uvidjeti razlike između toplijeg i hladnijeg dijela godine. Iako još ne postoje punionice za vodik u Hrvatskoj te stoga ni ne postoje vozila na vodik, raspored dolaska tih vozila je modeliran kao pretpostavka kako bi to izgledalo ako bi tehnologija vodika više zaživjela [15].

- **Zagreb Centar**

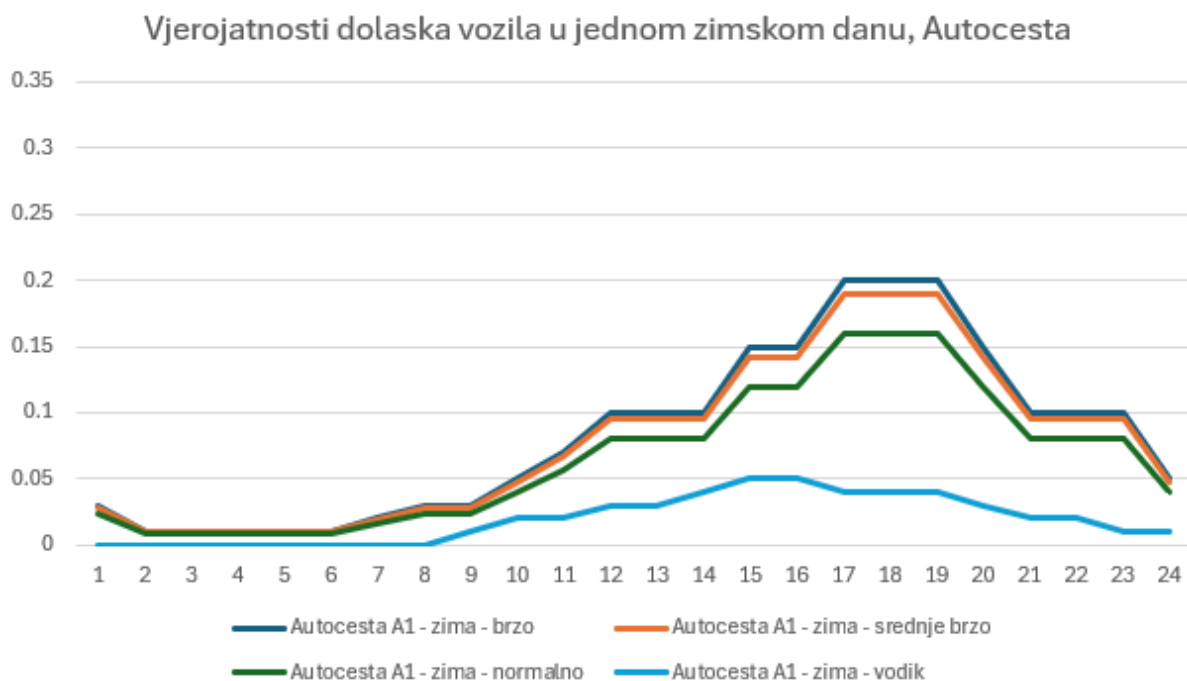


Slika 5.3. Vjerojatnosti dolaska vozila u zimskom danu, Zagreb

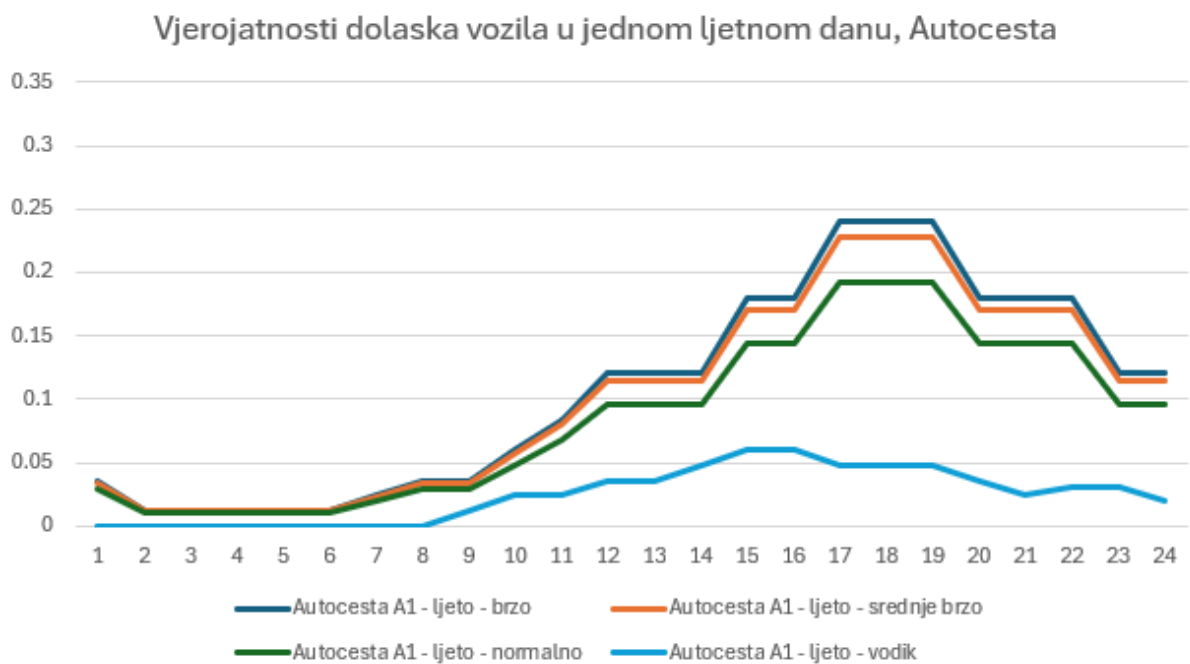


Slika 5.4. Vjerojatnosti dolaska vozila u ljetnom danu, Zagreb

- **Autocesta A1**

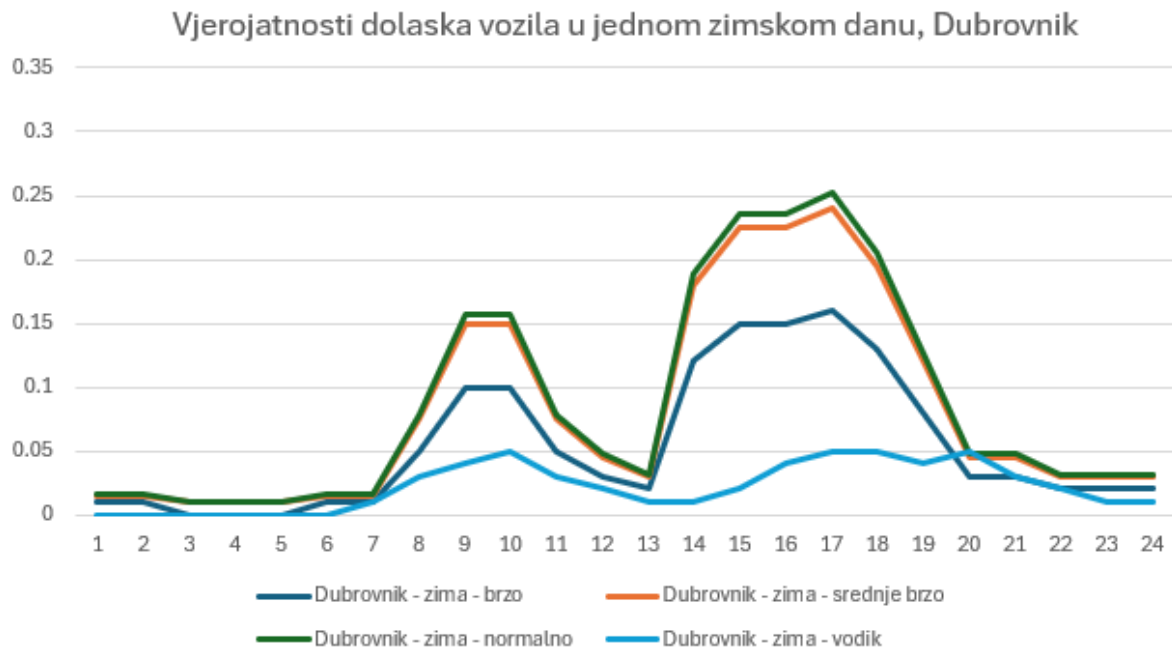


Slika 5.5. Vjerojatnosti dolaska vozila u zimskom danu, Autocesta

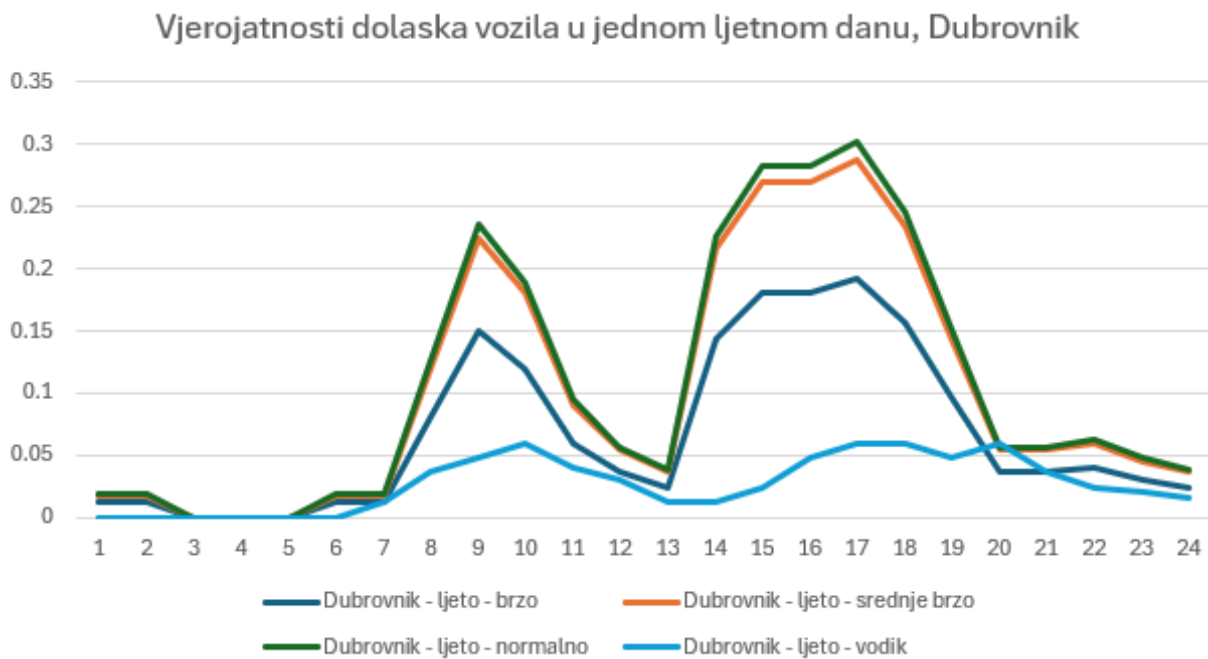


Slika 5.6. Vjerojatnosti dolaska vozila u ljetnom danu, Autocesta

- **Dubrovnik**



Slika 5.7. Vjerojatnosti dolaska vozila u zimskom danu, Dubrovnik



Slika 5.8. Vjerojatnosti dolaska vozila u ljetnom danu, Dubrovnik

2.3. Vrste vozila koja dolaze

Bitna stavka za modeliranje vozila su njihovi kapaciteti baterija te njihova snaga punjenja. Kapacitet baterije određuje koliko dometa ima vozilo te snaga punjenja kolikom snagom se može baterija puniti. Kako se ti podaci razliku od vozila do vozila uzeo sam 4 karakteristične vrijednosti za električna vozila koje se mogu pojaviti u modelu. Za vozila na vodik je bitna količina vodika koja stane u spremnik. Za takvu vrstu vozila uzete su 3 karakteristične vrijednosti. Karakteristične vrijednosti predstavljaju najčešći tip vozila koja se trenutno mogu pojaviti na cestama [16] [17].

Tablica 1. Tipovi električnih vozila

Električno vozilo	Kapacitet baterije	Snaga punjenja	Vjerojatnost pojavljivanja
Tesla model Y	60 kWh	11 kW AC /210 kW DC	69 %
Ford Mustang Mach	70 kWh	11 kW AC /150 kW DC	11 %
Chevy Bolt EV	66 kWh	11 kW AC /85 kW DC	11 %
Tesla Model S	100 kWh	17 kW AC /250 kW DC	9 %

Tablica 2. Tipovi vozila na vodik

Vozilo na vodik	Kapacitet spremnika	Vjerojatnost pojavljivanja
Toyota Mirai	5.6 kg	84 %
Hyundai Nexa	6.3 kg	9 %
Honda Clarity	5 kg	7 %

Dakle, punjenje vozila je modelirano tako da je svakom satu pridodana neka vjerojatnost koja predstavlja šansu da je tada došlo vozilo koje su opisane u poglavlju 4.2.. Ako je u nekom satu došlo vozilo onda model određuje koje je vozilo došlo na osnovu vjerojatnosti pojavljivanja vozila prikazano u tablici 1. i tablici 2.

Na primjer na lokaciji Zagreb zimi u 18h vjerojatnost dolaska vozila je 0.2, odnosno 20 %. Ako vozilo dođe vjerojatnost je 69 % da je to vozilo Tesla model Y, 11 % da je Ford Mustang Mech, 11 % da je Chevy Bolt EV te 9 % da je Tesla model S. Ovisno o vozilu koje dođe potrebno je potrošiti električne energije u tome satu ovisno o kapacitetu toga vozila.

2.4. Uređaji koji povezuju električnu energiju i vodik

S obzirom na to da ova punionica ima mogućnost punjenja električnih vozila i vozila na vodik, korisno je imati uređaje koji povezuju ta dva medija kako bi bilo moguće pretvoriti energiju iz jednog u drugi oblik kada je to potrebno. To može biti dobro u trenucima kada je električna energija dovoljno skupa da je isplativo pretvarati vodik u električnu energiju, te kada je toliko jeftina da je dobro pretvarati iz električne energije u vodik. Uređaji koji su trenutno najčešće korišteni u tu svrhu su elektrolizer i gorivna ćelija.

2.4.1. Elektrolizator

Elektroliza je kemijski proces koji koristi električnu energiju za pokretanje ne-spontane kemijske reakcije. To je temeljna tehnika u kemiji i industrijskim primjenama, posebno za ekstrakciju i pročišćavanje metala, galvanizaciju i proizvodnju kemijskih spojeva. No, u zadnje vrijeme se istražuje kako se što efikasnije elektrolizom može dobiti čisti vodik koji bi služio kao gorivo u nekim procesima sve u smjeru manjeg oslanjanja na fosilna goriva i ostale zagađujuće energente.

Elektrolizator se sastoji od dvije elektrode uronjene u elektrolit. Na elektrode se dovede električna struja koja izaziva oksidaciju vode na anodi te redukciju vodikovih iona na katodi. Oksidacijom vode se oslobađa kisik iz vode, dok se redukcijom oslobađa vodik koji se dalje može skladištiti. S obzirom na to da su jedini produkti kisik i vodik proces ne stvara nikakve emisije u okoliš. Postoje različiti tipovi elektrolizatora:

- **Alkalni** – koriste alkalni elektrolit kao što je kalijev hidroksid (KOH) ili natrijev hidroksid (NaOH), relativno niski troškovi i dug životni vijek, manja učinkovitost od ostalih vrsta elektrolizatora
- **Proton Exchange Membrane (PEM)** – čvrsta polimerna membrana kao elektrolit, viša učinkovitost i gustoća struje, kraće vrijeme uključivanja te bolje performanse pri promjenjivim opterećenjima

- **Solid Oxide Elektrolizatori (SOE)** – čvrsta oksidna keramika kao elektrolit, rade na visokim temperaturama (oko 750 °C), visoka učinkovitost ako se koristi otpadna toplina iz drugih procesa

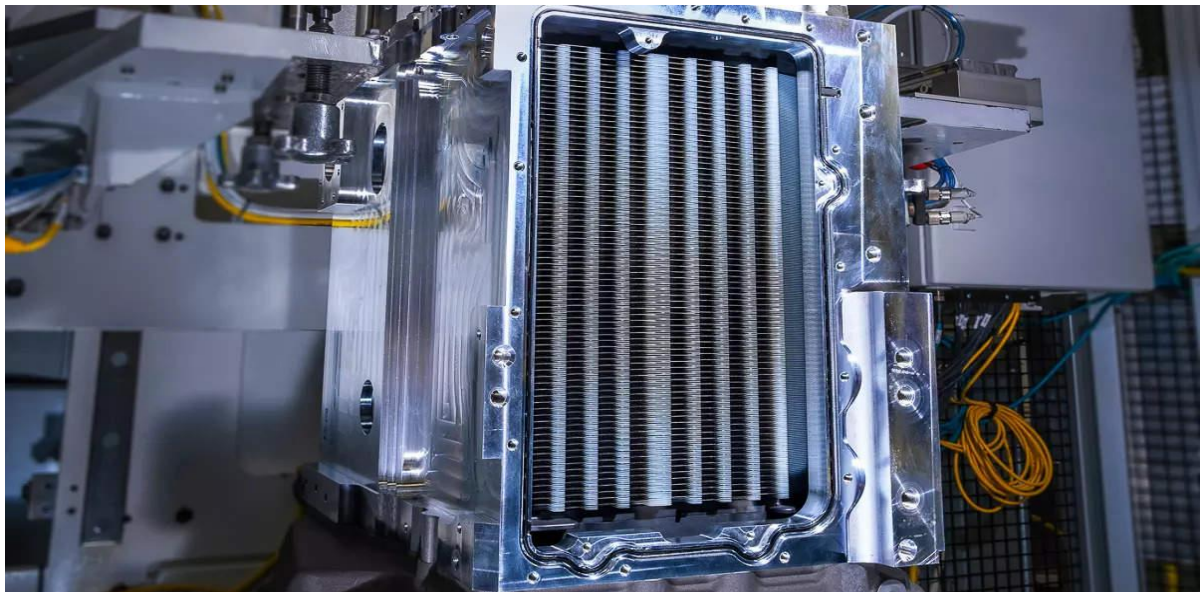
Trenutno su elektrolizatori poprilično skup način proizvodnje vodika. No, s obzirom na to da su nulte stope emisije znatno se ulaže i njih te pokušava pronaći način kako bi bili održivi. Kao i svaki proces elektroliza vode s pomoću elektrolizatora nije idealan proces te ima gubitke. Prosječna efikasnost realnog PEM elektrolizatora iznosi oko 50-67 kWh/kg [18]. Elektrolizatori su i dalje novi uređaji stoga imaju znatnu cijenu proporcionalu snazi koja iznosi od 700 EUR/kW do 1400 EUR/kW [19]. Pretpostavlja se da ni u jednom satu ne bi bilo potrebno proizvesti više od 10 kg vodika, te se stoga uzima elektrolizator snage 550 kW. Dakle, takav elektrolizator bi koštao od 385 000 EUR do 770 000 EUR.



Slika 5.9. Elektrolizator [20]

2.4.2. Gorivni članak

Gorivni članak je uređaj koji stvara električnu energiju korištenjem vodika kao goriva. Ovaj proces te njegovi prednosti i nedostaci su bolje opisani u poglavlju 1.1.2.. Bitan razlog zašto se dodaje gorivni članak jest kako bi se mogla ispuniti potreba za električnom energijom kada je ona poprilično skupa. U tim slučajevima se koristi vodik kako bi izbjegli veće troškove. Naravno, to se može u slučajevima kada je u sustavu dostupan vodik koji se može koristiti u ove svrhe. No, ni sama gorivna ćelija nije sto posto efikasna te se stoga mora pretpostaviti realna efikasnost koja je da 1 kg vodika može proizvesti 23 kWh energije [21]. S obzirom na to da elektrolizator ne proizvodi više od 10 kg vodika u satu, nije za očekivati da će biti potrebno čitav vodik iz jednog sata u drugi potrošiti nazad u električnu energiju. Dakle, zato se uzima gorivna ćelija što troši najviše 5 kg vodika u satu odnosno proizvodi 115 kWh. Uzima se nazivna vrijednost od 120 kW što bi bilo dovoljno za sve svrhe. Takav uređaj bi koštao oko 1500 EUR/kW što bi značilo da ukupno košta 180 000 EUR [22].



Slika 5.10. Gorivna ćelija [23]

2.5. Integracija obnovljivih izvora energije

Punionica električnih vozila je dobra prilika za uključiti obnovljive izvore energije jer punionica troši velike količine električne energije. Tako je moguće osigurati da punionica koristi više energije koja je nulte stope emisije. U ovom slučaju bi se u prvom redu koristile fotonaponske ćelije s obzirom na to da su one najjednostavnije za primjenu. Kada je potrebna energija da se pune automobili odmah se može trošiti energija proizvedena iz fotonaponskih ćelija te se tada ne bi trebala koristiti energija iz mreže. U slučaju da fotonaponske ćelije proizvode, a nema nijednog vozila da troši tu energiju onda ju je moguće vraćati u mrežu ili spremati u neki spremnik energije. U modelu razmatram tri različite lokacije, stoga će se razlikovati proizvodnja fotonaponskih ćelija no ne toliko značajno s obzirom na to da nisu velike razlike. Nije moguće napraviti fotonaponske panele visoke snage jer bi tada bila potrebna velika površina koja bi zahtijevala mnogo veće troškove, uzeti će se površina od 140 m² krova koja je dovoljna za ugradnju 20 kW solarnih panela. Paneli te snage bi koštali od oko 16 000 EUR do 28 000 EUR [24].



Slika 5.11. Solarni paneli [25]

2.6. Spremnici energije

Svaki sustav električne energije ima korist od spremnika energije pa tako i električna punionica. Punionica je specifična po tome da koristi mnogo energije u trenucima kada puni vozilo, posebice ako se vozilo brzo puni, dok u trenucima kada nema vozila ne troši uopće energiju. Takav teško predvidivi potrošač zadaje mnoge probleme distribucijskom sustavu. Dakle, za ovaj sustav električne punionice još je znatnija korist spremnika energije koji mogu snižavati vršno opterećenje mreže te mogu vraćati energiju u mrežu preko agregatora kada je to potrebno.

2.6.1. Baterija

Baterije kao spremnici energije imaju ključnu ulogu u modernim sustavima zbog svoje sposobnosti pohrane energije u obliku kemijske energije, koja omogućava visoku učinkovitost pri pretvorbi u električnu energiju. Tijekom procesa punjenja, električna energija se pretvara u kemijsku energiju s pomoću elektrokemijskih reakcija unutar baterije, dok se tijekom pražnjenja ta energija ponovno pretvara u električnu, bez potrebe za dodatnim pretvorbama u druge oblike energije, što minimizira energetske gubitke i povećava ukupnu učinkovitost sustava. Baterije se dijele na punjive (reverzibilne) i nepunjive (nereverzibilne), ovisno o tome mogu li prolaziti kroz višekratne cikluse punjenja i pražnjenja. Punjive baterije (npr. litij-ionske, nikal-metal-hidridne) koriste elektrokemijske reakcije koje su reverzibilne, omogućujući ponovnu upotrebu baterije. Nepunjive baterije (npr. alkalne baterije) koriste ireverzibilne kemijske procese, nakon čega gube sposobnost skladištenja energije i moraju se zamijeniti. U kontekstu efikasnosti, baterije omogućuju visoku energetska gustoću i brzu odzivnost, zbog čega su pogodne za primjenu u raznim sektorima, uključujući električna vozila i obnovljive izvore energije, gdje se minimiziranje gubitaka i optimizacija pretvorbe energije smatraju ključnim. Baterije su više opisane u poglavlju 2.1. jer i sama električna vozila koriste baterije. Budući da su litij ionske baterije daleko najviše rasprostranjene te imaju najbolja svojstva, uzet ćemo taj tip baterije za naš model. Prosječna efikasnost tog tipa baterije je 90 % za punjenje i 88 % za pražnjenje. Cijena te baterije je oko 139 EUR/kWh [26]. Za naš model uzimamo vrijednost veličine baterije od 50 kWh. Znači takva baterija bi koštala 6 950 EUR.

2.6.2. Spremnik vodika

Dobar spremnik vodika je pitanje koje je i dalje otvoreno jer je potrebno imati posebne sustave kako bi se vodik mogao spremiti na koristan način. S obzirom na to da je vodik plin zahtijeva velik prostor kako bi se spremio ako nije pod visokim tlakom. Stoga postoje nekoliko različitih metoda kako bi se mogao spremiti vodik:

- **Podzemna spremišta** – moguće je spremiti znatne količine vodika u geološkim formacijama jer se one nalaze pod slojem zemlje gdje je visok tlak i gdje je velik volumen stoga je taj način spremanja vrlo efikasan jer nije potrebno ulagati dodatno u opremu, no velik nedostatak ovog načina je to što je potrebno pronaći adekvatnu lokaciju te treba uložiti u transport od te lokacije do mjesta trošenja vodika
- **Vodik u metalnim hidridima** – vodik je moguće spremiti u metalima i legurama koje apsorbiraju i otpuštaju vodik, korisni su metali magnezij i titanij, prednost je što nije potreban visoki tlak niti niska temperatura, no velik je nedostatak što je na ovaj način teško dobiti veće količine vodika
- **Vodik u kemijskim spojevima** – vodik se nalazi u mnogim kemijskim spojevima kao što su amonijak, metan te natrijev borohidrid, omogućen je siguran transport i skladištenje, ali potrebne su efikasne i zahtjevne kemijske reakcije da se oslobodi vodik
- **Komprimirani vodik** – gustoća vodika se znatno povećava s povećanjem tlaka te se optimalno vodik sprema na tlaku od 350 do 700 bara, nedostatak je što je potrebno pravilno baratati s visokim tlakom
- **Tekući vodik** – gustoća vodika se povećava s padom temperature te je moguće pretvoriti vodik u tekući oblik kako bi se dostigla visoka gustoća za skladištenje, korisno je jer su gubici relativno niski no nedostatak je što je potrebno uložiti dosta energije kako bi se vodik pretvorio u tekući oblik

Za naš sustav punionice za vozila na vodik najbolji je oblik spremnika s komprimiranim vodikom. Za naš primjer očekuje se da je dovoljan spremnik od 100 kg vodika. Cijena

spremnika po kilogramu vodika jest od 500 EUR/kg do 700 EUR/kg [27]. Znači da bi ukupan trošak bio od 50 000 EUR do 70 000 EUR.



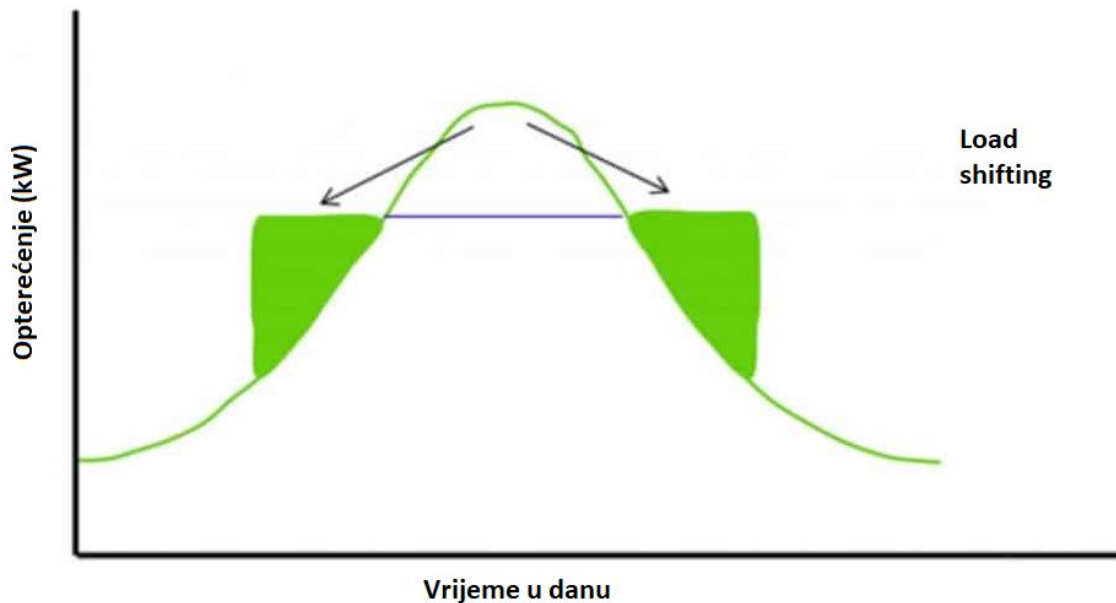
Sika 5.12. Spremnik vodika [28]

2.7. Vršna snaga

Punionice za električna vozila predstavljaju izazov zbog njihove nelinearne i volatilne potrošnje energije. U razdobljima kada se vozila ne pune, potrošnja je minimalna, dok za vrijeme punjenja u kratkom vremenu može doći do velikih zahtjeva za energijom. Operateri distribucijske mreže zbog toga naplaćuju mjesečnu naknadu na temelju vršne snage koja je korištena u najopterećenijem trenutku.

Za optimizaciju troškova i povećanje profita, ključno je upravljati vršnom snagom. Jedna od učinkovitih strategija je pohrana energije u razdobljima niske potrošnje putem baterijskih sustava. Tijekom perioda visokih zahtjeva za energijom, ta se energija može vratiti u mrežu ili koristiti za punjenje vozila, čime se smanjuju vršna opterećenja. Takav sustav ne samo da smanjuje troškove za operatera punionice, već i doprinosi stabilnosti i učinkovitosti elektroenergetske mreže, smanjujući opterećenja na infrastrukturu. Implementacija ovih metoda, uz korištenje inteligentnih sustava upravljanja energijom, može značajno poboljšati

dugoročnu održivost i financijsku isplativost punionica za električna vozila. Trošak vršne snage u Hrvatskoj iznosi 5.18 EUR/kW mjesečno [29].



Slika 5.13. Smanjenje opterećenja u vršnim satima

2.8. Različiti modeli naplate

Za maksimiziranje profita bitno je imati model naplate koji prinosi najviše zarade, ali opet smislen kako bi se vozačima električnih automobila isplatilo doći u ovu punionicu. Postoje različiti načini na koje se može vršiti naplata te će se u ovom modelu koristiti neke koje se primjenjuju u Europi. Bitno je uključiti to da se brzo punjenje naplaćuje više po kWh od sporog zato što takvo punjenje više opterećuje sustav u kraćem vremenskom roku stoga zahtjeva veću cijenu. U modelu će se uzeti da je srednje brzo punjenje koje traje 3h za 2.2 puta skuplje, a brzo punjenje koje traje 1h za 8.5 puta skuplje od normalnog punjenja. Takve cijene su približne kakve su danas u Hrvatskoj [30].

Modeli koji se koriste u ovom radu su:

- **Dvotarifni** – ovaj model razlikuje dvije tarife, dnevnu i noćnu, u dnevnoj (od 7 h do 22 h) normalno punjenje iznosi 0.1 EUR/kWh, dok u noćnoj (od 22 h do 7 h) iznosi 0.08 EUR/kWh

- **Višetarifni** – ovaj model ima 4 različite tarife kako bi se realnije prikazalo mijenjanje dnevnih cijena električne energije, zbog utjecaja solarnih elektrana cijena oko 12 h je relativno niska
 - 1) Od 7 h do 10 h i od 14 h do 18 h – normalno punjenje 0.1 EUR/kWh
 - 2) Od 10 h do 14 h – normalno punjenje 0.09 EUR/kWh
 - 3) Od 18 h do 22 h – normalno punjenje 0.15 EUR/kWh
 - 4) Od 22 h do 7 h – normalno punjenje 0.08 EUR/kWh
- **Dinamički** – ovaj se model zasniva na tome da svaki sat ima različitu vrijednost naplate te će se za normalno punjenje uzimati vrijednost jednaka vrijednosti koja je 10% veća od day-ahead vrijednosti za taj dan

Ti modeli naplate vrijede za punjenje električnih vozila dok vozila za vodik imaju fiksnu cijenu u svim satima po kilogramu vodika koja iznosi 16.5 EUR/kg [31].

2.9. Jednadžbe koje opisuju model

Model je opisan s pomoću niza jednadžbi i nejednadžbi koje opisuju model iz kojih gurobi optimizacijski alat pronalazi najbolje rješenje prema zadanoj funkciji cilja. Jednadžbe predstavljaju parametre svakog od pojedinih uređaja koji se nalaze u modelu.

2.9.1. Jednadžbe elektrolizatora i gorivne ćelije

Jednadžbe koje opisuju elektrolizator i gorivnu ćeliju su jednostavne. Postavljene su njihove efikasnosti kao konstantne vrijednosti te im je zadana maksimalna vrijednost.

$$H_{\text{vodik}}^t = H_{\text{en}}^t \cdot \eta_H, \forall t \in T \quad (1)$$

$$H_{\text{en}}^t \leq H_{\text{maks}}, \forall t \in T \quad (2)$$

$$FC_{en}^t = FC_{vodik}^t \cdot \eta_{FC}, \forall t \in T \quad (3)$$

$$FC_{vodik}^t \leq FC_{maks}, \forall t \in T \quad (4)$$

Jednadžbe (1) i (2) se odnose na ograničenja elektrolizatora dok se (3) i (4) odnose na ograničenja gorivne ćelije. Varijabla H_{en}^t se odnosi na električnu energiju u satu na ulazu u elektrolizator dok je η_H koeficijent efikasnost da se dobije H_{vodik}^t vodik koji dobijemo u svakom satu. H_{maks} je maksimalna energija koju se može iskoristiti u satu. Varijabla FC_{vodik}^t se odnosi na vodik u satu na ulazu u gorivnu ćeliju dok je η_{FC} koeficijent efikasnost da se dobije FC_{en}^t električna energija koji dobijemo u svakom satu. FC_{maks} je maksimalna količina vodika koju se može iskoristiti u satu.

2.9.2. Jednadžbe spremnika energije

Spremnici energije imaju više nejednadžbi kako bi se opisao njihov rad. S obzirom na to da su oba spremnika prikazana istim setom jednadžbi prikazat će se jedan set koji se odnosi na bateriju.

$$SoC_{bs}^t = SoC_{bs}^{t-1} + P_{ch}^t \cdot \eta_{ch} - \frac{P_{dis}^t}{\eta_{dis}}, \forall t \in T \quad (5)$$

$$0 \leq P_{ch}^t \leq P_{ch,max}^t \cdot N_{ch,bin}^t, \forall t \in T \quad (6)$$

$$0 \leq P_{dis}^t \leq P_{dis,max}^t \cdot N_{dis,bin}^t, \forall t \in T \quad (7)$$

$$N_{ch,bin}^t + N_{dis,bin}^t \leq 1, \forall t \in T \quad (8)$$

$$0 \leq SoC_{bs}^t \leq SoC_{bs,max}^t, \forall t \in T \quad (9)$$

Napunjenost baterije SoC_{bs}^t (state of charge) je uvijek veće ili jednako 0 te manje ili jednako od maksimalne napunjenosti $SoC_{bs,max}^t$. Dok P_{ch}^t predstavlja vrijednost za koliko se baterija napuni u jednom satu, P_{dis}^t vrijednost za koliko se baterija isprazni u jednom satu. Iskoristivost punjenja η_{ch} i iskoristivost pražnjenja η_{dis} također su uključene. Uključene su i binarne varijable $N_{ch,bin}^t$ i $N_{dis,bin}^t$ koje osiguravaju da se baterija ne puni i prazni u isto vrijeme.

2.9.3. Jednadžba jednakosti energije

Nužno je povezati sve različite uređaje u jednadžbu kako bi radili skupa. S obzirom na to da su u ovom modelu uključeni električna energija i vodik svaki od njih ima svoju jednadžbu koja ih povezuje.

$$P_{trošak}^t = P_{solari}^t - P_{chBat}^t + P_{disBat}^t - P_{el}^t + P_{fc}^t + P_{kupljeno}^t - P_{višak}^t, \forall t \in T \quad (10)$$

Jednadžba (10) izjednačava električnu energiju koji trošimo na punjenje automobila s električnom energiju koju uređaji proizvode i električnom energiju koju uzimamo iz mreže. $P_{trošak}^t$ predstavlja trošak električne energije u satu koju troše automobili koji se pune. P_{solari}^t je snaga koju proizvedu solari u satu. Punjenje i pražnjenje baterije predstavljaju P_{chBat}^t i P_{disBat}^t . Na ulazu u elektrolizator je električna energija P_{el}^t , dok je na izlazu iz gorivne ćelije P_{fc}^t . $P_{kupljeno}^t$ je električna energija koju je potrebno kupiti u svakom satu. $P_{višak}^t$ je varijabla koja služi za slučajeve ako nije moguće zadovoljiti jednakost da se energija vraća u mrežu te se za to dobije naknada od operatora.

$$H_{trošak}^t = H_{chVod}^t + H_{disVod}^t + H_{el}^t - H_{fc}^t, \forall t \in T \quad (11)$$

Jednadžba (11) se odnosi na jednakost proizvodnje i potrošnje vodika. $H_{trošak}^t$ predstavlja trošak vodika u satu koji troše automobili na vodik. Varijable H_{chVod}^t i H_{disVod}^t predstavljaju punjenje i pražnjenje spremnika vodika. H_{el}^t je količina vodika koju proizvede elektrolizator, dok je H_{fc}^t količina vodika koja se pretvori u električnu energiju u gorivnoj ćeliji u satu.

2.9.4. Funkcija cilja

$$\sum_{t=1}^T c_{kup}^t \cdot P_{kup}^t - c_{prijodE}^t \cdot P_{prijodE}^t - c_{prijodH}^t \cdot H_{prijodH}^t - c_{višak}^t \cdot P_{višak}^t + \sum_{t=1}^{12} c_{VS}^t \cdot P_{VS}^t \quad (12)$$

Funkcija cilja (12) modela je minimizirati trošak tako da model u satima kada je struja skupa jeftina ili skupa koristi uređaje i spremnike kako bi se ta energija koristila efikasnije. P_{kup}^t je električna energija potrošena u satu, a c_{kup}^t cijena električne energije u satu. $P_{prijodE}^t$ je električna energija koja je utrošena na punjenje električnih vozila s baterijom, a $c_{prijodE}^t$ cijena naplate za punjenje automobila. $H_{prijodH}^t$ je količina vodika koja je utrošena na punjenje električnih vozila s gorivnim člankom, a $c_{prijodE}^t$ cijena naplate po kilogramu vodika za punjenje automobila. $P_{višak}^t$ je električna energija u satu koja je višak proizvodnje iz fotonaponskih ćelija te se vraća u mrežu, a $c_{višak}^t$ je cijena po kojoj se energija vraća u mrežu a iznosi 90 % od cijene po kojem se kupuje energija u satu. P_{VS}^t je vršna snaga u mjesecu, a c_{VS}^t cijena vršne snage po kW potrošenom u mjesecu.

3. Rezultati za različite scenarije

U dosadašnjem radu je opisan model te su dane vrijednosti koje se koriste kao i troškovi koje je potrebno pokriti kako bi se električna punionica isplatila. Te vrijednosti će se uzeti kao bazni model te će se različiti scenariji uspoređivati s baznim modelom. Različiti scenariji će biti za različite vrijednosti ulaznih parametara. Bitni pokazatelj isplativosti modela je vrijeme povrata novca koje se računa jednostavno tako da se ukupna investicija dijeli s godišnjom dobiti.

3.1. Rezultati baznog modela

Bazni model se sastoji od tri lokacije kojima je model naplate dvotarifni. Usporedit će se njihov ukupni trošak te njihova dobit kako bi se dobilo vrijeme povrata investicije. Troškovi izgradnje su troškovi svih uređaja i opreme koji su opisani u ranijim poglavljima. Godišnja dobit je rezultat funkcije cilja koji nam daje model s obzirom na to da je vrijeme analiziranja jedna godina. Dakle, vrijeme isplate je dobiveno metodom diskontiranog razdoblja povrata investicije [32]. Razdoblje povrata investicije je najmanji broj razdoblja (godina) u kojima će neto novčani tokovi biti veći od investicijskih troškova.

$$I = \sum_{t=1}^{t_p} \frac{F_p}{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^t} \quad (13)$$

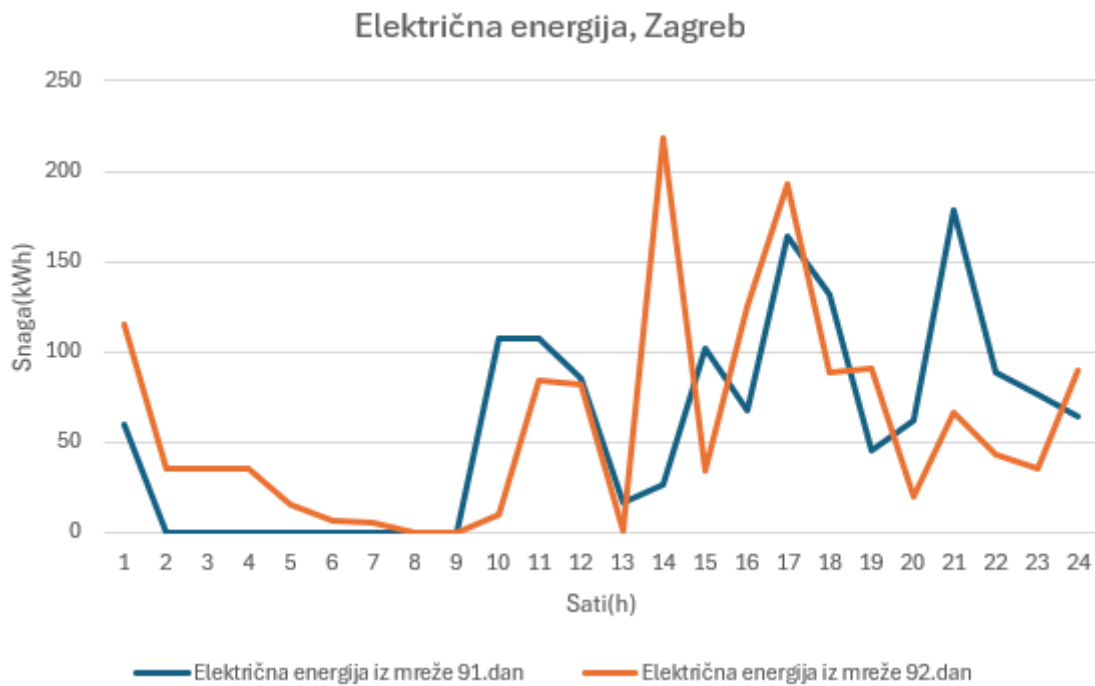
U jednadžbi (13) I predstavlja investicijske troškove, t_p predstavlja vrijeme povrata, a F_p predstavlja novčani tok u godini t , te p predstavlja diskontnu stopu koja iznosi 3 %.

Tablica 3. Usporedba lokacija za bazni model

Lokacija	Trošak izgradnje (EUR)	Godišnja dobit (EUR)	Vrijeme isplate (god)
Zagreb	1 274 450	81 282	21.50
Autocesta	1 215 650	112 540	13.25
Dubrovnik	1 215 650	72 698	23.56

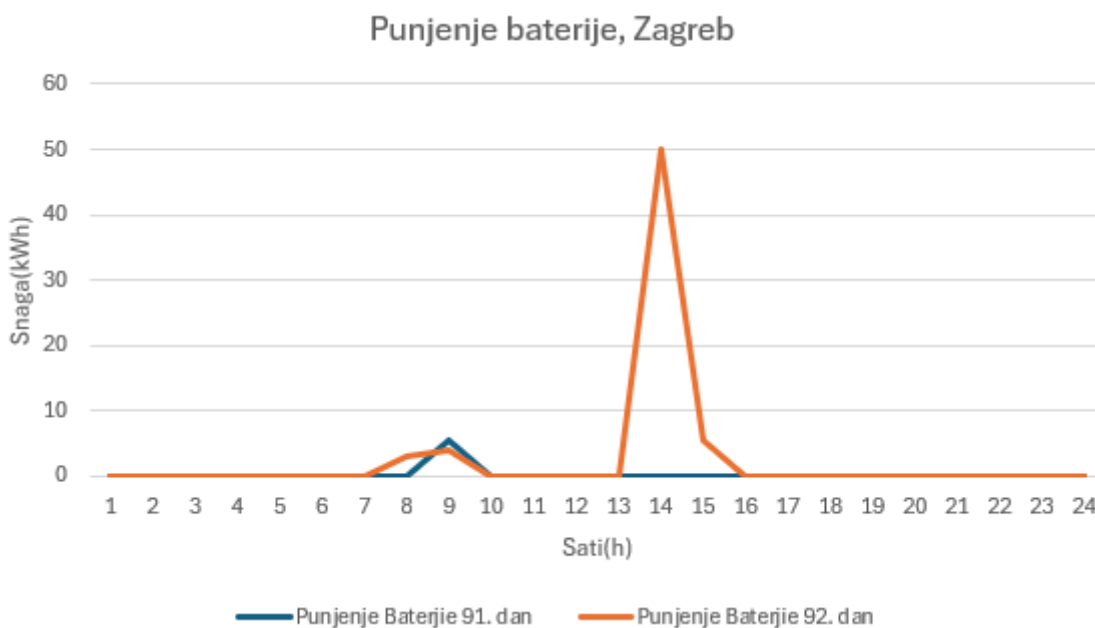
Dakle, iz tablice 3. možemo zaključiti kako je s ovim parametrima najisplativije izgraditi punionicu na autocesti. To je moguće jer električni automobili imaju kraći domet od vozila na unutarnje izgaranje pa je potrebno češće puniti pri dugim vožnjama.

Prikazat će se rad nekih bitnih uređaja u modelu kako bi se mogao procijeniti njihov utjecaj. S obzirom na to da model ima više lokacija uzet će se samo jedna (Zagreb) zato što je rad uređaja sličan u svim lokacijama. Svaki dijagram će se sastojati od 91. i 92. dana u godini koji su odabrani nasumično. Također svakom vrtnjom modela rezultati će biti drugačiji za pojedini dan s obzirom na to da dolazak vozila u svakom satu ima neku vjerojatnost.



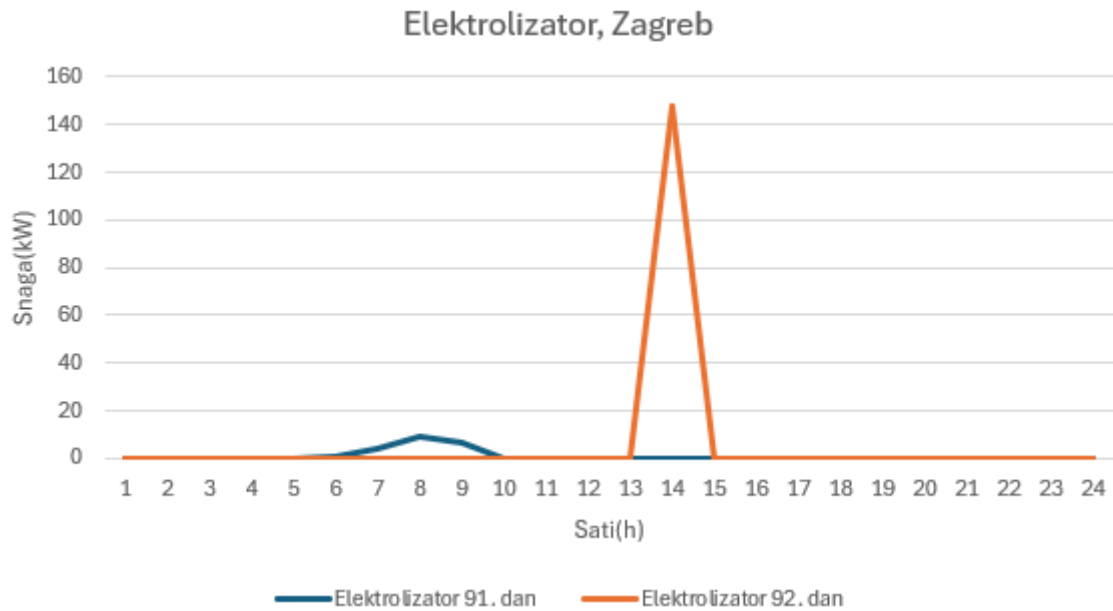
Slika 6.1. Kupljena električna energija iz mreže za bazni model u 91. i 92. danu

Na slici 6.1. se vidi da je znatno više kupljeno struje u noćnim satima što odgovara opterećenju. Također se u nekim satima uzimanje iz mreže smanji na niske vrijednosti (13h i 14h u 91.danu, 13h u 92. danu) jer je tad relativno nisko opterećenje, a fotonaponske ćelije najviše proizvode.



Slika 6.2. Punjenje baterije za bazni model u 91. i 92. danu

Na slici 6.2. se vidi da se baterijski spremnik puni u samo nekim satima tijekom dana, kada proizvode fotonaponske ćelije, a opterećenje je nisko (od 7h do 10h), dok se u popodnevnim satima (od 14h do 15h) puni jer je tada niska cijena električne energije zbog velike proizvodnje fotonaponskih ćelija. Tada se baterijski spremnik puni iz mreže.



Slika 6.3. Električna energija u elektrolizatoru za bazni model u 91. i 92. danu

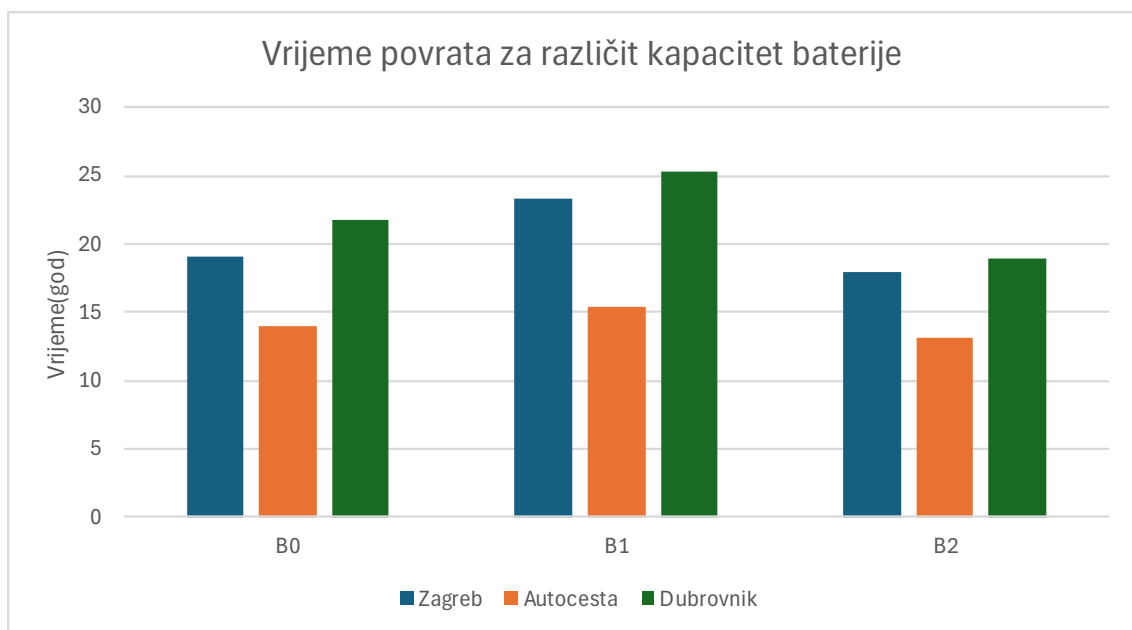
Na slici 6.3. se vidi da je krivulja elektrolizatora slična kao krivulja baterijskog spremnika. U popodnevnom satu (14h u 92. danu) se pretvara električna energija u vodik jer je tada sustavu najpovoljnije dobiti vodik kako bi se mogla puniti električna vozila s gorivnim člankom.

3.2. Rezultati različitih slučaja

Dosad su prikazani samo rezultati baznog modela te je samo iz njega teško vidjeti koliko koja komponenta utječe na isplativost punionice. Stoga će se za usporedbi mijenjati vrijednosti nekih komponenti te uspoređivati s baznim modelom.

3.2.1. Usporedba različitog kapaciteta baterije

- B0 – bazna vrijednost 50 kWh
- B1 – vrijednost 10 kWh
- B2 – Vrijednost 200 kWh



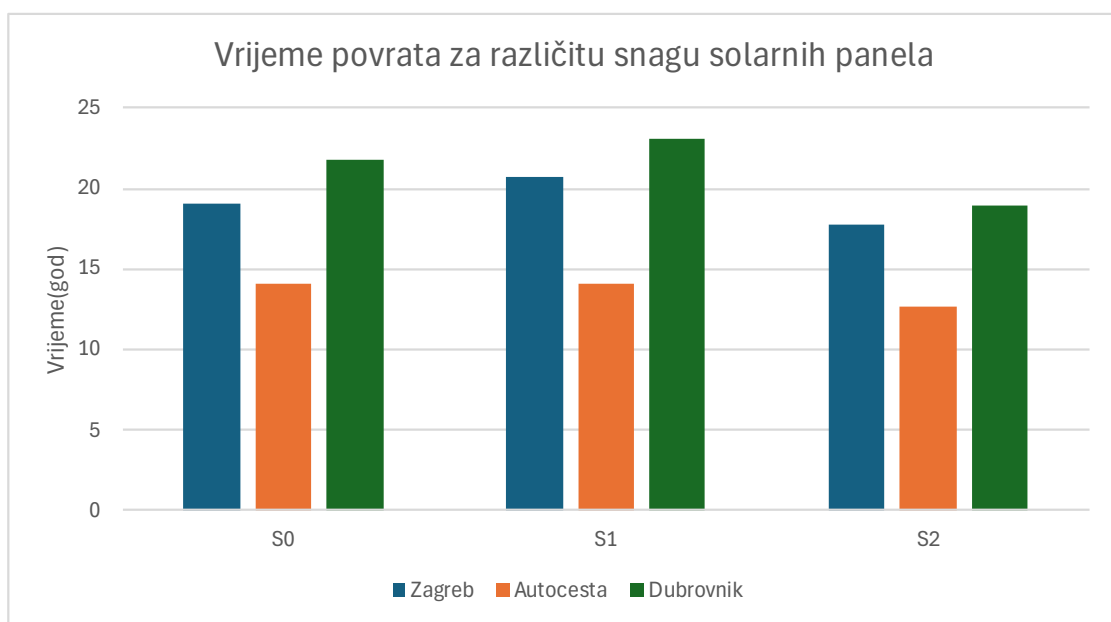
Slika 6.6. Usporedba različitog kapaciteta baterije

Na slici 6.6. se vidi da kapacitet spremnika energije utječe na vrijeme povrata. Slučaj s većim kapacitetom B2 ima kraće vrijeme povrata što govori da je s većim kapacitetom moguće više spremiti energije pri niskim satima. Također slučaj B1 kad je kapacitet baterije nizak može se primijetiti razlika u vremenu isplate. Znači za lokaciju Dubrovnik baterija s kapacitetom

10kWh ima vrijeme isplate od blizu 23 godine dok baterija s kapacitetom 200kWh ima manje od 20 godina.

3.2.2. Usporedba različite snage solarnih panela

- S0 – bazna vrijednost 20 kW
- S1 – vrijednost 5 kW
- S2 – Vrijednost 50 kW

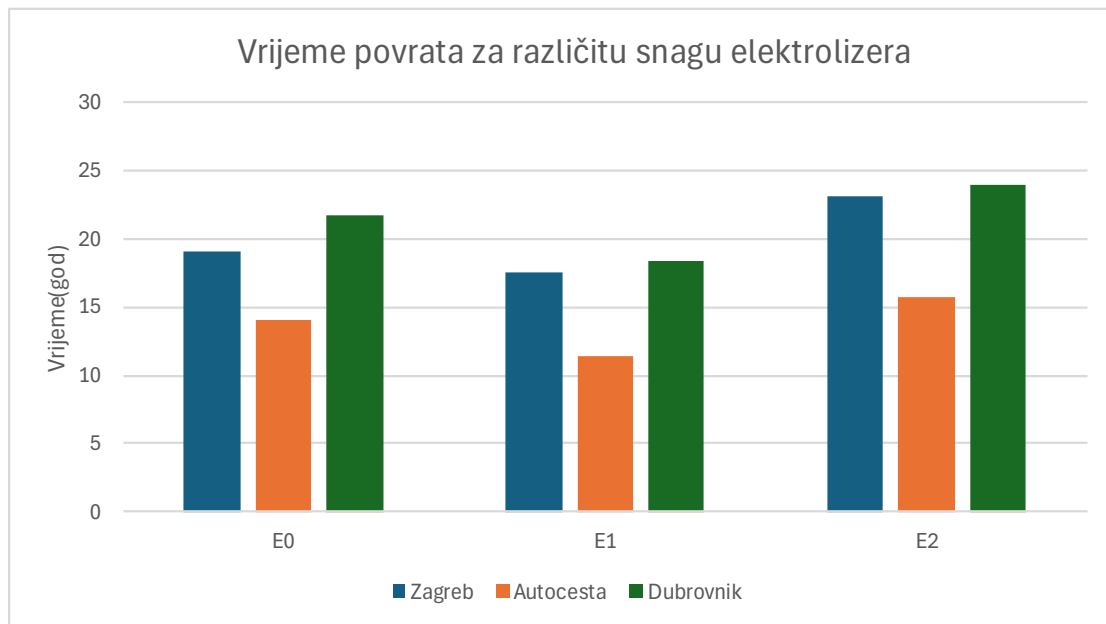


Slika 6.7. Usporedba različite snage solarnih panela

Na slici 6.7. se vidi da snaga solarnih panela znatno utječe na vrijeme povrata. Veća snaga solarnih panela znači kraće vrijeme povrata. To ima smisla jer cijena izgradnje solarnih panela je dovoljno malena, a snaga koju proizvode solarni paneli znatno doprinosi isplativosti, jer u tim satima kada solari najviše proizvode ima i dosta prometa. Također je bitno da kapacitet nije prevelik jer tada je moguće da se ne može potrošiti a niti spremi u neki od spremnika, onda se samo vraća u mrežu.

3.2.3. Usporedba različitih snaga elektrolizatora

- E0 – bazna vrijednost 550 kW
- E1 – vrijednost 300 kW
- E2 – Vrijednost 800 kW

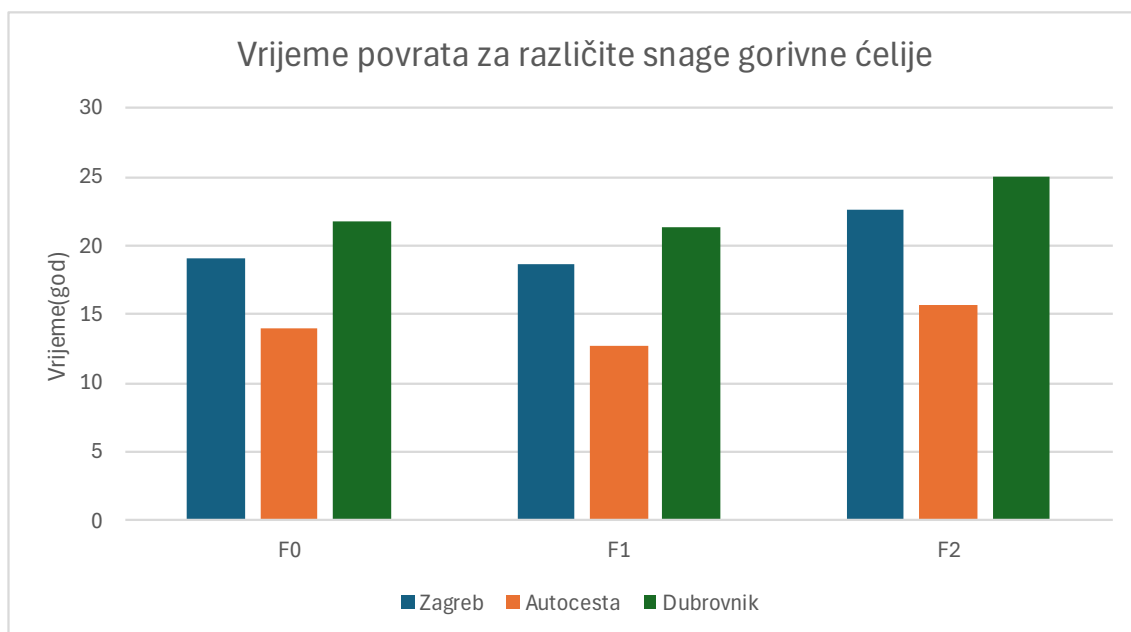


Slika 6.8. Usporedba različite snage elektrolizatora

Na slici 6.8. se vidi kako je vrijeme povrata najkraće u slučaju E1, a najveće u slučaju E2. Dakle, može se zaključiti da smo u baznom modelu uzeli elektrolizator prevelike snage za naše potrebe. S obzirom na to da je elektrolizator relativno skup uređaj za visoke snage, više se isplati uzeti uređaj manje snage koji je dovoljan da su sve potrebe vodika zadovoljene.

3.2.4. Usporedba različitih snaga gorivne ćelije

- F0 – bazna vrijednost 120 kW
- F1 – vrijednost 72 kW
- F2 – Vrijednost 240 kW

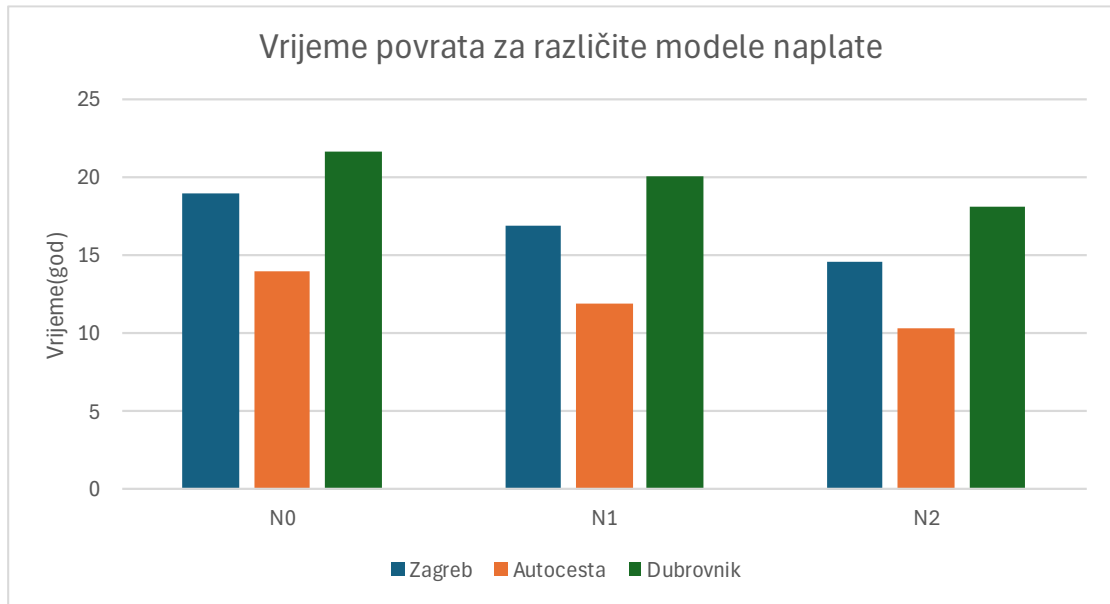


Slika 6.9. Usporedba različite snage gorivne ćelije

Na slici 6.9. se vidi kako su slučajevi F0 i F1 sličnih vrijednosti te se može zaključiti kako je pri nižim vrijednostima snage gorivne ćelije slično vrijeme povrata. Vrijeme povrata F2 je više od ostalih slučajeva što znači da taj povećani kapacitet nije potreban jer se rijetko događaju situacije u modelu kada je potrebno koristiti gorivnu ćeliju. Dakle, manja snaga gorivne ćelije je sasvim dovoljna. Postavlja se također pitanje je li gorivna ćelija uopće potrebna.

3.2.5. Usporedba različitih modela naplate

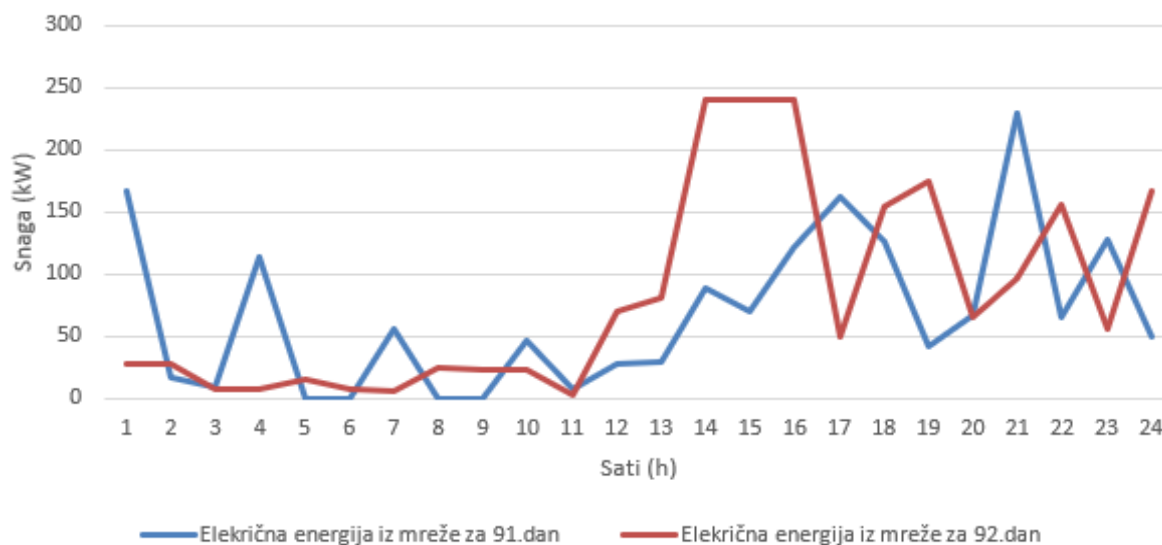
- N0 – bazna vrijednost dvotarifno
- N1 – višetarifno
- N2 – dinamičke cijene, prate dan unaprijed cijene



Slika 6.10. Usporedba različitog modela naplate

Na slici 6.10. se vidi kako su dinamički i višetarifni model naplate isplativiji od klasičnog dvotarifnog. To je zato što takvi modeli imaju više cijene u istim satima kada su i najveća opterećenja punionice te su stoga isplativiji. Dinamički model je najisplativiji jer sati u kojima je najskuplja cijena električne energije također i najveći dolazak električnih vozila što znači veću zaradu. No, pitanje je kada će i ako će takvi modeli naplate zaživjeti u Hrvatskoj.

Kupljena električna energija pri dinamičkim cijenama, autocesta



Slika 6.11. Kupljena električna energija iz mreže za slučaj N2 u 91. i 92. danu

Na slici 6.11. je prikazana energija koja se kupuje iz mreže u 91. i 92. danu. Vidljivo je kao i baznom modelu da se najviše energije kupuje u popodnevnim satima kad je najveće opterećenje. Također se vidi kako se u noćnim satima troši kako bi se napunila baterija. Može se primijetiti na krivulji što prikazuje 92. dan kako je u popodnevnim satima (od 14h do 16h) potpuno jednaka energija iz mreže što govori kako je u tim satima dosegnuta vršna snaga koju model povlači iz mreže u tom mjesecu. Dakle u tim satima se troše spremnici energije kako ne bi bilo potrebno uzimati više iz mreže.

4. Dimenzioniranje komponenti

Nakon što su analizirani različiti slučajevi te dobivene vrijednosti za različite komponente, postavlja se pitanje koja je optimalna nazivna snaga komponenti. Stoga je potrebno u model uključiti trošak svake od komponenti kako bi model dao optimalnu vrijednost za ovu punionicu. Uređaji koji će se dimenzionirati su baterijski spremnik, elektrolizator te gorivni članak. Optimalna vrijednost nazivne snage komponenti se dobije tako da se u funkciju cilja modela uključi i trošak uređaja [33].

$$\sum_{t=1}^T c_{kup}^t \cdot P_{kup}^t - c_{prihode}^t \cdot P_{prihode}^t - c_{prihodH}^t \cdot H_{prihodH}^t - c_{višak}^t \cdot P_{višak}^t + \sum_{t=1}^{12} c_{VS}^t \cdot P_{VS}^t + c_K \cdot P_K \quad (14)$$

Funkcija cilja (14) za model koji pronalazi optimalnu vrijednost komponenti je slična kao i funkcija cilja (12) za bazni model samo što je sada dodan trošak komponente po nazivnoj snazi $c_K \cdot P_K$. Model je izvršen za svaku od tri komponente te su dobivene vrijednosti koje su u tablici 4. nazvane optimalne vrijednosti. Budući da su te optimalne vrijednosti decimalni brojevi odabrane su vrijednosti koje su realne, a dovoljno su blizu optimalnim vrijednostima.

Tablica 4. Vrijednosti dimenzioniranih komponenti

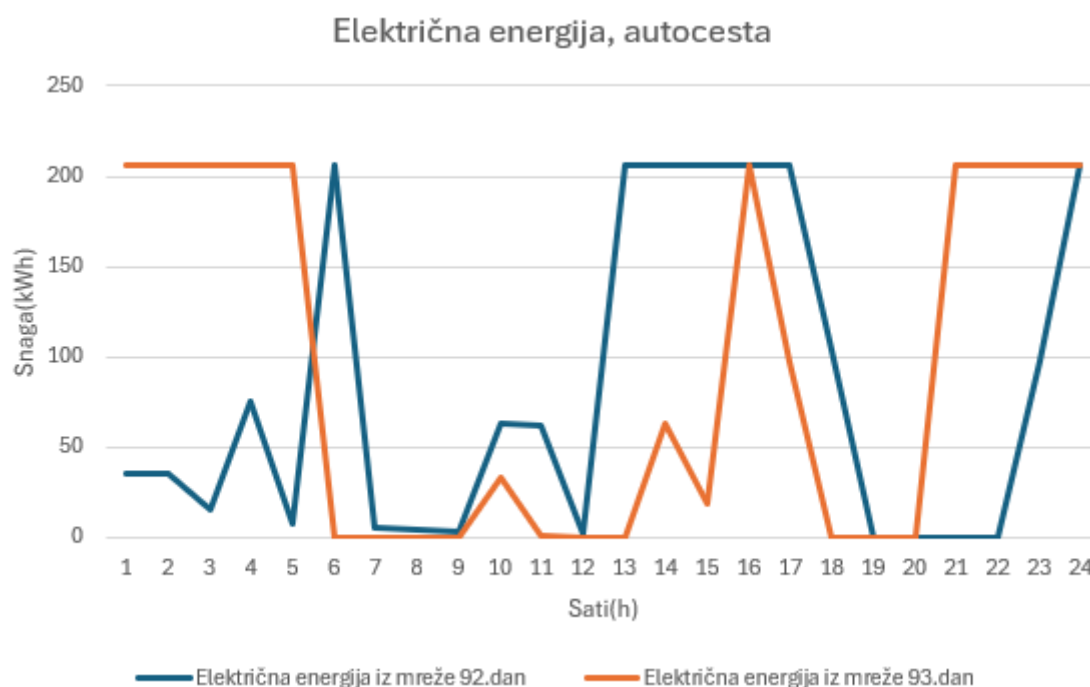
Komponenta	Optimalna vrijednost	Odabrana vrijednost
Baterija	601.59 kWh	600 kWh
Elektrolizator	101.41 kW	100 kW
Gorivna ćelija	11.28 kW	-

Tablica 5. Vrijeme isplate po lokacijama s dimenzioniranim komponentama

Lokacija	Vrijeme isplate (god)
Zagreb	9.59
Autocesta	7.94
Dubrovnik	10.58

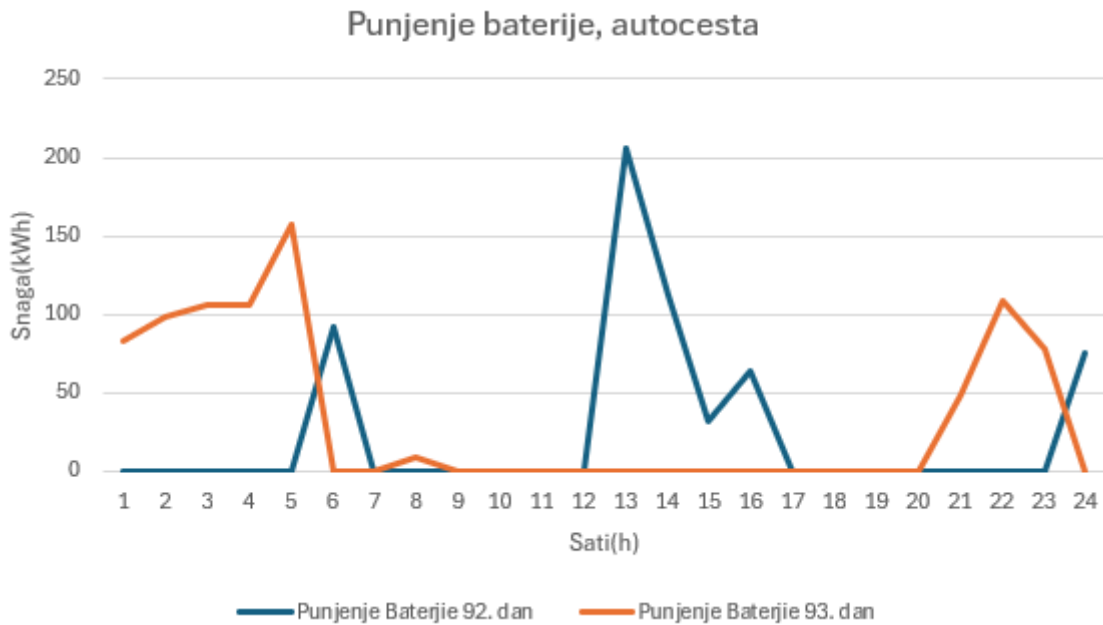
Uspoređujući tablicu 3. iz baznog modela te tablicu 5. s modelom koji ima optimalno dimenzionirane komponente vidi se da je vrijeme isplate znatno kraće s optimalnim komponentama. Kapacitet baterije se povećao s 50 kWh na 600 kWh, elektrolizator smanjio s 550 kW na 100 kW, dok gorivnu ćeliju uopće ne koristimo više jer je optimalni iznos nazivne snage prenizak da bi se uopće isplatio imati gorivnu ćeliju. Vidljivo je također da je sada punionica na lokaciji autoceste također najisplativija, no sada je znatnije isplativija od ostalih lokacija. To ima smisla jer veći kapacitet baterije najviše pogoduje lokaciji koja ima najveći trošak energije.

Prikazat će se rad nekih uređaja za slučaj s dimenzioniranim komponentama na lokaciji autocesta jer se ta lokacija pokazala kao najisplativija.



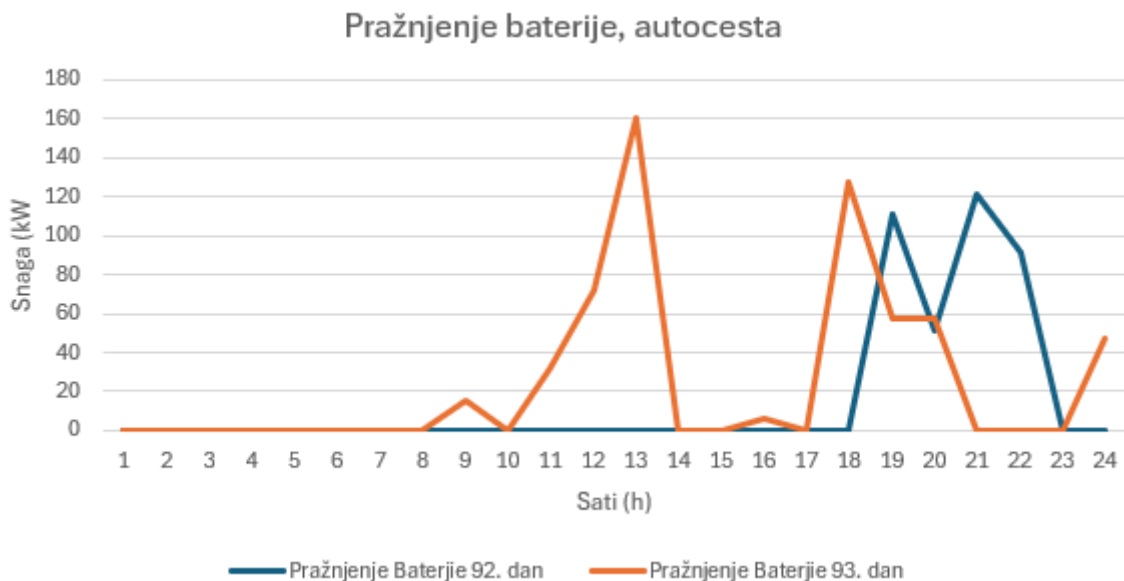
Slika 7.1. Kupljena električna energija iz mreže za model s dimenzioniranim komponentama u 92. i 93. danu

Na slici 7.1. se vidi kako se u velikom broju sati doseže vršna snaga u tom mjesecu u kojem se nalaze 92. i 93. dan (travanj). Vidi se da se ta energija najviše uzima iz mreže u popodnevним ili noćnim satima kad se puni baterija.



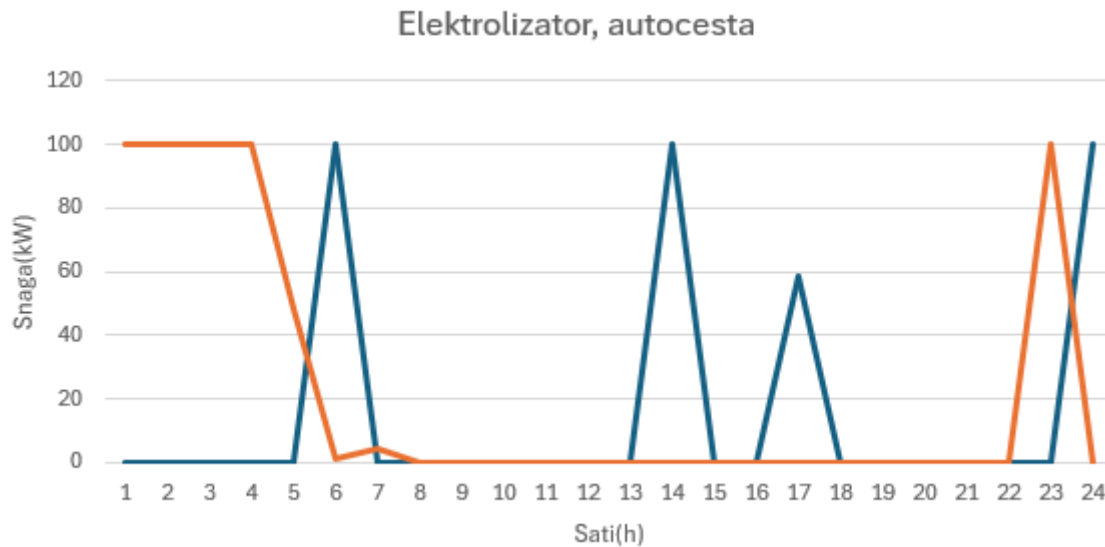
Slika 7.2. Punjenje baterije za model s dimenzioniranim komponentama u 92. i 93. danu

Na slici 7.2. se vidi kako se baterija puni najviše u noćnim satima te u popodnevним kad je visoka proizvodnja fotonaponskih ćelija.



Slika 7.3. Punjenje baterije za model s dimenzioniranim komponentama u 92. i 93. danu

Na slici 7.3. se vidi da se baterija praznila u jutarnjim satima u 93. danu kada su bile cijene dovoljno visoke za to, također se vidi da se u oba dana praznila baterija u popodnevним satima kad su standardno više cijene.



Slika 7.4. Električna energija u elektrolizatoru za model s dimenzioniranim komponentama u 92. i 93. danu

Na slici 7.4. se vidi kako se elektrolizator najviše koristi u noćnim satima kada su najniže cijene električne energije te u popodnevним satima kada je proizvodnja fotonaponskih ćelija visoka.

5. Zaključak

U radu je analizirana i optimizirana hibridna punionica za baterijska i vozila s gorivnim člankom, s ciljem postizanja energetski efikasnog i ekonomičnog rješenja u kontekstu sve brže energetske tranzicije. Implementacija takvih punionica predstavlja ključni korak prema održivoj infrastrukturi, nužnoj za podršku rastućeg broja električnih vozila. Kroz korištenje naprednih tehnologija poput elektrolizatora, gorivnih ćelija i baterijskih sustava za pohranu energije, moguće je smanjiti operativne troškove, povećati fleksibilnost i osigurati kontinuiranu opskrbu energijom. Optimizacija dimenzioniranja komponenti ovih sustava dodatno doprinosi ekonomskoj održivosti projekta. Ovaj rad pokazuje kako dizajnirana punionica može olakšati prijelaz na niskougljične izvore energije, koristeći vezu između baterijskih i vodikovih tehnologija. Takva infrastruktura ima ne samo pozitivan utjecaj na vlasnika, već i na širu zajednicu, jer ubrzava proces energetske tranzicije i doprinosi smanjenju emisije ugljičnog dioksida na lokalnoj i globalnoj razini.

Literatura

- [1] Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011 (recast) (Text with EEA relevance.), sv. 111. 2019. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj/eng>
- [2] Uredba (EU) 2021/1119 Europskog parlamenta i Vijeća od 30. lipnja 2021. o uspostavi okvira za postizanje klimatske neutralnosti i o izmjeni uredaba (EZ) br. 401/2009 i (EU) 2018/1999 („Europski zakon o klimi“), sv. 243. 2021. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/hrv>
- [3] „Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work?“ Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [4] „Alternative Fuels Data Center: How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?“ Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- [5] M. Spendiff-Smith, „EV Charging Connector Types: A Complete Guide - EVESCO“, Power Sonic. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.power-sonic.com/blog/ev-charging-connector-types/>
- [6] epunjaci, „E-PUNJAČI | Kako sigurno napuniti električni automobil kod kuće | Blog“, E-Punjači. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://epunjaci.hr/2021/10/14/kako-sigurno-napuniti-elektricni-automobil-kod-kuce/>
- [7] „DC Fast EV Charging Grant Program | NMDOT“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.dot.nm.gov/event/dc-fast-ev-charging-grant-program/>
- [8] „Solarni baterijski spremnici - Međimurka BS“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://medjimurka-bs.hr/kategorija-proizvoda/solarni-sustavi/solarni-baterijski-spremnici/>
- [9] „Hydrogen-Powered Cars: Fuel Cell Electric Vehicles Explained | PCMag“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.pcmag.com/how-to/hydrogen-powered-cars-fuel-cell-electric-vehicles-explained>
- [10] S. DiNello, „How Much Do EV Charging Stations Cost?“, Future Energy. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://futureenergy.com/ev-charging/how-much-do-ev-charging-stations-cost/>

- [11] „How much does a 100kw dc fast charger cost? - Pilotess“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.pilotenergystorage.com/2022/10/18/100kw-dc-fast-charger-cost/>
- [12] „Priključenje na mrežu“, hep.hr. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.hep.hr/ods/pristup-mrezi/prikljucenje-na-mrezu-28/28>
- [13] „21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf?Status=Master>
- [14] „Race for EV charging stations intensifies for market dominance“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://m.koreaherald.com/view.php?ud=20211130000633>
- [15] L. Richard i M. Petit, „Fast Charging Station with Battery Storage System for EV: Optimal Integration into the Grid“, u 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR: IEEE, kol. 2018, str. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2018.8585856.
- [16] „The Most Popular EVs of 2023 | EnergySage“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.energysage.com/electric-vehicles/most-popular-evs/>
- [17] „Hydrogen Cars: Everything You Need To Know“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/>
- [18] „Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: an integrated approach | Emergent Materials“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42247-024-00697-y>
- [19] „Electrolyzer prices – what to expect“, pv magazine International. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.pv-magazine.com/2024/03/21/electrolyzer-prices-what-to-expect/>
- [20] „PEM | ITM“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://itm-power.com/how-it-works/pem>
- [21] „Hydrogen electrolysis | AHDB“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/hydrogen-electrolysis>
- [22] „Horizon Educational - Hydrogen Guide: Are Fuel Cell Stacks Really Worth It?“ Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.horizoneducational.com/hydrogen-guide-are-fuel-cell-stacks-really-worth-it/t1429?currency=usd>
- [23] www.ETEnergyworld.com, „GM targets hydrogen-powered generators in expansion of fuel cell business - ET EnergyWorld“, ETEnergyworld.com. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://energy.economictimes.indiatimes.com/news/renewable/gm-targets-hydrogen-powered-generators-in-expansion-of-fuel-cell-business/89013147>

- [24] „Cjenici - cijene 2024: Solarna elektrana - Trebam.hr“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.trebam.hr/cijene/solarno-grijanje/solarna-elektrana-cijena>
- [25] „Što su solarni paneli i kako proizvode struju?“ Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.energianaturalis.hr/zelim-znati/sto-su-solarni-paneli-i-kako-proizvode-struju>
- [26] „How Much Does a Lithium-Ion Battery Cost in 2024?“ Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://lawnlove.com/blog/lithium-ion-battery-cost/>
- [27] „qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://escholarship.org/content/qt83p5k54m/qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf?t=s9oa2u
- [28] „Comprehensive Review of Hydrogen Storage Methods: Best Practices and Technologies for the Future“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.hydrogennewsletter.com/comprehensive-review-of-hydrogen-storage-methods-best-practices-and-technologies-for-the-future/>
- [29] „Tarifni modeli“, hep.hr. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.hep.hr/ods/korisnici/kucanstvo/tarifni-modeli/34>
- [30] P. Kranjcec, „Cijene punjenja električnih vozila (ažurirano za 2024.)“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://postanivozac.com/blog/cijene-punjenja-elektricnih-vozila>
- [31] „Cost to refill | Hydrogen Fuel Cell Partnership“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://h2fcp.org/content/cost-refill>
- [32] „01_Isplativost-KM_20130131.pdf“. Pristupljeno: 10. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://elfarchive1718.foi.hr/pluginfile.php/54360/mod_resource/content/0/01_Isplativost-KM_20130131.pdf
- [33] E. Heath, R. Wolbertus, i R. Heller, „Optimal Sizing of a Battery-Supported Electric Vehicle Charging Hub with a Limited-Capacity Grid Connection“, World Electr. Veh. J., sv. 15, izd. 4, str. 133, ožu. 2024, doi: 10.3390/wevj15040133.

Sažetak

Optimizacija investicije i pogona hibridne punionice za baterijska i vodikova vozila

Rad se bavi analizom i optimizacijom infrastrukture za punjenje električnih vozila i vozila s gorivnim člankom. U kontekstu sve brže energetske tranzicije, studija istražuje kako implementirati hibridne punionice koje koriste tehnologije poput elektrolizatora, gorivnih ćelija i baterijskih sustava za pohranu energije. Glavni cilj rada je što vjernije modelirati rad jedne takve punionice u svrhu maksimizacije profita. Kroz optimizaciju dimenzioniranja ključnih komponenti, ovaj rad nudi rješenje za podršku rastućem broju električnih vozila. Uvođenje takvih punionica ne donosi samo koristi za vlasnike, već i za širu zajednicu, jer ubrzava prijelaz na niskougljične izvore energije i doprinosi energetskej tranziciji, što ima pozitivan utjecaj na lokalnoj i globalnoj razini.

Ključne riječi: punionica električnih vozila, elektrolizator, gorivne ćelije, baterijski sustavi, Gurobi model, optimizacija troškova

Summary

Optimization of investment and operation of hybrid charging stations for battery and hydrogen vehicles

The paper focuses on the analysis and optimization of infrastructure for charging electric vehicles and fuel cell vehicles. In the context of the rapidly accelerating energy transition, the study explores how to implement hybrid charging stations that utilize technologies such as electrolyzers, fuel cells, and battery storage systems. The main goal of the paper is to accurately model the operation of such a charging station to maximize profits. By optimizing the sizing of key components, this paper offers a solution to support the growing number of electric vehicles. The introduction of such charging stations benefits not only the owners but also the wider community, as it accelerates the transition to low-carbon energy sources and contributes to the energy transition, having a positive impact both locally and globally.

Keywords: electric vehicle charging station, electrolyzer, fuel cell, battery systems, Gurobi model, cost optimization