

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Starčević

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Marko Starčević

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Nevenu Duiću na mentorstvu te Antunu Pfeiferu, mag. ing. mech na stalnoj dostupnosti, savjetima i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se projektu INTERENERGY (IP-2019-04-9482) Istraživanje puteva energetske tranzicije - međuovisnost "power-to-X" tehnologija, tehnologija odgovora potrošnje i povezivanja tržišta energijom na pristupu literaturi i računalnim programima.

Zahvaljujem se i projektu RESFLEX – Energetski neovisna Hrvatska bazirana na visokom udjelu obnovljivih izvora energije te različitih tehnologija brzog odziva na ustupljenim podacima, modelima i izvještajima.

Za kraj bih se zahvalio svojoj obitelji na podršci koju su mi pružili tijekom studiranja.

Marko Starčević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Starčević**

Mat. br.: **0035214684**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba različitih scenarija za primjenu tehnologija odziva potrošnje u elektrificiranom sustavu cestovnog prometa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of different scenarios for the implementation of demand response technologies in electrified road transport system**

Opis zadatka:

U Strategiji energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030., s pogledom na 2050. predviđa se povećanje udjela vozila na alternativni pogon, poglavito električnih, te elektrifikacija gradskog i međugradskog prometa. Prema ambicioznom scenariju energetske tranzicije, udio električnih vozila bi do 2050. mogao preći 60 % ukupnog broja cestovnih vozila. Pri punjenju baterija brojnih električnih vozila pojavljuje se značajan novi, distribuirani potrošač u energetske sustavu. Međutim, takav potrošač također pruža mogućnost za uvođenje tehnologija odziva potrošnje i tehnologija koje mogu pružati balansiranje sustava koji se temelji na visokom udjelu obnovljivih izvora energije.

U okviru ovog zadatka potrebno je:

1. Napraviti pregled literature vezane uz projekcije cijena električnih vozila i potrebne infrastrukture za punjenje i priključivanje na električnu mrežu te znanstvene literature o primjeni baterija električnih vozila za balansiranje energetske sustava.
2. Modelirati energetske sustav Republike Hrvatske u računalnom alatu za energetske planiranje EnergyPLAN u 2018., 2025., 2030., 2035., 2040., 2045. i 2050. godini.
3. Predložiti različite scenarije primjene tehnologija odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje energetske sustava u elektrificiranom sustavu cestovnog prometa.
4. Prikazati rezultate kroz sve razmatrane godine, koji govore o smanjenju „kritičnog viška proizvedene električne energije“ [TWh/godišnje] u sustavu s visokim udjelom VOIE, godišnjim troškovima instalacije opreme, operativnim troškovima [MEUR], emisijama CO₂ [Mt] te prema tim rezultatima usporediti scenarije primjene tehnologija odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje energetske sustava.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Neven Duić


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. ELEKTRIČNA VOZILA.....	2
2.1. Razvoj električnih vozila.....	2
2.2. Vrste električnih vozila.....	2
2.3. Cijena električnih vozila.....	4
2.3.1. Trošak vlasništva električnog vozila.....	4
2.3.2. Projekcije budućih cijena električnih vozila	5
2.4. Baterije električnih vozila.....	6
3. INFRASTRUKTURA ZA PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA	8
3.1. Tehnologije punjenja	8
3.2. Mjesta za punjenje	8
3.3. Elektroenergetska mreža.....	10
3.4. Perspektive metoda punjenja električnih vozila s obzirom na njihov utjecaj na elektroenergetski sustav.....	11
3.4.1. Priključi i puni.....	11
3.4.2. Pametno punjenje.....	11
3.4.3. Vehicle to grid.....	12
4. Metode.....	13

4.1. Računalni alat EnergyPLAN	13
4.2. Scenarijski pristup	14
5. MODEL ENERGETSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE.....	17
5.1. Referentna godine.....	17
5.2. Projekcije energetskog sustava.....	19
5.3. Scenariji uvođenja tehnologija odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje energetskoga sustava	21
6. USPOREDBA REZULTATA.....	23
6.1. Odzivi scenarija	23
6.2. Ekonomska analiza scenarija.....	26
7. ZAKLJUČAK	28
8. LITERATURA.....	29

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema električnog vozila [6]	3
Slika 2. Utjecajni faktori na ukupni trošak vlasništva električnog vozila [9]	6
Slika 3. Tip 2 priključak za punjenje izmjeničnom strujom [13].....	9
Slika 4. CHAdeMO (lijevo) i CCS (desno) priključak za punjenje istosmjernom strujom [13]	9
Slika 5. Shematski prikaz energetskega tokova u modelu EnergyPLANA-a [22]	13
Slika 6. Izgled sučelja za unos podataka o tehnologiji pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologiji [22]	14
Slika 7. Kapaciteti za proizvodnju električne energije u 2018. godini u MW [23]	17
Slika 8. Konačna potrošnja energije u Republici Hrvatskoj po sektorima u 2018. godini u TWh [24]	18
Slika 9. Uvezena električna energija kroz godine za pojedine scenarije u TWh	23
Slika 10. Izvezena električna energija kroz godine za pojedine scenarije u TWh	24
Slika 11. Emisija CO ₂ kroz godine za pojedine scenarije u Mt.....	25
Slika 12. Neintegrirana električna energija za pojedine scenarije u TWh	26

POPIS TABLICA

Tablica 1. Projekcije cijene litij-ionskih baterija [11]	7
Tablica 2. Cijene instalacije punionica za tehnologiju pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologije	10
Tablica 3. Usporedba odziva modela u referentnoj godini s dostupnim podacima	18
Tablica 4. Projekcija instaliranih snaga proizvodnih postrojenja u MW	19
Tablica 5. Projekcija potražnje za električnom energijom u TWh.....	20
Tablica 6. Projekcija potrošnje energije u sektoru prometa u TWh.....	20
Tablica 7. Projekcija broja električnih i plug in hibridnih vozila.....	20
Tablica 8. Parametri scenarija 2	21
Tablica 9. Parametri scenarija 3	22
Tablica 10. Trošak degradacije baterija prilikom balansiranja energetskog sustava po scenarijima u MEUR	27
Tablica 11. Troškovi balansiranja energetskog sustava po scenarijima u MEUR	27

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
UTV	EUR	Ukupni trošak vozila
JT	EUR	Jednokratni troškovi
PT	EUR	Periodički troškovi
i	%	Diskontna stopa
EUR		Euro
T_{VG}	MEUR	Ukupni trošak tehnologije vehicle to grid
P_{IVG}	MW	Snaga novoinstaliranih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije
T_{IPVG}	MEUR/MW	Trošak instalacije novoinstaliranih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije
P_{PVG}	MW	Snaga postojećih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije
T_{OPVG}	MEUR/MW	Trošak održavanja postojećih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije
T_{DB}	MEUR	Trošak zbog degradacije baterija
B_c		Broj ciklusa punjenja i pražnjenja baterije
$B_{CŽV}$		Broj ciklusa u životnom vijeku baterije
C_B	MEUR	Cijena baterije
T_{PP}	MEUR	Ukupni trošak tehnologije pametnog punjenja
P_{IPP}	MW	Snaga novoinstaliranih punionica s mogućnošću pametnog punjenja
T_{IPP}	MEUR/MW	Trošak instalacije novoinstaliranih punionica s mogućnošću pametnog punjenja
P_{PPP}	MW	Snaga postojećih punionica s mogućnošću pametnog punjenja

T _{OPPP}	MEUR/MW	Trošak održavanja postojećih punionica s mogućnošću pametnog punjenja
kW		Kilovat
kWh		Kilovatsat
MW		Megavat
MWh		Megavatsat
GWh		Gigavatsat
MEUR		Milijuna eura
CEEP	TWh	Kritični višak proizvedene energije
CO ₂		Ugljični dioksid

SAŽETAK

Elektrifikacija cestovnog prometa značajno utječe na cjelokupni elektroenergetski sustav. Zbog zabrinjavajućih trendova klimatskih promjena i novih tehnologija za eksploataciju obnovljivih izvora električne energije, pojavljuje se sve veći interes za električnim vozilima. Unatoč mnogim prednostima potpuno električnih vozila, kao što su tiši rad, lakše upravljanje i niži troškovi održavanja, električna vozila imaju i neke nedostatke poput dometa. Razvoj elektrifikacije vozila može se pratiti u nekoliko smjerova. To su potpuno električna vozila, hibridna električna vozila i električna vozila s gorivim člancima. Potpuno električna vozila mogu se smatrati potpuno CO₂ neutralnim samo uz uvjet da je električna energija dobivena iz obnovljivih izvora energije. Iako električni automobili trenutno imaju višu cijenu prilikom kupnje, trend povećanja konkurentnosti u odnosu na automobile s motorom s unutarnjim izgaranjem ukazuje na koji način će se cestovni promet razvijati. Također, predviđa se i povećanje specifične pohranjene energije u baterijama, što će za posljedicu imati povećanje dometa, te povećati fleksibilnost potrošnje električne energije iz elektroenergetske mreže. Rast broja električnih vozila utjecat će na povećanje potrošnje električne energije, što predstavlja rizik za distribucijsku mrežu električne energije. Stoga će biti nužno vrijeme punjenja električnih vozila uskladiti tako da posluži izjednačavanju vremenskih krivulja potrošnje električne energije i proizvodnje iz obnovljivih izvora. Tehnologija odziva potrošnje i tehnologije balansiranja energetskeg sustava koje su razmatrane u ovom radu su tehnologija pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologija. U okviru ovoga rada izrađen je model energetskeg sustava Republike Hrvatske te su scenarijskim pristupom uspoređeni troškovi i učinci koje donosi implementacija ove tehnologije u periodu energetske tranzicije.

Ključne riječi: električna vozila, tržište električne energije, odziv potrošnje, pametno punjenje, balansiranje elektroenergetskeg sustava, vehicle to grid, kritični višak proizvedene električne energije.

SUMMARY

Road traffic electrification has a significant impact on the entire electric power system. Due to worrying trends in climate change and new technologies in the use of renewable energy sources, the interest for electric vehicles has increased. Despite numerous advantages of electric vehicles, such as the fact that they are quieter, easier to use and have lower maintenance costs, electric vehicles have some disadvantages, such as having a shorter range. Vehicle electrification has developed in several different ways – electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell electric vehicles. Electric vehicles can be considered carbon neutral only if the electrical energy has been generated from renewable energy sources. Even though electric vehicles are currently more expensive to buy, the increase in competitiveness in relation to internal combustion engine vehicles shows the way in which road traffic will develop in the future. Moreover, an increase in the specific energy stored in the battery has been predicted, which would extend the range of electric vehicles and make the use of electrical energy from the electric power system more flexible. The increasing number of electric vehicles would make the demand for electrical energy higher, which poses a risk for electric power distribution network. Therefore, it would be necessary to organize the time before recharging the vehicle in a way that there would be a balance between the time in which electrical energy is spent and the time for it to be generated from renewable energy sources. The technology of demand response and the technology for balancing the power system, which are analyzed in this paper, are the smart charging technology and vehicle-to-grid technology. This paper also presents a model of the energy system of the Republic of Croatia. Using the scenario approach, an analysis has been made of the costs and effects of the implementation of this technology in the period of energetic transition.

Key words: electric vehicles, electricity market, demand response, smart charging, balancing the power system, vehicle-to-grid, CEEP

1. UVOD

Republika Hrvatska Pariškim se sporazumom, kao članica Europske unije, obvezala provoditi smanjenje emisije stakleničkih plinova s ciljem sprečavanja daljnjih klimatskih promjena i ograničenja porasta prosječne temperature do 2°C, odnosno 1,5°C u ambicioznijem scenariju. U 2018. godini, promet je činio 27 % ukupnih emisija stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj, dok na ostatak energetskeg sektora otpada oko 42%. U Strategiji niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu [1], kao jedan od glavnih ciljeva navodi se povećanje udjela obnovljivih izvora energije. Iako elektrifikacija cestovnog prometa, kao jedan od mogućnosti za smanjenje emisija stakleničkih plinova u tome sektoru, povlači za sobom povećanje potrošnje električne energije, otvara mogućnosti primjene novih tehnologija za balansiranje energetskeg sustava koje su nužne za prelazak na varijabilne obnovljive izvore električne energije poput energije vjetra i sunca. U tom slučaju, električna vozila više ne predstavljaju samo potrošača električne energije, već i distribuiranog proizvođača [2]. Radi boljeg balansiranja budućih energetskeg sustava, predlaže se jače povezivanje elektroenergetskeg sustava s sustavima grijanja i sektorom prometa [3] u kojima već postoje tehnologije brzog odziva potrošnje. Modelima energetskeg sustava moguće je pokazati kako fleksibilnost sustava utječe na mogućnost podizanja udjela varijabilnih obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji. Mogućnost električnih automobila da pohranjuju energiju, uz razvoj komunikacijskih kanala i promjenu tržišta električne energije može rezultirati ekonomskim benefitima i očuvanju okoliša [4].

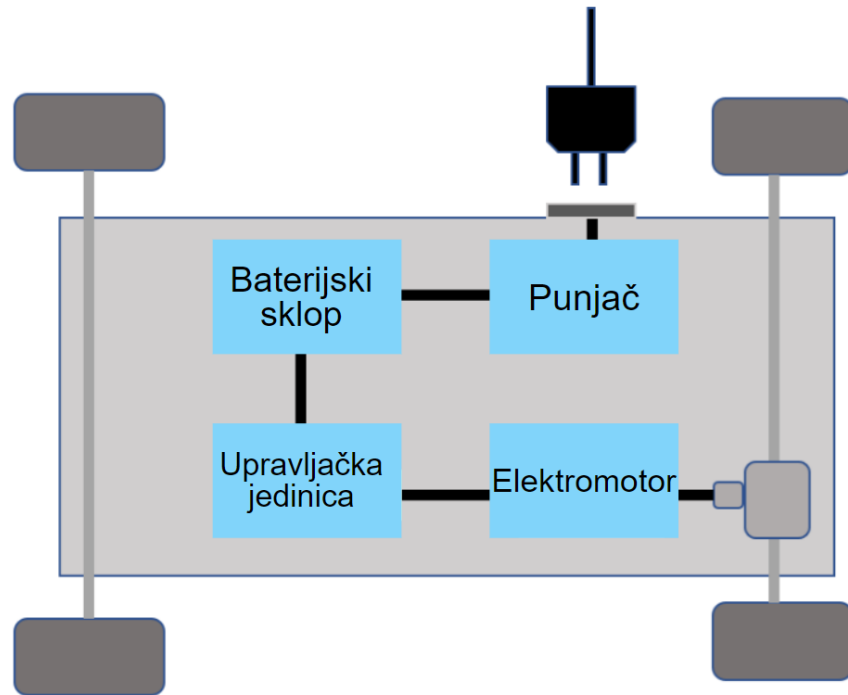
2. ELEKTRIČNA VOZILA

2.1. Razvoj električnih vozila

Električna vozila postojala su od samih početaka automobilske industrije, čak i prije izuma motora s unutarnjim izgaranjem. U odnosu na tadašnje automobile s parnim motorima i motorima s unutarnjim izgaranjem, automobili na električni pogon bili su tiši, čišći i lakši za upravljati [5]. Ipak, nakon dvadesetih godina prošlog stoljeća, na tržištu potpunu dominaciju preuzimaju vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem zbog niže cijene, znatno većeg dometa i brzog dolijevanja goriva [6]. Novi zalet u razvoju cestovnih električnih vozila dogodio se početkom dvadesetog stoljeća zbog sve većeg zagađenja okoliša i zabrinutosti u pogledu klimatskih promjena. U 2016. na svjetskim se prometnicama nalazilo 2 milijun električnih vozila, a u 2020. godini ta se brojka popela preko 10 milijuna [7], što predstavlja godišnju stopu rasta od preko 50% .

2.2. Vrste električnih vozila

Električna vozila mogu se podijeliti na potpuno električna vozila, hibridna električna vozila i na električna vozila s gorivnim člancima. Potpuno električna vozila za pogon elektromotora koriste električnu energiju pohranjenu u baterijama, dok je bateriju potrebno puniti spajanjem na elektroenergetsku mrežu. Slika 1 prikazuje shemu jednog takvog vozila. [6]



Slika 1. Shema električnog vozila [3]

Hibridna električna vozila uz elektromotor imaju i motor s unutarnjim izgaranjem, te se mogu dalje podijeliti, s obzirom na način prijenosa mehaničke energije između komponenti, na paralelna i serijska [8]. Kod serijskih hibridnih vozila sva se mehanička energija proizvedena u motoru s unutarnjim izgaranjem, pomoću generatora, pretvara u električnu energiju koja se zatim pohranjuje u bateriju i napaja elektromotor zadužen za pogon vozila. Prednosti ovog tipa vozila su da motor s unutarnjim izgaranjem ne mora raditi cijelo vrijeme trajanja vožnje te da radi u režimu koji ima najbolju efikasnost što za posljedicu ima manju emisiju CO₂, veću izdržljivost i dulji vijek trajanja motora. Nasuprot, paralelna hibridna vozila mogu raditi u nekoliko režima rada ovisno o toku mehaničke i električne energije: pogonjena samo elektromotorom, hibridni pogon pri kojem oba motora pogone vozilo, punjenje baterije, pogon samo s motorom s unutarnjim izgaranjem i regenerativno kočenje. Paralelna hibridna vozila imaju veću ukupnu efikasnost od serijskih te nemaju generator pošto elektromotor obavlja tu funkciju. Razvijaju veću snagu na kotačima pošto je mogući istovremeni pogon elektromotorom i motorom s unutarnjim izgaranjem. Ovaj tip hibridnih vozila najčešće se proizvodi. Za ovaj rad bitnija će biti mogućnost povezivanja hibridnog vozila s elektroenergetskom

mrežom. Vozila koja imaju tu mogućnost nazivaju se plug-in hibridna vozila. U odnosu na potpuno električna vozila, plug in hibridna vozila imaju znatno manji kapacitet baterije, no ipak veći od ostalih hibridnih vozila.

Električna vozila s gorivnim člancima kao pogonsko gorivo koriste vodik. Električna energija proizvedena u gorivnim člancima pogoni elektromotor najčešće u kombinaciji s baterijom ili superkondenzatorom [6]. Ovaj tip vozila, kao i potpuno električna vozila mogu se smatrati CO₂ neutralnima jedino ako su vodik i električna energija dobiveni iz obnovljivih izvora energije, u suprotnom će njihov CO₂ otisak biti približno jednak vozilima s motorom s unutarnjim izgaranjem. U daljnjem tekstu termin električno vozilo odnosit će se na pojam potpuno električnog vozila.

2.3. Cijena električnih vozila

2.3.1. Trošak vlasništva električnog vozila

Za prikaz stvarne cijene proizvoda poput električnog vozila, potrebno je napraviti sveobuhvatnu analizu ukupnih troškova vlasništva. Takva vrsta analize u obzir uzima sve troškove vlasništva koji se javljaju kroz životni vijek vozila. Za električni automobil to bi bili jednokratni troškovi: trošak kupnje vozila i porez, te periodični troškovi: održavanje, osiguranje, troškovi punjenja i porezi. Pošto su u takvom načinu izračuna cijene uzeti u obzir svi troškovi, možemo usporediti različite proizvode poput električnih automobila i automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Električna vozila trenutno imaju veću cijenu prilikom kupnje, no troškovi održavanja, kao i trošak punjenja vozila značajno mogu utjecati na cjenovnu konkurentnost u odnosu na automobile s unutarnjim izgaranjem. Problem koji se javlja, prilikom ovakve analize, je da moramo biti upoznati s navikama vlasnika. Na primjer, godišnja kilometraža utjecat će na ukupnu cijenu, no razlikovat će se za svakog pojedinca. Matematički gledano, ukupnu cijenu vozila možemo izračunati prema formuli [9] :

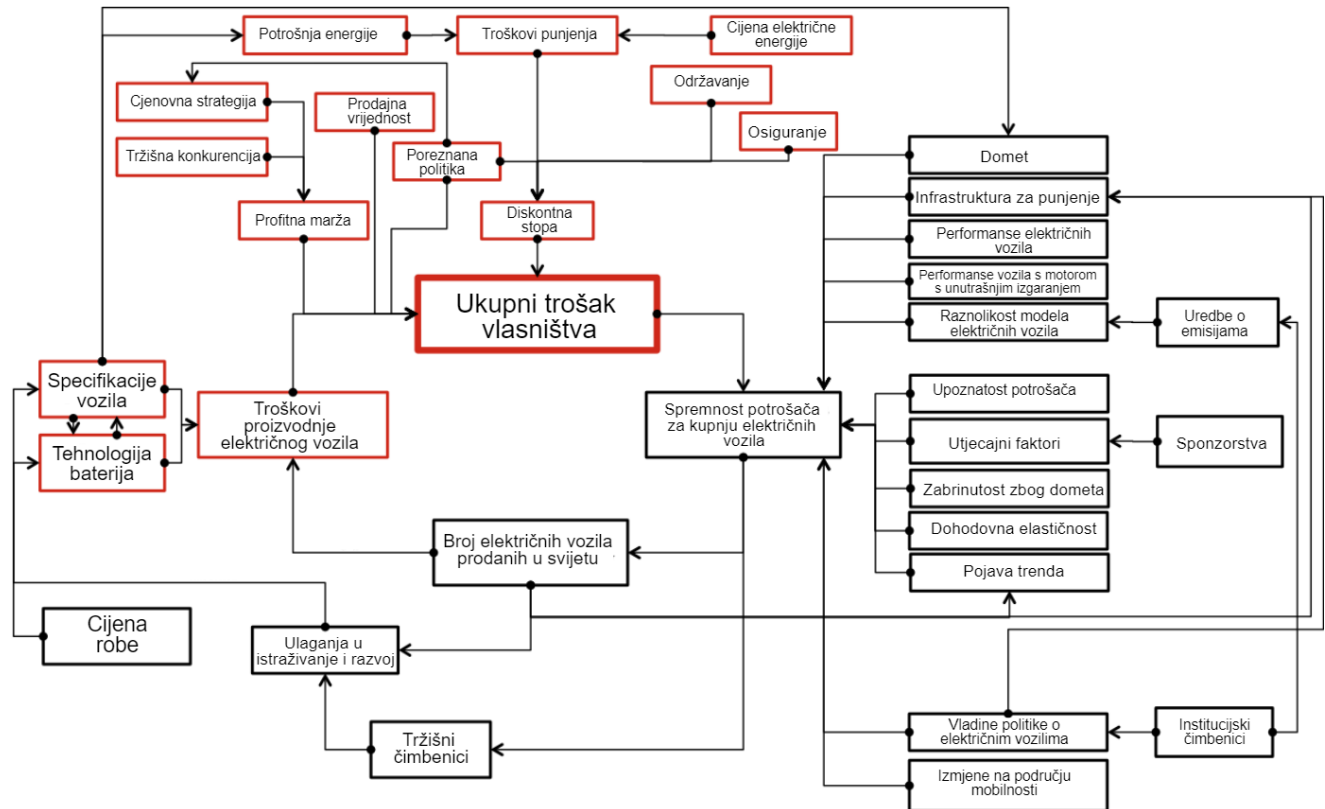
$$UTV = JT + \sum_{n=1}^N PT \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (1)$$

U ovoj formuli, UTV predstavlja ukupni trošak vozila, JT jednokratne troškove i PT predstavlja periodičke troškove. Periodički troškovi diskontirani su za diskontnu stopu i u n -toj godini u kojoj se pojavljuju.

2.3.2. Projekcije budućih cijena električnih vozila

Za projekcije budućih cijena proizvoda najčešće se koriste dvije metode: top-down i bottom-up. Top-down metoda koristi se iskustvenim krivuljama za projekciju cijene, dok se bottom-up metoda temelji na inženjerskoj procjeni. Iskustvenim krivuljama opisuje se smanjenje cijene koja se događa iz tri razloga. Povećanjem kapaciteta proizvodnje, raste i učinkovitost vezana za napretke u radnoj izvedbi, dok standardizacija i automatizacija donose tehnološke napretke. Također, povećanje proizvodnih kapaciteta ne zahtijeva proporcionalno veća ulaganja. Sve ove pretpostavke zasnivaju se na prethodnim iskustvima u industrijama sa sličnim tehnologijama.

Za projekciju cijene bottom-up metodom, potrebno je za svaku komponentu proizvoda procijeniti trošak proizvodnje što uključuje proces proizvodnje i korištene materijale. Da bismo došli do tih podataka potrebno je odrediti sve čimbenike i njihov utjecaj na ukupni trošak vlasništva električnog automobila. Pri razvoju tehnologije postoji obrnuto proporcionalna korelacijska veza između stope prihvaćenosti i jedinične cijene proizvoda. Svi faktori i način njihovog utjecaja na ukupni trošak vlasništva električnog vozila shematski su prikazani na slici 2 [9].



Slika 2. Utjecajni faktori na ukupni trošak vlasništva električnog vozila [9]

Prema projekcijama, ukupni trošak vlasništva električnog vozila u optimističnom scenariju bit će manji u odnosu na ukupni trošak vlasništva vozila motorom s unutarnjim izgaranjem već u 2025. godini. Ipak, kod nekih modela automobila, to se neće dogoditi sve do 2030. godine [10]. Iz tog razloga u navedenom periodu možemo očekivati još značajniji skok broja električnih vozila prisutnih na tržištu.

2.4. Baterije električnih vozila

Iako se najčešće domet spominje kao glavni čimbenik na koji utječe baterija ugrađena u električno vozilo, vrsta baterije ugrađene može promijeniti i ostale performanse vozila. Na tržištu postoji širok spektar baterija, no najzastupljenija vrsta baterije ugrađenih u električne automobile su litij-ionske. U odnosu na ostale, litij-ionske baterije trenutačno pružaju najbolji omjer specifične snage, gustoće pohrane energije i cijene kada su u pitanju električni automobili. Cijena litij-ionskih baterija u zadnja

dvadesetak godina višestruko je pala, te se u budućnosti očekuje nastavak takvog trenda. U tablici 1 prikazane su projekcije cijena do 2050. godine.

Tablica 1. Projekcije cijene litij-ionskih baterija [11]

	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Cijena litij-ionskih baterija [EUR/kWh]	144	112	93	78	68	60

Uz pad cijena baterija, može se očekivati i povećanje specifične snage i pohranjene energije što za sobom donosi mogućnost pohrane veće količine energije u manjem vremenu. Mana ove vrste baterija je njihovo propadanje prilikom punjenja i pražnjenja. Životni vijek litij-ionske baterije smatra se oko 500 ciklusa potpunog punjenja i pražnjenja [12].

3. INFRASTRUKTURA ZA PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA

3.1. Tehnologije punjenja

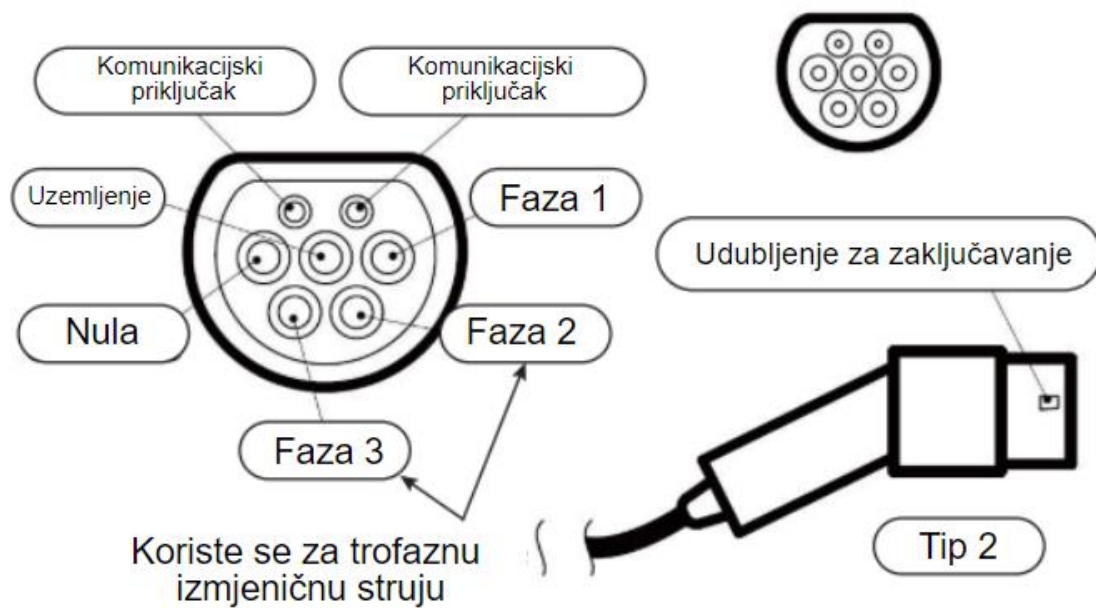
Postoji nekoliko načina na koje je moguće električno vozilo dopuniti električnom energijom. Prvi, i trenutno jedini korišteni način punjenja je konduktivno punjenje baterije. Za takvo punjenje potrebno je kompatibilni priključak fizički povezati s vozilom. Za razliku od konduktivnog punjenja, za induktivno punjenje nije potrebna fizička veza s elektroenergetskom mrežom, već je punjenje moguće obaviti bežičnim povezivanjem. Na taj način bi se vozilo koje je prilagođeno bežičnom punjenju moglo napuniti samim parkiranjem na parkirno mjesto ili čak vožnjom po prometnici koje je opremljeno takvom tehnologijom [6]. Najveći nedostatak ove metode je skupa i trenutno nepostojeća infrastruktura, te niska efikasnost prijenosa energije. Treći način opskrbe vozila električnom energijom je zamjenom prazne baterije s prethodno napunjenom baterijom. Postaja za promjenu baterije bila bi vrlo slična benzinskim postajama u kojima je moguće vozilo opskrbiti potrebnom energijom u nekoliko minuta. Gledano s perspektive električne mreže, ova metoda je najpovoljnija zbog prilagodljivih potreba za električnom energijom.

3.2. Mjesta za punjenje

Kao što je već rečeno, trenutno se za punjenje baterija električnih vozila koriste samo fizički priključci. Pošto je za punjenje baterije potreba istosmjerna struja, a na raspolaganju imamo samo izmjeničnu struju iz električne mreže, nužan je pretvarač električne energije. Za punjenje nižim snagama, električno vozilo napaja se jednofaznom ili trofaznom izmjeničnom strujom koja se u pretvaraču koji je ugrađen u vozilo pretvara u istosmjernu i napaja bateriju. Ograničavajući faktor brzine odnosno snage ovakvog načina punjenja je kapacitet pretvarača ugrađenog u vozilo, no zahtjeva minimalne uvjete na vanjsku infrastrukturu. Za veće snage punjenja koristi se pretvarač koji je ugrađen u mjesto za punjenje, te se vozilo napaja istosmjernom strujom koja puni bateriju. Takve punionice znatno su skuplje, no omogućuju potpuno punjenje baterije u svega 15 do 30 minuta.

Za samo povezivanje vozila s mjestom za punjenje postoji nekoliko tipova priključaka. U Europskoj uniji, pa tako i u Hrvatskoj, prevladava priključak tipa 2 za izmjeničnu struju, dok su za punjenje

istosmjernom strujom najčešći priključci CCS i CHAdeMO. Na slikama 3 i 4 su prikazani navedeni priključci [13].



Slika 3. Tip 2 priključak za punjenje izmjeničnom strujom [13]



Slika 4. CHAdeMO (lijevo) i CCS (desno) priključak za punjenje istosmjernom strujom [13]

3.3. Elektroenergetska mreža

Rastući broj električnih vozila povećat će ukupnu potrošnju električne energije. Također, električna vozila predstavljaju rizik za mrežu zbog mogućeg povećanja vršnog opterećenja. Iz tog razloga potrebni su dodatni kapaciteti za proizvodnju i distribuciju električne energije. Ipak, ukoliko se električna vozila pune za vrijeme manje opterećenosti mreže, mogu poslužiti kao alat za izjednačavanje vremenskih krivulja proizvodnje i potrošnje električne energije. Takav pristup potrošnji električne energije nazivamo tehnologijama odziva potrošnje. Primjena takvih tehnologija otvara mogućnost većoj implementaciji obnovljivih izvora energije. Za mogućnost primjene tehnologije pametnog punjenja potrebna je komunikacija između električnog vozila i poslužitelja punjenja zbog čega se nužnim nameće standardizacija prilikom izmjene informacija za vrijeme dok je električno vozilo spojeno s mrežom.

Još veću perspektivu u integraciji obnovljivih izvora energije pruža takozvana vehicle to grid tehnologija. U tom slučaju baterije u električnim automobilima za vrijeme vršnih opterećenja vraća električnu energiju natrag u mrežu, dok se baterije pune za vrijeme viškova. Primjenom vehicle to grid tehnologije, električna vozila više ne predstavljaju samo distribuiranog potrošača u sustavu, već i distribuirano skladište električne energije. Za mogućnost realizacije vehicle to grid tehnologije potrebno je infrastrukturu za punjenje prilagoditi na izmjenu električne energije u oba smjera, iz mreže u vozilo, ali i obrnuto. Za to su potrebni dvosmjerni pretvarači i brojila električne energije [14]. U tablici 2. prikazane su cijene instalacije i troškovi održavanja punionica za tehnologiju pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologiju. Primjena ove tehnologije značajno bi mogla pomoći u stabilizaciji i pouzdanosti mreže, te donijeti financijsku korist vlasnicima električnih vozila.

Tablica 2. Cijene instalacije punionica za tehnologiju pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologije [15]

	Trošak instalacije [EUR/kW]	Godišnji troškovi održavanja i operativni troškovi [EUR/kW]
Punionice za pametno punjenje	300 EUR/kW	20
Punionice za vehicle to grid (dvosmjerne punionice)	400 EUR/kW	30

3.4. Perspektive metoda punjenja električnih vozila s obzirom na njihov utjecaj na elektroenergetski sustav

3.4.1. Prikluči i puni

Trenutno korišteni način punjenja električnih vozila je jednostavno priključivanje vozila na mrežu i trenutni početak punjenja baterije najvećom raspoloživom snagom. Ovakav koncept punjenja trenutno je moguć zbog relativno malog broja električnih vozila, kao i mogućnosti proizvođača električne energije za povećanjem proizvodnih kapaciteta u određenom vremenskom periodu. Za očekivati je da će ovakav način punjenja u budućnosti velikom mjerom iščeznuti, te da će se primjenjivati jedino u slučaju kada ne postoji dovoljno dugačak vremenski interval kada je električno vozilo spojeno s mrežom. To se prvenstveno odnosi na duža putovanja i situacije kada se tijekom jednoga dana prevaljuje veći broj kilometara.

3.4.2. Pametno punjenje

Iako možemo reći da trenutno postoji neka vrsta pametnog punjenja električnih vozila u vidu punjenja za vrijeme jeftinije noćne tarife električne energije, za učinkovitiju primjenu ove vrste tehnologije odziva potrošnje nužna je strukturna reforma tržišta električne energije. Proizvođači električne energije u tom bi slučaju imali veću fleksibilnost prilikom određivanja cijene električne energije, dok bi potrošači imali mogućnost ugovaranja dinamičnih tarifa koje prate cijene na promptnom tržištu. Za ostvarivanje takvog tržišta potrebno je izgraditi online platformu za komunikaciju između dionika u energetske mreži [4]. Na takvoj mreži ugovarala bi se kupnja i prodaja električne energije dan unaprijed [16], kada su s velikom sigurnošću poznati klimatski uvjeti, pa se tako može i s visokom sigurnošću procijeniti proizvodnja električne energije iz varijabilnih obnovljivih izvora energije. Nadogradnja na komunikacijskoj mreži, kao i instalacija pametnih brojlara temelj je razvoja svih tehnologija odziva potrošnje [17]. Pametno punjenje ne zahtijeva iznimno velike snage punjenja, pa tako ni skupu infrastrukturu punionica. Ipak omjer punionica i broja električnih vozila treba biti što veći kako bi većina vozila mogla biti spojena s mrežom dok su parkirana.

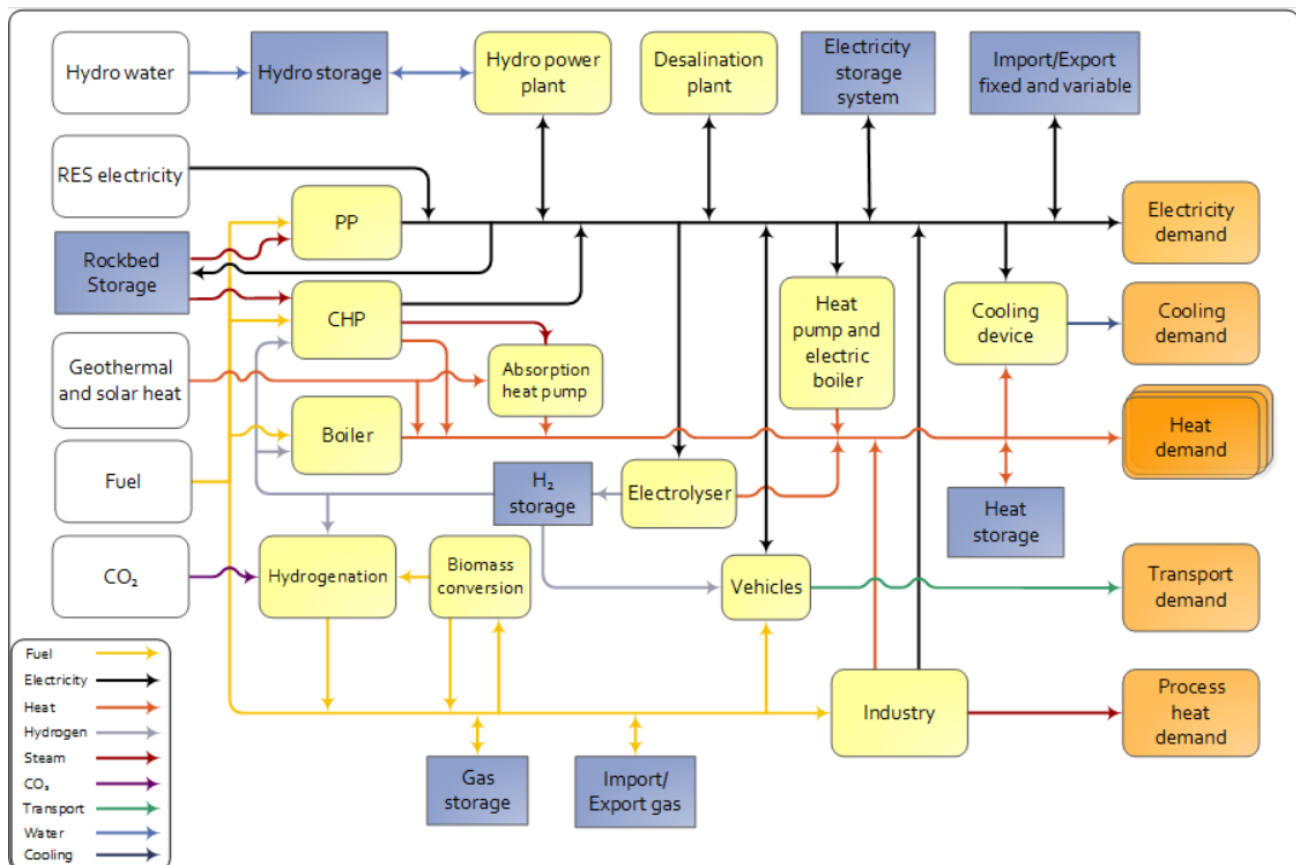
3.4.3. Vehicle to grid

Vehicle to grid tehnologija predstavlja tehnologiju balansiranja energetskeg sustava i zapravo je nadogradnja pametnog punjenja, te stoga i zahtjeva sve prethodno navedene infrastrukturne promjene. Uz to, potrebno je osposobiti punionice i električna vozila za dvosmjerni protok električne energije, pritom vodeći računa o efikasnosti kako bi se što veći udio električne energije prilikom punjenja baterije kasnije mogao vratiti u mrežu [13]. U elektroenergetskom sustavu s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije, gdje su fluktuacije u cijenama električne energije velike, financijska isplativost vehicle to grid tehnologije raste [18]. S druge strane, opterećenja baterije zbog velikog broja punjenja i pražnjenja, koja za rezultat mogu imati degradaciju baterijskih ćelija, mogla bi vlasnike električnih vozila udaljiti od primjene ove tehnologije. Ukoliko je vozilo zaduženo za balansiranje sustava vehicle to grid tehnologijom, degradacija baterija u vozilu može se odvijati i do 50 % brže [19]. Kvaliteta baterija i garancije proizvođača u tom bi slučaju mogli imati veliki utjecaj na masovnost korištenja vehicle to grid tehnologije. Radi optimizacije balansiranja sustava, postoje razni algoritmi koji određuju kada i kojom snagom se svako pojedino vozilo treba puniti ili vraćati energiju nazad u mrežu kako bi se postigli zadani ciljevi [20] [21]. Neki od ciljeva mogu biti minimiziranje uvezene električne energije i/ili kritičnog viška proizvedene energije. Za najbolji učinak smanjenja kritičnog viška proizvedene energije potrebno je optimizirati i trgovanja kako bi se za vrijeme najveće proizvodnje električne energije iz varijabilnih izvora potaknulo na potrošnju iste [16].

4. Metode

4.1. Računalni alat EnergyPLAN

Za potrebe modeliranja energetskega sustava Republike Hrvatske korišten je računalni program EnergyPLAN. EnergyPLAN je razvijen za modeliranje energetskih tokova koji se temelji na satnom izračunu potražnje i dobave toplinske i električne energije. Simulacija modela se provodi na trajanje od jedne godine. Na slici 6. prikazana je shema energetskih tokova u modelu EnergyPLAN-a.



Slika 5. Shematski prikaz energetskih tokova u modelu EnergyPLAN-a [22]

Kao ulazne podatke u simulaciju potrebno je navesti energetske potrebe po sektorima, instalirane snage i specifikacije energetskih postrojenja, meteorološke podatke i troškove tehnologija. Izlazni podaci simulacije su iznosi proizvedene električne i toplinske energije po tehnologijama, emisije CO₂, uvoz, izvoz i kritični višak električne energije, te godišnji financijski trošak cijelog energetskega sustava.

Prilikom simulacije, postavke EnergyPLAN-a bit će podešene na način da tehnologije za balansiranje energetskeg sustava imaju prednost nad izvozom energije, odnosno da pohrane električnu energiju iako su kapaciteti za izvoz dostupni. Također, vehicle to grid tehnologija imat će prednost nad reverzibilnim hidroelektranama. Ulazni podaci za modeliranje pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologije su krivulje distribucije i ukupni iznosi potreba za električnom energijom za punjenje električnih vozila metodom priključi i puni, te za pametno punjenje. Također za modeliranje su potrebni podaci koji se odnose na maksimalnom udjelu vozila u prometu za vrijeme vršnih opterećenja, ukupnim kapacitetom baterija, te udio parkiranih vozila koji su dostupni za balansiranje energetskeg sustava u bilo kojem trenutku. Potrebno je unijeti i podatke o snazi postojećoj punionica koje imaju mogućnost pametnog punjenja, te vraćanja električne energije nazad u mrežu kao i njihovu efikasnost. Izgled sučelja za unos podataka prikazan je na slici 6. [22].

The image shows the 'Electric Vehicle Specifications' window in EnergyPLAN. It contains two sections: 'Smart Charge Vehicles' and 'Additional Specifications for Vehicle-to-Grid (V2G)'. The 'Smart Charge Vehicles' section has input fields for 'Max. share of cars during peak demand' (0.2), 'Capacity of grid to battery connection' (0 MW), 'Share of parked cars grid connected' (0.7), 'Efficiency (grid to battery)' (0.9), and 'Battery storage capacity' (0 GWh). The 'Additional Specifications for Vehicle-to-Grid (V2G)' section has input fields for 'Capacity of battery to grid connection' (0 MW) and 'Efficiency (battery to grid)' (0.9). To the right of the specifications is a flow diagram showing energy sources (Oil, Ngas, Biomass, H2 storage, Electricity) feeding into different technologies (Combustion cars, FC, Electric vehicle, Vehicle to grid) which then feed into 'Transport demand'. The 'Vehicle to grid' technology shows a bidirectional arrow between 'Electricity' and the technology box, indicating energy storage and return to the grid.

Slika 6. Izgled sučelja za unos podataka o tehnologiji pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologiji [22]

4.2. Scenarijski pristup

Izradom tri scenarija za energetske sustav Republike Hrvatske, usporedit će se u učinci tehnologija odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje energetskeg sustava s elektrificiranim cestovnim prometom. Scenarij 1 predstavljat će sustav bez navedenih tehnologija, dok će scenariji 2 i 3 predstavljati njihovu postupnu, odnosno ubranu implementaciju.

Predloženi scenariji biti će uspoređeni s obzirom na njihov utjecaj na uvoz i izvoz električne energije, kritičkim višom proizvedene energije, te na emisije CO₂.

Također, za scenarije 2 i 3 biti će izračunat trošak implementacije tehnologija pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologije. Tehnologija pametnog punjenja, kao i vehicle to grid tehnologija, za uspješnu implementaciju zahtijevaju veći broj punionica za električna vozila kako bi vozilo moglo što duži vremenski period biti spojeno s elektroenergetskom mrežom pritom izmjenjujući električnu energiju. Također, takve punionice trebaju biti prilagođeni tim tehnologijama punjenja.

Trošak implementacije vehicle to grid tehnologije može se podijeliti na 3 dijela. Trošak instalacije punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije, njihovim održavanjem i troškovi koji nastaju zbog degradacije baterije uslijed povećanog broja punjenja i pražnjenja. Troškovi za jednu godinu mogu se izračunati jednadžbom:

$$T_{VG} = P_{IVG} \cdot T_{IPVG} + P_{PVG} \cdot T_{OPVG} + T_{DB} \quad (2)$$

Pri čemu T_{VG} predstavlja ukupni trošak tehnologije vehicle to grid za promatranu godinu u MEUR, P_{IVG} snagu novoinstaliranih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije u MW, T_{IPVG} trošak instalacije novoinstaliranih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije u MEUR/MW, P_{PVG} snagu postojećih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije u MW, T_{OPVG} trošak održavanja postojećih punionica s mogućnošću dvosmjernog toka električne energije u MEUR/MW i T_{DB} trošak zbog degradacije baterija u MEUR.

Troškovi degradacije baterija mogu se izračunati po metodi koja u obzir uzima utjecaj broja ciklusa punjenja i pražnjenja na smanjenje vijeka trajanja baterije prema formuli:

$$T_{DB} = \frac{B_c}{B_{CŽV}} \cdot C_B \quad (3)$$

Pri čemu T_{DB} trošak zbog degradacije baterija u MEUR, B_c broj ciklusa punjenja i pražnjenja, $B_{CŽV}$ broj ciklusa u životnom vijeku baterije, te C_B cijenu baterije u MEUR.

Na sličan način možemo izračunati i trošak pametnog punjenja prema formuli:

$$T_{PP} = P_{IPP} \cdot T_{IPP} + P_{PPP} \cdot T_{OPPP} \quad (4)$$

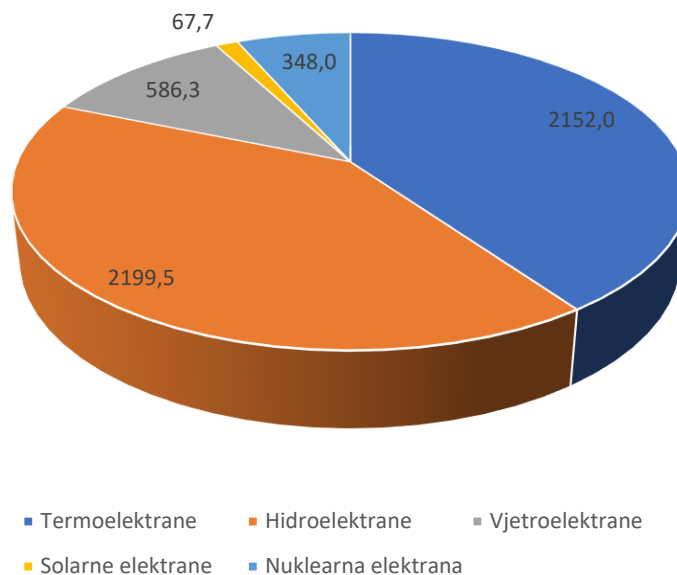
Pri čemu T_{PP} predstavlja ukupni trošak tehnologije pametnog punjenja za promatranu godinu u MEUR, P_{IPP} snagu novoinstaliranih punionica s mogućnošću pametnog punjenja u MW, T_{IPP} trošak instalacije novoinstaliranih punionica s mogućnošću pametnog punjenja u MEUR/MW, P_{PPP} snagu postojećih punionica s mogućnošću pametnog punjenja u MW, T_{OPPP} trošak održavanja postojećih punionica s mogućnošću pametnog punjenja u MEUR/MW.

Bitno je napomenuti da sve punionice koje podržavaju vehicle to grid tehnologiju, podržavaju i tehnologiju pametnog punjenja, kako se takvi troškovi ne bi dvostruko obračunavali.

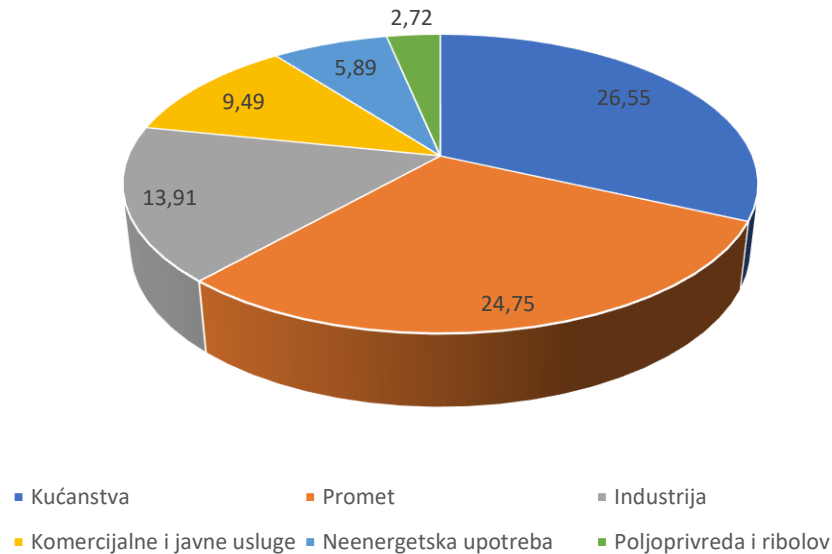
5. MODEL ENERGETSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE

5.1. Referentna godine

Za verifikaciju simulacije, modeliran je energetska sustav Republike Hrvatske u 2018. godini. Za modeliranje sustava korišteni su podaci dostupni sa stranica EIHP [23], IEA [24], EUROSTAT [25] i ENTSO-E [26]. Korištene krivulje distribucije preuzete su iz repozitorija datoteka RESFLEX-a [27]. Na slici 7. prikazani su instalirani kapaciteti za proizvodnju električne energije u 2018. godini, dok je na slici 8. prikazana konačna potrošnja energije po sektorima



Slika 7. Kapaciteti za proizvodnju električne energije u 2018. godini u MW [23]



Slika 8. Konačna potrošnja energije u Republici Hrvatskoj po sektorima u 2018. godini u TWh [24]

Nakon unosa svih potrebnih podataka dobiven je odziv simulacije modela. Proizvedena električna energija i emisije CO₂ dobivene odzivom modela u EnergyPLAN-u uspoređene su s podacima dostupnima na stranicama EIHP i IEA što je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Usporedba odziva modela u referentnoj godini s dostupnim podacima

	Odziv modela	EIHP [23]	IEA [24]
Proizvedena električna energija u vjetroelektranama [TWh]	1340	1335,4	1335
Proizvedena električna energija u solarnim elektranama [TWh]	70	74,9	75
Proizvedena električna energija u hidroelektranama [TWh]	7790	7784,9	7785
Proizvedena električna energija u termoelektranama [TWh]	4440	4436,5	4437
Emisije CO ₂ [Mt]	15,27	15,325	15,29

Odziv modela pokazuje minimalna odstupanja u odnosu na dostupne podatke.

5.2. Projekcije energetskog sustava

Napravljene su projekcije energetskog sustava Republike Hrvatske za 2025., 2030., 2035., 2040., 2045. i 2050. godinu koji se temelji na visokom udjelu obnovljivih izvora energije. U tablici 4. prikazane su instalirane snage proizvodnih postrojenja u promatranim godinama. Također, u 2045. godini pretpostavljeno je povećanje prijenosnog kapaciteta mreže za uvoz i izvoz električne energije s 2500 na 4000 MW.

Tablica 4. Projekcija instaliranih snaga proizvodnih postrojenja u MW

	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Vjetroelektrane	900	1300	2600	3200	4800	5600
Solarne elektrane	700	2000	3000	3300	4900	5800
Hidroelektrane	2337	2485	2608	2730	3110	3395
Termoelektrane (obnovljivi izvori)	230	335	350	360	740	1000
Termoelektrane (neobnovljivi izvori)	1339	790	600	460	155	0
Nuklearna elektrana	348	348	348	348	0	0

Projekcije potražnje za električnom energijom prikazane su u tablici 5. U obzir su uzeta demografska kretanja, kao i ubrzana elektrifikacija prometnog sustava.

Tablica 5. Projekcija potražnje za električnom energijom u TWh

	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Električna energija	19,10	19,44	22,05	24,73	28,32	32,37

Potrošnju fosilnih goriva u sektoru prometa postupno će zamijeniti električna energija, biogoriva, vodik i sintetička goriva. U tablici 6. prikazana je projicirana potrošnja energije u simuliranim godinama. Zbog veće učinkovitosti električnih vozila i vozila na vodik, ukupna potrošnja energije u sektoru prometa kroz godine će padati. U tablici 7. prikazano je pretpostavljeno kretanje broja električnih vozila i plug in hibridnih vozila.

Tablica 6. Projekcija potrošnje energije u sektoru prometa u TWh

	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Fosilna goriva	19,5	18,34	12,4	6,45	3,3	0
Električna energija	0,5	1,3	2,2	3,6	4,6	6
Vodik	0	0	0	0	0,25	1,87
Biogoriva	0,9	1,22	2,39	4,77	2,12	0
Sintetička goriva	0	0	0	0	1,33	2,66

Tablica 7. Projekcija broja električnih i plug in hibridnih vozila

	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Električna vozila	75 000	250 000	450 000	700 000	1 000 000	1 300 000
Plug in hibridna vozila	10 000	20 000	40 000	50 000	60 000	60 000

5.3. Scenariji uvođenja tehnologija odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje energetskega sustava

Tehnologije odziva potrošnje i tehnologije balansiranja energetskega sustava koje su razmatrane u ovome radu su tehnologija pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologija. U scenariju 1 bit će prikazan model energetskega sustava u kojemu se električna vozila napajaju iz elektroenergetske mreže isključivo metodom priključi i puni. Takva metoda punjenja električnih vozila, u sustavu s elektrificiranim prometom, ima izrazito negativan utjecaj na stabilnost, no prikazana je radi usporedbe sa scenarijima 2 i 3 u kojima će biti prikazana postupna implementacija pametnog punjenja i tehnologije vehicle to grid. Scenarij 2 prikazuje umjerenu brzinu implementacije navedenih tehnologija, dok scenarij 3 prikazuje ubrzanu implementaciju. Najveća razlika u scenarijima napravljena je u dostupnosti punionica za povrat električne energije nazad u mrežu. Iz tog razloga u scenariju 2 električna vozila će u velikoj mjeri moći preuzeti viškove električne energije u trenucima prekomjerne proizvodnje, no mogućnost za povrat iste nazad u mrežu za vrijeme vršnih opterećenja bit će znatno manja u odnosu na scenarij 3. Tablice 8. i 9. prikazuju parametre scenarija 2 i 3.

Tablica 8. Parametri scenarija 2

	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Priključi i puni [TWh]	0,45	0,6	0,8	0,9	0,9	0,5
Pametno punjenje [TWh]	0,05	0,7	1,4	2,7	3,8	5,5
Dostupna snaga mreža - baterija (pametno punjenje)[MW]	20	170	400	1200	2900	4500
Dostupna snaga baterija – mreža (Vehicle to grid) [MW]	0	50	120	400	1200	2500
Kapacitet baterija [GWh]	0,5	6	15	40	60	85

Tablica 9. Parametri scenarija 3

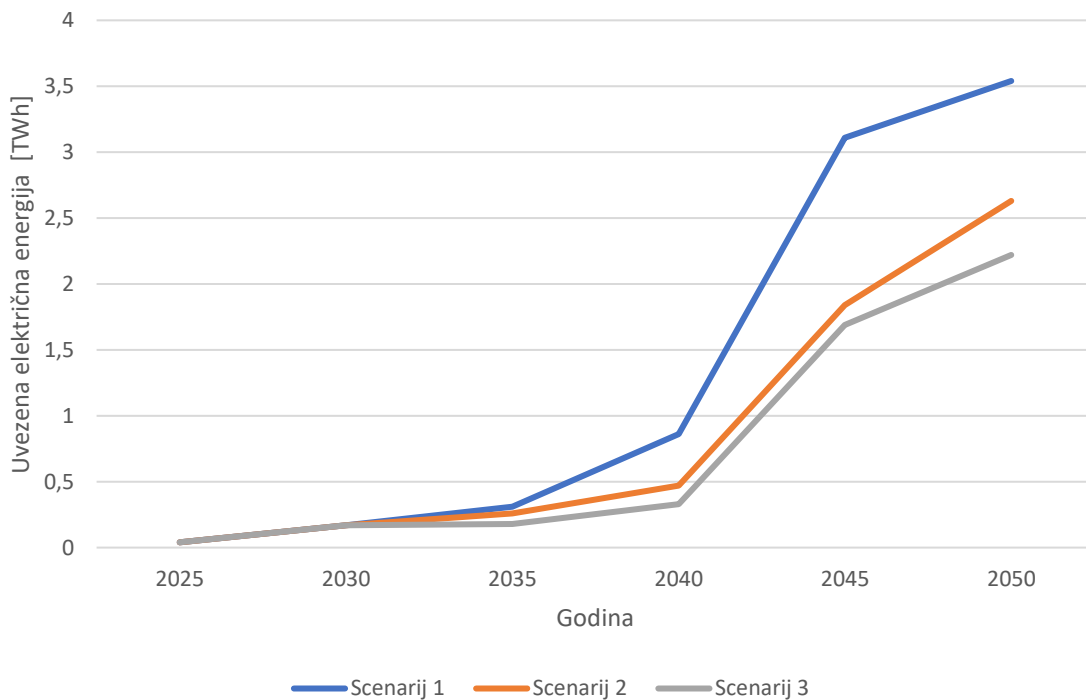
	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Priključi i puni [TWh]	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,3
Pametno punjenje [TWh]	0,2	0,9	1,7	3,3	4,3	5,7
Dostupna snaga mreža - baterija (pametno punjenje)[MW]	70	350	900	2300	4000	5000
Dostupna snaga baterija – mreža (Vehicle to grid) [MW]	10	120	400	1400	3000	5000
Kapacitet baterija [GWh]	2	9	20	50	70	90

Efikasnost punionica, odnosno prijenosa energije između baterije i mreže pretpostavljena je 90 %. Udio vozila na cestama iznosi maksimalno 20 %, dok je udio parkiranih automobila spojenih s mrežom 70 %.

6. USPOREDBA REZULTATA

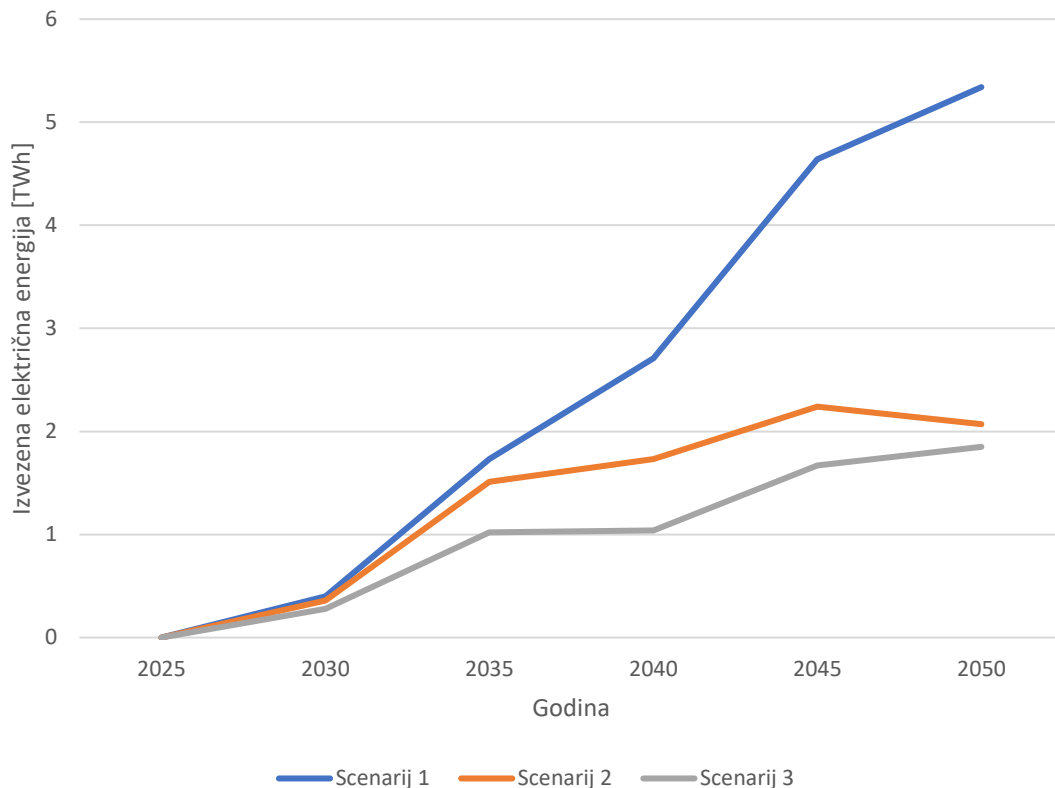
6.1. Odzivi scenarija

Za usporedbu scenarija, na slici 9. prikazan je uvoz električne energije za svaki od scenarija. Možemo primijetiti da oba scenarija implementacije tehnologija odziva potrošnje i balansiranja energetskeg sustava slično utječu na smanjenje uvezene električne energije. Od 2025. do 2035. godine ne postoji velika razlika u odnosu na scenarij 1 u kojem uopće nema navedenih tehnologija. Nakon 2035. godine jasno se mogu vidjeti učinci balansiranja sustava. Ipak, do 2045. godine ne postoji značajna razlika između scenarija 2 umjereno brze implementacije tehnologija, od scenarija 3 koji predstavlja ubranu implementaciju. Razlika u uvozu električne energije između scenarija 2 i 3 u 2040. godini iznosi tek 0,15 TWh, no u 2050. godini razlika je 0,41 TWh.



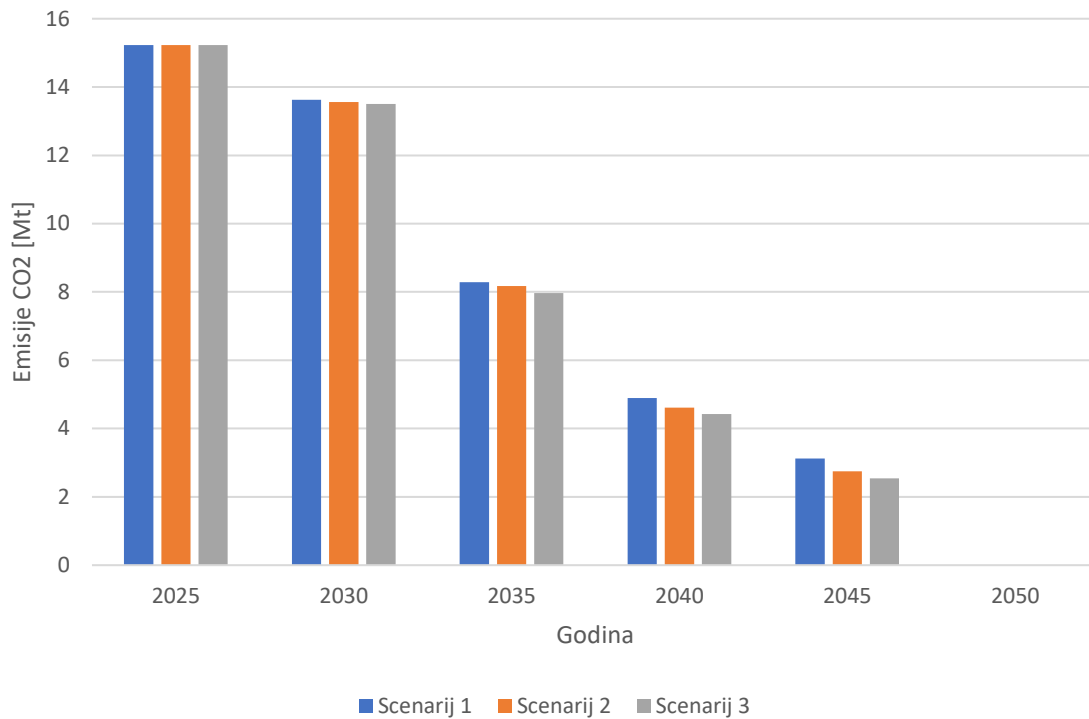
Slika 9. Uvezena električna energija kroz godine za pojedine scenarije u TWh

Slika 10. prikazuje izvezenu električnu energiju po scenarijima kroz godine. Pošto je simulacija izvršena na način da se upogone svi raspoloživi kapaciteti za pohranu prije nego se električna energija izveze, njen iznos se u 2040. godini smanjio s 2,71 TWh na 1,04 TWh u scenariju 3, odnosno 1,73 TWh u scenariju 2. U 2050. godini, bez korištenja tehnologija odziva potrošnje izvest će se 5,34 TWh, odnosno 16,5% ukupnih potreba za električnom energijom, dok će izvoz u scenariju 2 iznositi 2,07 TWh, te 1,85 TWh u scenariju 3. Ove podatke treba uzeti s dozom zadržke, pošto u trenucima kada se električna energija izvozi, mora postojati i potreba za električnom energijom na inozemnom tržištu.



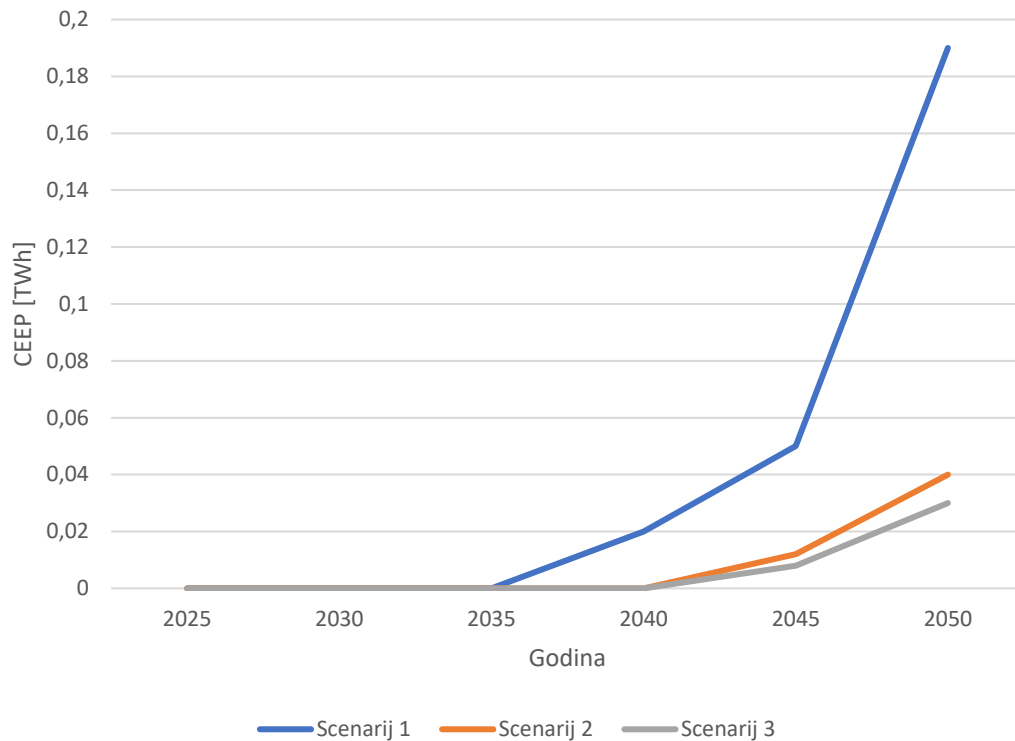
Slika 10. Izvezena električna energija kroz godine za pojedine scenarije u TWh

Na slici 11., koja predstavlja emisije CO₂ u ovisnosti od predstavljenih scenarija, može se vidjeti da brzina implementacija utječe na razinu emisija CO₂ u godinama kada varijabilni obnovljivi izvori čine značajan udio u proizvodnim kapacitetima električne energije, no još nisu potpuno zamijenili termoelektrane na fosilna goriva. Do 2030. godine smanjenje emisija CO₂ jedva je vidljivo te iznosi manje od 0,1 Mt u oba scenarija. Do 2045. godine raste značaj tehnologija odziva potrošnje na emisije CO₂ raste, te u 2045. godini ono iznosi čak 0,6 Mt u scenariju 3, te 0,4 Mt u scenariju 2.



Slika 11. Emisija CO2 kroz godine za pojedine scenarije u Mt

Kritični višak proizvedene električne energije (CEEP – critical excess energy produced) često se javlja u energetske sustavima s visokom velikom električnom energijom proizvedenom iz obnovljivih izvora. U tom slučaju ta energija ostaje neintegrirana. Na slici 12. možemo vidjeti da oba scenarija implementacije tehnologije balansiranja značajno smanjuju razinu neintegrirane energije, te da se ona pojavljuje tek poslije 2040. godine. U 2050. godini za scenarij 2 neintegrirana energija iznosi 0,04 TWh (0,12% od ukupno proizvedene električne energije), dok u scenariju 3 ona iznosi 0,03 TWh (0,09% od ukupno proizvedene energije).



Slika 12. Neintegrirana električna energija za pojedine scenarije u TWh

6.2. Ekonomska analiza scenarija

Ekonomska analiza uvođenja tehnologija odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje energetskeg sustava napravljena je na način da su uzeti u obzir svi dodatni troškovi koji se javljaju u odnosu na scenarij 1. Prvo su izračunati troškovi degradacije baterija uzrokovani vehicle to grid tehnologijom kako je prikazano u tablici 10., te su zatim izračunati ukupni troškovi implementacije tehnologija po scenarijima. Za izračun troškova degradacije baterije, prema odzivima scenarija, uzeto je da su u prosjeku 10% vremena vehicle to grid punionice bile potpuno opterećene.

Tablica 10. Trošak degradacije baterija prilikom balansiranja energetskeg sustava po scenarijima u MEUR

	Do 2025.	Od 2025. do 2030.	Od 2030. do 2035.	Od 2035. do 2040.	Od 2040. do 2045.	Od 2045. do 2050.	Ukupno
Scenarij 2	0	8	24	56	148	314	550
Scenarij 3	0	21	73	193	407	680	1374

Troškovima degradacije pridodani su i troškovi instalacije infrastrukture iz tablice 9 i prema parametrima scenarija navedenih u tablicama 8. i 9. izračunati su troškovi za svaki scenarij kako je prikazano u tablici 11.

Tablica 11. Troškovi balansiranja energetskeg sustava po scenarijima u MEUR

	Do 2025.	Od 2025. do 2030.	Od 2030. do 2035.	Od 2035. do 2040.	Od 2040. do 2045.	Od 2045. do 2050.	Ukupno
Scenarij 2	6	69	133	417	983	1387	2995
Scenarij 3	22	140	341	919	1502	1830	4754

Scenarij ubrzane implementacije u konačnici zahtjeva 59% veće troškove u periodu do 2050. godine od troškova koji se javljaju u scenariju umjerene brzine implementacije promatranih tehnologija.

7. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada pokazano je da se električnim vozilima, koristeći tehnologije pametnog punjenja i vehicle to grid tehnologije, može uspješno obavljati funkcija balansiranja energetske mreže u energetsom sustavu Republike Hrvatske koji se temelji na varijabilnim izvorima električne energije. Učinci ovih tehnologija dobivaju na značenju dostupnim gašenjem termoelektrana koje su do tada u sustavu imale zadaću pokrivanja vršnih opterećenja. To jasno možemo vidjeti iz prikazanih rezultata u kojima u tom tranzicijskom periodu postoji veća mogućnost smanjenja emisija CO₂ s povećanim ulaganjima u infrastrukturu potrebnu za vehicle to grid tehnologiju. Za razdoblje od 2035. do 2050. godine uvoz električne energije u scenarijima kada su implementirane navedene tehnologije pao je za više od 30% u odnosu na scenarij bez implementacije odziva potrošnje i tehnologija za balansiranje, što pridonosi samodostatnosti sustava. Kako se navedenim tehnologijama postigla veća fleksibilnost prilikom potrošnje električne energije, izvoz električne energije, u odnosu na scenarij bez implementacije smanjen je za 61%, odnosno za 65% u scenariju ubrzane implementacije. Neintegrirana energija ne pojavljuje se u sustavu s predloženim tehnologijama sve do 2040. godine, a u 2050. godini smanjena je za 85% u scenariju ubrzane implementacije, dok u drugom scenariju smanjenje iznosi 80%.

Dva scenarija implementacije, koja su razmatrana kroz ovaj rad, pokazala su da ubrzani ritam ulaganja u infrastrukturu koja je potrebna za iskorištavanje potpunog potencijala koji ova tehnologija nudi za sobom povlači oko 40% veće troškove. Od ukupnih troškova implementacije tehnologije pametnog punjenja i tehnologije vehicle to grid, u scenariju ubrzane implementacije udio koji predstavlja trošak zbog degradacije baterija iznosi 29%, dok u scenariju umjerene brzine implementacije ono iznosi 19%. Imajući to u vidu, kao i podatak da je iznos neintegrirane energije, kao i smanjenje izvoza električne energije u oba scenarija skoro pa jednako, možemo zaključiti da planiranje implementacije ovih vrsta tehnologija treba biti proporcionalno benefitima koje donosi u obliku smanjenja uvoza električne energije i smanjenja emisija CO₂.

8. LITERATURA

- [1] Strategija niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, Hrvatski sabor, 2021.
- [2] Y. L. Zhukovskiy, P. K. Suslikov, N. I. Russkih, N.A. Korolev: The use of vehicle-to-grid technology for the integration of electric vehicles in the power system of the city, 2019.
- [3] Antun Pfeifer, Luka Herc, Ilija Batas Bjelić, Neven Duić: Flexibility index and decreasing the costs in energy systems with high share of renewable energy, 2021.
- [4] J. Wang: Constructing a V2G-enabled regional energy internet for cost-efficient carbon trading, *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 31–40, 2020.
- [5] Rajashekara K.: History of Electric Vehicles in General Motors *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 4, pp. 897–904, 1994.
- [6] Xiaoli Sun, Zhengguo Li, Xiaolin Wang, Chengjiang Li: Technology Development of Electric Vehicles : pp. 1–29, 2020.
- [7] The Global Electric Vehicle Market In 2021 – Virta, <https://www.virta.global/global-electric-vehicle-market> 18.9. 2021.
- [8] Opali M.,P. Rek, P. Sulokowski: Review of propulsion types in hybrid electric vehicles
- [9] A. van Velzen, J. A. Annema, G. van de Kaa, B. van Wee: Proposing a more comprehensive future total cost of ownership estimation framework for electric vehicles, *Energy Policy*, vol. 129, no. September 2017, pp. 1034–1046, 2019
- [10] Soulopoulos N.: When Will Electric Vehicles be Cheaper than Conventional Vehicles, 2017.
- [11] L. Mauler, F. Duffner, W. G. Zeier, J. Leker: Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050, *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 9, pp. 4712–4739, 2021.
- [12] The Charging Cycles of Lithium-ion Polymer Batteries - Grepow Blog, <https://www.grepow.com/blog/charging-cycles-of-lithium-ion-polymer-batteries/> , 21.9. 2021.
- [13] T. Chen: A Review on Electric Vehicle Charging Infrastructure Development in the UK, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 193–205, 2020.
- [14] Why Bidirectional Charging is The Next Big Thing for EV Owners, <https://blog.wallbox.com/why-bidirectional-charging-is-the-next-big-thing-for-ev-owners/>, 19.9.2021.

-
- [15] M. Nicholas: Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas, *Int. Counc. Clean Transp.*, no. 14, p. 11, 2019.
- [16] F. Wang: Day-ahead optimal bidding and scheduling strategies for DER aggregator considering responsive uncertainty under real-time pricing, *Energy*, vol. 213, p. 118765, Dec. 2020.
- [17] S. Annala: Regulation as an enabler of demand response in electricity markets and power systems, *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 1139–1148, 2018.
- [18] A. De Los Ríos, J. Goentzel, K. E. Nordstrom, and C. W. Sievert: Economic analysis of Vehicle-to-Grid (V2G)-enabled fleets participating in the regulation service market, *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. ISGT 2012*, pp. 1–8, 2012.
- [19] A. Thingvad, L. Calero, P. B. Andersen, and M. Marinelli: Empirical Capacity Measurements of Electric Vehicles Subject to Battery Degradation from V2G Services, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 8, pp. 7547–7557, 2021.
- [20] H. Ko, S. Pack, and V. C. M. Leung: Mobility-Aware Vehicle-to-Grid Control Algorithm in Microgrids, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 7, pp. 2165–2174, Jul. 2018.
- [21] J. Iria, P. Scott, A. Attarha: Network-constrained bidding optimization strategy for aggregators of prosumers, *Energy*, vol. 207, p. 118266, Sep. 2020.
- [22] EnergyPLAN | Advanced energy systems analysis computer model, <https://www.energyplan.eu/> 15.9.2021.
- [23] EIHP | Energy Institute Hrvoje Požar, <http://www.eihp.hr/>, 15.9.2021.
- [24] IEA, <https://www.iea.org/countries/croatia>, 15.9.2021.
- [25] Eurostat, https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/search?p_p_id=estatsearchportlet_WAR_estatsearchportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_estatsearchportlet_WAR_estatsearchportlet_action=search&p_auth=whBASg06&text=croatia, 15.9.2021.
- [26] Power Statistics, <https://www.entsoe.eu/data/power-stats/>, 15.9.2021.
- [27] Repozitorij datoteka - Hrvatska energetska tranzicija, <https://het.hr/repositorij/>, 19.9.2021.