Tehno-ekonomska analiza primjene alternativnih goriva u sustavu prometa u energetskoj tranziciji

Opetuk, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:825745

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Opetuk

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Filip Opetuk

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svom mentoru Nevenu Duiću na pruženoj prilici te asistentu Antunu Pfeiferu na pomoći i strpljenju.

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

Na poslijetku, zahvaljujem se svojim roditeljima, djevojci i prijateljima koji su bili uz mene tijekom studiranja.

Filip Opetuk

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Filip Opetuk** Mat. br.: 0035199208

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza primjene alternativnih goriva u sustavu prometa u energetskoj tranziciji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of implementation of alternative fuels in transport system in energy transition**

Opis zadatka:

Jedan od ključnih elemenata strategije EU za promet s niskim emisijama jest poticanje korištenja obnovljivih izvora energije i alternativnih goriva u prometu. U slučaju Hrvatske, udio prometa u emisijama stakleničkih plinova iznosi 24,6%. Stoga, svaki strateški plan smanjenja emisija u svrhu izbjegavanja i prilagodbe klimatskim promjenama razmatra smanjenje emisija iz prometa kroz njegovu elektrifikaciju ili prijelaz na alternativna goriva. Predviđanja udjela električnih vozila i vozila na vodik između 2030. i 2050. godine također su prisutna u aktualnim prijedlozima nacionalnih strateških dokumenata, poput prijedloga Energetske strategije, gdje se predviđa da čak i bez mjera udio električnih i vozila na vodik dostigne 2,5% u 2030., odnosno 30% u 2050., dok u scenariju ubrzane energetske tranzicije predviđanja dostižu 4,5% u 2030. i 85% u 2050., a u scenariju umjerene tranzicije predviđanje iznosi 3,5% u 2030., odnosno 65% u 2050. godini. U skladu s navedenim strategijama i ambicijama, Nacrt integriranog energetskog i klimatskog plana 2021.-2030. također donosi mjere za jačanje infrastrukture i povećanje udjela vozila na alternativna goriva. Zadatak ovog rada je istražiti, metodama tehno-ekonomske analize, značajne tehnologije za smanjenje emisija iz sustava prometa, kao što su elektrifikacija cestovnog prometa ili korištenje vodika kao goriva. S tim ciljem, potrebno je:

1. Napraviti pregled literature vezane uz cijene i ekonomiku električnih vozila i vozila na vodik te potrebnu infrastrukturu.
2. Objasniti ulogu svake od razmatranih tehnologija u povezivanju energetskog sustava i sustava prijevoza.
3. Prikazati projekcije cijena električnih vozila i vozila na vodik te pripadajuće infrastrukture do 2030. i 2050. godine, u skladu s dostupnom literaturom.
4. Tehno-ekonomskom analizom pokazati slučajeve u kojima niže sveukupne troškove vlasništva ima vozilo koje koristi jednu ili drugu tehnologiju, uspoređujući ih s konvencionalnim vozilima s motorom na unutarnje izgaranje.
5. Predložiti poslovne modele koji bi omogućili vlasnicima vozila na alternativna goriva da aktivno sudjeluju u radu energetskog sustava.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
26. rujna 2019.	28. studenoga 2019.	2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
1.1. Zakonodavne mjere 4
2. CIJENA I EKONOMIKA ELEKTRIČNIH VOZILA I VOZILA NA VODIK 7
2.1. Električna vozila 7
2.1.1. Kapitalni troškovi 8
2.1.2. Operativni troškovi 10
2.1.3. Infrastruktura za električna vozila 13
2.2. Vozila na vodik 16
2.2.1. Kapitalni troškovi 19
2.2.2. Operativni troškovi 21
2.2.3. Infrastruktura 22
3. POVEZIVANJE ENERGETSKOG SUSTAVA I SUSTAVA PRIJEVOZA 24
3.1. Spoj električnog vozila i mreže 27
3.2. Spoj vozila na vodik i mreže 30
4. PROJEKCIJE CIJENA ELEKTRIČNIH VOZILA I VOZILA NA VODIK 32
4.1. Cijene baterija 32
4.2. Cijene gorivnih članaka 33
4.3. Cijene benzina 34
4.4. Cijene električne energije 35
4.5. Cijene vodika 36
5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA 38
5.1. Ulazni podatci 40
5.1.1. Cijene vozila 40
5.1.2. Godišnja kilometraža 41
5.1.3. Prosječna potrošnja pogonskih sklopova 41
5.1.4. Troškovi održavanja 41
5.1.5. Porezi i davanja državi 42
5.2. Rezultati tehno-ekonomske analize 43
5.3. Analiza osjetljivosti 47
6. POSLOVNI MODELI ZA SUDJELOVANJE VLASNIKA VOZILA U RADU ENERGETSKOG SUSTAVA 52
6.1. Trenutni model privatnog punjenja 52
6.2. Pametno punjenje 52

6.3. Punjenje na mreži ... 53
6.4. Punjenje na putu ... 54
6.5. Punjenje flote ... 55
6.6. Analiza poslovnih modela ... 55
6.6.1. Metodologija ... 56
6.6.2. Rezultati ... 58
7. ZAKLJUČAK ... 61
LITERATURA ... 64
PRILOZI ... 73

POPIS SLIKA

Slika 1. Godišnja emisija CO2 nastala antropogenim djelovanjem [1] 1
Slika 2. Promjena prosječne temperature zemljine površine u odnosu na 1986. – 2005. [1] 1
Slika 3. Plan EU za smanjenje emisija stakleničkih plinova do 2050., učinak CCS-a prikazan crvenom bojom. [5] 3
Slika 4. Udio prometa u ukupnim emisijama stakleničkih plinova [6][7][8] 3
Slika 5. Relativni porast apsolutnog iznosa emisija stakleničkih plinova iz prometa [6][7][8] 4
Slika 6. Smanjenje cijena Li-ion baterija od 2010. do 2018. [27] 9
Slika 7. Udio troška goriva u ukupnim operativnim troškovima prema Palmer et al. [21] 10
Slika 8. Trošak električne energije po izvoru (LCOE) za OIE i fosilna goriva 2018. u Njemačkoj [29] 11
Slika 9. Priključci na električnim vozilima prema IEEE standardima [38] 13
Slika 10. Punjač koji se spaja izravno na utičnicu [39] 14
Slika 11. Ugradbeni kućni punjač [39] 14
Slika 12. HEP-ova ELEN punionica u Otočcu [42] 15
Slika 13. PEM gorivni članak [48] 16
Slika 14. Toyota Mirai osobni automobil na vodik [55] 17
Slika 15. Alstom Croadia iLint vlak na vodik [56] 18
Slika 16. Usporedba cijena BEV-a, FCEV-a i vozila s MSUI [49][60] 20
Slika 17. Cijena proizvodnje vodika iz raznih tehnologija u 2014. prema Creti et al. [62] . 21
Slika 18. Punionica na vodik uklopljena u OMV-ovu benzinsku postaju u Njemačkoj [67] 23
Slika 19. Udio pojedinih izvora energije u proizvodni električne energije u EU [7] 24
Slika 20. Udio pojedinih izvora energije u proizvodnji električne energije u RH [7] 25
Slika 21. Učestalost potrebe promjene izlazne snage termoelektrane u 2009. i predviđanje za 2020. [68] 25
Slika 22. Prikaz pametne mreže, mreže budućnosti [73] 27
Slika 23. Pad kapaciteta Li-ion baterije u ovisnosti o broju ciklusa raznih baterija [75] 28
Slika 24. Opterećenje EES-a za punjenje EV-ova s udjelom na tržištu SAD-a od 45% u ovisnosti o strategiji punjenja (nekontrolirano ili pametno punjenje) [76] 29
Slika 25. V2G sustav vozila s gorivnim člancima (FCEV) [79] 30
Slika 26. Procijenjene cijene baterija po kWh do 2040. [80] 32
Slika 27. Procijenjene cijene baterija po kWh do 2050. [81] 33
Slika 28. Cijena gorivnih članaka u ovisnosti o godišnjoj proizvodnji [82] 33
Slika 29. Projicirane cijene gorivnih članaka [49][60][61] 34
Slika 30. Procijenjeno kretanje cijena benzina do 2050. [31] 35
Slika 31. Procijenjeno kretanje cijena električne energije u Europi do 2050. [84] 36
Slika 32. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 12.688 km godišnje 45
Slika 33. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 17.500 km godišnje 45
Slika 34. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 25.000 km godišnje 46
Slika 35. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 35.000 km godišnje 47
Slika 36. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% nižoj cijeni benzina za 25.000 (lijevo) i 35.000 km (desno) 48
Slika 37. Ukupni troškovi posjedovanja pri 15% nižoj cijeni benzina za 17.500 km 49
Slika 38. Ukupni troškovi posjedovanja pri 15% višoj cijeni benzina za 25.000 (lijevo) i 35.000 km (desno) 49
Slika 39. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% višoj cijeni benzina za 17.500 km 50

Slika 40. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% višoj cijeni električne energije za 17.500 km 50
Slika 41. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% nižoj cijeni vodika za 17.500 km (lijevo) i 35.000 km (desno) 51
Slika 42. Primjer *load levelinga* korištenjem pametnog punjenja [93] 53
Slika 43. Primjer *load levelinga* uslijed pametnog punjenja i dodatnog smanjenja opterećenja korištenjem V2G koncepta [93] 54
Slika 44. Gubitak kapaciteta baterije u ovisnosti o broju ciklusa s prikazanim rezervama [98] 56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kapitalni i operativni troškovi nekih tehnologija proizvodnje električne energije [31] 12
Tablica 2. Projicirani pad cijena gorivnih članaka 20
Tablica 3. Kapitalni trošak i učinkovitost pojedinih tehnologija za proizvodnju vodika [31] 22
Tablica 4. Prikaz procijenjenih cijena vodika raznih autora [49][61][62][63] 36
Tablica 5. Osnovni podatci i maloprodajne cijene vozila u Hrvatskoj 40
Tablica 6. Prosječne potrošnje pogonskih sklopova 41
Tablica 7. Godišnji troškovi održavanja pogonskih sklopova 42
Tablica 8. Porezi i davanja državi za vozila 42
Tablica 9. Ukupno troškovi posjedovanja do 2050. u osnovnom scenariju za prosječnu hrvatsku kilometražu (12.688 km) i 17.500 km [€] 43
Tablica 10. Ukupni troškovi posjedovanja do 2050. u osnovnom scenariju za 25.000 km i 35.000 km [€] 44
Tablica 11. Ulazni podatci za EnergyPLAN 57
Tablica 12. Rezultati simulacije elektroenergetskog sustava 58
Tablica 13. Rezultati primjene simulacije na modele korištene u radu 58
Tablica 14. Cijena pohrane energije u baterijama električnih vozila 59

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
OIE		obnovljivi izvori energije
CCS		*carbon capture and storage*, hvatanje i skladištenje ugljika
UPP		ukapljeni prirodni plin
SPP		stlačeni prirodni plin
EU		Europska unija
EV		*electric vehicle*, električno vozilo
VV		vodikovo vozilo
TCO		*total cost of ownership*, ukupni troškovi posjedovanja
BEV		*battery electric vehicle*, baterijsko električno vozilo
MSUI		motor s unutarnjim izgaranjem
FCEV		*fuel cell electric vehicle,* vodikovo vozilo s gorivnim člancima
PHEV		*plug-in hybrid electric vehicle,* plug-in hibridno električno vozilo (na punjač)
LCOE		*levelised cost of electricity*, trošak električne energije po izvoru
CAPEX		*capital expenditures*, kapitalni troškovi
OPEX		*operating expenditures*, operativni troškovi
ETS		*Emissions Trading System,* europski sustav trgovanja emisijama
HE		hidroelektrana
PV		fotovoltaici
PEM		*proton exchange membrane,* membrana za izmjenu protona
SMR		*steam methane reforming,* parno reformiranje prirodnog plina
UNP		ukapljeni naftni plin
V2G		*vehicle to grid*, punjenje na mreži
IOT		*internet of things,* internet stvari
I_0	€	investicijski troškovi u 0-toj (nabavnoj) godini
T_0	€	porez u 0-toj (nabavnoj) godini
S_0	€	subvencija na kupnju vozila
Inf_0	€	ukupni troškovi izgradnje infrastrukture
I_n	€	investicijski troškovi u n-toj godini
F_n	€	troškovi goriva u n-toj godini
M_n	€	troškovi održavanja u n-toj godini
T_n	€	davanja državi u n-toj godini
GK	km	godišnja kilometraža
$PP_{b,n}$	l/100 km	prosječna potrošnja benzinskog vozila u n-toj godini
$PP_{ee,n}$	km/kWh	prosječni prevaljeni put električnog vozila po jedinici električne energije u n-toj godini

$PP_{v,n}$	km/kg	prosječni prevaljeni put vodikovog vozila po jedinici mase vodika u n-toj godini
$C_{b,n}$	€/l	cijena benzina u n-toj godini
$C_{ee,n}$	€/kWh	cijena električne energije u n-toj godini
$C_{v,n}$	€/kg	cijena vodika u n-toj godini
PO	€/km	prosječni troškovi održavanja
r'	%	nominalna diskontna stopa
$\overline{f}$	%	generalna stopa inflacije
r	%	stvarna diskontna stopa
PPMV		posebni porez na motorna vozila
PCMV		porez na cestovna motorna vozila
WACC	%	*weighted average cost of capital*, ponderirani prosječni trošak kapitala
OS		osnovni scenarij

SAŽETAK

Ovaj radi bavi se tehno-ekonomskom analizom primjene alternativnih goriva u sustavu prometa u energetskoj tranziciji s ciljem smanjenja emisije stakleničkih plinova. Alternativna goriva u razmatranju su električna energija i vodik. Prikazane su osnovne karakteristike pojedinih tehnologija alternativnih goriva i potrebna infrastruktura. Prikazane su i projekcije cijena tehnologija, cijena goriva i učinkovitosti energetskih pretvorba različitih pogonskih sklopova do 2050. godine. Korištenjem tih podataka izrađena je tehno-ekonomska analiza za pet različitih osobnih vozila različitih pogonskih sklopova na uzorcima od četiri prosječne godišnje kilometraže (12.688, 17.500, 25.000 i 35.000 km) za desetogodišnje razdoblje posjedovanja s kupnjom u petogodišnjim intervalima od 2020. do 2045. Metodom ukupnih troškova posjedovanja uspoređena su vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem (Renault Clio, Škoda Octavia), električna vozila (Renault Zoe, Nissan Leaf) i vozilo na vodik (Toyota Mirai). Dobiveni rezultati pokazuju da za više godišnje kilometraže električna vozila dostižu troškovni paritet već 2020., a vozila na vodik 2030. Za manje kilometraže najpovoljnija su vozila s MSUI. Izrađena je analiza osjetljivosti za različite cijene goriva i diskontne stope te su nakon toga predloženi poslovni modeli kojima bi vlasnik vozila na alternativna goriva mogao sudjelovati u radu energetskog sustava. Analizirano je kako primjena različitih poslovnih modela (neregulirano punjenje, pametno punjenje, punjenje na mreži) utječe na vijek trajanja baterija i ustvrđeno je da punjenje na mreži povećava broj ciklusa baterije u 10-godišnjem razdoblju posjedovanja od 31% do 103%. Pokazano je da je pohrana električne energije u baterijama u slučaju veće pohranjene energije po bateriji cjenovno konkurentna drugim tehnologijama pohrane energije.

Ključne riječi: EV, ukupni troškovi posjedovanja, vozila na vodik

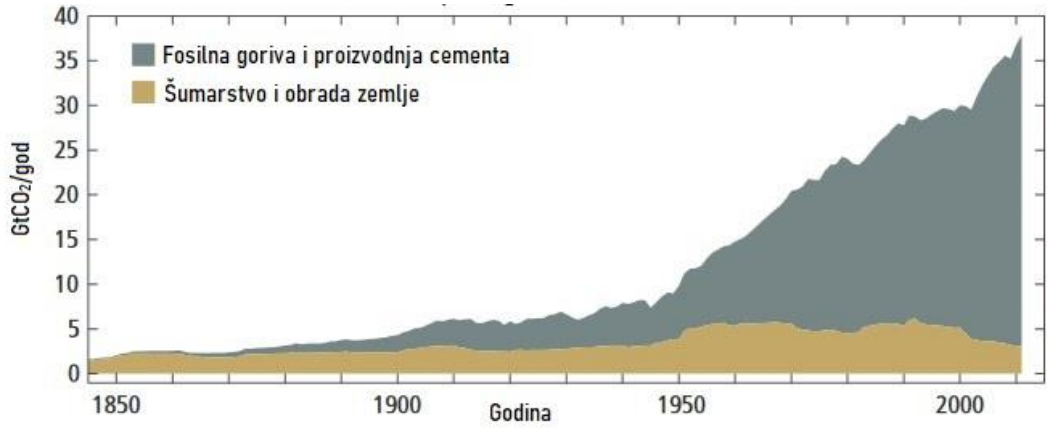
SUMMARY

This paper is a techno-economic analysis of implementation of alternative fuels in transport systems in energy transition with the goal of reducing greenhouse gas emissions. Alternative fuels considered are electrical energy and hydrogen. A general overview of hydrogen and electric vehicles is given, as well as the information on necessary infrastructure. Technology and fuel cost projections are given up to 2050, as well as powertrain efficiency projections. Using this data, a case study is performed for five different vehicles with three different powertrains, for four different annual mileages (12,688 km, 17,500 km, 25,000 km and 35,000 km), for a ten-year ownership period with a start date every five years from 2020 up to 2045. Using the total cost of ownership method, the internal combustion engine vehicles (Renault Clio, Škoda Octavia), electric vehicles (Renault Zoe, Nissan Leaf) and a hydrogen vehicle (Toyota Mirai) TCOs are compared. The results of the case study indicate that for higher annual mileage, EV TCO is lower than ICEV TCO from the year 2020, whereas hydrogen vehicle TCO is lower than ICEV from 2030. For a smaller annual mileage ICEV is the best technology for the whole case study period. A sensitivity analysis is performed for different fuel prices and discount rates and afterwards different business models for vehicle owners' participation in the functioning of the electrical grid are proposed. The proposed business models are analysed (dump charge, smart charge, V2G) and it is concluded that using V2G increases the number of battery cycles during a ten-year ownership period from 31% to 103%. It is also shown that energy storage in EV batteries is commercially viable in systems where relatively more energy is stored annually per battery.

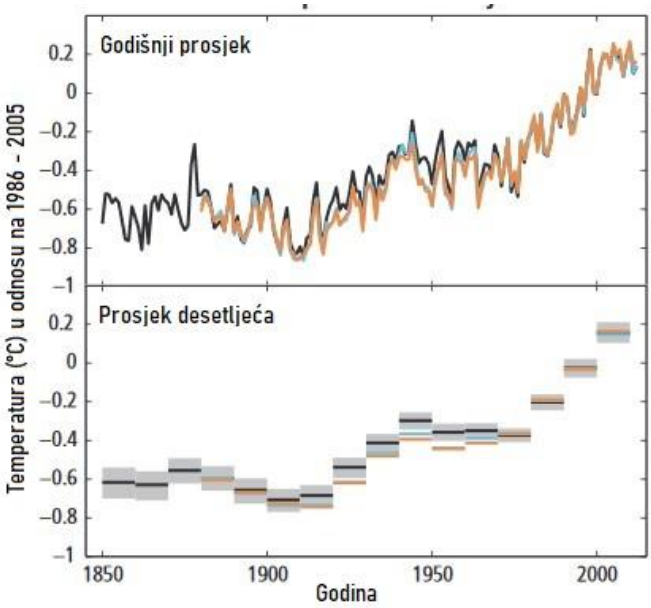
Key words: EV, FCEV, TCO

1. UVOD

Klimatske promjene jedan su od vodećih izazova ne sutrašnjice, već sadašnjice. Posljednja tri desetljeća bila su tri uzastopno najtoplija u zadnjih 150 godina, a vrlo vjerojatno i u zadnjih 800 godina.[1]. Prosječna površinska temperatura zemlje podigla se za 1°C u odnosu na predindustrijsko doba [2]. To je uzrokovano antropogenim emisijama stakleničkih plinova koje su trenutno na najvišoj razini u posljednjih 800 000 godina, što dovodi do povećane akumulacije energije u atmosferi [1]. Dominantni staklenički plin odgovoran za 4/5 emisija je ugljikov dioksid. Koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi prikazana je na slici [Slika 1], a promjena prosječne površinske temperature Zemlje prikazana je na slici [Slika 2].



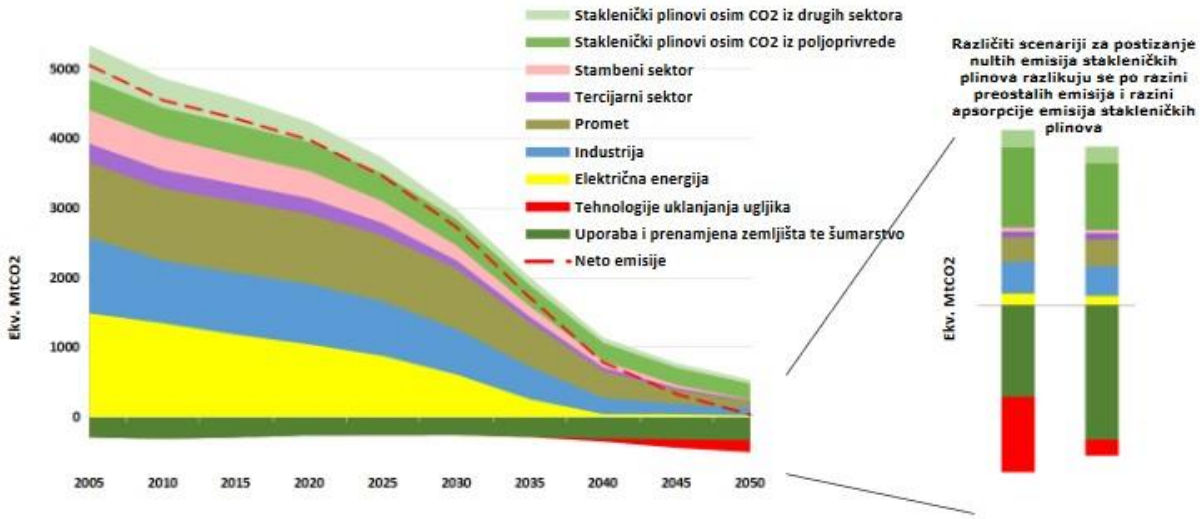
Slika 1. Godišnja emisija CO2 nastala antropogenim djelovanjem [1]



Slika 2. Promjena prosječne temperature zemljine površine u odnosu na 1986. – 2005. [1]

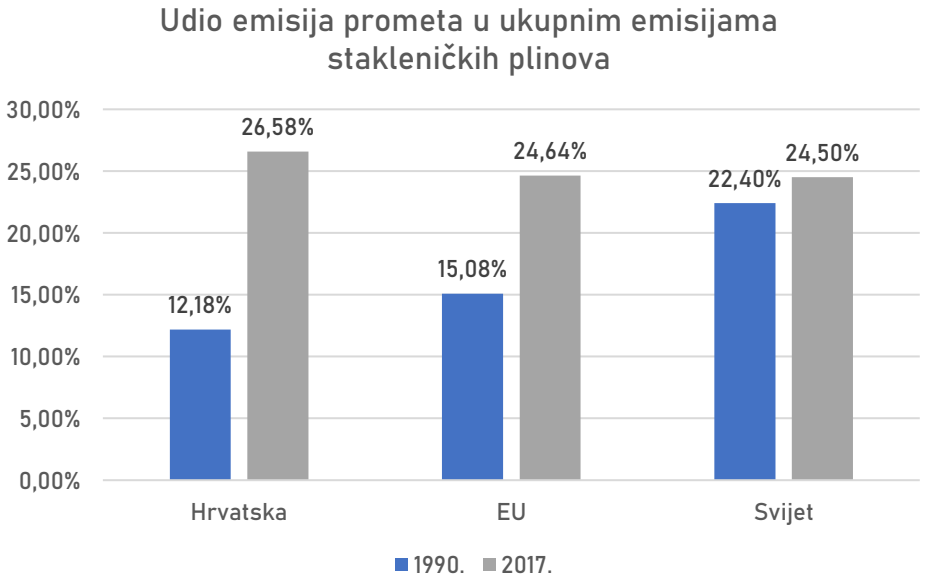
Posljedice klimatskih promjena osjećaju se već sada – razina mora podigla se za 19 cm u odnosu na 1901., smanjuju se ledene kape, mnoge životinjske vrste promijenile su svoj habitat, sezonska kretanja i migracije. Iako neka područja imaju povećanu poljoprivrednu proizvodnju uslijed globalnog zatopljenja, neto učin je smanjenje prinosa žitarica poput kukuruza, riže, pšenice i sl. Do 2050. procijenjeni porast površinske temperature je minimalno 1,5 °C [2], što bi za posljedicu imalo mijenjanje obrazaca padalina, smanjenje količine kisika u morima, podizanje razine mora za 0,8 m u odnosu na predindustrijsko doba, učestale ekstremne vremenske neprilike (oluje, uragani, poplave), izumiranje brojnih životinjskih vrsta i masovne migracije [1][2].

Kako bi se uspješno borili protiv klimatskih promjena uzrokovanih ljudskim djelovanjem, bitno je smanjiti emisiju stakleničkih plinova, poglavito ugljikovog dioksida. Ugljikov dioksid primarno nastaje kao produkt izgaranja u našim elektranama, pećima i vozilima. Prepoznajući važnost borbe s klimatskim promjenama, Europska unija je u ovom stoljeću fokus svog razvoja stavila na niskougljično gospodarstvo. To je kulminiralo potpisivanjem Pariškog sporazuma prema kojem je 186 zemalja svijeta (uključujući Kinu, SAD i EU) obvezalo spriječiti globalno zagrijavanje od 2 °C u 2050. i „činiti sve u njihovoj moći“ da globalno zagrijavanje bude ispod predviđenih 1,5 °C [3]. Ti ciljevi ujedno su i ciljevi Republike Hrvatske kao članice Europske unije. Niskougljično gospodarstvo ostvaruje se kroz povećanje energetske učinkovitosti, upotrebu obnovljivih izvora energije (OIE), implementaciju cirkularne ekonomije, poboljšanje infrastrukture i interkonekcija, povećanje mobilnosti i konkurentnosti te tehnologije izdvajanja i spremanja ugljikova dioksida (CCS – *carbon capture and storage*) [Slika 3][4]. Osim očite prednosti smanjenja emisija, visok udio obnovljivih izvora energije smanjuje europsku ovisnost o fosilnim gorivima kojih Europa, u usporedbi s nekim drugim državama i područjima, nema puno.



Slika 3. Plan EU za smanjenje emisija stakleničkih plinova do 2050., učinak CCS-a prikazan crvenom bojom. [5]

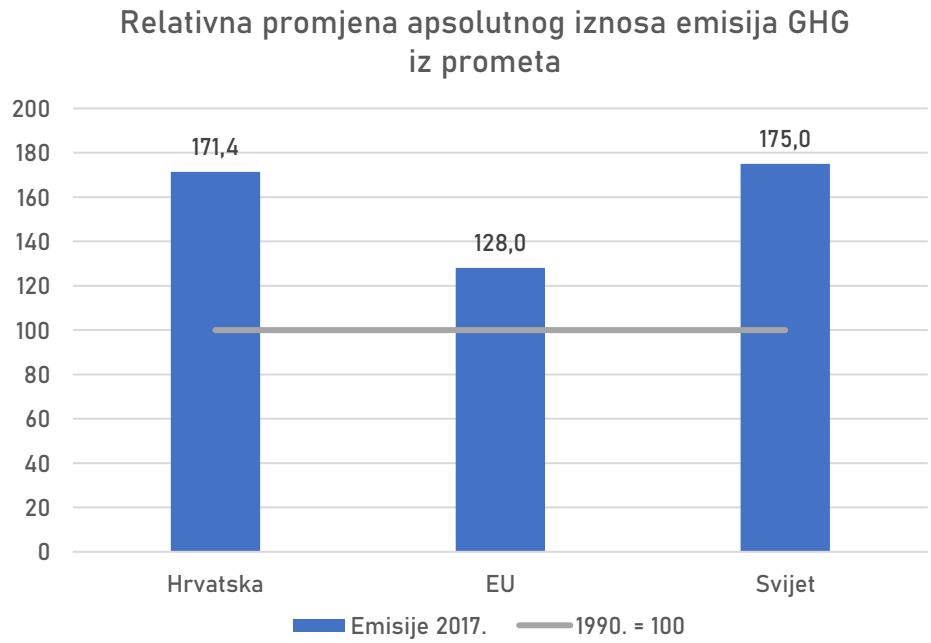
U Republici Hrvatskoj udio prometa u ukupnoj emisiji stakleničkih plinova u 2017. godini iznosio je 26,56% [6] što odgovara 6,65 $MtCO_2e$ [6], dok je svjetski prosjek u istoj godini iznosio 24,50% [7]. U Europskoj uniji četvrtina emisija (24,64%) 2017. godine nastala je u prometu [8]. Grafički prikaz relativnog udjela prometa u emisiji stakleničkih plinova u 1990. i 2017. prikazuje porast tog udjela koji je na razini svijeta nešto manji, ali na razini Europe je značajniji [Slika 4].



Slika 4. Udio prometa u ukupnim emisijama stakleničkih plinova [6][7][8]

Bitni su i apsolutni iznosi jer su Hrvatska i EU smanjili svoje ukupne emisije stakleničkih plinova između 1990. i 2017., stoga su prikazane i relativne promjene apsolutnih emisija stakleničkih plinova iz prometa [Slika 5]. Hrvatska je 1990. emitirala 3,88 $MtCO_2e$ iz prometa,

dok je 2017. godine taj iznos porastao na 6,65 $MtCO_2e$ [6]. Iako je to po apsolutnom iznosu malo u odnosu na europskih 1.104 $MtCO_2e$ [8] u 2017. ili svjetskih 8.040 $MtCO_2e$, [7] Hrvatska je kao članica EU obvezana smanjiti svoje emisije, a budući da je prometni sektor u ekspanziji, njemu treba posvetiti posebnu pozornost.



Slika 5. Relativni porast apsolutnog iznosa emisija stakleničkih plinova iz prometa [6][7][8]

Osim netehničkih mjera poput smanjenja uporabe transporta i odluke potrošača o korištenju javnog prijevoza, neke tehničke mjere poput elektrifikacije prometa i korištenje alternativnih goriva poput vodika djeluju pozitivno na smanjenje emisija. Električna vozila, kada se uzme u obzir njihova proizvodnja i izvor električne energije kojim se pune baterije, su manji emiteri od vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem [9]. Vozila na vodik ne emitiraju nikakve stakleničke plinove prilikom svog rada, već se sve emisije odvijaju u fazi proizvodnje vodika i samog vozila [10]. Kako je cilj energetske tranzicije smanjiti, pa u potpunosti eliminirati emisiju stakleničkih plinova, nužno je i vodik proizvoditi bez emisija. Širom primjenom ovakvih vozila postiglo bi se značajno smanjenje emisija prometa te bi se otvorile mogućnosti povećanja fleksibilnosti i stabilnosti elektroenergetskih sustava.

1.1. Zakonodavne mjere

Važnost smanjenja emisija stakleničkih plinova u prometu prepoznata je i u temeljnim dokumentima energetske politike Europske unije: Dugoročnoj energetskoj strategiji do 2050. i paketu Čiste energije za sve Europljane. Ovi dokumenti međusobno se nadopunjuju jer Dugoročna energetska strategija do 2050. godine daje smjernice i odrednice politike

ostvarivanja niskougljičnog gospodarstva, a paket Čista energija za sve Europljane sadrži konkretne mjere za realizaciju tog plana u razdoblju do 2030. godine – cilj je smanjiti emisiju stakleničkih plinova za 40% u odnosu na 1990. godinu, proizvoditi 32% energije iz OIE i povećati energetske učinkovitosti za 32,5% na razini cijele EU [4]. U sektoru prometa, plan EU za 2050. godinu opisan u Bijeloj knjizi o prometu je nepostojanje vozila na konvencionalna goriva u gradovima, korištenje 40% održivih niskougljičnih goriva u avionskom prijevozu i smanjenje emisija u transportu robe za 40% te poticanje korištenja željeznica i unutarnjih plovnih puteva tako da preuzmu 50% međugradskog prometa. Procjenjuje se da bi sve te mjere trebale smanjiti emisiju stakleničkih plinova u Europi za 60% [11]. Vidljivo je da je za ovakve scenarije ključna elektrifikacija prometa (poglavice gradskog) i korištenje alternativnih goriva (vodik se spominje kao rješenje za neke vidove prometa koje je teže elektrificirati poput brodskog prometa ili kamiona na internacionalnim rutama).

U okviru europske energetske strategije, i Republika Hrvatska je izradila svoj nacrt prijedloga energetske strategije u kojoj kao ključne stvari navodi osiguranje sigurnosti opskrbe energijom, smanjenje upotrebe energije i smanjenje emisija stakleničkih plinova u svrhu borbe s klimatskim promjenama [12]. Planira se „izgradnja nove infrastrukture za korištenje alternativnih oblika energije u prometu s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova (UPP, SPP/SBM, električna energija i vodik)“ [12], a u scenariju izrađenom bez poticajnih mjera očekuje se 2,5% električnih vozila (EV) i vozila na vodik (VV) do 2030., odnosno 30% do 2050. Ambiciozniji scenariji navode udio od 65% i čak 85% EV i vozila na vodik u Hrvatskoj 2050. godine. U skladu s tim, i kao obaveza preuzeta iz paketa Čiste energije za sve Europljane, Hrvatska je izradila Prvi Nacrt Integriranog energetskog i klimatskog plana za razdoblje od 2021. do 2030. godine [13]. Kao mjere vezane za sektor prometa spominje se podizanje naknada na vozila s konvencionalnim pogonom, poticanje čistih i energetski učinkovitih vozila, primjenu biogoriva, poticaje za EV i vozila na vodik, izgradnju infrastrukture za alternativna goriva (UPP, SPP, vodik) i električnih punionica. Isti ciljevi navedeni su i u trenutnom Četvrtom nacionalnom akcijskom planu energetske učinkovitosti za razdoblje 2017. – 2019. [14] koji kao poseban dodatak ima Pregled mjera za uspostavu infrastrukture za alternativna goriva.

UN-ov Međuvladin panel o klimatskim promjenama u svom Petom izvješću o klimatskim promjenama navodi potrebu za zamjenom goriva baziranih na naftnim derivatima prirodnim plinom, biogorivima te električnom energijom i vodikom ako su proizvedeni iz niskougljičnih

izvora kako bi se smanjile emisije stakleničkih plinova iz prometa koje trenutno čine 23% emisija (8000 $MtCO_2e$) s procijenjenim rastom na 12.000 $MtCO_2e$ do 2050. godine.

2. CIJENA I EKONOMIKA ELEKTRIČNIH VOZILA I VOZILA NA VODIK

Svaka primjena tehnologije nužno sa sobom nosi određen trošak. Taj trošak uvelike određuje opseg korištenja određene tehnologije, pogotovo ako se radi o robi široke potrošnje, a ne specijaliziranoj robi. Isto tako, prilikom donošenja zakonske regulative u tehnološkim područjima koji se tiču velikog dijela stanovništva, nužno je uzeti u obzir i socijalnu dimenziju. Predložene mjere trebaju biti i ekonomski razumne, ali razumne i sa stajališta osobnih financija. Primjer toga je Direktiva EU o energetskoj učinkovitosti zgrada (EPBD) koja prilikom predlaganja mjera uštede energije u zgradarstvu gleda cjenovno optimalnu točku, a ne (skuplju) točku najveće uštede energije [15]. Prilikom predlaganja bilo kakvih mjera - pogotovo u energetici koja predstavlja jedan od najvećih sektora na svijetu – nužno je projicirati koliko te mjere koštaju i koliko uštede. Iz tog razloga, ovo poglavlje bit će posvećeno pregledu postojeće literature koja se bavi cijenom i ekonomikom električnih vozila i vozila na vodik i prateće infrastrukture.

Ukupni troškovi posjedovanja (TCO – *total cost of ownership*) vozila predstavljaju sve troškove koji se javljaju tijekom perioda posjedovanja vozila. Ovdje se uspoređuju ukupni troškovi posjedovanja različitih pogonskih sklopova osobnih vozila. Pogonski sklop predstavlja sustav pohrane i pretvorbe energije u vozilu i prijenos te energije na kotače. Za automobile, TCO ovisi o nekoliko faktora:

- nabavnoj cijeni vozila;
- vrijednosti vozila prilikom preprodaje;
- poticajima od države;
- trošku energije za pogon;
- porezima i davanjima državi i jedinicama lokalne samouprave;
- premiji osiguranja;
- troškovima održavanja;
- troškovima popravaka. [16]

2.1. Električna vozila

Električno vozilo u širem smislu predstavlja vozilo koje bar dio pogonske snage razvija elektromotorima. U tu kategoriju spadaju hibridna vozila (vozila s motorom na unutarnje

izgaranje i elektromotorima; baterije im se pune regenerativnim kočenjem), plug-in hibridna vozila (kombinirani pogon kao i hibridna, ali se baterije pune s elektroenergetske mreže) i potpuna EV (sva pogonska snaga dolazi od elektromotora). U užem smislu najčešće se govori o potpuno električnim vozilima (BEV – *battery electric vehicle*). Najčešće korištena baterija u električnim vozilima je litij-ionska kakva se nalazi u većini trenutnih vozila na tržištu (Nissan Leaf, Renault Zoe, Tesla Model 3, Chevrolet Volt, BMW i3, e Golf).

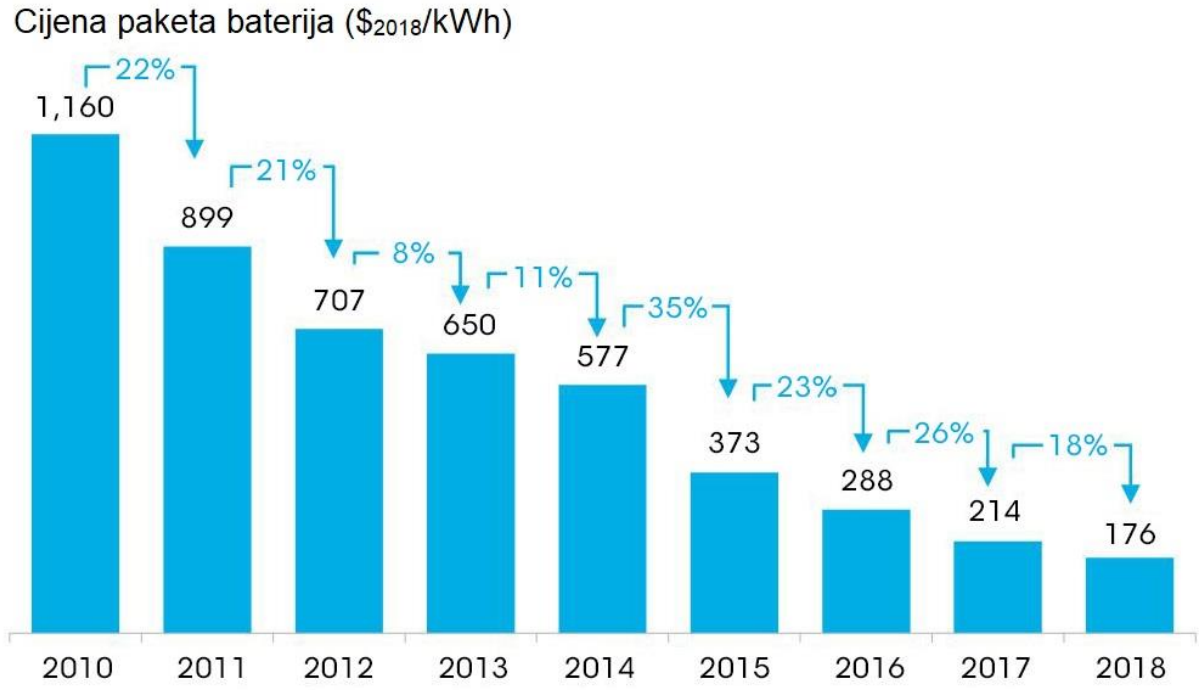
Električna vozila čista su onoliko koliko je električna energija kojom se napajaju čista. U slučaju vrlo „prljavog" energetskog miksa (miksa koji emitira velike količine stakleničkih plinova po jedinici proizvedene energije), emisije iz električnih vozila se približavaju emisijama iz konvencionalnih vozila [17]. Unatoč tome, u Europskoj uniji je električno vozilo u svim državama manji emiter stakleničkih plinova od prosječnog vozila [18]. Isto vrijedi i za sve države Australije [19], ali i većinu saveznih država Sjedinjenih Američkih Država [20].

U proteklih nekoliko godina objavljeno je mnogo radova na temu ukupnih troškova posjedovanja električnih vozila. Palmer et al. [21] ispitivali su TCO električnih i hibridnih vozila u četiri različita tržišta (Japan, UK, Kalifornija, Teksas) i ustvrdili postojanje troškovnog pariteta električnih vozila zbog postojanja državnih subvencije. Wu et al. [22] bavili su se statističkom analizom osjetljivosti TCO-a električnih vozila u 10.000 različitih scenarija i zaključili da cijene EV-ova i vozila s MSUI konvergiraju i u 2025. godini dostižu troškovni paritet, te da su EV isplativija u slučaju viših godišnjih kilometraža. Van Velzen et al. [23] analiziraju sve čimbenike koji utječu na formiranje TCO i nude metodologiju provođenja proračuna. Moon i Lee [24] bave se donošenjem odluka o kupnji električnih vozila i ustvrđuju njihov troškovni paritet u Južnoj Koreji. Tseng et al. [25] uključuju i bitan dio eksternih troškova posjedovanja vozila, njihov utjecaj na okoliš i ljude.

2.1.1. Kapitalni troškovi

Razni radovi različito raspoređuju ove troškove, uglavnom se svode na kapitalne troškove i operativne troškove. Kapitalni troškovi kod vozila uključuju nabavnu cijenu vozila koja je za električna vozila viša od vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem (MSUI), ali uključuju i određene poticaje od nacionalnih ili lokalnih vlasti. Zbog gotovo nepostojećeg tržišta rabljenih električnih automobila, mogućnost prodaje vozila gotovo ni u jednom istraživanju ne uzima se u obzir. U slučaju veće penetracije EV-ova na tržište otvorila bi se mogućnost preprodaje vozila koja bi utjecala na kupce novih vozila [22]. Operativni troškovi uključuju cijene goriva (konvencionalnog goriva, alternativnog goriva poput vodika ili električne energije), poreze i davanja državi (porez na emisiju stakleničkih plinova, naknadu za održavanje prometnica),

premiju osiguranja, troškove održavanja (godišnji servis, tehnički pregled) i neplanirane troškove popravaka. Viša nabavna cijena električnog vozila primarno je uzrokovana troškom proizvodnje baterije, ali i ekonomijom razmjera – svi troškovi nastali prilikom razvoja i proizvodnje električnih vozila moraju se rasporediti na manju količinu vozila. Ipak, cijena baterija se u zadnjih 8 godina smanjila za gotovo čitav red veličine [Slika 6]. Uz to, električna vozila zahtijevaju formiranje posebnih logističkih lanaca i proizvodnih procesa koji su kod industrije vozila s MSUI već desetljećima dobro uhodani i poznati [26].



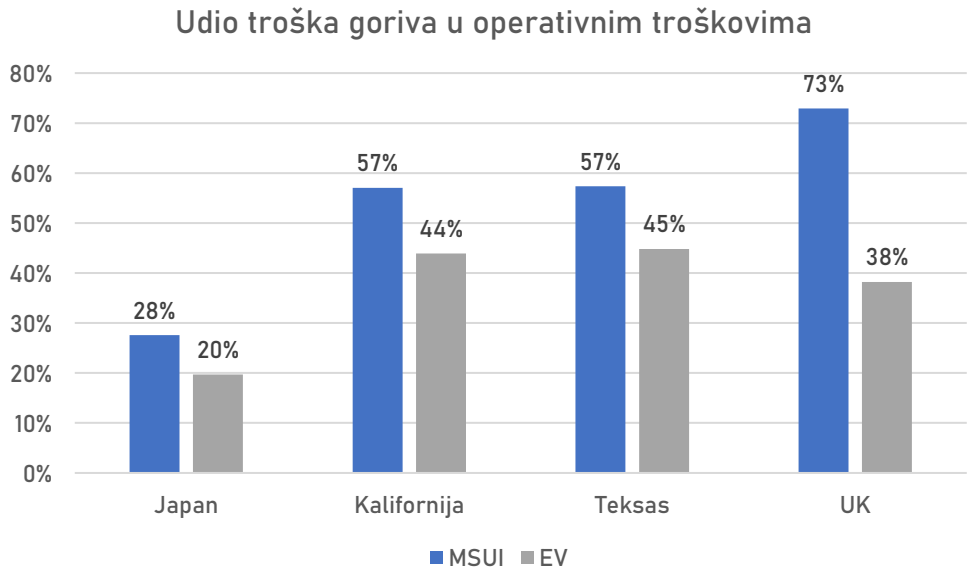
Slika 6. Smanjenje cijena Li-ion baterija od 2010. do 2018. [27]

Sami iznosi cijena vozila uvelike variraju – na tržištu je velik broj modela vozila, pogotovo vozila s MSUI, raznih veličina i klasa. Znanstveni radovi najčešće koriste usporediva vozila i varirajuće godišnje kilometraže, što ima velikog utjecaja na usporedbu tehnologija, što pokazuju Wu et al. [22] Primjerice, u spomenutom radu korištene su tri klase vozila bazirane prema europskim klasama vozila: mala (A/B), srednja (C/D) i velika (J). Palmer, et al.[21] koriste Toyotu Prius (HEV), Toyotu Prius plug-in model (PHEV) i Nissan Leaf (EV) te ih uspoređuju s Toyotom Corollom (benzinski MSUI), dok Tseng, et al. koriste Ford Focus (EV), Toyotu Camry Hybrid LE (HEV), Toyotu Prius plug-in (PHEV) i Toyotu Camry LE (MSUI) [25]. Van Velzen et al. koriste automobil C klase. [23] Nabavne cijene vozila uzimane su iz kataloga distributera u područjima koja su bila obuhvaćena istraživanjem, u pravilu s najmanjim paketom opreme. Iznimka je Wu et al. koji su razvili svoj model cijene električnog vozila u ovisnosti o potrebnom kapacitetu baterije (koja je uvjetovana dnevnom kilometražom), dok su

neki drugi autori poput Moona i Leeja [24] aproksimacijom cijene baterije razdvojili cijenu baterije od cijene ostatka vozila kako bi ispravno mogli provesti analizu osjetljivosti uslijed nastavka postojećeg trenda pada cijena baterije [28]. Wu et al. i Moon i Lee aproksimirali su preprodajnu vrijednost vozila, prvi na temelju matematičkog modela za postojeće MSUI, a drugi na podatcima dobivenim iz korejskog tržišta rabljenih vozila.

2.1.2. Operativni troškovi

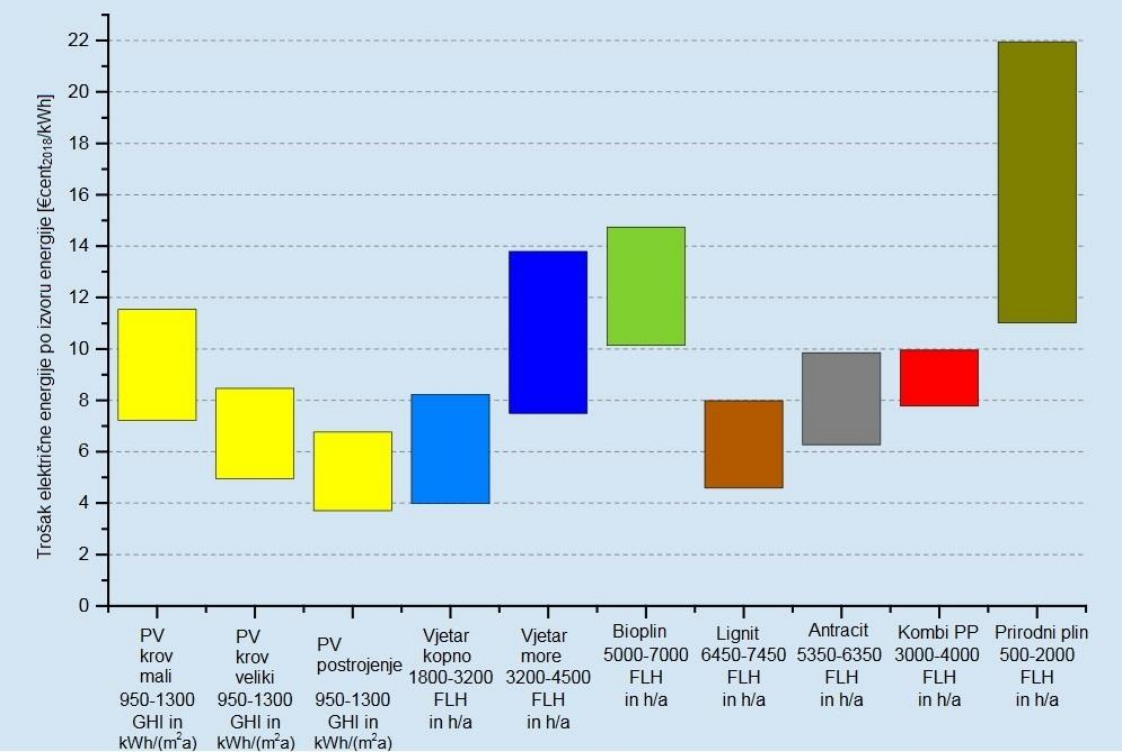
Operativni troškovi najviše ovise o opsegu korištenja vozila, tj. o dnevnom/godišnem putu (kilometraži) prevaljenom vozilom. Autori koriste različite godišnje kilometraže: Wu et al. koriste tri razreda bazirano na Njemačkim podatcima (7000, 15.000 i 28.000 kilometara godišnje), Moon i Lee koriste 15.000 kilometara godišnje što predstavlja korejski prosjek, a Palmer et al. koriste raspon od 10.000 km godišnje u Japanu do 25.000 km godišnje u Teksasu, što ujedno predstavlja i godišnji minimum i maksimum korišten u literaturi. Kilometraža je bitna jer o njoj ovisi koliki je trošak goriva (energije za pogon), što je vidljivo iz visokog udjela goriva u ukupnim operativnim troškovima u radu Palmer et al. [Slika 7].



Slika 7. Udio troška goriva u ukupnim operativnim troškovima prema Palmer et al. [21]

Troškovi goriva električnih vozila uvelike ovise i o samom energetskom miksu na isti način na koji i sveukupna emisija stakleničkih plinova električnih vozila ovisi o emisijama prilikom proizvodnje električne energije. Korištenje skupih metoda za proizvodnju električne energije nužno utječe na visoke troškove goriva EV-a. Fraunhofer instituta daje uvid u trošak električne energije po izvoru (LCOE – *levelised cost of electricity*) za nova postrojenja [Slika 8], gdje je vidljivo da provođenje energetske tranzicije prema niskougljičnom gospodarstvu i izgradnja OIE kapaciteta povoljno utječu na cijene električne energije, pa posljedično i TCO EV-a [29].

Iste podatke daje i Europska komisija u svom izvješću o subvencijama i troškovima energije u EU [30]. Navas-Anguita et al. [31] u svom radu aproksimacije cijena goriva u transportu ne koriste LCOE već imaju točne podatke o kapitalnim troškovima (CAPEX), a operativne troškove (OPEX) aproksimiraju pomoću njih. Rezultati su u skladu s rezultatima u [29] i [30] pa i oni navode prirodni plin od konvencionalnih izvora i OIE kao najjeftinije nove izvore električne energije. Ipak, s postojećim sustavima situacija je malo drugačija, kako je prikazano u tablici [Tablica 1]. Vidljivo je da su neke tehnologije poput ugljena i dalje konkurentne jer su kapitalni troškovi već prije otplaćeni i njihov pogon, iako skuplji, kratkoročno je povoljniji od izgradnje novih postrojenja na OIE. To vrijedi ako su elektrane dovoljno fleksibilne, tj. ako u kratkom vremenskom periodu mogu promijeniti snagu za određeni iznos, što ih čini kompatibilnima u sustavima s visokim udjelom varijabilnih OIE [32]. Uz to, pri sadašnjoj cijeni emisija CO2 na europskom tržištu emisija (ETS – E*missions Trading System*) elektrane na ugljen su granično isplative, a daljnje povećanje cijene emisija stavlja ih u nepovoljan položaj.



Slika 8. Trošak električne energije po izvoru (LCOE) za OIE i fosilna goriva 2018. u Njemačkoj [29]

Tablica 1. Kapitalni i operativni troškovi nekih tehnologija proizvodnje električne energije [31]

Tehnologija	**Kapitalni troškovi (2015.) [€/kW]**	**Operativni troškovi kao postotak kapitalnih [%]**	**Operativni troškovi (2015.) [€/kW]**
Derivacijska HE	3000	0,5	15,00
Akumulacijska HE	3500	0,5	17,50
PV, postrojenje (veliki kapacitet)	1020	2	20,40
Kombi postrojenje na prirodni plin	850	-	21,00
PV, krov (mali kapacitet)	1360	1,7	23,12
Vjetar, na kopnu	1350	3	40,50
Ugljen s CCS-om	2760	2,1	57,96
Kombi postrojenje na rasplinjeni ugljen	2500	-	63,00
Kogeneracija	880	-	75,00
Nuklearna elektrana 3. generacije	4500	-	95
Biomasa	5300	4	126,00

Jedno punjenje električnog vozila kapaciteta baterije 75 kWh (dostatno za 450 km) [33] u EU u prosjeku košta 10 - 15 € ako se puni s kućnog priključka [34].

U operativne troškove spadaju još i iznosi godišnjeg poreza na vozila i njihove emisije. U Republici Hrvatskoj, porezi na osobna vozila ovise o snazi i starosti vozila i kreću se između 1500 i 200 kn. Osim toga, prilikom registracije i tehničkog pregleda plaća se i eko test, naknada za ceste i posebna naknada za okoliš [35]. Neke države subvencioniraju električna vozila manjim porezima ili davanjima državi, u Hrvatskoj se plug-in hibridnim vozilima smanjuje posebni porez proporcionalno dosegu vozila dok se na električna vozila ne plaća posebni porez prilikom prijenosa vlasništva [36]. Obvezno auto osiguranje električnih vozila u Hrvatskoj 2016. godine nije bilo razvrstano u posebnu kategoriju već su se primjenjivali isti kriteriji i cijene kao i kod vozila s MSUI, a ista situacija opisana je i svim citiranim radovima.

2.1.3. Infrastruktura za električna vozila

Električna vozila pune se kao i svi drugi uređaji preko punjača spojenih na električnu mrežu. Električna vozila mogu se puniti izmjeničnom (jednofaznom i trofaznom) strujom i istosmjernom strujom, ali je izmjeničnu struju potrebno ispraviti na istosmjernu [37]. Priključci na električnim vozilima definirani su IEEE standardima i prikazani su na slici [Slika 9].



Slika 9. Priključci na električnim vozilima prema IEEE standardima [38]

Punjači su prema brzini punjenja, odnosno snazi podijeljeni u tri kategorije:

- spori punjači.
- brzi punjači;
- superbrzi punjači;

Spori punjači predstavljaju najjeftiniju tehnologiju koja se najčešće koristi u domovima vlasnika. Postoji nekoliko vrta sporih punjača, ali svi se svode na priključak na izmjeničnu kućnu utičnicu. Najjednostavnija izvedba je spoj električnog vozila direktno na utičnicu i korištenje pretvarača integriranog u samo vozilo. Najveća snaga u takvom slučaju je 3,7 kW [Slika 10]. Kompleksnije izvedbe sporih punjača uključuju mehanizme zaštite od pregrijavanja i drugu elektroniku poput sigurnosne sklopke. U Europi se izvode preko Mennekes priključka. Punjenje prosječne baterije u električnom vozilu od 30 – 40 kWh takvim punjačem traje oko 10 sati, zato se često zovu i noćni punjači.



Slika 10. Punjač koji se spaja izravno na utičnicu [39]

Brzi punjači pune većim snagama – od 7 do 22 kW. Postoji opcija ugradnje vlastitog kućnog brzog punjača koji potom omogućuje veće snage punjenja (do 7,4 kW) od sporih, mogućnost rada kao IoT uređaj i modulaciju struje i napona [Slika 11]. Brzi punjači ujedno se koriste i na javnim električnim punionicama, iako u Hrvatskoj postoje i mješovite izvedbe sporog i brzog punjača na jednoj punionici. U svijetu se brzi punjači sve češće postavljaju i u poduzeća s ciljem poticanja elektromobilnosti svojih zaposlenika [40]. Punjenje ovakvim punjačem traje od 3 do 7 sati za punu bateriju i pogodni su za punjenje na destinaciji prije povratka kući.



Slika 11. Ugradbeni kućni punjač [39]

Superbrzi punjači omogućuju punjenje snagom većom od 22 kW. Izvode se kao punjači trofaznom strujom (preko Mennekes priključka, 43 kW) ili istosmjernom strujom (preko CCS2 priključka, 50 kW). Superbrzi punjači u Hrvatskoj pretežito se koriste na punionicama na autocestama ili u većim gradovima. Postoje i Teslini superbrzi punjači koji pune snagom i do 120 kW. Punjenje Teslinog vozila tim punjačima traje maksimalno dva sata, a u Hrvatskoj se trenutno nalaze na 8 lokacija – uzduž autoceste A1 od Zagreba do Splita [41].



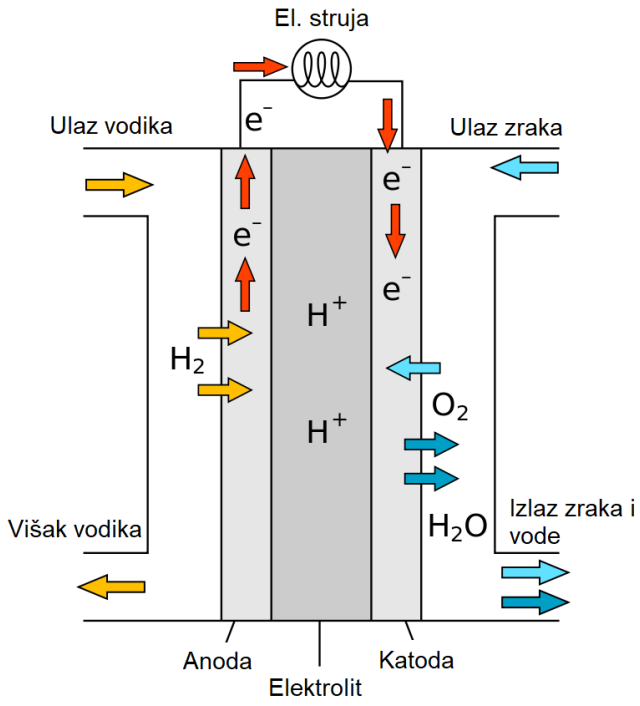
Slika 12. HEP-ova ELEN punionica u Otočcu [42]

U Hrvatskoj je sredinom 2019. godine bilo registrirano 272 punionica za električna vozila s ukupno 693 priključka za vozila [43]. Tvrtke koje se bave električnim punionicama su HEP, Hrvatski telekom, Tifon i Crodux. Usporedbe radi, u Hrvatskoj je 2017. godine bilo 830 benzinskih pumpi [44]. Do sada je punjenje na javnim punionicama bilo besplatno, međutim prema [43], od 2020. godine počinje naplaćivanje korištenja punionica po cijeni od 0,14 – 0,15 €/minuti, dok su (usporedbe radi) u Sloveniji cijene 0,01 – 0,09 €/min.

Cijene infrastrukture za punjenje navode se od 600 [39] do 2.200 [25] € po vozilu (cijena kućne punionice, kojih prema procjenama IEA trenutno ima 1,1 po vozilu [45], a predviđa se taj omjer i u budućnosti). Van Velzen et al. [23] navode cijenu kućnog priključka od 1189 € po vozilu, a fiksni trošak javne punionice od 48,81 € po vozilu godišnje. Cijene javnih punionica kreću se od 3.500 € [39] za brze punjače do 50.000 € za superbrze punjače, [46] ali se trošak javnih punionica ne vidi na TCO-u vozila jer se u pravilu te punionice grade od strane poduzeća radi ostvarivanja profita te one eventualno naplaćuju fiksnu godišnju „članarinu“ koju navode van Velzen et al. Le Duigou i Smatti [60] procjenjuju trošak infrastrukture od 1.500 do 2.500 € po vozilu.

2.2. Vozila na vodik

Vozila na vodik dijele se na dvije velike skupine: na vozila koja vodik koriste za izgaranje u motoru s unutarnjim izgaranjem i na vozila koja vodik koriste u gorivnom članku za proizvodnju električne energije [10]. Izgaranje nije povoljno jer su učinkovitosti motora manje od učinkovitosti prilikom izgaranja konvencionalnih goriva. Iz tog razloga razvijene su neke metode koje se koriste kako bi se učinkovitost MSUI na vodik povećala: tlačenje vodika na usisu kako bi se povećala energetska gustoća po jedinici prostora, direktno ubrizgavanje vodika, hibridno vozilo u kojem MSUI na vodik proizvodi električnu energiju [10]. Druga mogućnost je korištenje vodika u gorivnim člancima. Gorivni članak pretvara kemijsku energiju vodika u električnu energiju proizvodeći pritom vodu. Upotreba vodika u gorivnim člancima je 2 – 3 puta učinkovitija od MSUI-ja, [47] stoga se u svim daljnjim razmatranjima proučavaju isključivo vozila s gorivnim člancima (FCEV – *fuel cell electric vehicle*). Gorivni članci u ovisnosti o elektrolitu dijele se na gorivne članke s krutim oksidnim elektrolitom, s fosfornom kiselinom, otopljenim karbonatom ili pak s membranom za izmjenu protona (PEM – *proton exchange membrane*). PEM gorivni članci su danas najčešće upotrebljavani, a shema jednog takvog članka prikazana je na slici [Slika 13].



Slika 13. PEM gorivni članak [48]

Vozila na gorivne članke imaju iste konstrukcijske izazove kao i električna vozila (BEV): veliku težinu i dimenziju gorivnih članaka, odnosno baterija. Uz to, gorivni članci imaju

probleme s regulacijom izlazne snage, sporim odazivom na ubrzanja i malom snagom pri niskim brzinama [10]. Takvi problemi u rješavaju se hibridnim vozilima koja kombiniraju električna vozila s baterijama i gorivne članke. Ipak, vozila na vodik imaju i određene prednosti u odnosu na EV: domet i vrijeme punjenja spremnika su im slični vozilima s MSUI [49].



Slika 14. Toyota Mirai osobni automobil na vodik [55]

Komercijalno dostupni automobili na vodik su Toyota Mirai, Hyundai Nexo i Honda Clarity. BMW i Daimler su jedno vrijeme razvijali vozila na vodik, ali su kasnih 2010-ih odustali do tog koncepta. Međutim, vodik se planira kao gorivo koje bi moglo nadomjestiti konvencionalna goriva u područjima gdje je elektromobilnost otežana – u brodovima ili čak avionima [50]. Trenutno u Njemačkoj postoji vlak na vodik Alstom Coradia iLint koji vozi u pokrajini Donjoj Saskoj, a u Velikoj Britaniji kreće testiranje drugog vlaka na vodik, British Rail Class 399 [51]. U Hamburgu prometuje i FCS Alsterwasser, brod na vodik za turistička razgledavanja, [52] dok sličan brod prometuje i u Bristolu [53]. Njemačka ratna mornarica ima i nekoliko podmornica U-Boot-Klasse 212A djelomično pogonjene vodikovim gorivnim člancima [54].



Slika 15. Alstom Croadia iLint vlak na vodik [56]

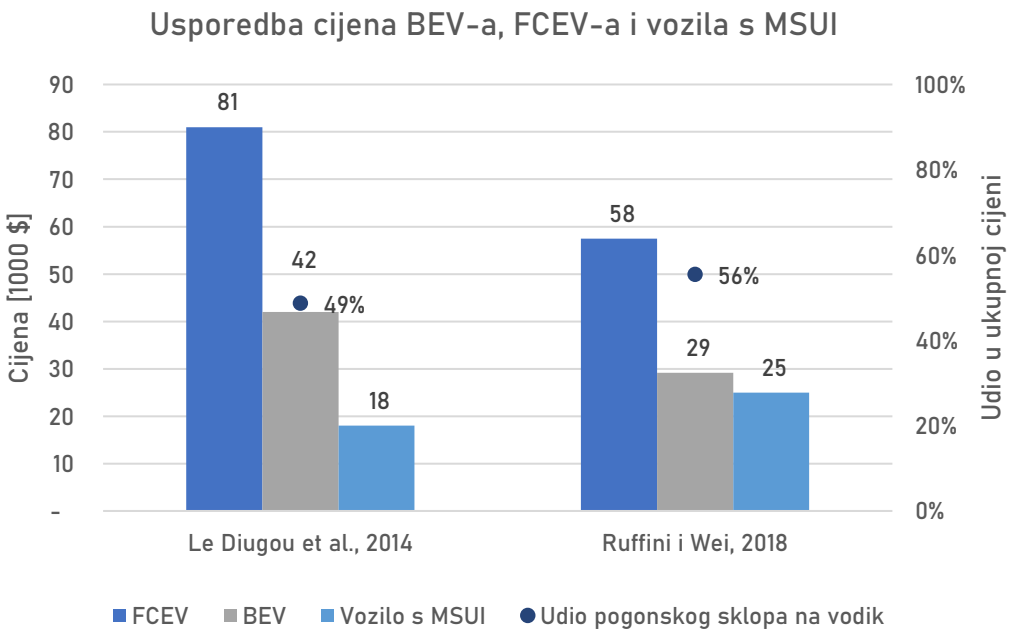
Iako je vodik najčešća tvar u svemiru [57], elementarnog vodika nema mnogo – gotovo sav se nalazi u zvijezdama. Na Zemlji, vodik je uvijek vezan u razne spojeve: vodu, naftu, biomasu i pregršt drugih. Kako bi se dobio elementarni vodik potreban za pogon vozila, nužno je ekstrahirati ga iz spojeva u kojima se nalazi. Iz tog razloga vodik se ne smatra izvorom energije već samo energetskim prijenosnikom Dominantna metoda je proizvodnja vodika iz fosilnih goriva, a poglavito iz prirodnog plina. Naime, parnim reformiranjem prirodnog plina iz metana se oslobađa vodik i ugljikov monoksid, a potom se proces nastavlja da se dobije još vodika i ugljikov dioksid. Danas se preko polovine svog proizvedenog vodika dobije na ovaj način [58]. Vodik se iz fosilnih goriva može proizvoditi i parcijalnom oksidacijom prirodnog plina, ali i rasplinjavanjem ugljena. Proizvodnja vodika iz fosilnih goriva povezana je s emisijama stakleničkih plinova, ali zbog više efikasnosti procesa i gorivnih članaka od spaljivanja tih ugljikovodika u MSUI, vozilo na vodik ima manju emisiju stakleničkih plinova od vozila na fosilna goriva [59]. Uz to, budući da su takva postrojenja točkasti izvori CO_2 pokazuju se kao bolji kandidati za CCS od, primjerice, MSUI. Drugi način proizvodnje vodika je elektrokemijskim postupcima: elektrolizom vode ili fotoelektrokemijskim razlaganjem vode. Postoji i mogućnost rasplinjavanja biomase ili otpada. Zadnje dvije metode kao i elektroliza električnom energijom iz obnovljivih izvora energije i fotoelektrokemijsko razlaganje vode posebno su zanimljivi jer ti postupci ne proizvode stakleničke plinove, mogu se koristiti za integraciju obnovljivih izvora energije ili pak mogu sudjelovati u kružnoj ekonomiji.

Gurz et al. [10] daju detaljan prikaz svih postojećih tehnologija primjene vodika u vozilima te zaključuju da, bez obzira na sve moguće modifikacije vozila s MSUI koje se pogoni vodikom, vozila na gorivne članke ipak su efikasnija i isplativija od vozila s MSUI. Hussain i Dincer [59] ne bave se troškovnom stranom već rade usporedbu emisija tijekom životnog ciklusa (LCA – *life cycle assessment*) vozila na gorivne članke i vozila s MSUI gdje potvrđuju da su s ekološkog

stajališta vozila na vodik nekoliko puta bolja od vozila s MSUI na fosilna goriva. Osjetno je manji opseg radova koji se bave ekonomijom vozila na vodik u usporedbi s radovima o ekonomiji električnih vozila. Ipak, u postojećim radovima ističe se rad Ruffini i Wei [49] koji u usporedbi BEV-a i PHEV-a s vozilom s MSUI uzimaju u obzir i stopu učenja, odnosno pad cijene proizvoda (konkretno u radu gorivnih članaka) uslijed povećanja iskustva proizvođača. Zaključuje da vozila na vodik između 2020. i 2025. postižu paritet ukupnih troškova posjedovanja s vozilima s MSUI uz relativno visoku stopu učenja (18%). Zanimljivo, isto istraživanje pokazuje i da EV s baterijama već sada imaju paritet ukupnih troškova posjedovanja i vozila na vodik ne dostignu EV na baterije tijekom trajanja analize, do 2050. godine. Le Duigou i Smatti uspoređuju više različitih pogonskih sklopova: vozila s MSUI, BEV, hibridne HEV, plug-in hibride PHEV, vozila na vodik s gorivnim člancima i električna vozila s produljenjem dometa (*extended-range*) gdje se baterije tijekom vožnje dodatno pune gorivnim člancima ili generatorom spojenom na MSUI [60]. Određuju i ciljanu cijenu vodika kako bi bio konkurentan motoru s unutarnjim izgaranjem u ovisnosti o cijenama gorivnih članaka i cijenama goriva. Zaključuju da 2030. godine i BEV i VV imaju niže TCO od vozila s MSUI, ali i da bi se gorivni članci najizglednije mogli koristiti za produljene dometa EV kako bi se dobile performanse dometa što sličnije vozilu s MSUI. Offer et al. rade usporedbu pogonskih sklopova uz analizu osjetljivosti te navode da se vodik može koristiti za produljivanje dometa EV-a te da bi se na vozila na vodik i električna vozila trebalo gledati kao na komplementarne tehnologije, a ne kao na konkurenciju jedna drugoj [61]. Creti et al. radili su analizu troškova i koristi primjene vozila na vodik uzimajući u svoju analizu i stope učenja i načine proizvodnje vodika i potencijalne oscilacije cijena nafte te su procijenili da bi vozila na vodik 2042. godine trebala imati niži ukupni trošak posjedovanja od vozila s MSUI [62].

2.2.1. Kapitalni troškovi

Kapitalni troškovi vozila na vodik strukturno su slični kapitalnim troškovima električnih vozila: naime, oba vozila imaju isti električni pogon, uz razliku što EV-ovi koriste baterijske pakete, dok vozila s gorivnim člancima imaju gorivne članke i spremnike vodika. Gorivni članci i spremnik vodika su skupe komponente koje zajedno čine polovicu cijene vozila na vodik, kao što je prikazano na slici [Slika 16].



Slika 16. Usporedba cijena BEV-a, FCEV-a i vozila s MSUI [49][60]

Sva istraživanja o ukupnim troškovima posjedovanja vozila na vodik spomenuta u ovom radu kao jednu od temeljnih pretpostavki konkurentnosti vodika uzimaju značajan pad cijena gorivnih članaka kao ključan faktor njihove proliferacije. O kolikom se pojeftinjenju govori prikazano je u tablici [Tablica 2].

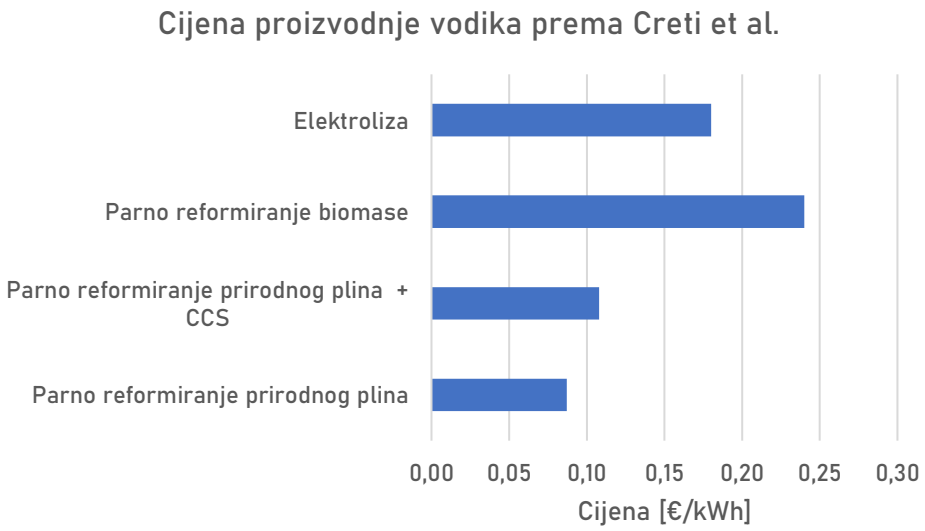
Tablica 2. Projicirani pad cijena gorivnih članaka

Autor	**Sadašnja cijena**	**Projicirana cijena (2030.)**	**Pad cijene, %**
Ruffini et al. (2018.)	31.920 $	2.500 $	92,2
Creti et al. (2015.)	38.000 €	7.800 €	79,5
Le Duigou i Smatti (2014.)	39.480 €	3.500 €	91,1
Offer et al. (2010.)	43.700 €	7.465 €	82,9

Kako je vidljivo na slici [Slika 6], Li-ionske baterije su u osam godina postigle pad cijena od otprilike 85%, što znači da je i gorivni članci imaju tu mogućnost. Ipak, valja uzeti u obzir kako su Li-ion baterije korištene u gotovo svoj prijenosnoj elektronici, počevši od laptopa, pametnih telefona do baterijskih svjetiljka i aku alata te su tehnologija s dugačkom tradicijom pa su i sredstva za istraživanje baterija veća. Još jedan važan trošak je i sam spremnik vodika koji se nalazi na vozilu, a može koštati i do 3000 € za spremnik koji bi osigurao domet jednak dometu vozilima s MSUI [63].

2.2.2. Operativni troškovi

Neki operativni troškovi poput servisa ili popravaka vozila na vodik jednaka su električnom vozilu jer oba koriste elektromotore za pogon, samo je razlika na koji se način ti elektromotori napajaju električnom energijom – iz baterija ili iz gorivnih članaka. Nijedno vozilo na vodik nije dostupno u Republici Hrvatskoj, stoga se u hipotetskom slučaju za poreze i davanja državi pretpostavlja ista situacija kao i s električnim vozilima – kategoriziraju se kao vozila s MSUI, uz razliku što ne plaćaju posebnu naknadu za okoliš na emisiju CO2. Najveći operativni trošak je trošak goriva. Naime, kako se vodik proizvodi iz raznih izvora, svaki od tih izvora ima svoj trošak proizvodnje vodika. Trenutno najpovoljnije tehnologije su parno reformiranje prirodnog plina (SMR – *steam methane reforming*) te rasplinjavanje ugljena i biomase. Sparivanje svake od tih tehnologija s izdvajanjem i spremanjem ugljikovog dioksida (CCS) uzrokuje povećanje troška proizvodnje vodika, ali je i nužno u svrhu sprječavanja emisija CO_2. Offer et al. navode cijenu vodika od 0,13 $/kWh u 2010. godini, a Creti et al. dijele troškove u ovisnosti o tehnologijama kao što je prikazano na slici [Slika 17]. Ruffini i Wei navode cijenu od 0,29 €/kWh za elektrolizu i 0,15 €/kWh za SMR prirodnog plina u 2018.



Slika 17. Cijena proizvodnje vodika iz raznih tehnologija u 2014. prema Creti et al. [62]

Vidljivo je da je cijena vodika slična cijeni benzina i dizela u Europi od 0,16 €/kWh [64]. Ipak, kada bi se u obzir gledale i iskoristivosti pretvorbe goriva (koja je u gorivnom članku dvostruko veća od MSUI), vodik je po jedinici iskorištene energije trenutno dvostruko jeftiniji od konvencionalnog goriva [65]. Punjenje spremnika na vodik od 5 kg (što osigurava domet od 500 kilometara) u EU koštalo bi oko 35 € koristeći proizvodnu cijenu vodika [62].

2.2.3. Infrastruktura

Proizvodnja vodika trenutno nije dovoljna da bi se omogućilo komercijalno korištenje vozila na vodik diljem svijeta. Stoga je bitno izgraditi nove proizvodne kapacitete i dograditi postojeće, ali i ulagati u nove tehnologije kako bi dodatno padala cijena proizvodnje vodika. Tehnologije poput parnog reformiranja najčešće su korištene i čine većinu proizvodnje jer su pogodne za velike količine proizvodnje vodika (preko 100 000 m_n^3 na sat). S druge strane, elektroliza je primarno povoljna za male količine vodika (do 300 m_n^3 na sat) [31]. Prikaz troška i učinkovitosti pojedinih tehnologija prikazan je u tablici [Tablica 3].

Tablica 3. Kapitalni trošak i učinkovitost pojedinih tehnologija za proizvodnju vodika [31]

Tehnologija	**Učinkovitost [%]**	**Cijena [€/GJ/god.]**
Parno reformiranje prirodnog plina	71 – 85	5,2 – 12,3
Parno reformiranje prirodnog plina s CCS-om	61 – 70	13,1 – 15,9
Parno reformiranje bioetanola	67 – 72	21,1 – 40,4
Rasplinjavanje ugljena	56 – 65	9,1
Rasplinjavanje ugljena s CCS-om	52 – 61	39,5 – 68,0
Rasplinjavanje biomase	39 – 48	12,9 – 17,0
Elektroliza	50 - 85	30,3 – 69,7

Vidljivo je da je postrojenje za elektrolizu, uz ono za rasplinjavanje ugljena s CCS-om, najskuplja tehnologija proizvodnje vodika. Unatoč višoj cijeni, elektroliza ima visoku učinkovitost što ju, u željenom scenariju proizvodnje vodika pomoću obnovljivih izvora energije, ipak čini pogodnijom od rasplinjavanja biomase ili bioplina, jer se može koristiti za balansiranje elektroenergetske mreže, a sirovina joj je voda.

Osim proizvodnih kapaciteta, bitno je izgraditi i punionice vodika te popratni logistički lanac. U Republici Hrvatskoj prva nekomercijalna punionica vodika nalazi se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje [66]. Punionice za vodik mogu se postaviti na postojeće benzinske stanice na isti način na koji se i ukapljeni naftni plin (UNP) ugrađivao. Prikaz jedne takve punionice nalazi se na slici [Slika 18]. Procjenjuje se da bi cijena izgradnje infrastrukture za vodik dodala oko 1000 – 2000 € po vozilu na ukupne troškove posjedovanja, odnosno 5% ukupne vrijednosti

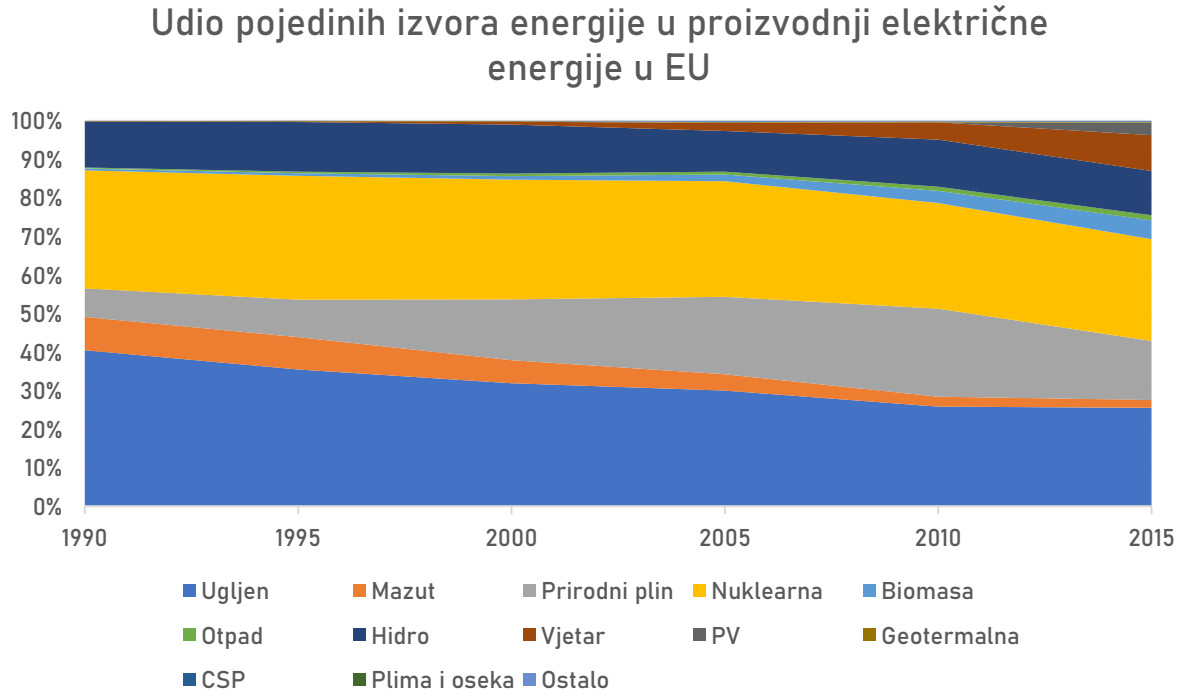
vozila na vodik [60][62]. Moguće su i izvedbe punionica koje same elektrolizom proizvode vodik, ali tada su manjih kapaciteta.



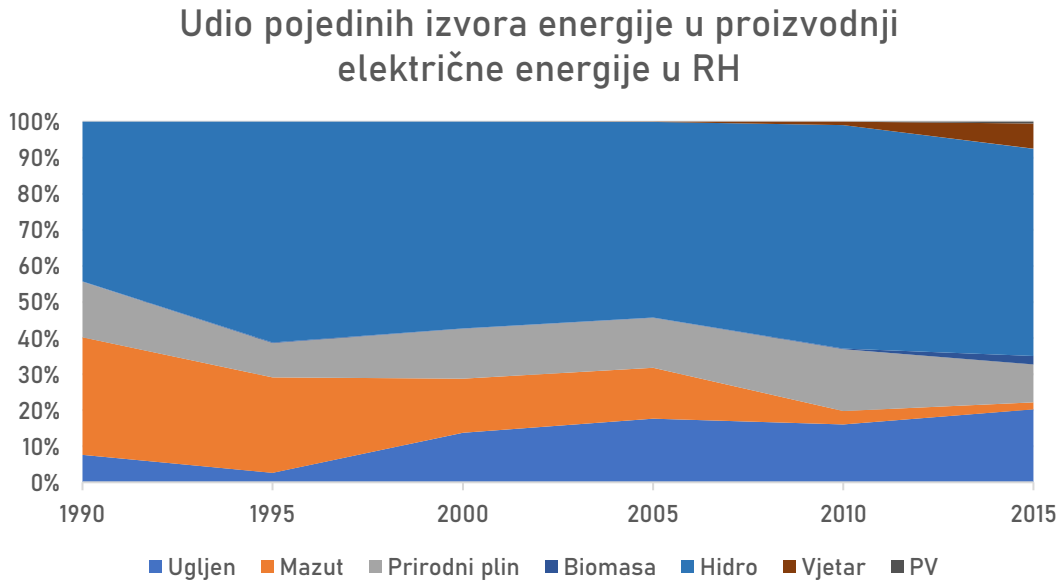
Slika 18. Punionica na vodik uklopljena u OMV-ovu benzinsku postaju u Njemačkoj [67]

3. POVEZIVANJE ENERGETSKOG SUSTAVA I SUSTAVA PRIJEVOZA

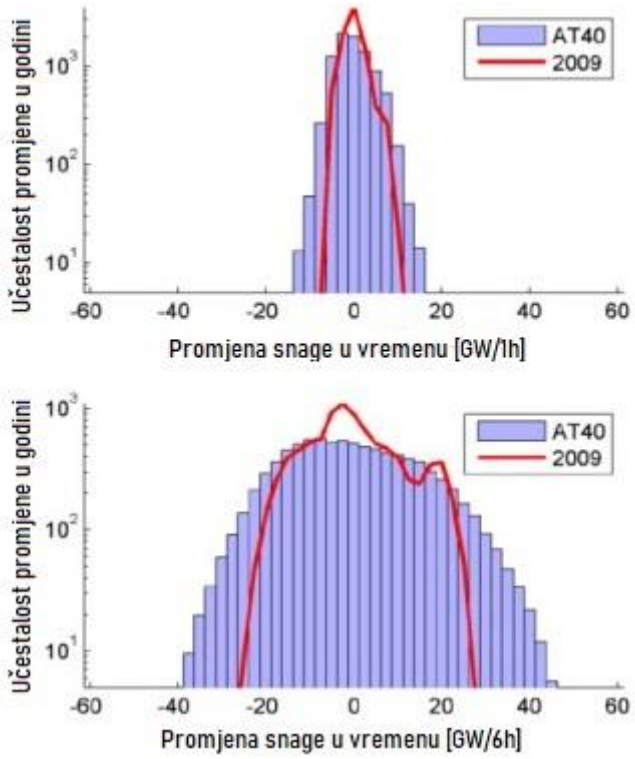
Moderni energetski sustavi obilježeni su visokim i rastućim udjelima obnovljivih izvora energije [Slika 19][Slika 20] i, posljedično, potrebom za povećanom fleksibilnošću elektroenergetskih postrojenja [32]. Zbog stohastičkog karaktera obnovljivih izvora energije, konvencionalna termoenergetska postrojenja moraju pokrivati razliku između potražnje i proizvodnje iz OIE sa sve većim gradijentima i učestalijim promjenama, dok im se ujedno smanjuje i faktor opterećenja [Slika 21].



Slika 19. Udio pojedinih izvora energije u proizvodni električne energije u EU [7]



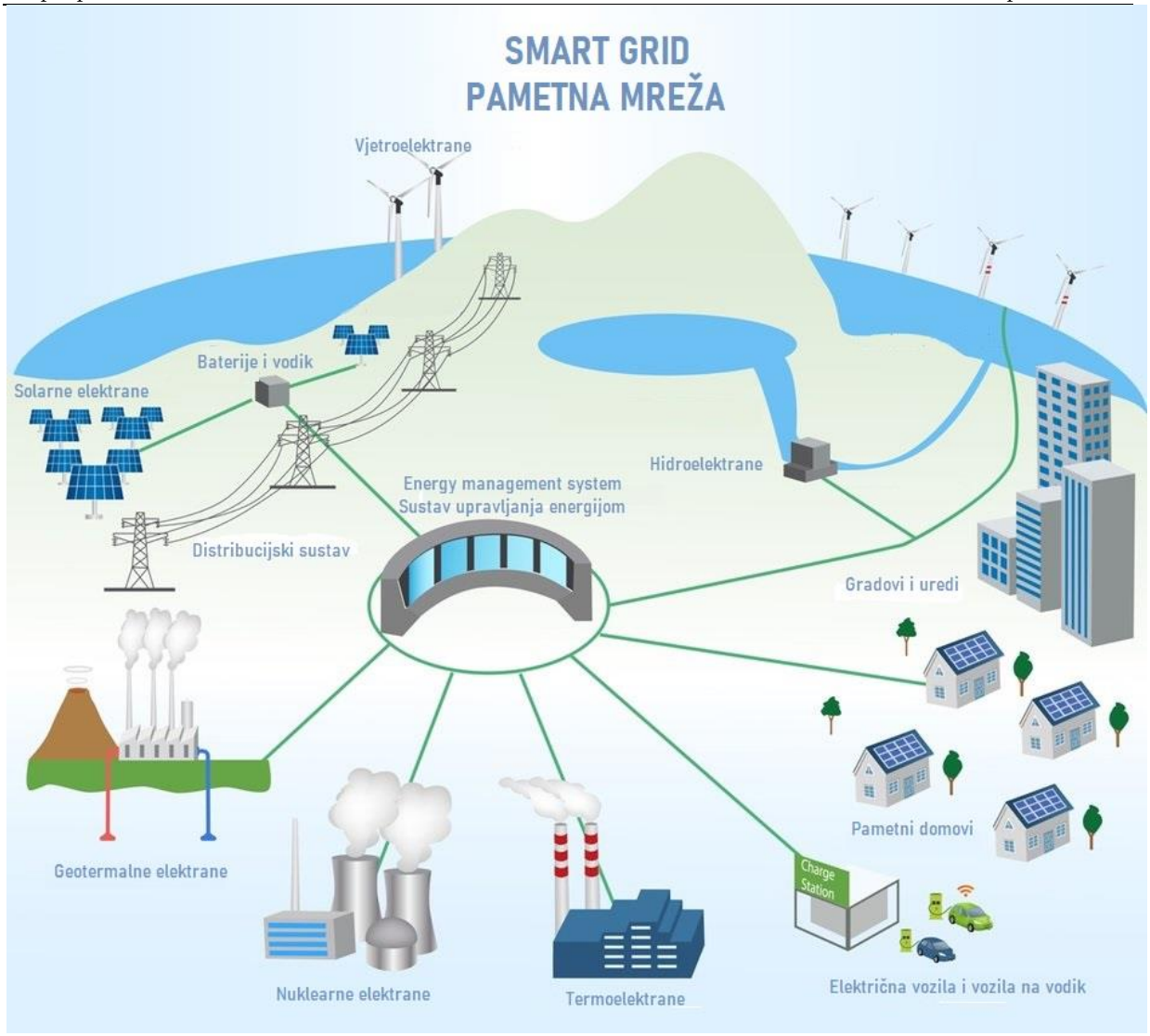
Slika 20. Udio pojedinih izvora energije u proizvodnji električne energije u RH [7]



Slika 21. Učestalost potrebe promjene izlazne snage termoelektrane u 2009. i predviđanje za 2020. [68]

Vidljivo je da se procjenjuju povećani zahtjevi na fleksibilnost termoelektrana, što za posljedicu ima čest rad u nestacionarnim stanjima koji se povezuje s manjom efikasnošću i nadalje povećanom emisijom stakleničkih plinova. U budućim elektroenergetskim sustavima s visokim udjelima OIE, za očekivati je i pojave kada proizvodnja iz OIE nadmašuje potražnju u datom

trenutku. Ako se višak električne energije ne može trgovinom usmjeriti drugdje, nužno je tu električnu energiju pohraniti za kasniju upotrebu, ujedno smanjujući buduću potrebu za energijom. U tom slučaju korisno je imati sustave pohrane energije. Jedan od načina pohrane koji se uvelike koristi su reverzibilne hidroelektrane – one mogu iskoristiti višak električne energije u mreži za pumpanje vode u gornji spremnik, a potom kada u elektroenergetskom sustavu nedostaje energije, tu vodu koriste u turbinskom režimu rada [69]. Drugi, sve češći način su baterije namijenjene isključivo radu na mreži – tvrtke poput ABB-a i Steaga već imaju gotova rješenja [70]. Ipak, te baterije su limitiranih kapaciteta i mogu se koristiti u centraliziranim sustavima, a predstavljaju i skupu investiciju koju bi morali provesti operateri distribucijskih sustava. Iako jedna baterija električnog vozila ima relativno malen kapacitet (do 80 kWh), flota električnih vozila može poslužiti kao jednostavan i jeftin način za balansiranje mreže i integraciju obnovljivih izvora energije konceptom punjenja na mreži (V2G – *vehicle to grid*). To je moguće zbog toga što je prosječno vozilo parkirano 95% vremena i ne koristi se [71]. Vodik može biti korišten na sličan način – proizvodnja električne energije za mrežu provodila bi se gorivnim člancima smještenim na vozilima. Obrnuti proces u slučaju viška električne energije nije zamišljen da se provodi decentralizirano kao što je slučaj s električnim vozilima, već centralizirano u elektrolizatorima koji su smješteni u postrojenjima za proizvodnju vodika ili, u najširem slučaju, na punionicama za vodik. Opremanje svakog vozila elektrolizatorom bilo bi skupo [31] i komplicirano zbog samih dimenzija uređaja [72]. Nekoliko ovakvih i drugih sustava prikazano je na slici pametne mreže [Slika 22].



Slika 22. Prikaz pametne mreže, mreže budućnosti [73]

3.1. Spoj električnog vozila i mreže

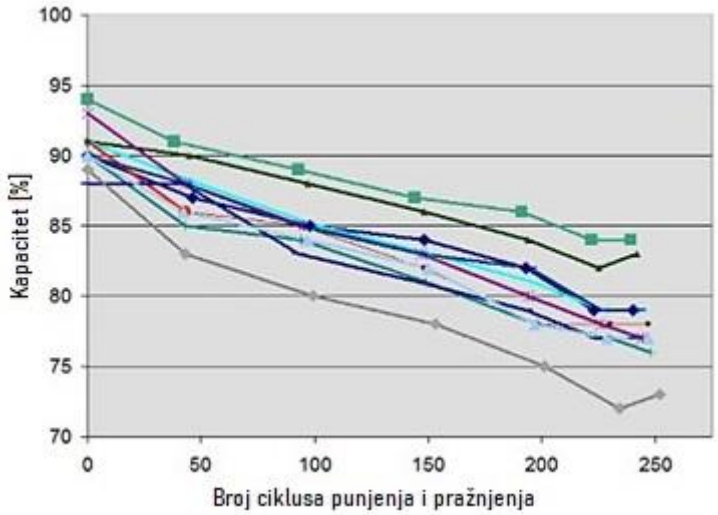
Punjenje električnog vozila na mreži, tzv. V2G (*vehicle to grid*) koncept predstavlja sustav u kojemu postoji mogućnost kontroliranog dvosmjernog toka električne energije između vozila i mreže [74]. Za ovakav koncept nužna su plug-in vozila, tj. ona koja se kablom spajaju na punjač i tako pune baterije – to su plug-in hibridi (PHEV) i u potpunosti električni BEV. Izvještaj američkog Centra za testiranje naprednih vozila (AVTA – *Advanced Vehicle Testing Activity*) navodi višestruke razloge i prednosti implementacije punjenja na mreži:

- sa stajališta opskrbljivača električnom energijom:
    - izravnavanje opterećenja (*load leveling*);
    - pohranjivanje viška jeftine električne energije uzrokovane stohastičkom prirodom OIE za kasniju upotrebu (*load shifting*);

- smanjenje vršnog opterećenja (*peak shaving*);
- pružanje pomoćnih usluga mreži (održavanje frekvencije – rezerva);

- sa stajališta vlasnika vozila:
  - naknada za pružanje usluga mreži;
  - potencijalno besplatno punjenje u slučaju velike raspoloživosti jeftine električne energije;
- sa stajališta proizvođača EV:
  - složen i tehnički napredan proizvod s visokom dodanom vrijednošću zbog skuplje ugrađene elektronike i posebnih punjača;
  - češće zamjene baterija uslijed pada kapaciteta zbog više ciklusa punjenja i pražnjenja. [74]

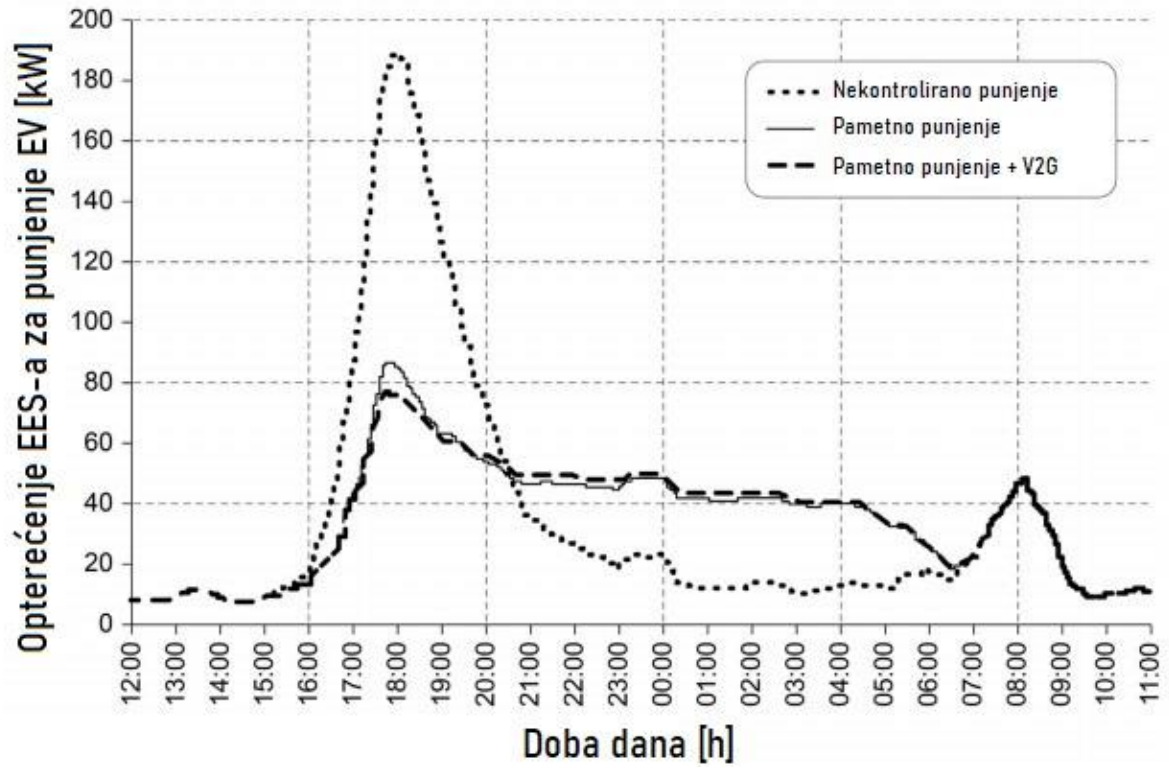
Vidljivo je da su motivacije pojedinih aktera za primjenu punjenja na mreži ponekad kontradiktorne: primjerice, kupac vozila zainteresiran je za potencijalnu dobit zbog pružanja pomoćnih usluga mreži. Pružanje tih usluga ujedno i češće prazni i puni bateriju, a svaka baterija ima određeni broj ciklusa punjenja i pražnjenja dok joj se kapacitet značajno ne smanji, što za posljedicu ima veći trošak za kupca i odražava se na TCO električnog vozila. [Slika 23].



Slika 23. Pad kapaciteta Li-ion baterije u ovisnosti o broju ciklusa raznih baterija [75]

Ipak, punjenje na mreži bitno je u slučaju veće penetracije EV na tržište iz dva razloga. Prvi razlog je taj daj bi punjenje električnog vozila u točno određenom trenutku (tipično po povratku većine ljudi s posla u kasnim popodnevnim satima) uzrokovalo velika opterećenja na mreži koja mreža ne bi mogla podnijeti bez značajnih ulaganja [Slika 24]. Iz tog razloga potrebna je komunikacija vozila s električnom mrežom i drugim vozilima kako bi se osigurala ravnomjerna

razdioba opterećenja, ali i dostupnost svih vozila svojim vlasnicima – tzv. pametno punjenje (*smart charging*).



Slika 24. Opterećenje EES-a za punjenje EV-ova s udjelom na tržištu SAD-a od 45% u ovisnosti o strategiji punjenja (nekontrolirano ili pametno punjenje) [76]

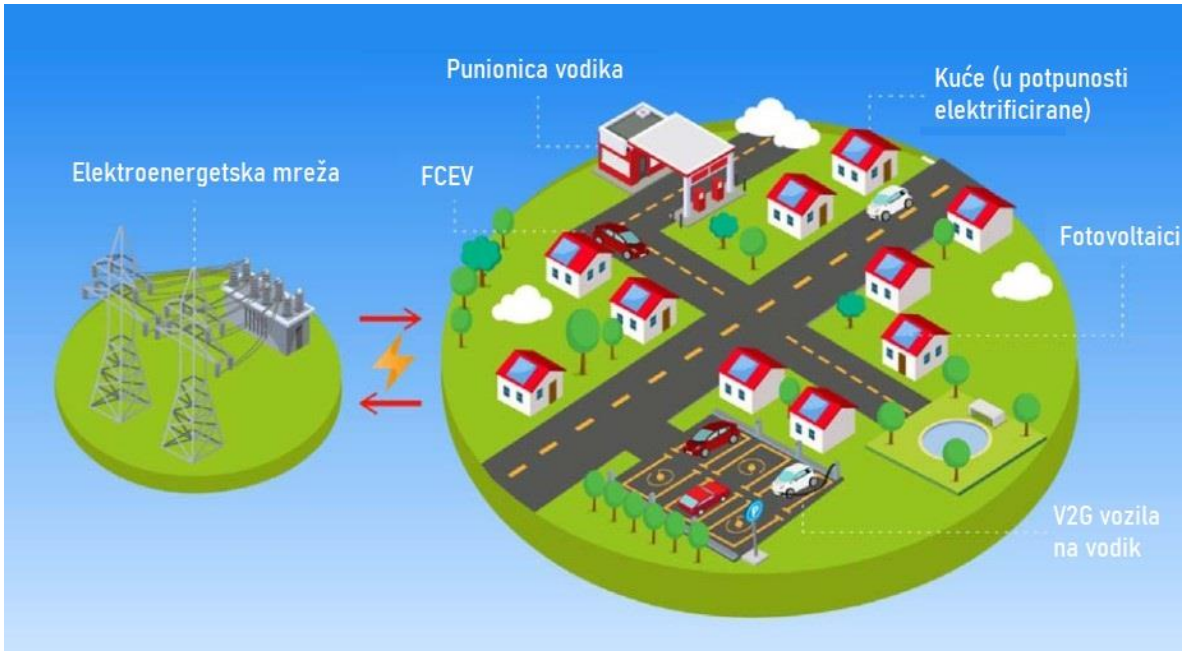
Drugi razlog je taj da se nekorištenjem V2G koncepta uvelike poskupljuje cijeli elektroenergetski sustav jer električna vozila predstavljaju izniman spremnik električne energije koji može imati mnoge upotrebe poput pružanja primarne i sekundarne rezerve ili uravnoteživanja opterećenja. Ovdje se ističe korištenje punjenja na mreži kao primarne rezerve jer baterije imaju gotovo neograničenu stopu promjene izlazne snage u vremenu (*ramp rate*) čime su najbolja tehnologija za pružanje primarne rezerve koja se mora aktivirati na razini nekoliko sekundi. Prema Medori [76], kada bi električna vozila u SAD-u sačinjavala 15% tržišta, te kada bi svako vozilo sudjelovalo u V2G konceptu sa samo 25 kW (što predstavlja četvrtinu maksimalne moguće izlazne snage baterije od 100 kW), sva ta električna vozila bi predstavljala spremnik energije izlazne snage od gotovo 1000 GW, odnosno iznos jednak ukupno instaliranim proizvodnim kapacitetima SAD-a 2014. godine.

Strategije upravljanja punjenjem na mreži mogu biti centralizirane i decentralizirane. Decentralizirana strategija znači da se na svakom vozilu nalazi sustav upravljanja punjenjem i pražnjenjem koji potom individualno određuje o punjenju baterije. Takav sustav se najlakše implementira, omogućuje lagano dodavanje novih vozila i vlasnik vozila uvelike donosi odluke

o punjenju njegovog vozila. S druge strane, takav sustav teško da se može koristiti za pružanje sekundarnih usluga mreži jer nema višeg stupnja odlučivanja koji bi naredio grupi vozila da se prazne. Punjenjem EV-a u centraliziranim sustavima upravlja se daljinski, sa središnjeg mjesta. Takav sustav je hijerarhijski uređen i omogućuje pružanje sekundarnih usluga mreži kao i minimiziranje cijena električne energije zbog optimalnog upravljanja tokovima električne energije. Ipak, teže ga je primijeniti na veće sustave zbog potrebe umrežavanja velikog broja sustava. Zato se koriste agregatori koji grupiraju nekoliko EV-a u jednu logičku cjelinu ili pak operater distributivnog sustava istovremeno mrežnim signalima upravlja svim vozilima koja se pune. Najbolja i najskuplja varijanta je multiagentski sustav koji predstavlja svojevrsni spoj centraliziranog i decentraliziranog. U takvom sustavu svako vozilo komunicira i s električnom mrežom i s drugim vozilima, što je tehnički najzahtjevnije ali i pruža najviše mogućnosti minimiziranja cijena električne energije i upravljanja elektroenergetskim sustavom. Multiagentski sustav je karakterističan za pametne mreže i važan preduvjet je široka implementacija „interneta stvari“ (IOT – *internet of things*) [77].

3.2. Spoj vozila na vodik i mreže

Vozilo na vodik primarno bi se koristilo kao izvor električne energije, ne i kao ponor. Spoj više vozila na vodik na mrežu koja koriste svoje gorivne članke za proizvodnju električne energije mogao bi se koristiti za balansiranje mreže, kao izvor energije u slučaju nužde ili kao primarna rezerva [78]. Robledo et al. [79] izradili su model mikromreže koja sadrži 10 kuća s instaliranim fotovoltaicima i 5 vozila s gorivnim člancima. Jedan takav sustav prikazan je na slici [Slika 25].



Slika 25. V2G sustav vozila s gorivnim člancima (FCEV) [79]

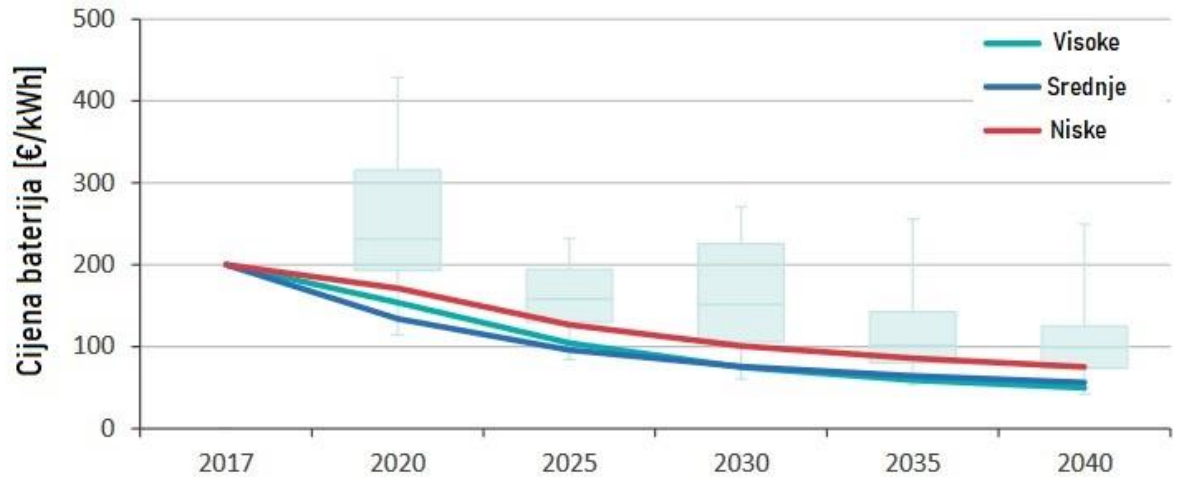
Pokazali su da korištenje vozila na vodik u ovakvim mrežama smanjuje korištenje električne energije s mreže jer se potrebe za energijom u kućama kada fotovoltaici nisu dostatni pokrivaju energijom proizvedenom u gorivnim člancima. Osim toga, vrijeme kada su vozila dostupna za proizvodnju električne energije poklapa se s vremenom kada fotovoltaici proizvode jako malo ili gotovo ništa energije – predvečer i tijekom noći. Vozila na vodik povećavaju autonomnost mikromreža i, ako je vodik proizveden korištenjem OIE, smanjuju primarnu energiju koju koriste zgrade, što je jedan od uvjeta na zgrade prema važećim pravilnicima [79]. Sparivanje ovakvih mikromreža s elektrolizatorima vodika omogućilo bi ne samo proizvodnju već i pohranu električne energije u vidu vodika, te bi pojeftinilo ukupne troškove posjedovanja (TCO) vozila na vodik. Ipak, zbog dodatne infrastrukture V2G koncept s vozilima na vodik je skuplji i tehnički teže izvediv od onog s električnim vozilima.

4. PROJEKCIJE CIJENA ELEKTRIČNIH VOZILA I VOZILA NA VODIK

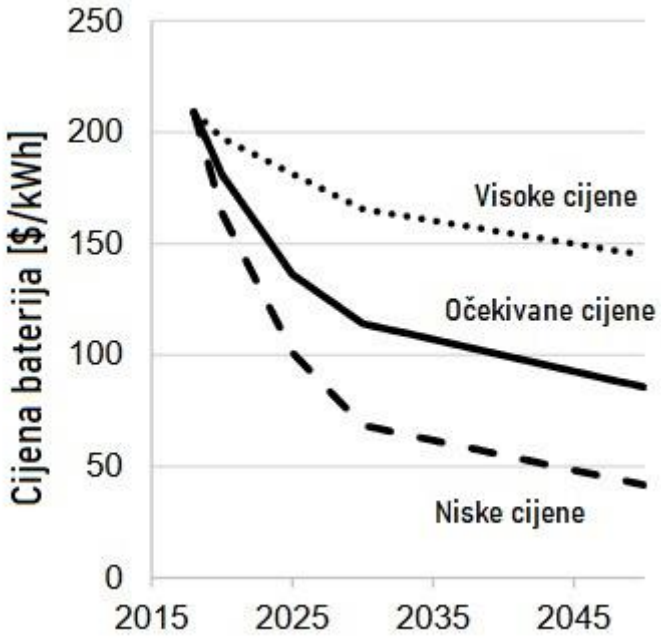
Cijene tehnologija mijenjaju se kroz vrijeme – kako se usavršavaju proizvodni procesi, same tehnologije i logistički lanci i raširenost tehnologije, cijene tehnologija imaju tendenciju pada. Ipak, u slučaju sužavanja obima upotreba tehnologije ili poskupljenja troškova proizvodnje ili upotrebe tehnologije, cijene mogu i rasti (primjer toga su termoelektrane na ugljen). Za svako uspješno modeliranje ukupnih troškova posjedovanja, nužno je što bolje procijeniti buduća kretanja pojedinih troškova. Troškovi koji će biti projicirani su cijene ključnih komponenti pogonskog sklopa: baterija i gorivnih članaka te cijene energije: benzina, električne energije i vodika.

4.1. Cijene baterija

Cijene baterija proteklih 8 godina smanjile su se za 85%, na otprilike 200-ak € po kWh. Očekuje se daljnji pad cijena Li-ion baterija, na razine ispod 100 €/kWh u 2050. godini, kako procjenjuju Zajednički istraživački centar EU-a [Slika 26] i američki Nacionalni laboratorij za OIE [Slika 27].



Slika 26. Procijenjene cijene baterija po kWh do 2040. [80]

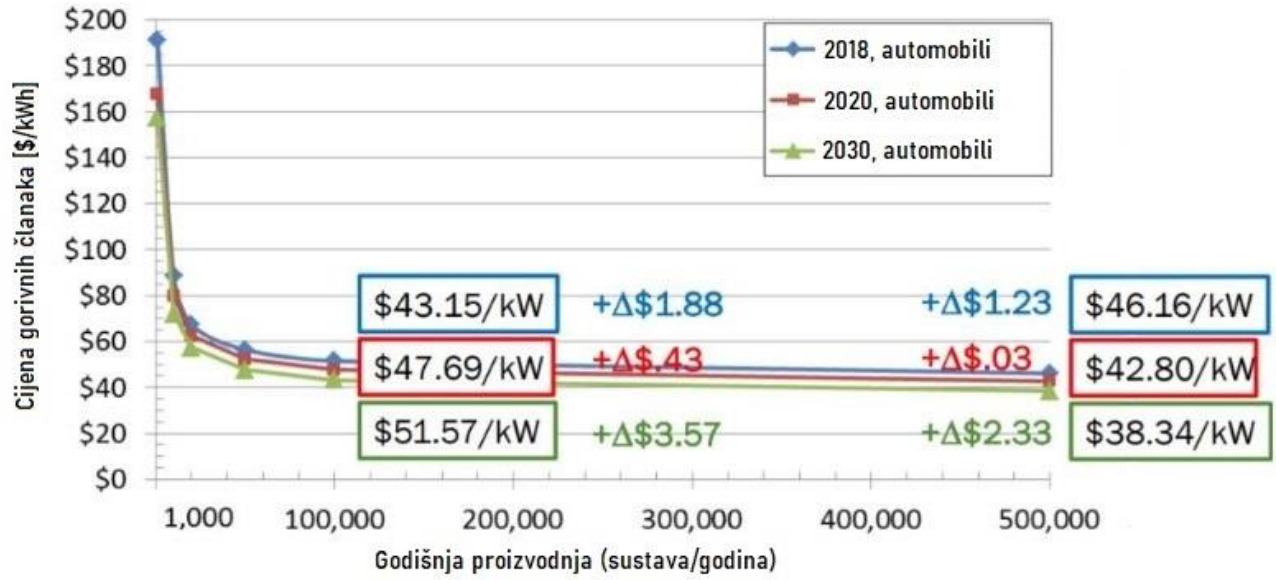


Slika 27. Procijenjene cijene baterija po kWh do 2050. [81]

Sa slika je vidljivo da je trenutna cijena baterija oko 180 €/kWh, dok se 2030. očekuju 110 – 90 €/kWh, a 2050. oko 70 €/kWh.

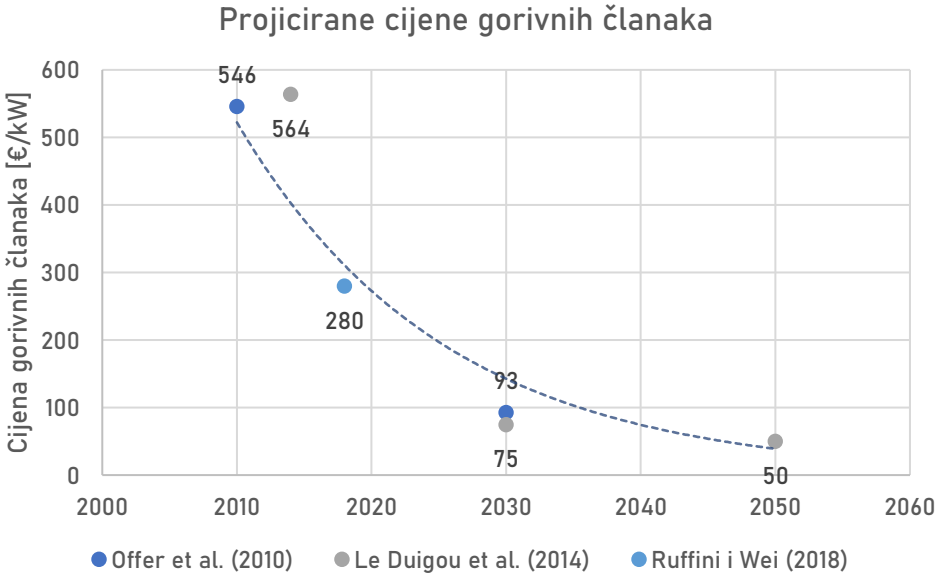
4.2. Cijene gorivnih članaka

Cijene gorivnih članaka u dostupnoj literaturi nisu prikazane kao vremenska progresija, već kao funkcija broja proizvedenih članaka. Američko Ministarstvo energije izradilo je tako sljedeću prognozu, koju su kasnije verificirali proizvođači gorivnih članaka [Slika 28]:



Slika 28. Cijena gorivnih članaka u ovisnosti o godišnjoj proizvodnji [82]

Ipak, neki autori, poput Le Duigou et al. i Offer et al. dali su svoja predviđanja za cijene gorivnih članaka, prikazane na slici [Slika 29].

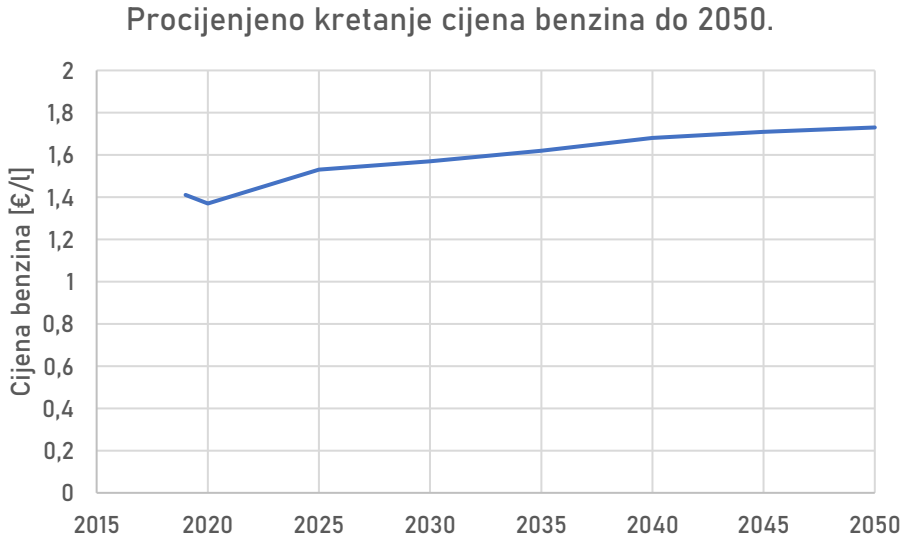


Slika 29. Projicirane cijene gorivnih članaka [49][60][61]

Vidljivo je da su projekcije za 2030. i 2050. konzervativnije od prognoza američkog Ministarstva energije, stoga korištenje tih cijena odmiče proračun od sklonosti određenoj opciji, a analiza veličine tržišta gorivnih članaka u budućnosti ne ulazi u opseg ovog rada što također opravdava korištenje cijena sa slike [Slika 29] u proračunu.

4.3. Cijene benzina

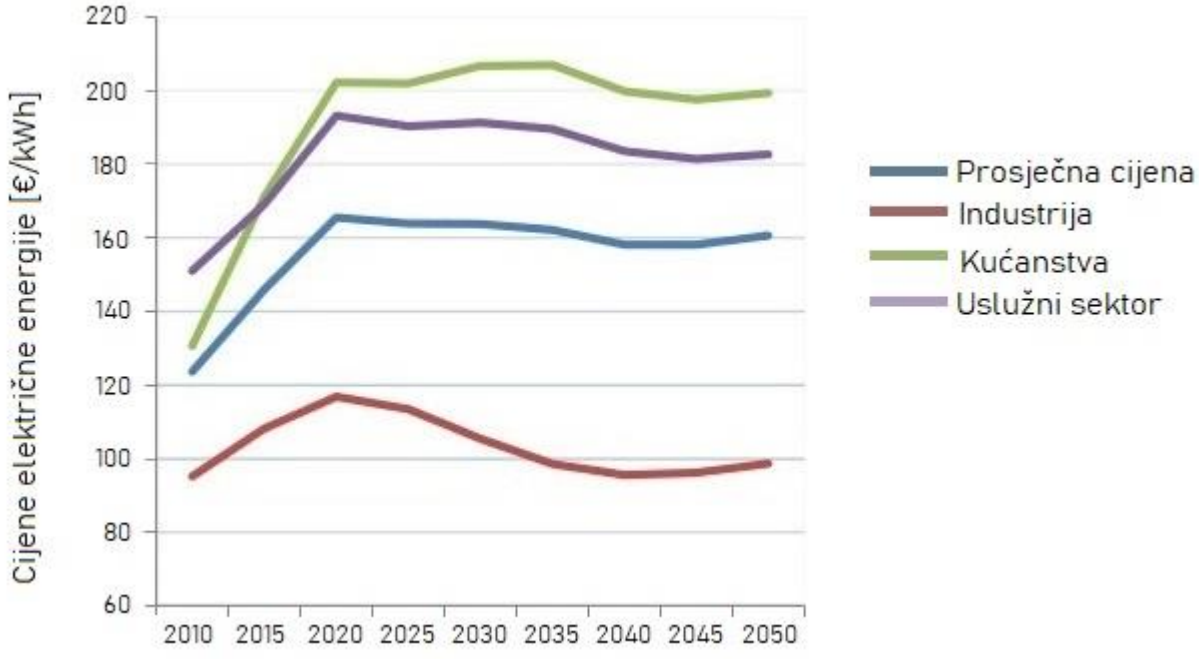
Trenutna prosječna europska cijena benzina u listopadu 2019. godine bila je 1,41 €/l s porezima i svim davanjima, dok je u Hrvatskoj malo niža i iznosi 1,33 €/l. Očekivane cijene benzina do 2050. godine prikazane su na grafu [Slika 30]. Za očekivati je porast cijena ugljikovodika diljem svijeta, što zbog većih poreza i davanja, što zbog problema u opskrbi [31]. Cijena u 2030. tako se procjenjuje na 1,58 €/l , a 2050. na 1,7 €/l.



Slika 30. Procijenjeno kretanje cijena benzina do 2050. [31]

4.4. Cijene električne energije

Cijene električne energije teško se prognoziraju u budućnosti jer u proizvodnji električne energije sudjeluje mnogo tehnologija, svaka sa svojim troškom električne energije (LCOE – *levelised cost of electricity*). Ti troškovi su poznati za danas [Slika 8], ali prognoze tih troškova u budućnosti uvelike variraju. Cijena kilovat-sata električne energije za punjenje električnog vozila na kućnom priključku u Hrvatskoj prosječno iznosi 0,1312 €/kWh [83], odnosno 131,2 €/MWh. Najvjerojatniji model punjenja na punionicama je plaćanje pretplate i/ili vremena punjenja, stoga za tu upotrebu nije važna cijena električne energije. Trenutna cijena električne energije u skladu je s procjenama EU-a [84], a u skladu s time, 2030. bi cijena za kućanstva trebala biti oko 207 €/MWh (odnosno 0,207 €/kWh), a 2050. oko 200 €/MWh (odnosno 0,200 €/kWh). Ovakve procjene ipak su veće od van Velzen et al. [23] koji, bez poreza, procjenjuju cijenu električne energije od 0,096 €/kWh u pesimističnom scenariju, a samo 0,024 €/kWh u optimističnom scenariju. Ipak, Tsang et al. navode raspon od 0,090 – 0,220 €/kWh kao „razuman“.



Slika 31. Procijenjeno kretanje cijena električne energije u Europi do 2050. [84]

4.5. Cijene vodika

Cijena vodika ovisi o načinu proizvodnje vodika i o cijeni distribucije vodika (vodik se proizvodi centralizirano, u određenim postrojenjima pa se distribuira do punionica). Najčešće korištene tehnologije proizvodnje su elektroliza i parno reformiranje prirodnog plina. U tablici [Tablica 4] su prikazane procjene pojedinih autora; sve cijene su u €/kg.

Tablica 4. Prikaz procijenjenih cijena vodika raznih autora [49][61][62][63]

Autor(i)	**Cijena [€/kg]**	**Cijena 2030. [€/kg]**	**Cijena 2050. [€/kg]**	**Napomena**
Delucchi i Lipman (2010)	3,584	3,136		
Offer et al. (2010)	4,5	3,75		
Creti et al. (2015)	7	6,3	6,8	
Ruffini i Wei (2018)	5,75	4	3,9	SMR
Ruffini i Wei (2018)	11	7,75	7,6	Elektroliza

Vidljivo je da ranije procjene iz 2010. godine imaju tendenciju podcjenjivanja cijena vodika (procjene za 2019. su niže od trenutne cijene), dok Creti et al. i Ruffini i Wei daju slične cijene vodika – razlika je što Ruffini navodi cijenu vodika nastalog parnim reformiranjem prirodnog

plina i elektrolizu na distribuiranim punionicama, dok su Creti et al. najdetaljniji u analizi te procjenjuju udjele pojedinih tehnologija u proizvodnji vodika za svaku od navedenih godina. Kako je njihova procjena smanjenje vodika reformiranog iz prirodnog plina, a veće korištenje elektrolize i reformiranja bioplina te projekcije uklapaju se u ciljeve energetske tranzicije, stoga se te cijene prihvaćaju kao dobra procjena.

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Tehno-ekonomska analiza koristi se za analiziranje implementacije pojedinih tehnologija ili projekata i njihov ekonomski aspekt. Cilj ove analize je procjena svih troškova vezanih uz korištenje osobnih električnih vozila i vozila na vodik te usporedba cjeloživotnih troškova posjedovanja (TCO – *total cost of ownership*) s osobnim vozilom na fosilna goriva, tj. na benzin. Svrha analize je određivanje optimalnog izbora pogonskog sklopa vozila u ovisnosti o godišnjoj kilometraži, veličini vozila i drugim parametrima.

Formula za ukupne troškove posjedovanja pojedine tehnologije je:

$$TCO = I_0 + T_0 - S_0 + Inf_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{I_n + F_n + M_n + T_n}{(1+r)^n} \qquad \textbf{(1)}$$

gdje TCO predstavlja ukupne troškove posjedovanja, I_0 predstavlja investicijske troškove u 0-toj godini (početnoj godini), T_0 predstavlja porez u 0-toj godini, S_0 je subvencija na kupnju vozila koja je u određenim slučajevima moguća, Inf_0 predstavlja ukupne troškove izgradnje infrastrukture. Svi ti troškovi su u 0-toj godini, stoga ih ne treba diskontirati. Međutim, sve kasnije troškove potrebno je diskontirati, odnosno svesti na vrijednost sadašnjeg novca jer novac koji imamo sada vrijedi više od novca u budućnosti. Iz tog razloga koristi se gore navedena suma koja po godinama korištenja (n) zbraja sve troškove u toj godini – investicijske troškove I_n, troškove goriva F_n, troškove održavanja M_n te davanja državi i druge obaveze (porez, registracija, tehnički pregled) T_n. To se diskontira godišnjom diskontnom stopom r [21][23].

Investicijski trošak I_0 predstavlja nabavnu cijenu vozila s PDV-om prema važećim cjenicima. Detaljnija razrada ovog troška je u poglavlju 5.1.1.

Troškovi infrastrukture Inf_0 navedeni su u prikazu literature pojedinih vozila i za električna vozila oni iznose 2.000 €, a za vozila na vodik 1.500 € (u slučaju većih budućih serija vozila na vodik).

Porez T_0 predstavlja poseban porez na motorna vozila koji propisuje Zakon o posebnom porezu na motorna vozila (NN 15/2013, 108/2013, 115/2016) i ovisi o prodajnoj cijeni vozila, prosječnoj emisiji CO_2 i vrsti goriva. Porez je izračunat korištenjem on-line kalkulatora na stranicama Carinske uprave [85], a električna vozila i vozila na vodik oslobođena su plaćanja ovog poreza.

Subvencija S_0 odnosi se na državne subvencije za nabavku električnih vozila. Takav natječaj provodi Find za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost jednom godišnje, a iznos poticaja na električno vozilo je do 40% prodajne vrijednosti vozila, odnosno u maksimalnom iznosu od 80.000 kn, tj. 10.755 € [86]. Pretpostavlja se da se od 2025. godine poticaji za električna vozila više neće isplaćivati jer bi cilj države trebao biti poticanje razvijanja pametnih mreža i punjenja na mreži te bi se poticaji trebali isplaćivati za takve inicijative, a ne za samu nabavku vozila.

Investicijski troškovi koji se diskontiraju I_n predstavljaju eventualnu izmjenu baterije nužnu na električnim vozilima nakon određene kilometraže.

Godišnji troškovi goriva F_n proračunati su sljedećim jednadžbama, ovisno o pogonskom sklopu:

$$F_n = \frac{GK}{100} \cdot PP_{b,n} \cdot C_{b,n} \quad \textbf{(2)}$$

za motore s unutarnjim izgaranjem (2),

$$F_n = \frac{GK}{PP_{ee,n}} \cdot C_{ee,n} \quad \textbf{(3)}$$

za električna vozila (3) ili pak

$$F_n = \frac{GK}{PP_{v,n}} \cdot C_{v,n} \quad \textbf{(4)}$$

za vozila na vodik (4). Veličina *GK* predstavlja godišnju kilometražu vozila, PP_n predstavlja prosječnu potrošnju energije ili goriva po jedinici puta u n-toj godini. $PP_{b,n}$ odnosi se na prosječnu potrošnju benzina u [l/100 km]; $PP_{ee,n}$ predstavlja prosječnu kilometražu električnog vozila prijeđenu po jedinici energije u [km/kWh], a $PP_{v,n}$ je prosječna kilometraža vozila na vodik prijeđena po masi vodika u [km/kg]. $C_{b,n}$, $C_{ee,n}$ i $C_{v,n}$ su pak cijene benzina [€/l], električne energije [€/kWh], odnosno vodika [€/kg] u n-toj godini.

Troškovi održavanja M_n procjenjuju se prema prijeđenoj kilometraži, odnosno, oni su linearna funkcija godišnje kilometraže. Prikazani su jednadžbom (5) gdje *PO* označava prosječne troškove održavanja [€/km].

$$M_n = PO \cdot GK \quad \textbf{(5)}$$

Porezi i davanja državi T_n dobiveni su korištenjem HAK-ovog on-line kalkulatora za izračun cijene tehničkog pregleda i registracije vozila [35].

Jednadžba za proračun stvarne diskontne stope (koja u obzir uzima i inflaciju) je:

$$r = r' + \bar{f} + r' \cdot \bar{f} \quad \textbf{(6)}$$

Gdje r' predstavlja nominalnu diskontnu stopu, a $\bar{f}$ generalnu stopu inflacije. Nominalna diskontna stopa r' prema podatcima Hrvatske narodne banke za 2019. godinu iznosi 3% [87], a generalna stopa inflacije $\bar{f}$ iznosi 0,6% [88]. Koristeći jednadžbu (6) dobivena stvarna diskontna stopa r iznosi 3,618%.

5.1. Ulazni podatci

5.1.1. Cijene vozila

Cijene svih vozila mogu se rastaviti na dvije komponente: na cijenu pogonskog sklopa i cijenu ostatka vozila. Cijene ostatka vozila ne razlikuju se značajno jer svi automobili imaju više manje jednaku šasiju, gume ili sjedala. Ipak, za očekivati je da se popularizacijom alternativnih pogonskih sklopova mijenja i njihova cijena te postaje konkurentnija vozilima s MSUI. Metoda korištena u ovom radu je da se od stvarne prodajne cijene vozila procijeni koliko iznosi trošak pogonskog sklopa (baterija ili gorivnih članaka). Modeli vozila birani su tako da se odabire model vozila s MSUI koji je po snazi motora jednak snazi EV-a i vozila na vodik. Zbog rastućih ograničenja na prometovanje dizelskim vozilima i postupnog ukidanja takvih motora, u razmatranje ulaze samo benzinski motori. Vozila su podijeljena u dvije kategorije prema europskoj klasifikaciji vozila: B razred (mala gradska vozila: Renault Clio, Renault Zoe) i C razred (malo obiteljsko vozilo: Škoda Octavia, Nissan Leaf, Toyota Mirai). Clio i Octavija predstavljaju najprodavanije modele vozila u Hrvatskoj [90], a ostala vozila pripadaju istoj kategoriji pa se smatraju valjanom alternativom. Cijene spomenutih vozila navedene su u tablici [Tablica 5].

Tablica 5. Osnovni podatci i maloprodajne cijene vozila u Hrvatskoj

Vozilo	**Kategorija**	**Pogonski sklop**	**Snaga [kW (KS)]**	**Cijena [€]**
Renault Clio	B	MSUI	74 (100)	14.090
Renault Zoe	B	EV	80 (108)	33.246
Škoda Octavia	C	MSUI	110 (150)	20.835
Nissan Leaf	C	EV	110 (150)	37.081
Toyota Mirai	C	Gorivni članci	112 (152)	60.000

Toyota Mirai nije dostupna na prodaju u Republici Hrvatskoj zbog nedostatne infrastrukture potrebne za vozila na vodik.

5.1.2. Godišnja kilometraža

Prosječna godišnja kilometraža u Hrvatskoj iznosi 12.688 km [89][89]. Za potrebe ovog rada odabrane godišnje kilometraže su prosječna Hrvatska, potom 17.500 km što predstavlja kilometražu koju prevali netko tko živi u prigradskim naseljima ili satelitskim gradovima, 25.000 i 35.000 kilometara što je raspon kilometraža koju odrade taksi vozila, službena ili dostavna vozila.

5.1.3. Prosječna potrošnja pogonskih sklopova

Korištenje veličine prevaljenog puta po jedinici goriva (energije) uobičajen je način za usporedbu učinkovitosti i potrošnje raznih vozila. Zbog toga se prosječna potrošnja iznosi u jedinicama poput [l/100 km] za vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem ili pak [km/kWh] za električna vozila i [km/kg] za vozila na vodik. Na prosječnu potrošnju utječe više faktora poput učinkovitost energetske pretvorbe (u elektromotoru, MSUI-ju, gorivnom članku), gubitaka u prijenosu, režima vožnje vozila i same veličine vozila (mase i oblika). Za očekivati je da će se sve navedene učinkovitosti povećavati s tehnološkim razvojem te da će to pozitivno utjecati na prosječnu potrošnju. U tablici [Tablica 6] su navedene prosječne potrošnje pogonskih sklopova dobivene na temelju procjena raznih autora, uz manje korekcije kako bi se realnije prikazali podatci.

Tablica 6. Prosječne potrošnje pogonskih sklopova

Tehnologija	**Mjerna jedinica**	**2019.**	**2030.**	**2050.**	**Izvor(i)**
MSUI – B kat.	l/100 km	6,64	6,23	5,05	[22][25][49]
MSUI – C kat.	l/100 km	7,24	6,83	5,65	
EV	km/kWh	6,06	6,41	7,41	[21][22][23][24][25][49]
VV	km/kg	112,25	143,35	154,85	[49][61][62]

5.1.4. Troškovi održavanja

Troškovi održavanja poglavito ovise o godišnjoj kilometraži – očigledno je da vozilo koje godišnje prijeđe 35.000 kilometara zahtijeva više održavanja od vozila koje prijeđe 12.688 km. Iz tog razloga korišten je jednostavan model gdje su troškovi održavanja pojedinih pogonskih sklopova izraženi po jedinici puta. Isto tako, nisu ni svi pogonski sklopovi jednaki za

održavanje: vozilo s MSUI ima kompleksno održavanje motora s mnogo pomičnih dijelova i sklopova, pumpu za gorivo, brizgaljke za gorivo (kod novijih benzinaca), cijeli sustav prijenosa – takav pogonski sklop puno je skuplji za održavanje od običnih elektromotora. Vozila na vodik i električna vozila ne dijele nijedan spomenuti dio s vozilima s MSUI osim prijenosnog sustava konstantnog omjera između pojedinačnih elektromotora i kotača, a taj sustav izložen je manjim opterećenjima nego onaj u vozilima na fosilna goriva [91]. Iz tog razloga, prosječno održavanje električnog vozila košta upola manje od održavanja vozila s MSUI. U tablici [Tablica 7] su prikazane prosječne vrijednosti troškova održavanja pojedinih pogonskih sklopova na temelju procjena raznih autora.

Tablica 7. Godišnji troškovi održavanja pogonskih sklopova

Pogonski sklop	**Trošak održavanja [€/km]**	**Izvor(i)**
MSUI	0,068	[21][25][49][62]
EV	0,036	[21][23][25][49]
VV	0,030	[49]

5.1.5. Porezi i davanja državi

Iznosi posebnog poreza na motorna vozila (PPMV), poreza na cestovna motorna vozila (PCMV) i ostalih naknada (ON) koje se naplaćuju prilikom registracije vozila (cijena tehničkog pregleda, naknade za ceste, posebna naknada za okoliš i ostale naknade) navedeni su u eurima u tablici [Tablica 8].

Tablica 8. Porezi i davanja državi za vozila

Vozilo | [€]	**PPMV**	**PCMV 1 – 2 g.**	**PMCV 3 – 5 g.**	**PMCV 6 – 10 g.**	**ON**
Renault Clio	247	81	57	54	87
Renault Zoe	0	81	67	54	70
Škoda Octavia	773	121	94	81	115
Nissan Leaf	0	121	94	81	76
Toyota Mirai	0	121	94	81	76

Vidljivo je da se posebni porez na motorna vozila kategorizira samo po snazi vozila, ne uzimajući u obzir vrstu pogonskog sklopa, dok na ostale naknade utječe vrsta pogonskog sklopa.

5.2. Rezultati tehno-ekonomske analize

Korištenjem svih navedenih ulaznih podataka i gore navedenih jednadžbi dobiveni su sljedeći rezultati ukupnih troškova posjedovanja (TCO) vozila iz poglavlja 5.1.1 s različitim pogonskim sklopovima prikazani u tablicama [Tablica 9][Tablica 10] za desetogodišnje razdoblje posjedovanja s vremenom nabave od 2020. do 2040. godine (zadnja proračunska godina je 2050.). Podatci u tablicama pokazuju ukupne troškove posjedovanja svedene na vrijednost u godini kupnje. Tako primjerice podatak za TCO vozila u 2040. godini diskontira sve cijene povezane s troškovima tog vozila do 2050. godine na vrijednost novca u nabavnoj 2040. godini. Budući da je sadašnji iznos troškova posjedovanja bitan samo za tehnologije u međusobnom natjecanju u istom vremenskom trenutku (različiti pogonski sklopovi), ova metoda omogućuje usporedbu TCO-va raznih tehnologija u istim vremenskim trenutcima.

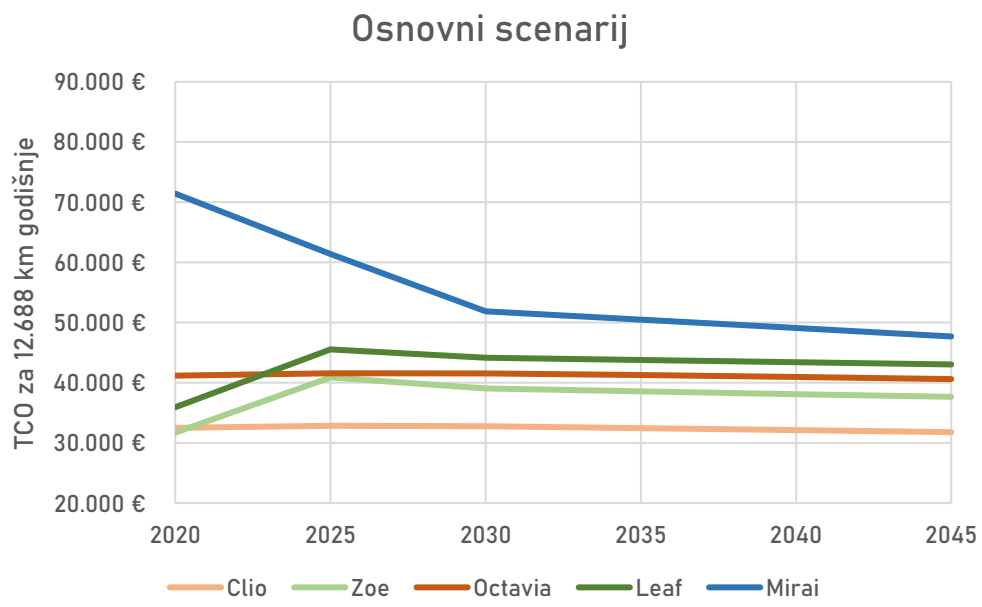
Tablica 9. Ukupno troškovi posjedovanja do 2050. u osnovnom scenariju za prosječnu hrvatsku kilometražu (12.688 km) i 17.500 km [€]

	Godina	**Clio**	**Zoe**	**Octavia**	**Leaf**	**Mirai**
12.688 km	2020	32.498,63	31.707,66	41.160,55	35.927,41	69.762,97
	2025	32.840,68	40.877,16	41.564,86	45.533,28	59.916,25
	2030	32.789,99	39.053,11	41.550,65	44.145,59	50.503,78
	2035	32.472,21	38.581,17	41.251,76	43.763,65	49.102,84
	2040	32.135,87	38.112,17	40.934,30	43.384,64	47.701,94
	2045	31.780,96	37.645,94	40.598,27	43.008,42	46.301,07
	Godina	**Clio**	**Zoe**	**Octavia**	**Leaf**	**Mirai**
17.500 km	2020	38.912,18	34.167,00	47.919,81	38.386,75	73.057,95
	2025	39.383,96	43.452,33	48.477,47	48.108,44	62.952,17
	2030	39.314,04	41.653,63	48.457,87	46.746,11	53.445,32
	2035	38.875,75	41.150,62	48.045,62	46.333,09	52.044,03
	2040	38.411,84	40.651,65	47.607,76	45.924,13	50.642,78
	2045	37.922,33	40.156,52	47.144,29	45.518,99	49.241,59

Tablica 10. Ukupni troškovi posjedovanja do 2050. u osnovnom scenariju za 25.000 km i 35.000 km [€]

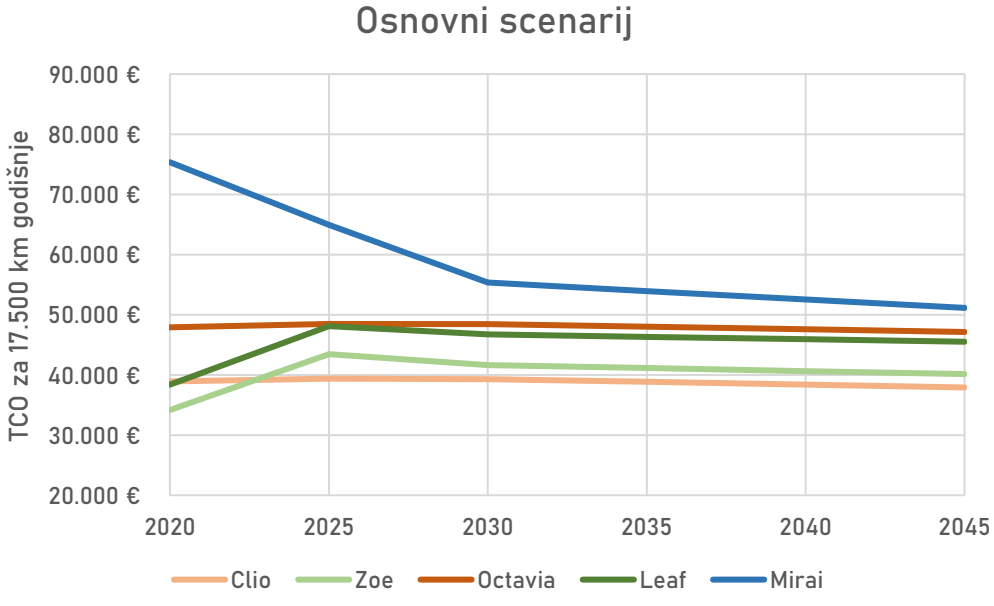
	Godina	**Clio**	**Zoe**	**Octavia**	**Leaf**	**Mirai**
25.000 km	2020	48.908,37	38.000,13	58.454,83	42.219,88	78.193,51
	2025	49.582,33	47.466,00	59.251,48	52.122,11	67.683,96
	2030	49.482,46	45.706,82	59.223,49	50.799,29	58.030,03
	2035	48.856,32	45.155,36	58.634,55	50.337,84	56.628,18
	2040	48.193,60	44.609,70	58.009,04	49.882,17	55.226,40
	2045	47.494,30	44.069,51	57.346,93	49.431,99	53.824,69
	Godina	**Clio**	**Zoe**	**Octavia**	**Leaf**	**Mirai**
35.000 km	2020	62.236,61	43.110,98	72.501,52	47.330,73	85.040,94
	2025	63.180,16	52.817,55	73.616,83	57.473,66	73.993,02
	2030	63.040,34	51.111,06	73.577,64	56.203,54	64.142,97
	2035	62.163,75	50.495,03	72.753,13	55.677,51	62.740,38
	2040	61.235,94	49.887,10	71.877,41	55.159,57	61.337,89
	2045	60.256,92	49.286,83	70.950,47	54.649,31	59.511,61

Grafički prikaz tabličnih podataka prikazan je na slikama [Slika 32 – Slika 35] podijeljen po godišnjoj kilometraži. Vidljivo je da za manju kilometražu [Slika 32] u manjoj (B) kategoriji električno vozilo ima niže ukupne troškove posjedovanja od vozila s MSUI samo ako se kupi 2020. godine zbog raspoloživih državnih poticaja. Isto vrijedi i u većoj (C) kategoriji: EV ima niži TCO od vozila s MSUI samo ako se nabavi 2020. Ipak, ukupni troškovi posjedovanja električnih vozila približavaju se TCO-u vozila s MSUI u budućnosti. Vozilo na vodik na ovoj kilometraži do 2045. ne dostiže paritet ukupnih troškova posjedovanja.



Slika 32. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 12.688 km godišnje

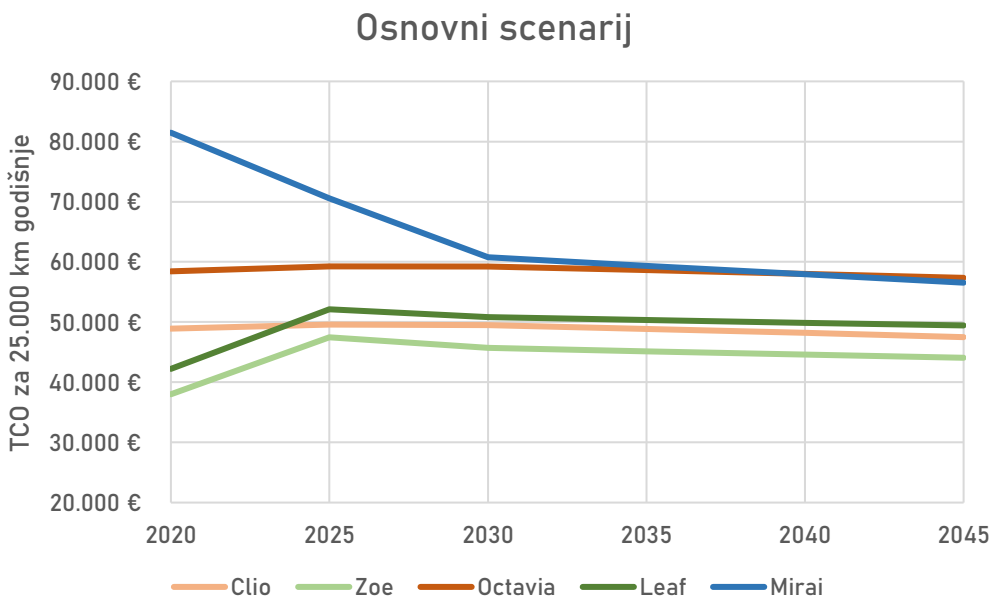
Za veću godišnju kilometražu (17.500 km) električna vozila postaju isplativija, u C kategoriji EV (Nissan Leaf) ispada jeftiniji za posjedovanje od MSUI-ja u bilo kojem trenutku nabave (iako su 2025. gotovo izjednačeni), dok je u B kategoriji EV i dalje jeftiniji samo ako se nabavi u 2020. [Slika 33]. Vozilo na vodik približava se vozilu s MSUI ali i dalje ne dostiže troškovni paritet do 2045.



Slika 33. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 17.500 km godišnje

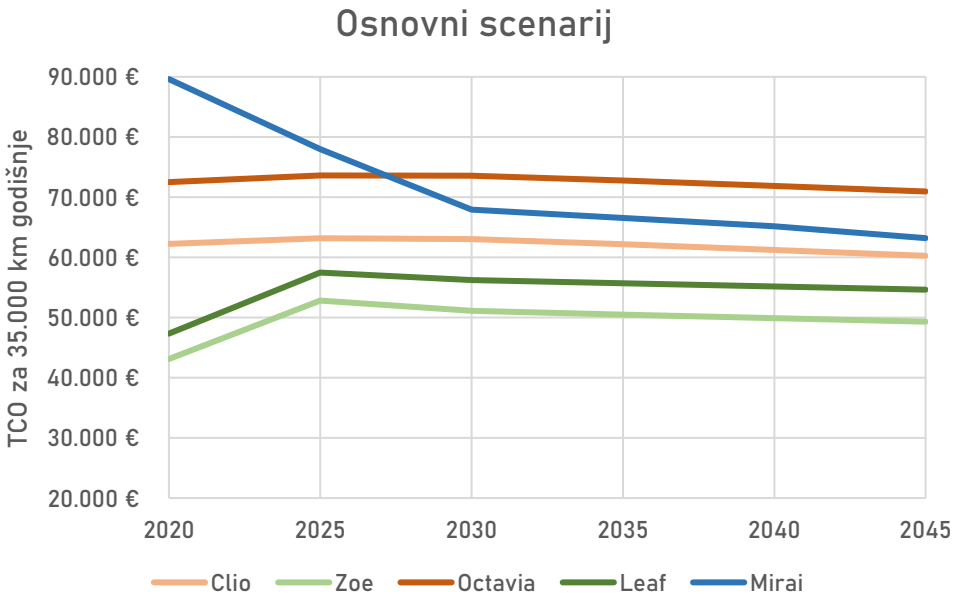
Za veće kilometraže (25.000 km) osobnih vozila – poput službenih vozila ili taksi-vozila troškovni paritet električnih vozila postignut je u bilo kojem trenutku nabave [Slika 34].

Električno vozilo C kategorije u 2045. ima gotovo jednake troškove posjedovanja kao i vozilo s MSUI B kategorije. Vozilo na vodik pri ovoj godišnjoj kilometraži postiže troškovni paritet vozilu s MSUI – nakon značajnog pojeftinjenja uslijed pada cijena gorivnih članaka do 2030. godine, vozilo na vodik C kategorije (Toyota Mirai) cjenovno je konkurentna vozilu s MSUI C kategorije (Škoda Octavia). Ovo potvrđuje raniju tezu da bi upotreba vodika trebala biti za sektore koje je teže elektrificirati i za vozila koja godišnje prevale veći broj kilometara poput autobusa ili kamiona.



Slika 34. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 25.000 km godišnje

Za najveće kilometraže koje se promatraju u ovom radu – 35.000 km – koje predstavljaju gornji godišnji limit gospodarskih automobila električna vozila od samo početka postižu troškovni paritet [Slika 35]. Pritom su ukupni troškovi posjedovanja EV-a C klase u bilo kojem trenutku nabave niži od troškova posjedovanja vozila B klase što kupcu predstavlja značajnu prednost. Vozilo na vodik u ovom slučaju ima niže troškove posjedovanja od vozila s MSUI iste klase (Octavije) nakon 2025., a 2040. ima niže troškove posjedovanja i od vozila B klase. Međutim, VV i dalje ne dostiže TCO koji imaju EV.



Slika 35. Ukupni troškovi posjedovanja u osnovnom scenariju za 35.000 km godišnje

5.3. Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti pokazuje kako se mijenja konačni rezultat tehno-ekonomske analize u ovisnosti o promjeni nekog parametra poput cijene goriva ili diskontne stope. Za izradu analize osjetljivosti bila su mijenjana četiri parametra:

- cijena benzina,
- cijena električne energije,
- cijena vodika,
- diskontna stopa.

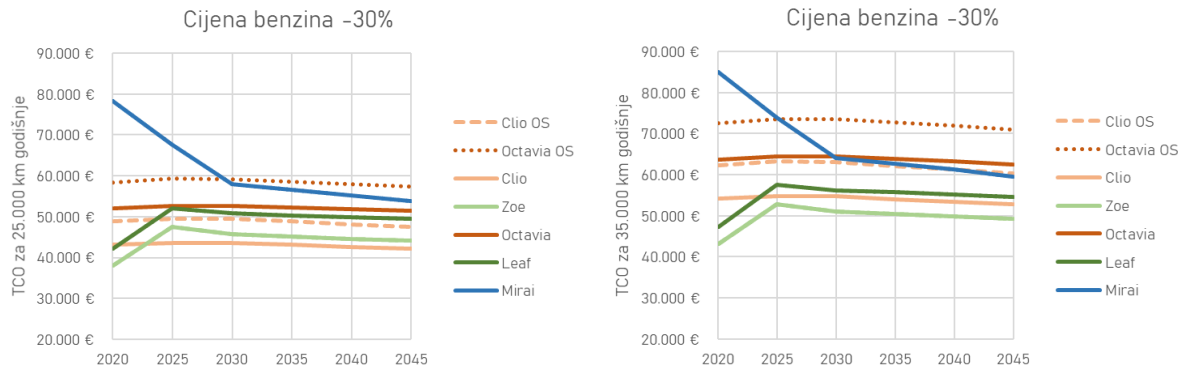
Cijene energenata mijenjaju se u rasponu od -30 do +30% (s korakom od 15%) dok su diskontne stope koje ulaze u razmatranje pored osnovne još i 5 te 7%. Za svaki od navedenih slučajeva proveden je ponovni proračun s novim cijenama, a rezultati su prikazani za sve promatrane kilometraže. Svrha analize osjetljivost je prikazati i scenarije koji se mogu dogoditi u budućnosti, a nisu pokriveni osnovnim scenarijem jer nijedno predviđanje nije u potpunosti točno. Na sljedećim stranicama prikazani su grafovi dobiveni analizom osjetljivosti za četiri ili dva stupnja gore navedenih parametara. Isprekidane linije predstavljaju usporedbu s osnovnim scenarijem za vozila s onim pogonskim sklopovima na koje utječe promjena navedenog parametra.

Na grafovima dobivenima analizom osjetljivosti moguće je uočiti određene trendove:

- kod vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem operativni troškovi čine veći udio ukupnih troškova posjedovanja, stoga su ta vozila i osjetljivija na promjene parametra cijene goriva;
- vozila na alternativna goriva imaju značajniji udio kapitalnih troškova u TCO-u stoga su njihovi ukupni troškovi posjedovanja manje osjetljivi na promjene cijena energenata;
- porast diskontne stope povoljno utječe na TCO vozila s MSUI jer se njihovi viši operativni troškovi koji nastaju kroz godine korištenja više diskontiraju, tj. umanjuje im se utjecaj na ukupne troškove posjedovanja.

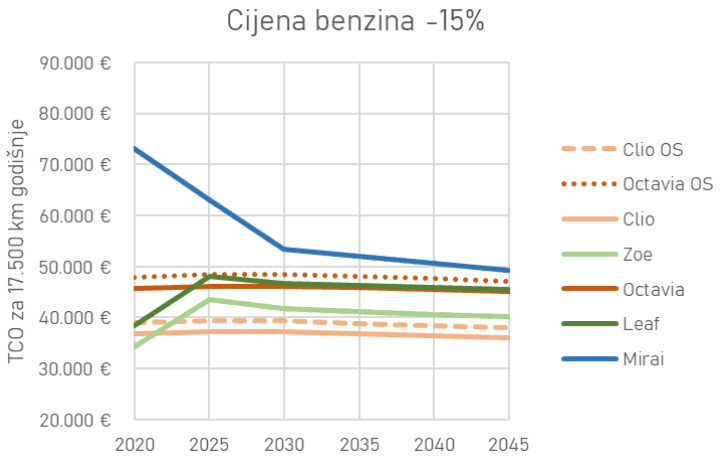
Ovdje će biti analizirani najznačajniji dijelovi analize osjetljivosti, a potpuna analiza osjetljivosti nalazi se u Prilogu I.

Promjene cijena goriva uvelike utječu na TCO vozila s MSUI. Pad cijena benzina uvelike snižava ukupne troškove posjedovanja, međutim na većim kilometražama i pad od 30% nije dovoljan da vozilo s MSUI ima niži TCO od EV-a [Slika 36].



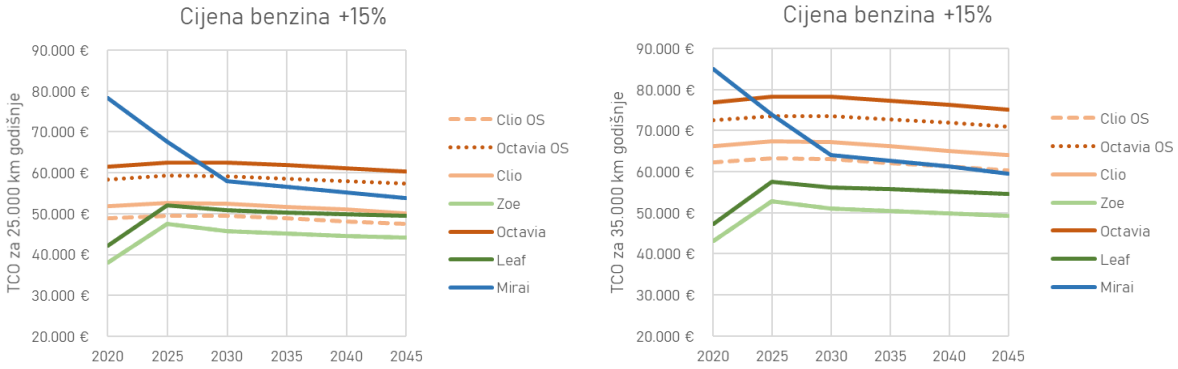
Slika 36. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% nižoj cijeni benzina za 25.000 (lijevo) i 35.000 km (desno)

Pad cijena benzina od 15% je granični slučaj na godišnjem prevaljenom putu od 17.500 km jer je u osnovnom slučajnu niže ukupne troškove posjedovanja imalo električno vozilo, dok u ovom slučaju vozilo s MSUI ima niži TCO [Slika 37].



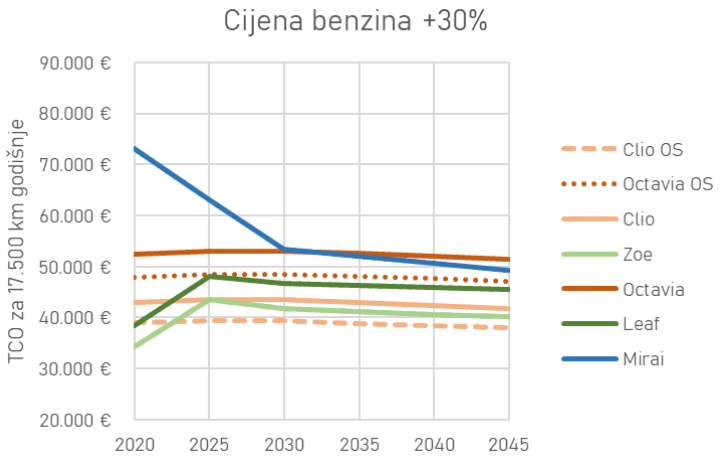
Slika 37. Ukupni troškovi posjedovanja pri 15% nižoj cijeni benzina za 17.500 km

Porast cijena goriva pak čini vozila na vodik konkurentnima vozilima s MSUI što se može vidjeti kod porasta cijena benzina – za najveće kilometraže vozilo s vodikom postiže troškovni paritet između 2020. i 2030. uz porast cijena benzina od samo 15% [Slika 38].



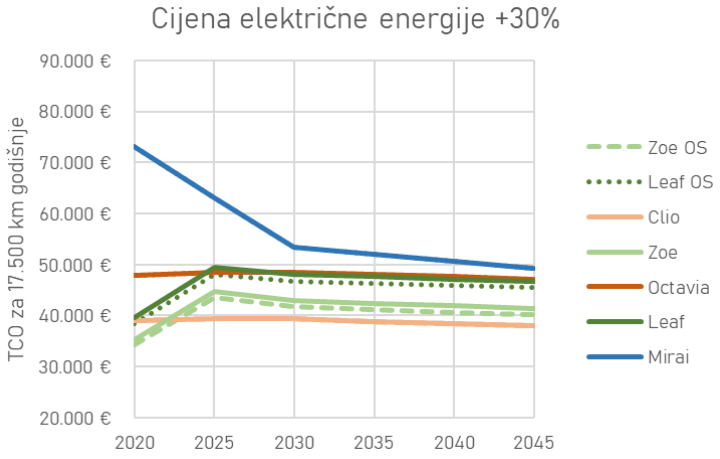
Slika 38. Ukupni troškovi posjedovanja pri 15% višoj cijeni benzina za 25.000 (lijevo) i 35.000 km (desno)

Ako cijene benzina porastu 30%, vozilo na vodik samo za prosječnu hrvatsku kilometražu (12.688 km) ne dostiže troškovni paritet, a za veće kilometraže dostiže ga najkasnije 2030. [Slika 39].



Slika 39. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% višoj cijeni benzina za 17.500 km

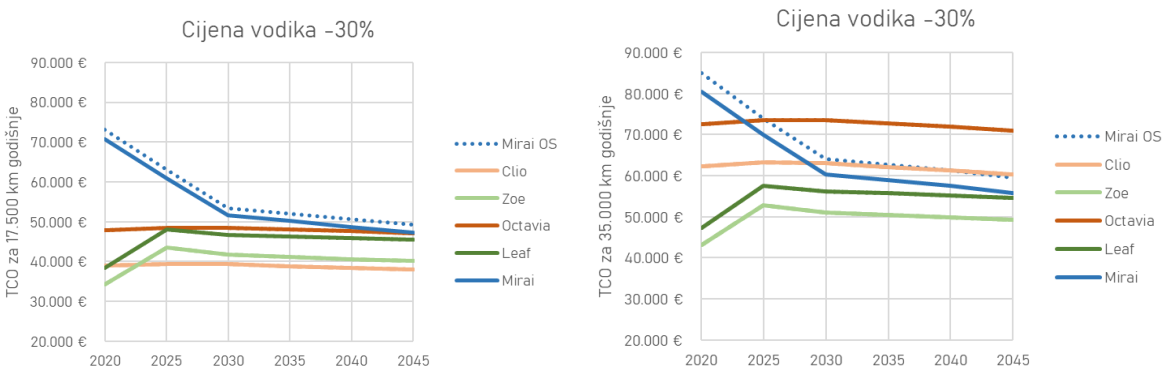
Porast cijena električne energije ne mijenja značajno isplativost EV-a u usporedbi s MSUI na velikim kilometražama. Granični slučaj je na 17.500 km godišnje kod porasta cijena električne energije od 30% [Slika 40] gdje TCO električnog vozila C kategorije raste gotovo do iznosa TCO vozila s MSUI (u 2025. ima i viši iznos TCO), što nije slučaj u osnovnom scenariju – EV na toj kilometraži od 2025. ima niže ukupne troškove posjedovanja u OS.



Slika 40. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% višoj cijeni električne energije za 17.500 km

Iako vozilo na vodik u velikom broju scenarija ima niže ukupne troškove posjedovanja od vozila s MSUI (pogotovo za viši godišnji prevaljeni put) nijednom ne postigne niže troškove posjedovanja od EV-a iste kategorije (Leaf). Ipak, vidljivo je da mu se TCO približava TCO-u električnog vozila. Tako je za slučaj da cijena vodika padne 30% (što je stvarna mogućnost ako popularizacijom elektrolizatora padnu cijene te tehnologije) na 35.000 km TCO vozila na vodik gotovo je izjednačen s TCO električnog vozila (viši je za 1177 €) [Slika 41], a za višu godišnju kilometražu vozilo na vodik pokazalo bi se kao troškovno optimalan odabir. Granični slučaj pri ovakvim cijenama ponovo je na 17.500 prevaljenih kilometara godišnje jer vozilo na vodik

postiže troškovni paritet vozilu s MSUI 2045. godine, što u osnovnom scenariju nije slučaj [Slika 41].



Slika 41. Ukupni troškovi posjedovanja pri 30% nižoj cijeni vodika za 17.500 km (lijevo) i 35.000 km (desno)

Rezultati ove analize osjetljivosti za vodik potvrđuju tezu [11] će se vozila na vodik najvjerojatnije koristiti u sektorima gdje se godišnje prevaljuje velik put (ili se često rade dugačka putovanja) poput autobusa ili kamiona koji godišnje prijeđu 50.000 – 70.000 km [89], ali potrebno je provesti ovakvu tehno-ekonomsku analizu za ta vozila.

Analiza osjetljivosti diskontne stope uzima u obzir porast diskontne stope na 5 i 7%. Ove diskontne stope česte su u sličnim analizama, ali isto tako su ove diskontne stope ispod hrvatskog ponderiranog prosječnog troška kapitala (WACC – *weighted average cost of capital*) koji se u automobilskom sektoru u Hrvatskoj kreće između 7 i 13,5% [92].

6. POSLOVNI MODELI ZA SUDJELOVANJE VLASNIKA VOZILA U RADU ENERGETSKOG SUSTAVA

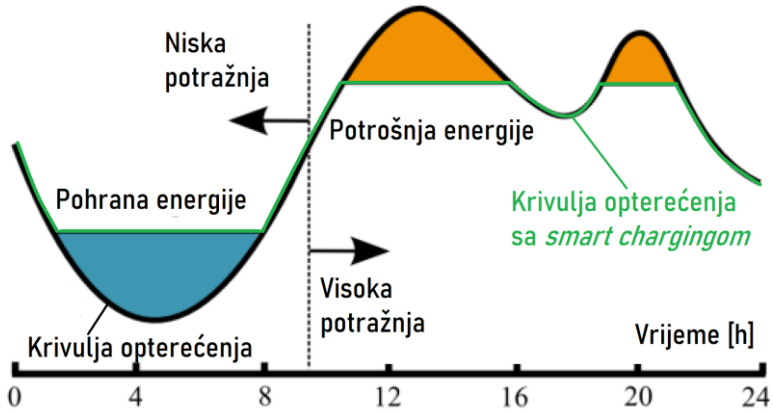
Kako je prikazano u poglavlju 3., vozila na alternativna goriva (električna vozila i vozila na vodik) imaju mogućnost punjenja na mreži. Kako takav koncept nosi brojne pogodnosti navedene u poglavlju 3., ovdje će se iznijeti mogući poslovni modeli koji bi vlasnicima vozila na alternativna goriva omogućili da aktivno sudjeluju u radu energetskog sustava. Naime, uz dobro odabrane poslovne modele moguće je da profitiraju i operater mreže (koristeći vozila spojena na mrežu za balansiranje mreže) i vlasnici vozila (koristeći višak električne energije u mreži za besplatno punjenje ili dobivajući naknadu od operatera za balansiranje mreže svojim baterijama ili gorivnim člancima). Isto tako, ovi poslovni modeli bave se načinom financiranja punionica, koji može biti od strane potrošača, ili od strane ponuđača - privatnog ili javnog.

6.1. Trenutni model privatnog punjenja

Trenutni model privatnog punjenja vrlo je jednostavan – vlasnik vozila puni svoje električno vozilo na kućnoj punionici kadgod mu je potrebno i plaća potrošenu električnu energiju svom opskrbljivaču po svojoj tarifi. Ako se puni na javnoj punionici, trenutno mu je punjenje besplatno na HEP-ovim ELEN punionicama i većini punionica T-Coma, dok na Tesla superbrzim punjačima punjenje koštaj 1,69 kn/kWh. Za većinu javnih punionica potrebna je RFID pristupna kartica preko koje se u budućnosti planira naplaćivanje punjenja.

6.2. Pametno punjenje

U ovom modelu vlasnik vozila ima tarifu u kojoj cijena električne energije varira iz sata u sat, u ovisnosti o ponudi i potražnji na unutardnevnom tržištu. Budući da je vlasnik u svakom trenutku informiran o cijeni električne energije, može birati kada želi puniti svoje vozilo (ili to vozilo radi automatizirano prema željama vlasnika). Na ovaj način vlasnik električnog vozila indirektno utječe na rad elektroenergetskog sustava jer radi *load leveling*, tj. odgađa punjenje (ako je to moguće) pri velikom opterećenju mreže (kad je skuplja el. energija), tj. ima pametno punjenje (*smart charging*). Na slici [Slika 42] je prikazan učinak ovakvog djelovanja na mrežu, gdje crna linija prikazuje opterećenje mreže prije upotrebe pametnog punjenja, a zelena linija nakon.



Slika 42. Primjer *load levelinga* korištenjem pametnog punjenja [93]

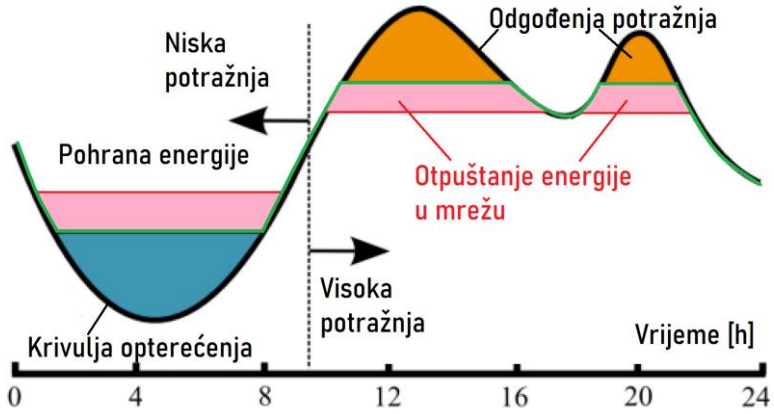
6.3. Punjenje na mreži

Ako je uspostavljena pametna mreža, tzv. *smart grid*, moguće je da vozilo na alternativna goriva komunicira s mrežom i svoje energetske tokove prilagođava potrebama mreže. Takvi energetski tokovi mogući su u dva smjera: s mreže prema vozilu i s vozila prema mreži, odnosno koncept punjenja na mreži.

U slučaju tokova s mreže prema vozilu nužno je imati električno vozilo s baterijom. Ako u elektroenergetskom sustavu postoji višak jeftine električne energije (uslijed primjerice velike proizvodnje iz vjetroelektrana noći i male potražnje za el. energijom) ili je jeftinije proizvoditi veću količinu energije od trenutne potrošnje (primjerice, zbog najefikasnije radne točne elektroenergetskih postrojenja) mreža komunicira s vozilima spojenim na punjače i puni ih. Strategije punjenja ovakvih vozila diskutirane su u 3. poglavlju – zahtijevaju centralizirani sustav u kojem operater sustava donosi odluku o punjenju vozila na mreži ili napredniji multi-agentski sustav u kojem vozila komuniciraju s mrežom i međusobno radi optimiranja stanja napunjenosti baterije.

Tok s vozila prema mreži moguć je u slučaju električnog vozila i vozila na vodik jer oba imaju mogućnost otpuštanja električne energije u mrežu. Kako bi se izbjegle skupe i komplicirane transformacije ovakve električne energije na iznimno visoke napone, najbolje je ovakve sustave koristiti na lokalnoj razini (srednjenaponskoj i niskonaponskoj) kao i distribuirane energetske izvore [94]. Primjer jednog takvog energetskog toka prikazan je na slici [Slika 43]. Naime, plavo i narančasto područje predstavljaju *load shifting*, tj. punjenjem EV-a u vrijeme niže potražnje za električnom energijom (plavo područje na slici) smanjena je potražnja tijekom dana kada je veća potreba za el. energijom (narančasto područje). Druga spremljena energija iz

mreže označena rozim područjem otpušta se u mrežu iz baterija, a dodatna energija (također roza) radom gorivnih članaka.



Slika 43. Primjer *load levelinga* uslijed pametnog punjenja i dodatnog smanjenja opterećenja korištenjem V2G koncepta [93]

Modeli naplaćivanja ovakvog punjenja variraju – postoje opcije da vlasnik ne prima nikakvu naknadu za otpuštanje energije u mrežu niti plaća naknadu za korištenje energije mreže, ali za to je nužan uvjet da neko određeno vrijeme provede spojen na mrežu pružajući uslugu spremnika energije. Druga opcija je da vlasnik plaća električnu energiju za punjenje vozila po trenutnom cjeniku kao u modelu pametnog punjenja, ali i da isto tako naplaćuje otpuštanje energije u mrežu (pružanje sekundarnih usluga mreži). Ovakav model zahtijeva praćenje energetskih tokova i naplatu sukladno tome, ali i omogućuje vlasniku da bude neto pozitivan, tj. da više zarađuje nego što troši, pogotovo ako posjeduje vozilo na vodik koje može samo otpuštati energiju u mrežu.

6.4. Punjenje na putu

Individualni vlasnici vozila mogu sudjelovati u radu elektroenergetskog sustava i ako pune vozilo van vlastitog doma. Punjenje na punjačima u vlasništvu nekog poduzeća ili lokalne zajednice može biti izvedeno preko četiri modela:

- besplatno punjenje: model koji je trenutno dominantan u Hrvatskoj gdje je većina punjača javno dostupna i besplatna za korištenje, često nije potrebna prethodna identifikacija korisnika;
- punjenje uz naplaćivanje potrošnje ili vremena punjenja: za ovakav model nužno je naplaćivanje punjenja karticom ili korištenje identifikacije korisnika SMS-om ili RFID karticom;

- punjenje uz naplaćivanje članarine: naplaćuje se mjesečna/godišnja članarina za korištenje infrastrukture za punjenje; ovakav model punjenja također zahtijeva identifikaciju korisnika;
- punjenje na temelju postojećeg tarifnog modela: ovakav model punjenja najlakše omogućuje aktivno sudjelovanje vlasnika vozila u radu energetskog sustava. U takvom modelu vlasnik vozila ima svoju identifikaciju koja mu omogućuje korištenje punionice po istim uvjetima kao i njegova kućna punionica, uz plaćanje naknade za korištenje infrastrukture. Tako je moguće da sudjeluje u radu svog vozila na mreži i ostvaruje profit čak i ako nije spojen na vlastiti kućni priključak.

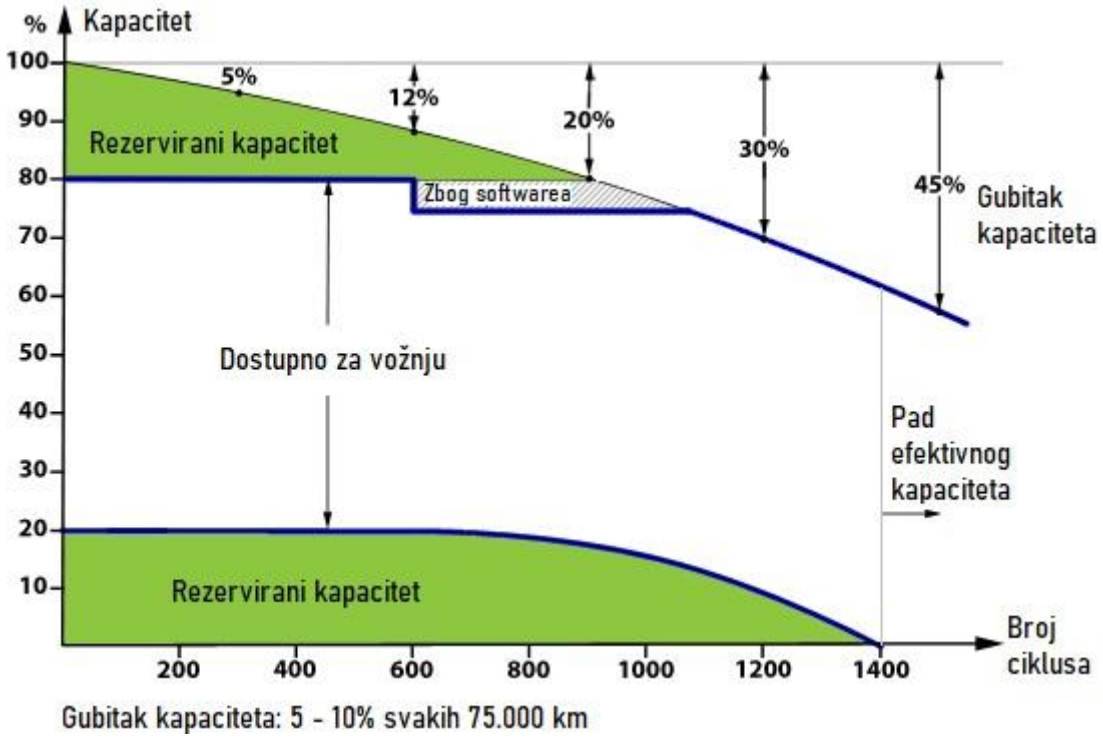
6.5. Punjenje flote

Za poduzeća koja imaju flotu automobila na alternativna goriva ili koja nude svojim zaposlenicima punjenje EV-a nije dovoljno samo imati poslovni model punjenja poput onih za individualne vlasnike vozila, već je nužno razvijati i poslovne modele izgradnje infrastrukture za više vozila [95][96]. Ovakvi poslovni modeli osim usluga punjenja uključuju i način financiranja punionica. Tako se punionice mogu financirati u potpunosti novcem investitora, mogu biti postavljene od strane treće strane koja potom provodi naplatu punjenja tvrtki ili mogu biti financirane modelom otplate kapitalnih troškova naplaćivanjem punjenja u određenom vremenskom periodu nakon kojeg prelaze u vlasništvo poduzeća.

6.6. Analiza poslovnih modela

Za potrebe ovog rada izrađena je analiza poslovnih modela punjenja električnih vozila. Svrha te analiza bila je istražiti model koji korisniku omogućava isplativost korištenja punjenja na mreži unatoč činjenici što skraćeni vijek trajanja baterije povećava ukupne troškove posjedovanja takvog vozila. Budući da baterija vozila u sustavu punjenja na mreži ima dodatno punjenje i pražnjenje zbog pružanja usluga pohrane energije mreži, baterija ima povećani broj ciklusa punjenja i pražnjenja. Jedan ciklus baterije predstavlja vrijeme u kojem se baterija kumulativno napuni za cijeli svoj kapacitet, ali ne nužno odjednom. Primjerice, ako se baterija troši 4 dana zaredom 25% i svaki dan se dopuni za taj isti iznos, tada je baterija u četiri dana odradila jedan ciklus punjenja i pražnjenja. Ciklusi baterije bitni su jer se sa svakim ciklusom bateriji smanjuje efektivni kapacitet. Krajnji potrošač je zaštićen od smanjenja tog efektivnog kapaciteta korištenjem rezerviranih područja baterije: na korištenje mu se stavlja samo dio ukupnog kapaciteta baterije, primjerice 60% [97]. Dva su razloga za ovo: Li-ion baterije koje prevladavaju u većini EV-a velikih serija imaju najmanji gubitak kapaciteta kada se nikada ne

isprazne ispod 15% i ne napune iznad 90%, tako da cikliranje između 20% i 80% najmanje nepovoljno djeluje na bateriju. Drugi razlog je da smanjenjem kapaciteta baterije vozilo smanjuje rezervu, tako da je za određeni broj ciklusa efektivni kapacitet baterije nepromijenjen. Međutim, kada se kapacitet baterije smanji na 60% početnog, potrošena je rezerva koja se koristi za balansiranje te je potrebno mijenjati bateriju ako je smanjenje dometa električnog vozila neprihvatljivo. Prikaz promjene ovih rezervi, ali i promjene kapaciteta baterije prikazan je na slici [Slika 44].



Slika 44. Gubitak kapaciteta baterije u ovisnosti o broju ciklusa s prikazanim rezervama [98]

6.6.1. Metodologija

Glavnina podataka korištenih za ovu analizu dobivena je od strane projekta RESFLEX – Energetski neovisna Hrvatska bazirana na visokom udjelu obnovljivih izvora energije te različitih tehnologija brzog odziva koji je dio Hrvatske energetske tranzicije. Stručnjaci iz RESFLEX tima izradili su EnergyPLAN modele [99] Hrvatske u godinama 2030., 2040. i 2050. s različitim udjelima električnih vozila te različitim stopama sudjelovanja tih vozila u pametnom punjenju i V2G-u. EnergyPLAN je softver za energetsko planiranje i modeliranje koji je razvijen na Sveučilištu Aalborg. Izmjenama postojećih modela dobiveni su podatci o energiji pohranjenoj na razini jedne godine u baterijama električnih vozila, prvo u slučaju u potpunosti nereguliranog punjenja, zatim u slučaju pametnog punjenja te potom u slučaju

punjenja na mreži (V2G). Iz tih podataka dobivena je prosječni broj ciklusa agregatora koji predstavlja sve baterije električnih vozila neke kategorije i uspoređeni su neregulirani koncept i koncept punjenja na mreži. Ovaj model je vrlo ograničen u svojim primjenama jer nije bio u fokusu ovog rada, stoga ovi rezultati predstavljaju kvalitativno kretanje trendova. Ulazni podatci u razne EnergyPLAN scenarije prikazani su u tablici [Tablica 11].

Tablica 11. Ulazni podatci za EnergyPLAN

Podatak	**Mj. jed.**	**2030.**	**2040.**	**2050.**
Broj električnih vozila	-			
Ukupna energija za EV	TWh	2,475	4,820	6
Udio vozila s nereguliranim punjenjem	%	82,6	10,4	2,3
Udio vozila s pametnim punjenjem	%	17,4	89,6	97,7
Kapacitet agregatora za neregulirano punjenje	GWh	17,31	16,94	1,91
Kapacitet baterija za pametno punjenje	GWh	3,64	60	80
Kapacitet spoja na mrežu za pametno punjenje	MW	671	4.400	5.400
Kapacitet spoja na mrežu za punjenje na mreži	MW	671	4.400	5.400

Neregulirano punjenje modelirano je tako da je za kapacitet baterije prikazan zbroj kapaciteta nereguliranog i pametnog punjenja, a energija potrebna za neregulirano punjenje isto tako je zbroj energija nereguliranog i pametnog punjenja. Dijeljenjem te energije s kapacitetom baterija dobiven je prosječni godišnji broj ciklusa agregatora (ujedno i baterije ako se pretpostavi jednaka veličina baterija).

Pametno punjenje ima isti broj ciklusa godišnje kao i neregulirano jer se sva energija pohranjena u bateriji koristi samo za (jednaku) prijeđenu kilometražu. Razlika je u distribuciji punjenja tijekom godine, tj. u pametnom punjenju ona je bolje prilagođena izjednačavanju opterećenja, iako joj je ukupni godišnji iznos jednak nereguliranom punjenju.

U modeliranju punjenja na mreži pretpostavljeno je da sva vozila koja sudjeluju u pametnom punjenju ujedno sudjeluju i u punjenju na mreži, stoga je kapacitet spoja na mrežu punjenja na

mreži jednak kapacitetu spoja na mrežu za pametno punjenje. Dijeljenjem energije potrebne za punjenje na mreži dobiveno iz satne simulacije cjelokupnog energetskog sustava Hrvatske kapacitetom agregatora baterija koje se pune na mreži dobiven je prosječni broj ciklusa baterije punjene na mreži prikazan u tablici [Tablica 12].

Tablica 12. Rezultati simulacije elektroenergetskog sustava

Godina	**2030**		**2040**		**2050**	
Scenarij	*dump/smart*	V2G	*dump/smart*	V2G	*dump/smart*	V2G
Broj ciklusa	107	216	65	85	66	104
Broj ciklusa u 10 godina	1.063	2.156	648	850	659	1.032
Povećanje ciklusa u punjenju na mreži	-	+103%	-	+31%	-	+57%

6.6.2. Rezultati

Utvrđeno je da vozila punjena na mreži imaju od 31% do 103% veći godišnji broj ciklusa od vozila s pametnim ili nereguliranim punjenjem što je uvjetovano veličinom samog agregatora i potrebama za fleksibilnošću samog modeliranog elektroenergetskog sustava. Koristeći te podatke i podatke iz Poglavlja 5.1, dobiveni su iznosi ciklusa punjenja vozila za 10-godišnje razdoblje u različitim trenutcima nabave (2030. – 2050.). Ti iznosi prikazani su u tablici [Tablica 13].

Tablica 13. Rezultati primjene simulacije na modele korištene u radu

Godišnja kilometraža [km]	**12.688**	**17.500**	**25.000**	**35.000**
Broj ciklusa nereguliranog punjenja u 10 godina	465	642	917	1.283
Broj ciklusa punjenja na mreži u 10 godina od 2030.	944	1.301	1.859	2.603
Broj ciklusa punjenja na mreži u 10 godina od 2030.	610	841	1.202	1.683
Broj ciklusa punjenja na mreži u 10 godina od 2030.	729	1.005	1.436	2.010

Iz ove tablice vidljivo je da bi primjena punjenja na mreži u slučaju malog broja dostupnih električnih vozila ili u slučaju velike godišnje kilometraže vozila dovela do prelaska 1400

ciklusa baterije u 10 godina, što prema grafu [Slika 44] predstavlja točku zamjene baterije. To znači da bi bilo potrebno u određenoj godini posjedovanja vozila imati investicijski trošak zamjene baterije, što bi poskupilo ukupne troškove posjedovanja. Ipak, ti troškovi mogu se namiriti na nekoliko načina: smanjenjem cijene električne energije koju vlasnik vozila plaća za punjenje vozila jer ujedno pruža i uslugu balansiranja mreže ili pak naplaćivanjem energije otpuštene u mrežu po posebnoj tarifi, poglavice ako je proizvedena iz vlastitih OIE poput fotovoltaika. Treća mogućnost je davanje poticaja prilikom kupnje punjača koji omogućuju punjenje na mreži, čime se također utječe na smanjenje TCO-a. Prikaz procijenjenih troškova zamjene baterije, energije koje su baterije otpustile u mrežu dobivenu RESFLEX modelima kao i cijena pohrane takve energije prikazane su u tablici [Tablica 14].

Tablica 14. Cijena pohrane energije u baterijama električnih vozila

Referentna godina	**Godina do promjene baterije za 25.000 km**	**Godina do promjene baterije za 35.000 km**	**Energija predana mreži u 10 godina [TWh]**	**Broj vozila**	**Cijena baterije [€/kWh]**	**Trošak zamjene baterije [€]**	**Cijena pohrane energije [€/MWh]**
2030.	7,5	5,4	4,0	80.889	100	4.500	91,0
2040.	-	8,3	12,1	1.333.333	85	3.825	421,1
2050.	9,8	7,0	29,9	1.777.778	70	3.150	187,6

Broj vozila dobiven je dijeljenjem ukupnog kapaciteta vozila spojenih na mrežu iz tablice [Tablica 12] s prosječnim kapacitetom baterije od 45 kWh. Cijena pohrane energije dobivena je dijeljenjem ukupnog troška izmjene baterija cijele flote vozila ukupnom energijom predanom mreži u desetogodišnjem razdoblju. Dobivene su cijene pohrane energije od 91 do 421 €/MWh. Cijene pohrane energije u velikim spremnicima od par stotina megavat-sati kreću se od 150 do 277 €/MWh prema Lazardovom izvješću o spremnicima energije [100], što cijene pohrane energije u baterijama električnih vozila u sustavima s većim količinama pohrane po vozilu (model Hrvatske 2030. s malim brojem električnih vozila i model Hrvatske 2050. s velikim potrebama za pohranom energije) čini konkurentnima trenutnim tehnologijama. U model Hrvatske 2040. godine cijena pohrane energije je visoka zbog manje potražnje za pohranom, a velike ponude, stoga mnoga vozila imaju dodatni trošak TCO-a zamjene baterije, ali ne pohranjuju dovoljno energije da bi se takav trošak opravdao. Pružanje usluga pohrane energije

u baterijama EV-a je održiv poslovni model jer su cijene pohrane konkurentne drugim tehnologijama pa operater distribucijskog sustava može ponuditi otkupnu cijenu energije koja je tržišno konkurentna, a pokriva povećanje TCO zbog brže zamjene baterije vlasnicima EV-a. Usporedbom cijena pohrane za punjenje na mreži s cijenama malih kućnih baterija koje se koriste za, primjerice, pohranu viška energije iz PV-a instaliranih na krovu kuće vidljivo je da se baterije električnih vozila mogu koristiti za pohranu energije i na mikro razini: cijena pohrane energije za male kućne baterije je od 415 do 602 €/MWh [100], stoga su cijene pohrane u baterije električnih vozila u svim razmatranim scenarijima konkurentne kućnim baterijama.

7. ZAKLJUČAK

Borba s klimatskim promjenama danas je u rukama vlada i država te ovisi o njihovoj volji da poštuju postojeće sporazume o borbi s klimatskim promjenama i sklapaju nove. Zadatak inženjera je da im daju potrebne tehnologije i alate te izrade analize koje ih vode i pomažu im u procesu kreiranja politika. Kako promet čini četvrtinu svjetskih emisija ugljikovog dioksida, plina odgovornog za globalno zagrijavanje koji katalizira klimatske promjene, dekarbonizacija prometa ostaje jedan od ključnih izazova pri prelasku na niskougljično i bezugljično gospodarstvo. U tom području dosad je postignut najmanji napredak kada se prometni sektor usporedi sa zgradarstvom, industrijom i proizvodnjom električne energije. Na tragu toga ova tehno-ekonomska analiza nastoji ustvrditi pod kojim uvjetima su pogonski sklopovi na alternativna goriva (električnu energiju i vodik) konkurentni tradicionalnim pogonskim sklopovima na fosilna goriva. Pogonski sklopovi na alternativna goriva u ovom radu odnose se na baterijska električna vozila te vozila na vodikove gorivne članke. Ostale tehnologije (poput plug-in hibrida i vozila s gorivnim člancima za produljenje dometa) su prijelazne i kao takve imaju manji udio na tržištu i sve manje prostora za implementaciju. Na početku je dan pregled literature o tehnologijama i infrastrukturi vezanoj uz električna vozila i vozila na vodik te koncepti spoja tih vozila i elektroenergetskog sustava. Ustvrđeno je da primjena alternativnih goriva ima smisla samo ako se ta alternativna goriva proizvode na obnovljiv i niskougljični način: električna energija iz obnovljivih izvora energije (ili barem iz postojećih plinskih i nuklearnih elektrana), a vodik elektrolizatorima pogonjenim čistom električnom energijom i parnim reformiranjem biomase i bioplina. Analizom dostupne literature izrađene su i projekcije cijena goriva i cijene i učinkovitosti tehnologija energetske pretvorbe koje sudjeluju u formiranju ukupnih troškova posjedovanja vozila s različitim pogonskim sklopovima. Tehno-ekonomska analiza provodila se metodom ukupnih troškova posjedovanja, tj. metodom sadašnje vrijednosti koja zbraja sve troškove koje vlasnik mora izdvojiti za svoje vozilo za vrijeme njegova posjedovanja (10 godina) poput investicijskog troška, poreza, davanja državi, troškova za gorivo i održavanje, troškova za izgradnju popratne infrastrukture te odbijanjem državnih subvencija. Budući troškovi svode se metodom diskontiranih novčanih tokova na sadašnje. Vozila koja se promatraju su podijeljena u dvije kategorije po veličini (B i C kategoriju). U B kategoriju spadaju Renault Clio kao vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem i Renault Zoe koji je električno vozilo. U C kategoriji nalaze se Škoda Octavia (vozilo s MSUI), Nissan Leaf (EV) i Toyota Mirai (vozilo na vodik) koji trenutno nije u ponudi u Hrvatskoj. Vozila s MSUI odabrana su kao najprodavaniji modeli u svojim kategorijama, dok su vozila na

alternativni pogon odabrana da imaju slične dimenzije i vozne performanse. Vozila su proučavana u četiri različite prosječne godišnje kilometraže: prosječna hrvatska godišnja kilometraža (12.688 km), 17.500 km (gornja granica prosjeka), 25.000 i 35.000 km (okvirne granice unutar kojih se nalaze taksi i dostavna vozila). Proračun se vrši za svaku petu godinu (godina kupnje vozila) od 2020. do 2045. Provedenom tehno-ekonomskom analizom ustvrđeno je da za prosječnu hrvatsku kilometražu električna vozila postižu troškovni paritet ako se kupe prije 2025. godine jer je za tada planirano ukidanje državnih subvencija za električna vozila. Na idućoj godišnjoj kilometraži (17.500) EV C kategorije (Nissan Leaf) praktički dostiže paritet ukupnih troškova posjedovanja vozila s MSUI 2035. godine, dok je u B kategoriji i dalje najisplativije vozilo s MSUI. U oba ova slučaja vozilo na vodik ima najviši TCO. Na 25.000 km vozilo na vodik nakon 2030. ima niže ukupne troškove posjedovanja od vozila s MSUI, a isto vrijedi i za električna vozila u bilo kojem trenutku kupnje. Na 35.000 godišnje prijeđenih kilometara vozilo na vodik C kategorije nakon 2025. postiže troškovni paritet vozilu s MSUI i približava se TCO-u električnog vozila iste kategorije. Izražena je analiza osjetljivosti promjenom različitih parametara (cijena benzina, električne energije i vodika mijenjala se i do ±30%, dok je diskontna stopa rasla na 5 i 7%). Analizom osjetljivosti ustvrđeni su trendovi koji vrijede za sve slučajeve. Vozila s MSUI osjetljivija su na promjene cijena goriva jer njihovi operativni troškovi (kojima dominira upravo cijena goriva) čine veći udio u ukupnim troškovima posjedovanja od vozila na alternativna goriva; vozila na alternativna goriva zbog viših kapitalnih i nižih operativnih troškova nisu toliko osjetljiva na promjene cijena energije, a porast diskontne stope najviše smanjuje TCO vozila s MSUI jer je manji utjecaj viših operativnih troškova u odnosu na vozila na alternativni pogon. Analizom osjetljivosti je i utvrđeno da vozila na vodik ni na 35.000 km s 30% nižom cijenom vodika ne dostignu električna vozila iako im troškovi konvergiraju, što dovodi do zaključka da su vozila na vodik najprikladnija za visoke godišnje kilometraže (više od 50.000 km) kakve prevaljuju autobusi i kamioni. Na kraju su predloženi poslovni modeli kojima vlasnici vozila na alternativna goriva mogu sudjelovati u radu elektroenergetskog sustava. Vlasnici električnih vozila imaju veće mogućnosti jer mogu imati dvosmjeran tok energije (punjenje na mreži) između vozila i mreže, pa tako oni mogu sudjelovati u prebacivanju potrošnje (*load shifting*), izravnavanju opterećenja (*load leveling*) ali i smanjenju vršnog opterećenja otpuštanjem električne energije u mrežu (*peak shaving*) te pružanjem pomoćnih usluga mreži kao primarna i sekundarna rezerva. Vozila na vodik imaju manje mogućnosti, pa mogu sudjelovati samo u smanjenju vršnog opterećenja otpuštanjem električne energije proizvedene gorivnim člancima u mrežu kada su priključena na nju. Ipak, vozila na vodik imaju primjenu i u mikromrežama za pokrivanje potreba za

električnom energijom privatne kuće kada je visoka cijena električne energije a produkcija iz OIE kuće (fotovoltaici) niska ili nepostojeća. Izrađena je i analiza utjecaja punjenja električnih vozila na mreži na trajnost baterije korištenjem RESFLEX modela Hrvatske i ulaznih podataka iz rada u EnergyPLAN programskom paketu. Utvrđeno je da primjena punjenja na mreži dovodi do povećanja broja ciklusa baterije za vrijeme posjedovanja vozila od 31 do 103%, ponajviše u ovisnosti o količini vozila spojenih na mrežu, a to posljedično povećava ukupne troškove posjedovanja takvih vozila. Kako bi se ti troškovi otklonili nužno je stvoriti poslovne modele koji omogućuju vlasnicima da imaju manje TCO zbog punjenja na mreži – smanjenje cijena električne energije za punjenje EV, mjerenje i otkup energije otpuštene u mrežu ili poticaje za nabavku vozila i opreme za punjenje na mreži. Uspoređene su cijene pohrane energije u scenarijima za 2030., 2040. i 2050. godinu i ustvrđeno je da u sustavima u kojima je potrebna relativno veća pohrana energije u baterijama na godišnjoj razini (sustavi s malo EV-a ili velikim potrebama pohrane) takva pohrana energije je cjenovno konkurentna drugim tehnologijama – cijena pohrane u baterijama EV-a u takvim sustavima je od 91 do 187,6 €/MWh što je konkurentno trenutnim cijenama. Jedina iznimka je sustav gdje postoji značajan broj električnih vozila, ali potreba za pohranom energije je manja pa cijena pohrane energije ostaje visoka – 421,1 €/MWh.

I električna vozila i vozila na vodik konkurentna su vozilima s MSUI, ali zahtijevaju veće kapitalne investicije iako dugoročno donose veću korist zbog nižih ukupnih troškova posjedovanja, ali i dekarbonizacije prometnog sektora. Problem vozila s gorivnim člancima je trenutno visoka cijena gorivnih članaka i pratećih dijelova pogonskog sklopa kao i gotovo nepostojeća infrastruktura za vodik. Implementacija električnih vozila ima više uspjeha, a sve više i više proizvođača vozila na konvencionalni pogon okreće se električnim vozilima. Ipak, u slučaju pojeftinjenja cijena pogonskog sklopa na vodik moguće su upotrebe vodika u sektorima koje je teško elektrificirati (letjelice i plovila) ili primjena vodika kao goriva za autobuse ili kamione. Isplativost električnih vozila za veće kilometraže već od 2020. i 2025. (kada se ukidaju poticaji) dovodi do zaključka da bi se regulativom trebalo poticati elektrifikaciju područja gdje su te kilometraže učestale – taksi prijevoza, malih dostavnih vozila, flota službenih vozila tvrtka, rent-a-car tvrtki i sl. Takav pristup olakšao bi stvaranje percepcije o „zelenim“ te ekološki, ali i ekonomski prihvatljivim vozilima na alternativna goriva te dovesti do prijeko potrebne masovne dekarbonizacije prometnog sektora voljom krajnjih potrošača.

LITERATURA

[1] Međuvladin panel o klimatskim promjenama (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Cambridge: Cambridge University Press.

[2] Međuvladin panel o klimatskim promjenama (2015) *Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C*. Cambridge: Cambridge University Press.

[3] *The Paris Agreement* (2019) UN Climate Change. New York: United Nations. Dostupno na: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement (zadnji posjet: 14. listopada 2019.)

[4] Europska komisija (2019) *Clean Energy for All Europeans.* Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[5] Europska komisija (2018) *Čist planet za sve: Europska strateška dugoročna vizija za prosperitetno, moderno, konkurentno i klimatski neutralno gospodarstvo.* Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[6] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike RH (2019) *Croatian greenhouse gas inventory for the period 1990 – 2017 (National Inventory Report 2019)*. Zagreb: Ekonerg.

[7] *IEA World Energy Balances 2019* (2019) Međunarodna energetska agencija. Dostupno na: https://www.iea.org/statistics/ (zadnji posjet: 1. listopada 2019.)

[8] Eurostat (2019) *Greenhouse gas emission statistics – emission inventories*. Luxembourg: Eurostat.

[9] Hoekstra, A. (2019) *The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions*. U: Earis, P., ur. *Joule 3*. Cambridge (SAD): CellPress, str. 1404-1414.

[10] Gurz et al. (2017) *The meeting of hydrogen and automotive: A review*. U: Veziroglu, T. N., ur. *International Journal of Hydrogen Enerty*. Amsterdam: Elsevier, str. 1 – 13.

[11] Europska komisija (2011) *Bijela knjiga o prometu*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[12] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike RH (2019) *Nacrt prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu*. Zagreb: MZOE.

[13] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike RH (2018) *Prvi Nacrt Integriranog energetskog i klimatskog paketa za razdoblje od 2021. do 2030. godine*. Zagreb: MZOE.

[14] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike RH (2017) *Četvrti nacionalni akcijski plan energetske učinkovitosti za razdoblje 2017. – 2019.* Zagreb: MZOE.

[15] Engelund Thomsen, K. (2016) *Cost optimum methodology within the EPBD*. Aalborg: Aalborg University.

[16] *Cost of Car Ownership* (2019) Edmunds. Dostupno na: https://www.edmunds.com/tco.html (zadnji posjet: 6. listopada 2019.)

[17] Hausfather, Z. (2019) *Factcheck: How electric vehicles help to tackle climate change*. London: CarbonBrief. Dostupno na: https://www.carbonbrief.org/factcheck-how-electric-vehicles-help-to-tackle-climate-change (zadnji posjet: 3. listopada 2019.)

[18] The International Council on Clean Transportation (2018.) *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions.* ICCT.

[19] Whitehead, J. (2019) *Clean, green machines: the truth about electric vehicle emissions*. London: The Conversation. Dostupno na: http://theconversation.com/clean-green-machines-the-truth-about-electric-vehicle-emissions-122619 (zadnji posjet: 3. listopada 2019.)

[20] *How Clean is Your Electric Vehicle?* (2019) Union of Concerned Scientists. Dostupno na: https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/ev-emissions-tool (zadnji posjet 4. listopada 2019.)

[21] Palmer, K. et al. (2018) *Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan*. U: Yan, J., ur. *Applied Energy vol. 209*. Amsterdam: Elsevier, str. 108 – 119.

[22] Wu, G.; Inderbitzin, A.; Bening, C. (2015) *Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments*. Zürich: ETH Zürich.

[23] van Velzen, A. et al. (2019) *Proposing a more comprehensive future total cost of ownership estimation framework for electric vehicles*. U: Brown, S. P. A., ur. *Energy Policy 219.* Amsterdam: Elsevier, str. 1034 – 1046.

[24] Moon, S. i Lee, D. (2019) *An optimal electric vehicle investment model for consumers using total cost of ownership: A real option approach*. U: Yan, J., ur. *Applied Energy vol. 253*. Amsterdam: Elsevier.

[25] Tseng, H.; Wu, J., Liu, X. (2013) *Affordability of electric vehicles for a sustainable transport system: An economic and environmental analysis*. U: Brown, S. P. A., ur. *Energy Policy 61*. Amsterdam: Elsevier, str. 441 – 447.

[26] Gaton, B. (2018) *Why are EVs more expensive? Is it really just the battery costs?* Mullumbimby: The Driven. Dostupno na: https://thedriven.io/2018/11/30/ev-price-tipping-point-automakers/ (zandji posjet: 5. listopada 2019.)

[27] Goldie-Scot, L. (2019) *A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices*. New York: BloombergNEF. Dostupno na: https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/ (zadnji posjet: 10. listopada 2019.)

[28] Joint Research Centre Institute for Energy and Transport (2014.) *Energy Technology Reference Indicator projections for 2010 – 2050*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[29] Fraunhofer ISE (2018) *Levelized cost of electricity: Renewable Energy Technologies*. Freiburg: Fraunhofer.

[30] Europska komisija (2014) *Subisidies and costs of EU energy: Final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[31] Navas-Anguita, Z.; García-Gusano, D.; Iribarren, D. (2019.) *A review of techno-economic data for road transportation fuels*. U: Foley, A. M., ur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 112*. Amsterdam: Elsevier, str. 11 – 26.

[32] Lončar, D. (2017) *Vođenje energetskih sustava: Uvod*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.

[33] *Model 3* (2019) Palo Alto: Tesla. Dostupno na: https://www.tesla.com/model3 (zadnji posjet: 13. listopada 2019.)

[34] *Electricity price statistics* (2019) Luxembourg: Eurostat. Dostupno na: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_household_consumers (zadnji posjet: 13. listopada 2019.)

[35] *Kalkulator za izračun naknada* (2019) Hrvatski autoklub. Dostupno na: https://www.hak.hr/vozila/tehnicki-pregledi/kalkulator/ (zadnji posjet: 6. listopada 2019.)

[36] *Posebni porez na motorna vozila* (2019) Zagreb: Carinska uprava. Dostupno na: https://carina.gov.hr/pristup-informacijama/propisi-i-sporazumi/trosarinsko-postupanje/trosarinsko-oporezivanje-opce-informacije/posebni-porez-na-motorna-vozila-3714/3714 (zadnji posjet: 6. listopada 2019.)

[37] Botsford, C. i Szczepanek, A. (2009) *Fast Charging vs. Slow Charging: Pros and cons for the New Age of Electric Vehicles*. Washington: World Electric Vehicle Association.

[38] *The Different EV Charging Connector Types* (2019) Boston: Enel X. Dostupno na: https://evcharging.enelx.com/eu/about/news/blog/552-ev-charging-connector-types (zadnji pristup: 7. listopada 2019.)

[39] *Metron Shop* (2019) Lešće: Institute Metron. Dostupno na: https://eauto.si/metron-shop/ (zadnji pristup: 7. listopada 2019.)

[40] *Guide to EV charging* (2018) Bristol: Zap Map. Dostupno na: https://www.zap-map.com/charge-points/ (zadnji posjet: 7. listopada 2019.)

[41] *Tesla Superchargers in Croatia* (2019) Palo Alto: Tesla. Dostupno na: https://www.tesla.com/findus/list/superchargers/Croatia (zadnji posjet: 14. listopada 2019.)

[42] *Otvorena prva punionica za električna vozila u Otočcu* (2017) Zagreb: Direktno. Dostupno na: https://direktno.hr/razvoj/otvorena-prva-punionica-za-elektricna-vozila-u-otoccu-92297/ (zadnji posjet: 7. listopada 2019.)

[43] Žabec, K. (2019) *Kraj jedne ere: Do kraja godine sve električne punionice naplaćivat će punjenje automobila*. Zagreb: Jutarnji list. Dostupno na: https://novac.jutarnji.hr/aktualno/kraj-jedne-ere-do-kraja-godine-sve-elektricne-punionice-naplacivat-ce-punjenje-automobila/8827031/ (zadnji pristup: 8. listopada 2019.)

[44] *Benzinske postaje: Novi vjetrovi su zapuhali*. Zagreb: Ja Trgovac. Dostupno na: https://www.jatrgovac.com/2016/07/benzinske-postaje-novi-vjetrovi-su-zapuhali/ (zadnji pristup: 8. listopada 2019.)

[45] International Energy Agency (2018) *Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification*. Pariz: IEA.

[46] Agenbroad, J. i Holland, B. (2014) *RMI: What's the true cost of EV charging stations?* Oakland: Greenbiz. Dostupno na: https://www.greenbiz.com/blog/2014/05/07/rmi-whats-true-cost-ev-charging-stations (zadnji pristup: 22. listopada 2019.)

[47] Salameh, Z. (2014) *Renewable Energy System Design*. Amsterdam: Elsevier.

[48] *Protonic solid oxide fuel cell* (2012.) Wikipedia. Dostupno na: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solid_oxide_fuel_cell_protonic.svg (zadnji pristup: 8. listopada 2019.)

[49] Ruffini, E. i Wei, M. (2018) *Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach*. U: Lund, H., ur. *Energy 150.* Amsterdam: Elsevier, str. 329 – 341.

[50] Međuvladin panel o klimatskim promjenama (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of the Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press.

[51] Parkinson, N. (2019) *UK's first hydrogen train set for mainline railway testing*. Truro: Gasworld. Dostupno na: https://www.gasworld.com/uks-first-hydrogen-train-set-for-testing/2017393.article (zadnji posjet: 9. listopada 2019.)

[52] hySOLUTIONS (2007) *One hundred passengers and zero emissions: The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells*. Hamburg: hySOLUTIONS.

[53] *About Hydrogenesis* (2010) Bristol: Bristol Hydrogen Boats. Dostupno na: http://www.bristolhydrogenboats.co.uk/about.html (zadnji posjet: 9. listopada 2019.)

[54] Roblin, S. (2017.) *Why Germany's New Super Stealth Submarines Could Take on Any Navy*. Washington: The National Interest. Dostupno na: https://nationalinterest.org/blog/the-buzz/why-germanys-new-super-stealth-submarines-could-take-any-21021 (zadnji posjet: 9. listopada 2019.)

[55] *Toyota Mirai* (2019) Toyota: Toyota Europe. Dostupno na: https://www.toyota-europe.com/new-cars/mirai/ (zadnji posjet 9. listopada 2019.)

[56] *Coradia iLint* (2018) Saint-Ouen-sur-Seine: Alstom. Dostupno na: https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train (zadnji posjet: 9. listopada 2019.)

[57] *Hydrogen-Helium Abundance* (1998) Atlanta: Georgia State University. Dostupno na: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/hydhel.html (zadnji posjet: 9. listopada 2019.)

[58] *Hydrogen Production: Natural Gas Reforming*. (2019) Washington: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Dostupno na: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming (zadnji posjet: 9. listopada 2019.)

[59] Hussain, M. M. i Dincer, I. (2010) *Electric and Hybrid Vehicles: Chapter eleven – Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell and Gasoline Vehicles*. Amsterdam: Elsevier.

[60] Le Duigou, A. i Smatti, A. (2014) *On the comparison and complementarity of batteries and fuel cells for electric driving.* U: Veziroglu, T. N., ur. *International Journal of Hydrogen Enerty 39*. Amsterdam: Elsevier, str. 117873 – 17883.

[61] Offer, G. J. et al. (2010) *Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system*. U: Brown, S. P. A., ur. *Energy Policy 38*. Amsterdam: Elsevier, str. 24 – 29.

[62] Creti, A. et al. (2015) *A cost benefit analysis of fuel cell electric vehicles*. Pariz: École Polytechnique Université Paris-Saclay.

[63] Delucchi, M. A. i Lipman, T. E. (2010) *Electric and Hybrid Vehicles: Chapter two Lifetime Cost of Battery, Fuel-Cell, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. Amsterdam: Elsevier.

[64] Europska komisija (2019) *Weekly Oil Bulletin*. Luxembourg: EC. Dostupno na: https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/weekly-oil-bulletin (zadnji posjet: 13. listopada 2019.)

[65] Fuel Cells Technologies Office, U. S. Department of Energy (2015) *Fuel Cells*. Washington: Department of Energy.

[66] *Hrvatska dobila prvu punionicu vodika*. Zagreb: Energetika-net. Dostupno na: http://www.energetika-net.com/vijesti/obnovljivi-izvori-energije/hrvatska-dobila-prvu-punionicu-vodika-28646 (zadnji posjet: 13. listopada 2019.)

[67] *Germany now has 32 hydrogen stations*. Bedford: erpecnews. Dostupno na: http://www.erpecnewslive.com/article/1287/germany-now-has-32-hydrogen-stations (zadnji posjet: 13. listopada 2019.)

[68] Pyc, I. (2013) VDE-Studie: Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020. Frankfurt na Majni: VDE e. V.

[69] *RHE Velebit* (2016.) Zagreb: HEP Proizvodnja. Dostupno na: http://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/rhe-velebit/1546 (zadnji posjet: 17. listopada 2019.)

[70] Timbus, A. (2018) *Controlling grids with renewables and energy storage*. Zürich: ABB.

[71] Barter, P. (2013) *„Cars are parked 95% of the time". Let's check!* Singapur: Reinventing Parking. Dostupno na: https://www.reinventingparking.org/2013/02/cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html (zadnji posjet: 22. listopada 2019.)

[72] Motavalli, J. (2016) *SimpleFuel Demonstrates its Affordable Hydrogen Filler – the Finalist for a $1 Million Prize*. Norwalk: FuelCellCars.com. Dostupno na: http://www.fuelcellcars.com/simplefuel-demonstrates-its-affordable-hydrogen-filler-the-finalist-for-a-1-million-prize/ (zadnji posjet: 21. studenog 2019.)

[73] Monica Odo (2017) *Smart Grid concept*. New York: Shutterstock. Dostupno na: https://www.shutterstock.com/image-vector/smart-grid-concept-different-power-generation-492306295?src=qbX8bb1m_gdi6_2so4IiYQ-1-74 (zadnji posjet: 17. listopada 2019.)

[74] Briones, A. et al. (2012) *Vehicle-to-Grid (V2G) Power Flow*. Idaho Falls: Idaho National Laboratory.

[75] *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries*. Richmond: Cadex. Dostupno na: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries (zadnji posjet: 19. listopada 2019.)

[76] Medora, N. K. (2017) *Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Smart Grids*. U: D'Andrade, B. W., ur., *The Power Grid*. Cambridge (SAD): Academic Press, str. 197 – 230.

[77] Saldaña, G. et al. (2019) *Electric Vehicle into the Grid: Charging Methodologies Aimed at Providing Ancillary Services Considering Battery Degradation*. U: Sciubba, E., ur., *Energy 12 – Issue 12*. Basel: MDPI, str. 2443 – 2480.

[78] Oldenbroek et al. (2018) *Fuel Cell Electric Vehicle-to-Grid: Experimental Feasibility and Operational Performance as Balancing Power Plant.* U: Stimming, U., ur., *Fuel Cells: From Fundamentals to Systems – Issue 5/2018*. Weinheim: Wiley-VCH.

[79] Robledo, C. B. et al. (2018) *Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and residential building*. U: Yan, J., ur. *Applied Energy vol. 215*. Amsterdam: Elsevier, str. 615 – 629.

[80] Joint Research Centre (2018) *Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[81] National Renewable Energy Laboratory (2019) *Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage*. Gloden: National Renewable Energy Laboratory.

[82] Hydrogen Europe (2018) *Technology Roadmaps – Full pack.* Brisel: Hydrogen Europe. Dostupno na: https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/2018-10/Public_HE%20Tech%20Roadmaps_full%20pack_0.pdf (zadnji posjet: 31. listopada 2019.)

[83] Eurostat (2019) *Electricity price statistics*. Luksemburg: Eurostat. Dostupno na: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics (zadnji posjet: 3. studenog 2019.)

[84] Europska komisija (2013) *EU Energy, transport and GHG emissions: Trends to 2050*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[85] *Informativni kalkulator za izračun PPMV-a* (2019) Zagreb: Carinska uprava. Dostupno na: https://carina.gov.hr/pristup-informacijama/propisi-i-sporazumi/trosarinsko-postupanje/dodatne-informacije-o-trosarinama-i-posebnim-porezima/posebni-porez-na-motorna-vozila-3650/informativni-kalkulator-za-izracun-ppmv-a/4838 (zadnji posjet: 6. studenog 2019.)

[86] *Poticanje energetske učinkovitosti u prometu* (2019) Zagreb: Fond za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost. Dostupno na: http://www.fzoeu.hr/hr/energetska_ucinkovitost/poticanje_energetske_ucinkovitosti_u_prometu/sufinanciranje_nabave_energetski_ucinkovitijih_vozila/ (zadnji posjet: 6. studenog 2019.)

[87] *Aktivne kamatne stope Hrvatske narodne banke* (2019) Zagreb: HNB. Dostupno na: www.hnb.hr/documents/20182/296265a5-9a82-43ea-8d6e-2d17bed45edd (zadnji posjet: 18. listopada 2019.)

[88] *Kalkulator inflacije* (2019) Zagreb: Državni zavod za statistiku. Dostupno na: https://www.dzs.hr/app/rss/stopa-inflacije.html (zadnji posjet: 20. studenog 2019.)

[89] *Prosječno godišnje prijeđeni put po kategorijama vozila za 2018.* (2019) Zagreb: Centar za vozila Hrvatske. Dostupno na: https://www.cvh.hr/media/3025/s10__prosjecno_godisnje_prijedjeni_put_povv_za_2018.pdf (zadnji posjet: 20. studenog 2019.)

[90] Milčić, M. (2019) *Ovo je 5 najprodavanijih novih automobila u Hrvatskoj*. Zagreb: Večernji list. Dostupno na: https://www.vecernji.hr/auti/ovo-je-top-5-najprodavanijih-novih-automobila-u-hrvatskoj-1319442 (zadnji posjet: 30. listopada 2019.)

[91] Barnard, T. (2019) *Do electric cars have gearboxes?* London: CarBuyer. Dostupno na: https://www.carbuyer.co.uk/tips-and-advice/169767/do-electric-cars-have-gearboxes (zadnji posjet: 16. studenog 2019.)

[92] *WACC Calculator* (2019) Pariz: WACC Expert. Dostupno na: http://www.waccexpert.com/?country=1705&sector=134&detailledView=true (zadnji posjet: 22. studenog 2019.)

[93] Roberts, D. (2016) *If you thought solar was going to hurt utilites, get a load of solar+storage.* Washington, DC: Vox. Dostupno na: https://www.vox.com/2016/2/5/10919082/solar-storage-economics (zadnji posjet: 21. studenog 2019.)

[94] Joint Research Centre (2007) *Distributed Power Generation in Europe: technical issues for further integration*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

[95] *5 Great EV Charging Business Models* (2019) Porvoo: Entsu. Dostupno na: https://www.ensto.com/company/newsroom/blogs/5-great-ev-charging-business-models/ (zadnji posjet: 18. studenog 2019.)

[96] *Emerging business models for the electric vehicle market* (2018) East Grinstead: Faversham House. Dostupno na: https://www.engerati.com/smart-infrastructure/emerging-business-models-for-the-electric-vehicle-market/ (zadnji posjet: 18. studenog 2019.)

[97] Miles, A. (2018) *The Secret Life Of An EV Battery*. New York: CleanTechnica. Dostupno na: https://cleantechnica.com/2018/08/26/the-secret-life-of-an-ev-battery/ (zadnji posjet: 24. studenog 2019.)

[98] *BU-1003a: Battery Aging in an Electric Vehicle (EV)* Richmond: Cadex. Dostupno na: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1003a_battery_aging_in_an_electric_vehicle_ev (zadnji posjet: 24. studenog 2019.)

[99] *EnergyPLAN Hrvatska – Analiza utjecaja tehnologija odgovora potrošnje na integraciju OIE* (2019) Energetski neovisna Hrvatska bazirana na visokom udjelu obnovljivih izvora energije te različitih tehnologija brzog odziva – RESFLEX. Dostupno na: https://het.hr/repozitorij/izvjestaj-o-utjecajima-razlicitih-tehnologija-na-integraciju-obnovljivih-izvora-u-energetski-sustav-kroz-scenarijski-pristup/energyplan-hrvatska-analiza-utjecaja-tehnologija-odgovora-potrosnje-na-integraciju-oie/ (zadnji posjet: 25. studenog 2019.)

[100] Lazard (2019) *Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis*. Hamilton: Lazard.

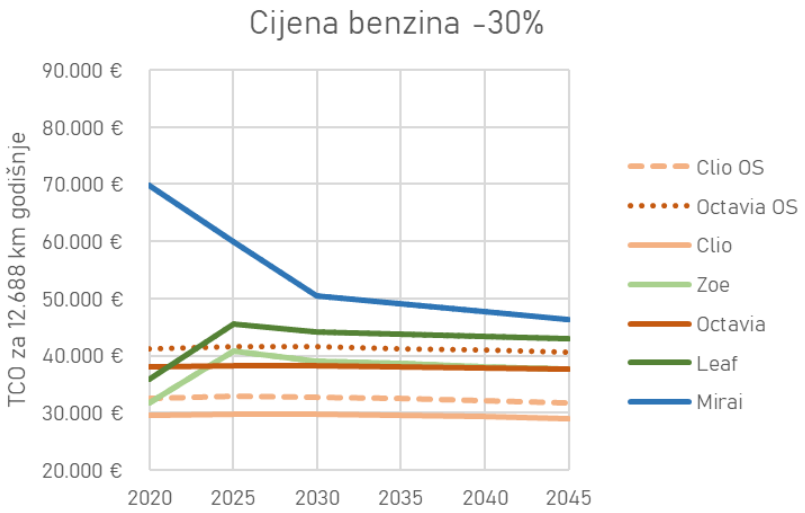
PRILOZI

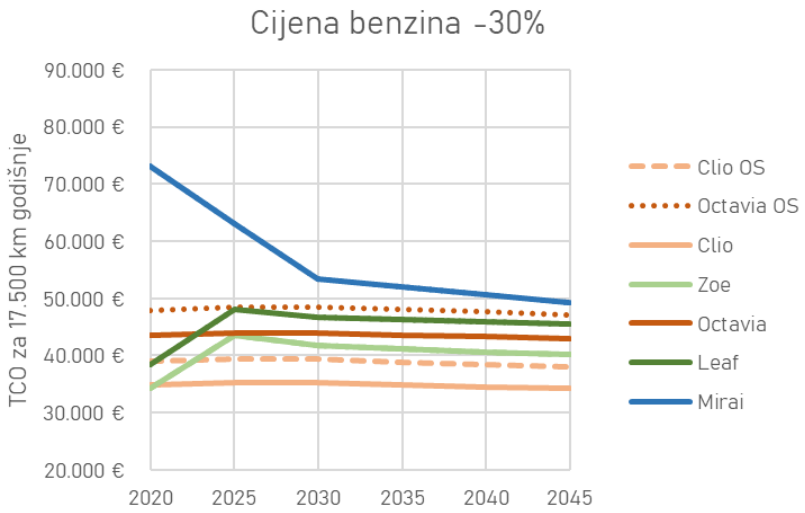
I. Analiza osjetljivosti

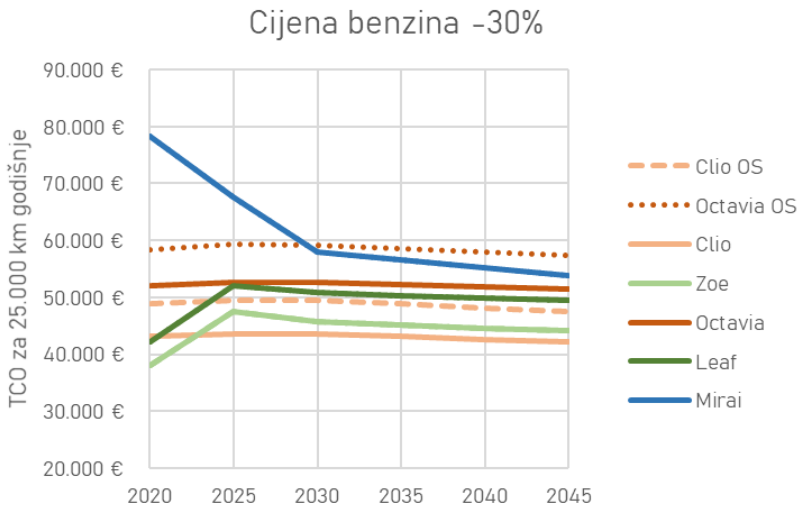
II. CD-R disk

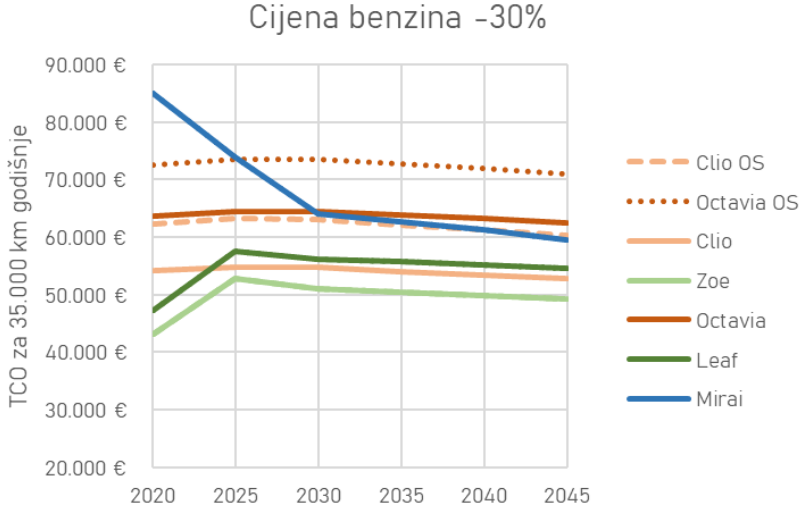
PRILOG I

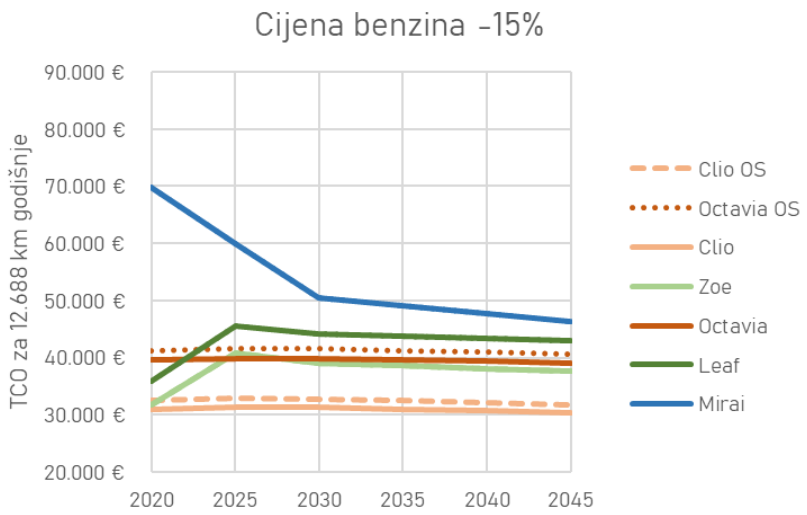
Analiza osjetljivosti

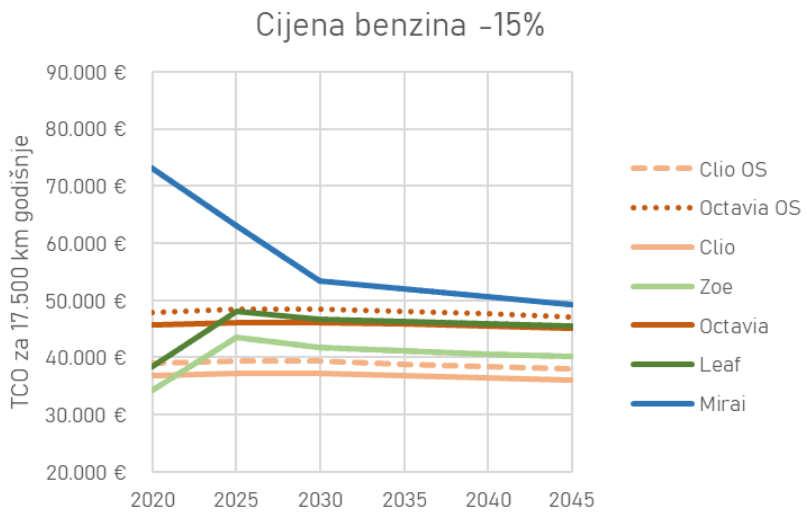

Cijena benzina -30%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

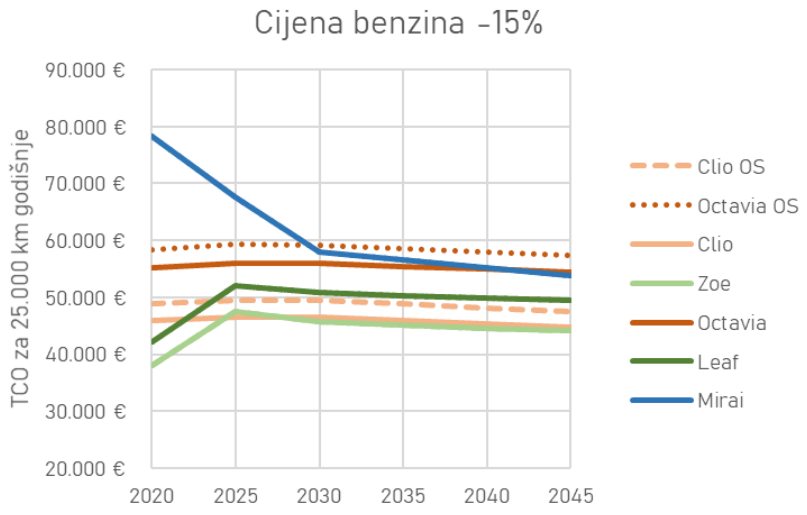

Cijena benzina -30%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

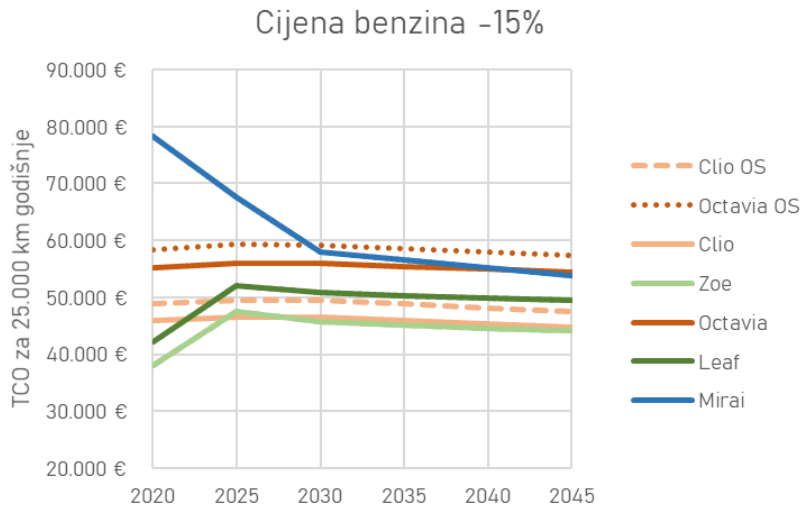

Cijena benzina -30%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

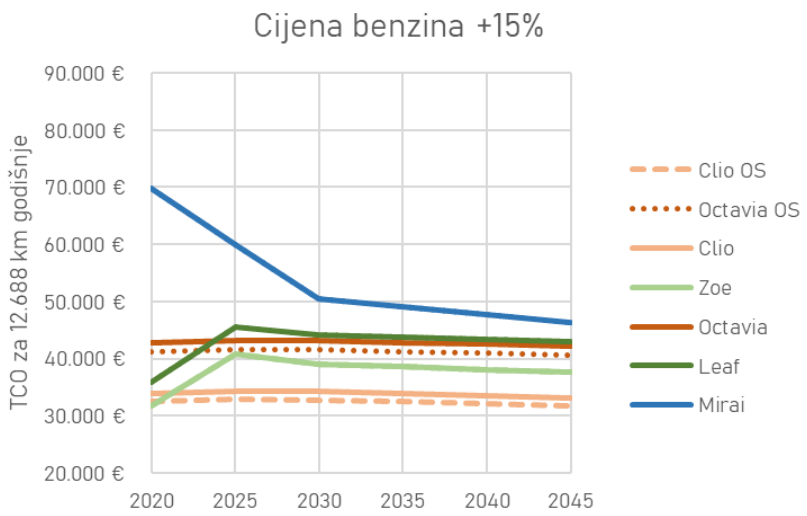

Cijena benzina -30%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

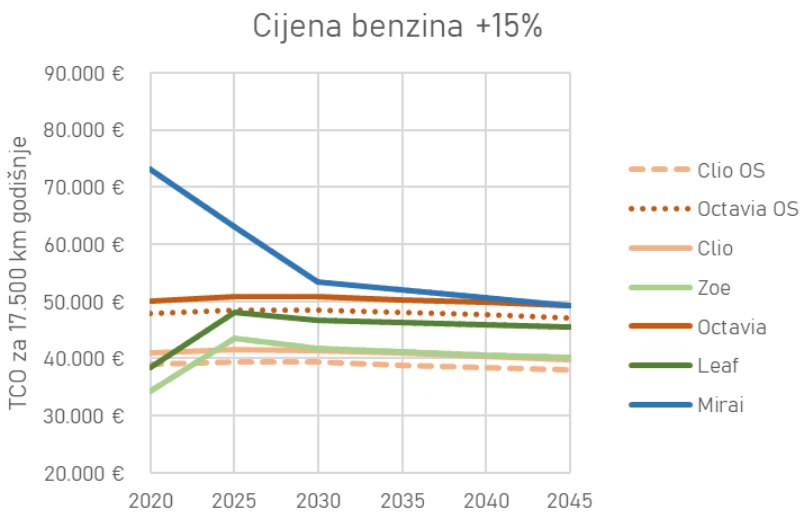

Cijena benzina -15%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

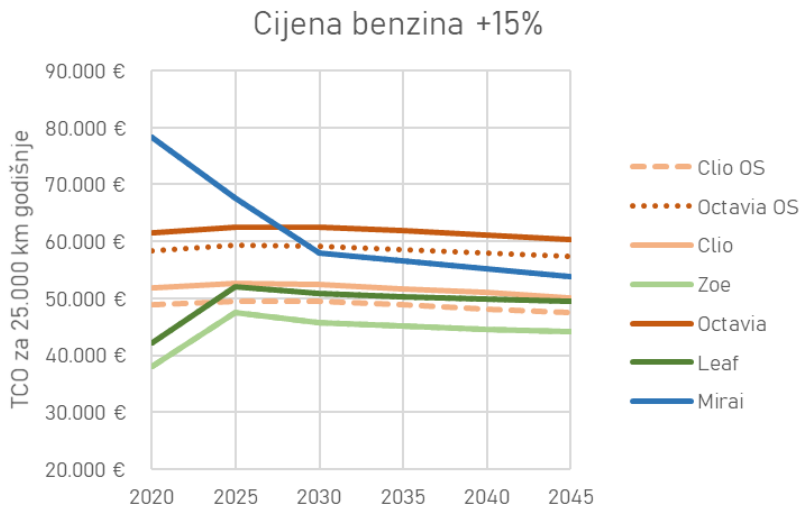

Cijena benzina -15%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

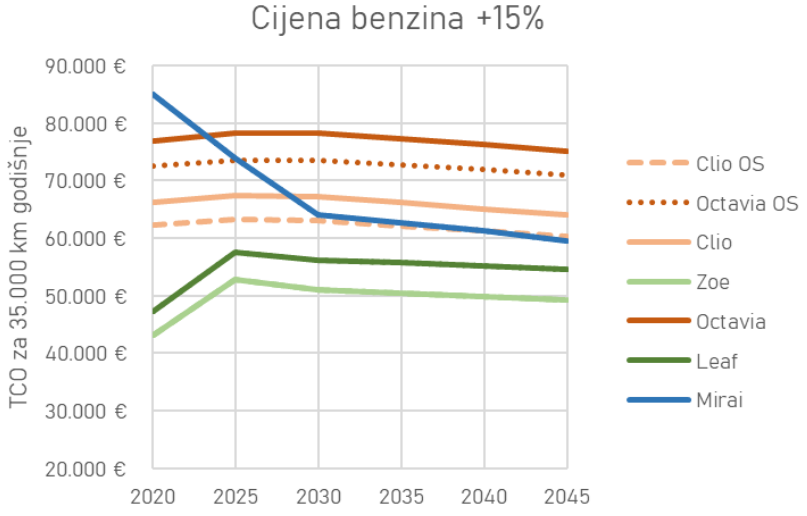

Cijena benzina -15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

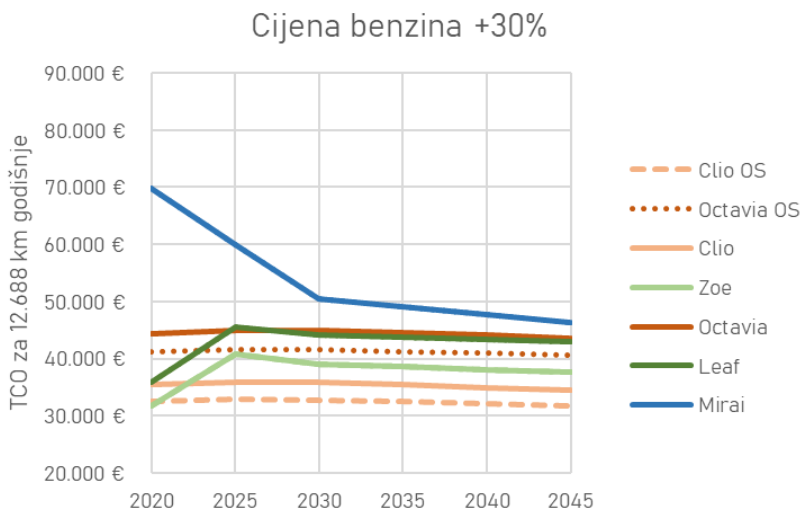

Cijena benzina -15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

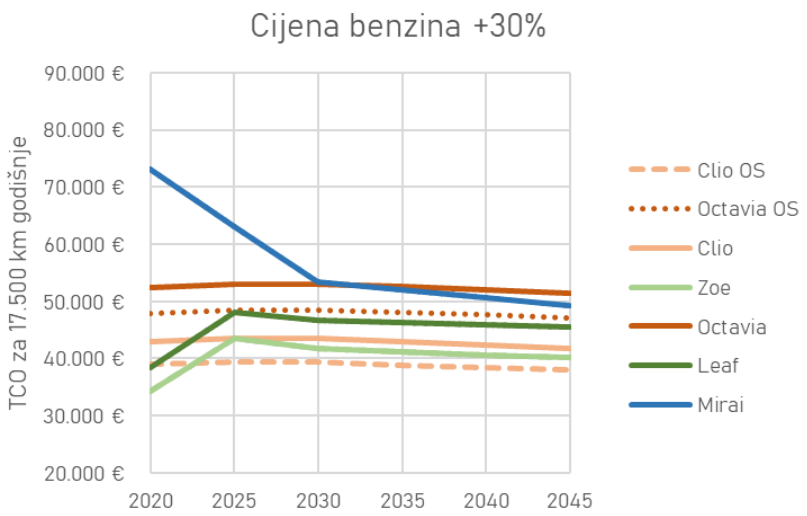

Cijena benzina +15%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

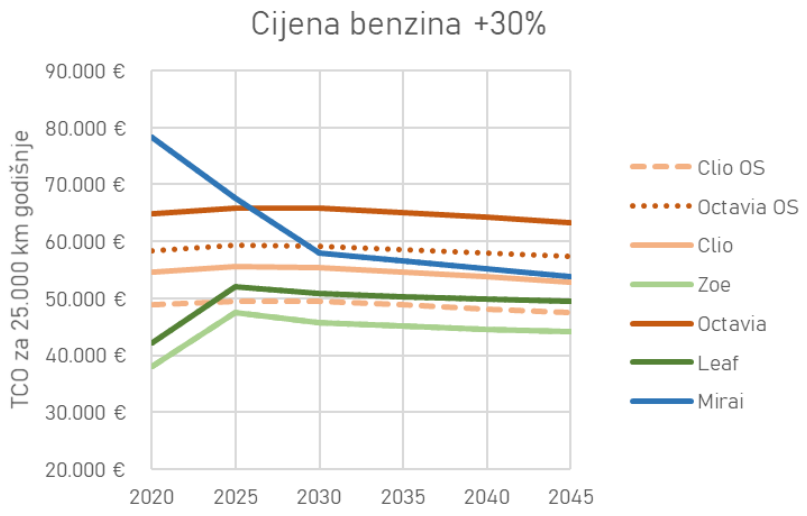

Cijena benzina +15%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

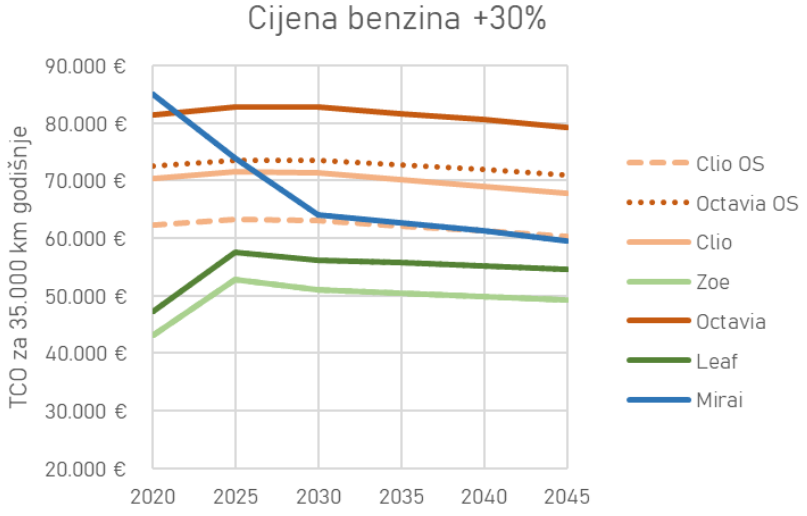

Cijena benzina +15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

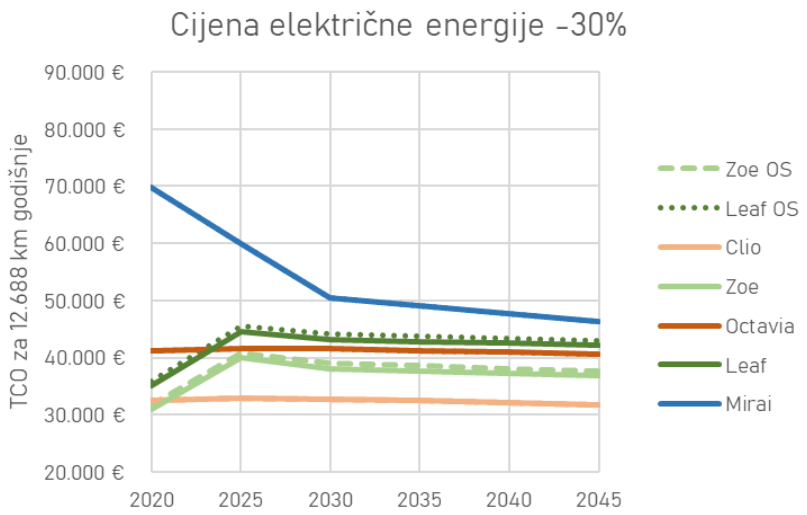

Cijena benzina +15%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

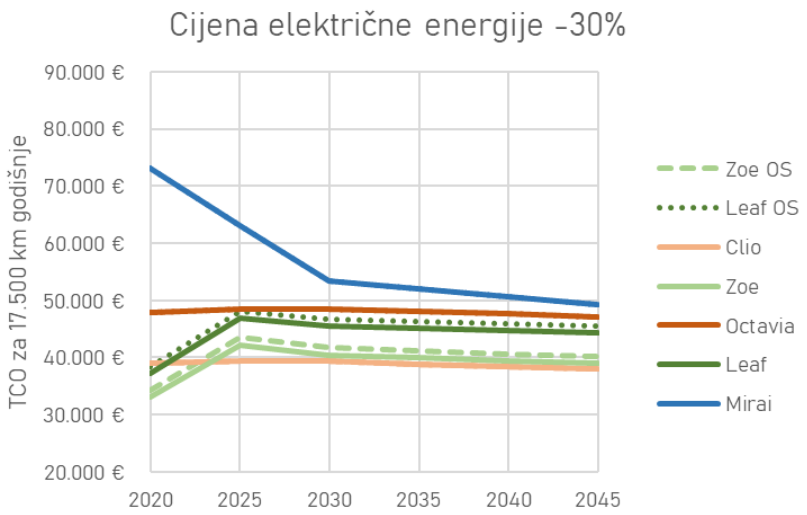

Cijena benzina +30%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

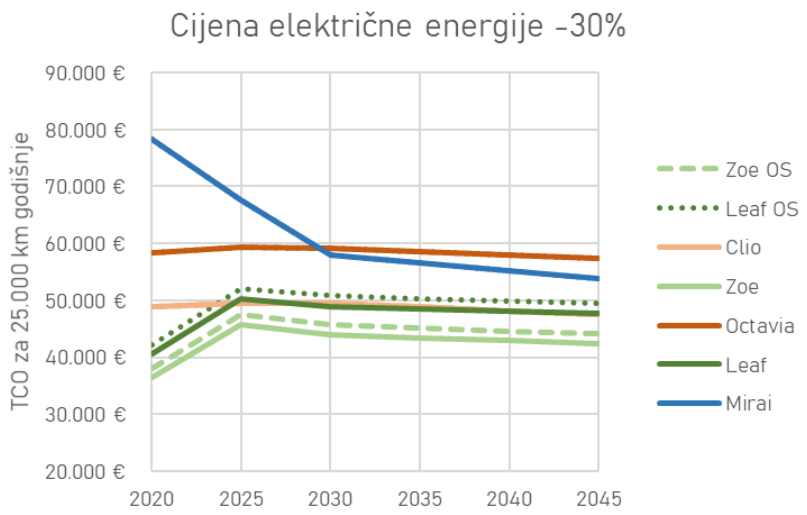

Cijena benzina +30%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

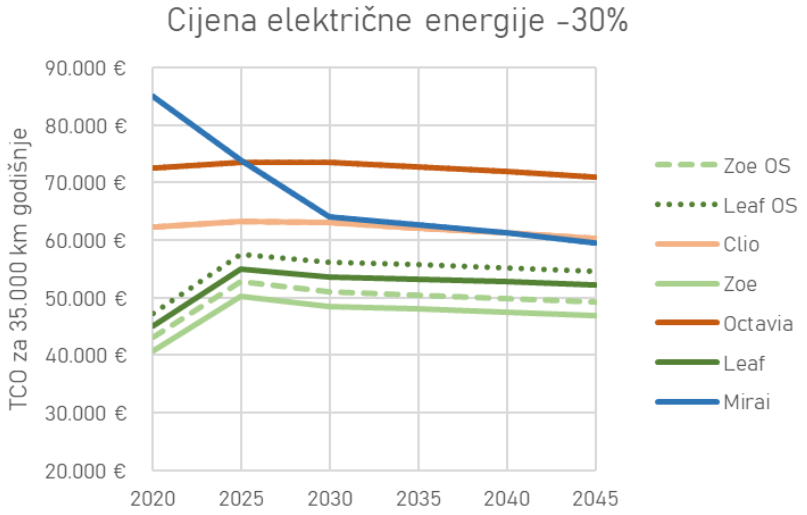

Cijena benzina +30%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

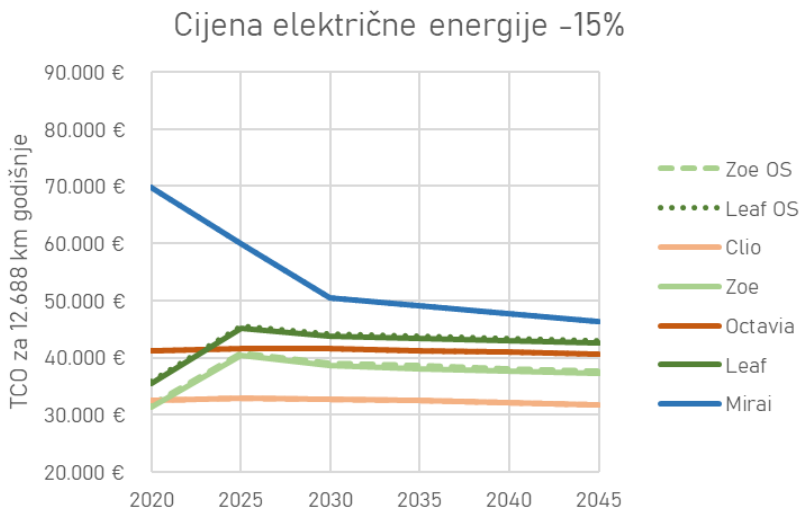

Cijena benzina +30%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Octavia OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

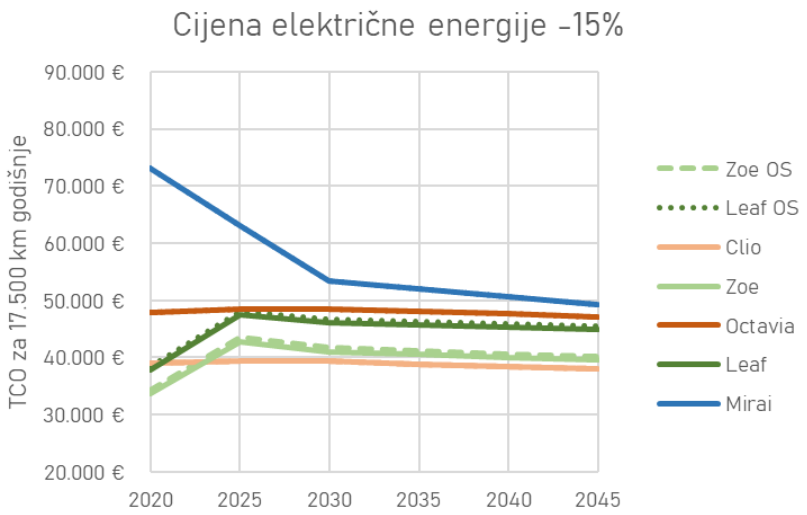

Cijena električne energije -30%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

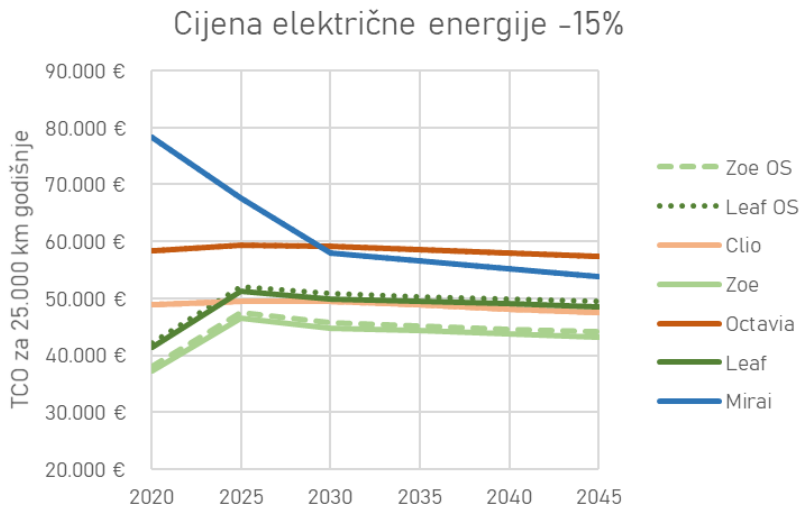

Cijena električne energije -30%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

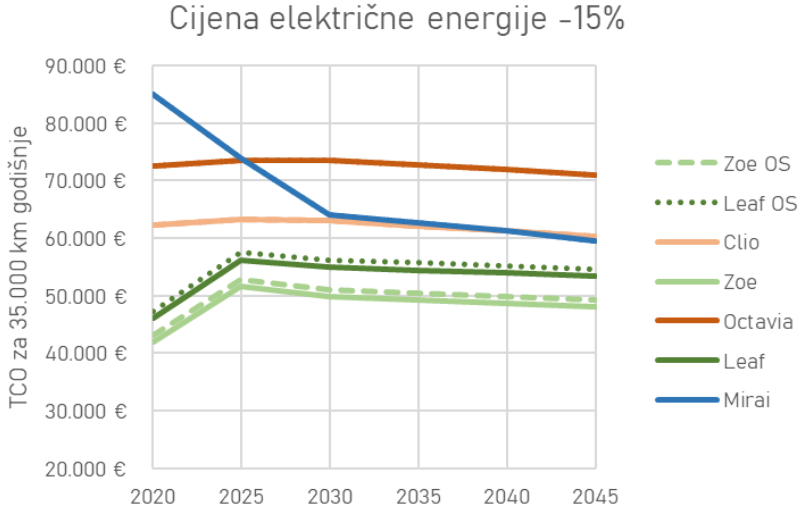

Cijena električne energije -30%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

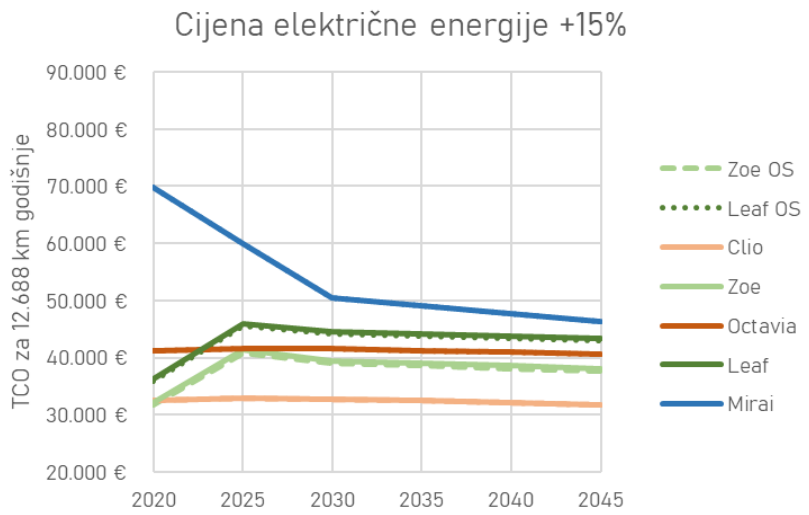

Cijena električne energije -30%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

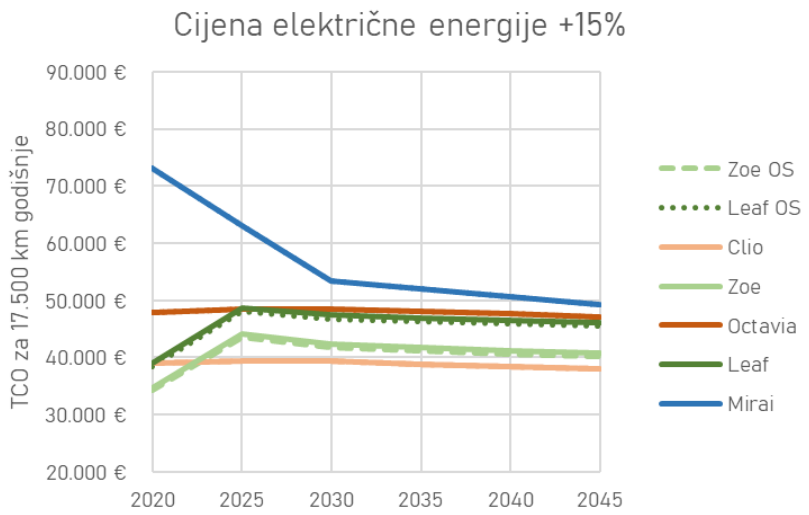

Cijena električne energije -15%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

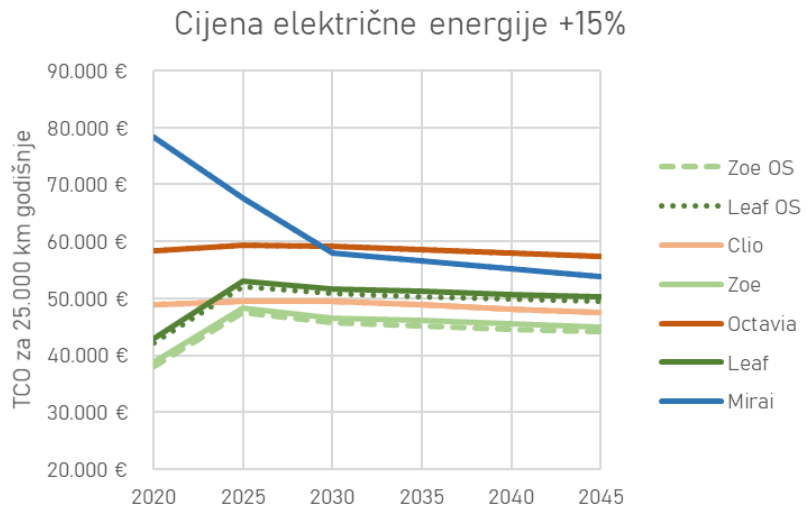

Cijena električne energije -15%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

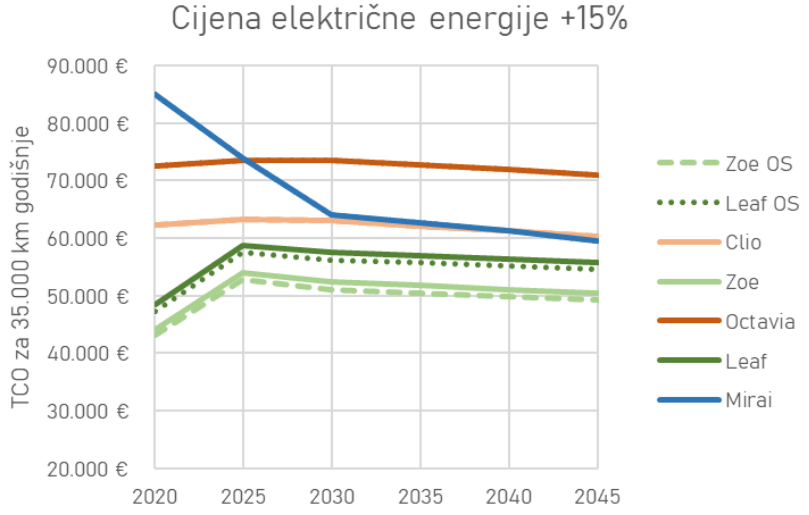

Cijena električne energije -15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

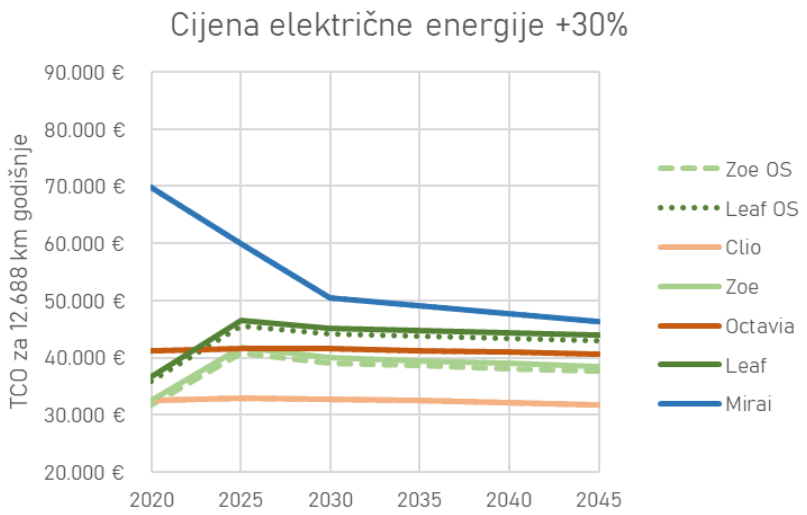

Cijena električne energije -15%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

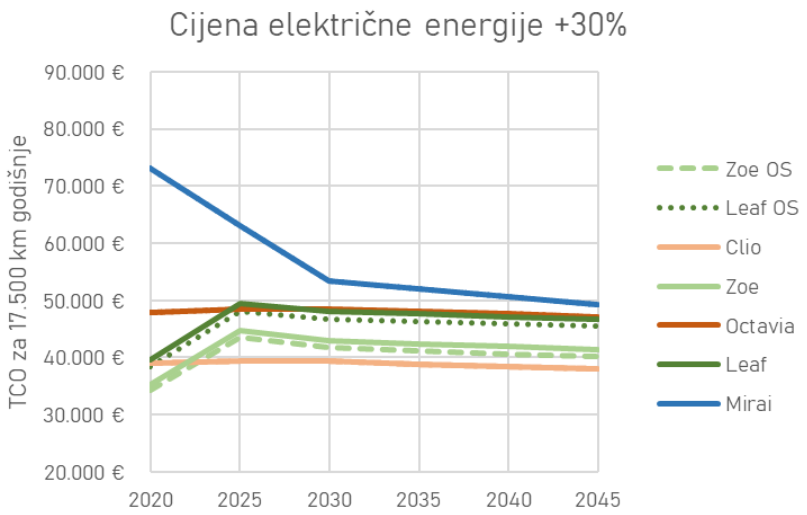

Cijena električne energije +15%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

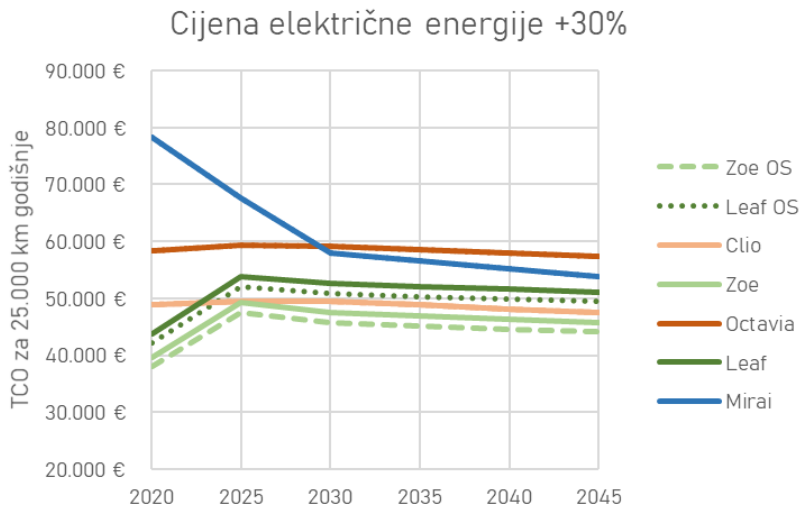

Cijena električne energije +15%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

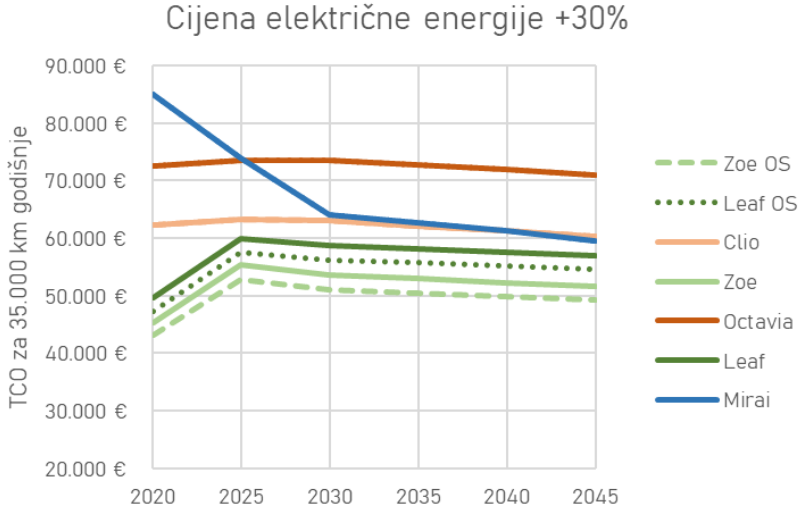

Cijena električne energije +15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

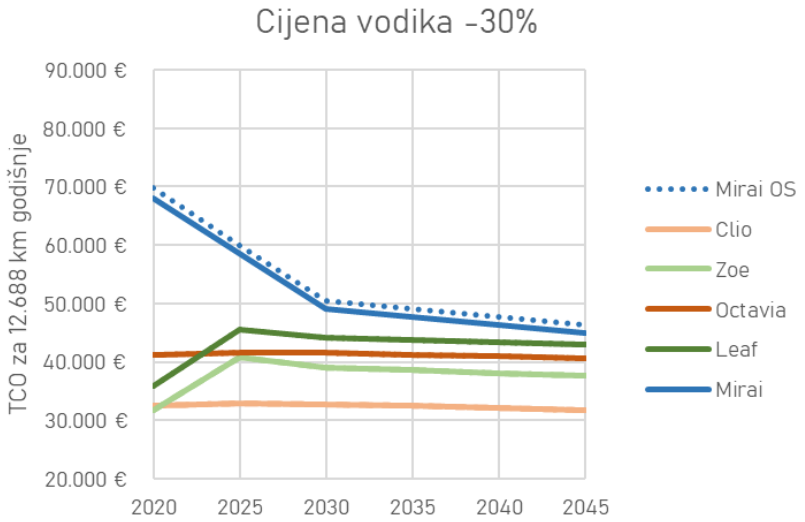

Cijena električne energije +15%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

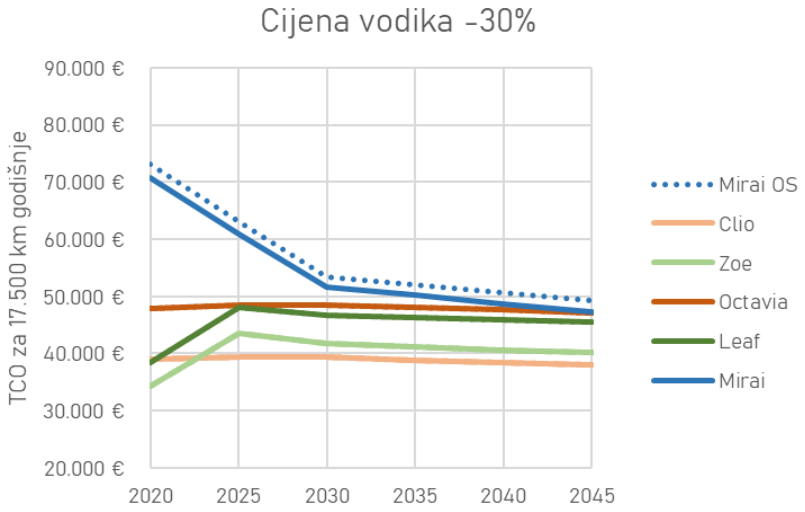

Cijena električne energije +30%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

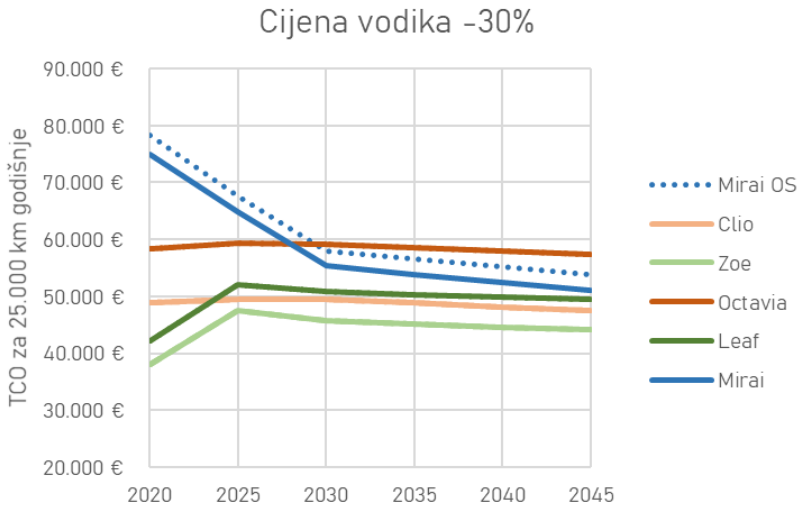

Cijena električne energije +30%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

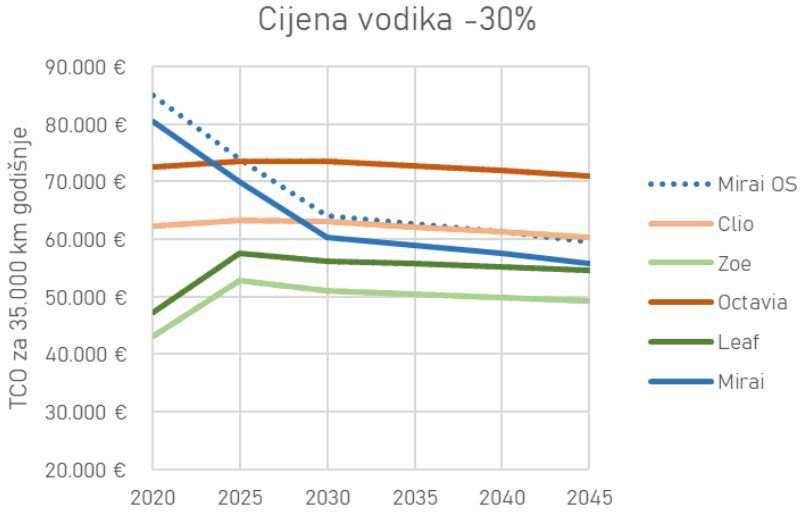

Cijena električne energije +30%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

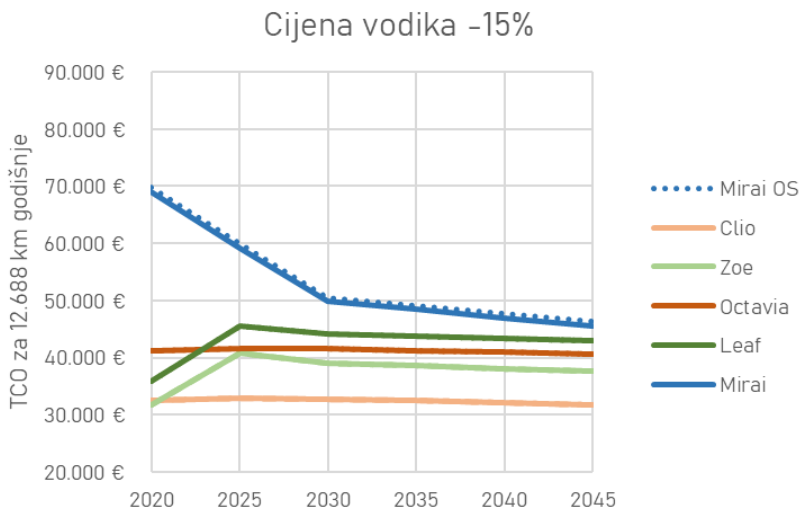

Cijena električne energije +30%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Zoe OS
Leaf OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

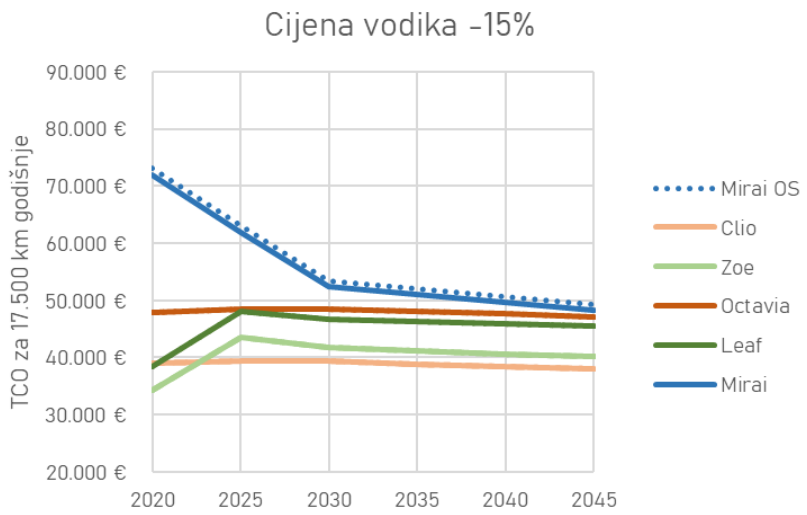

Cijena vodika -30%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

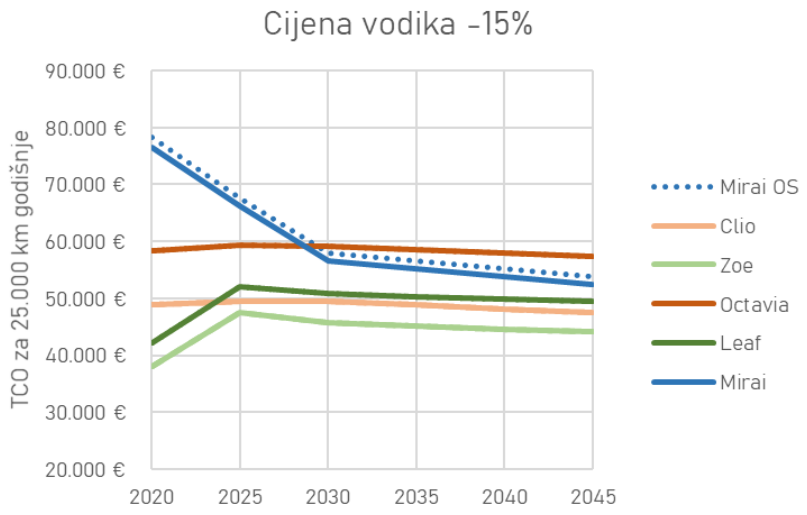

Cijena vodika -30%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

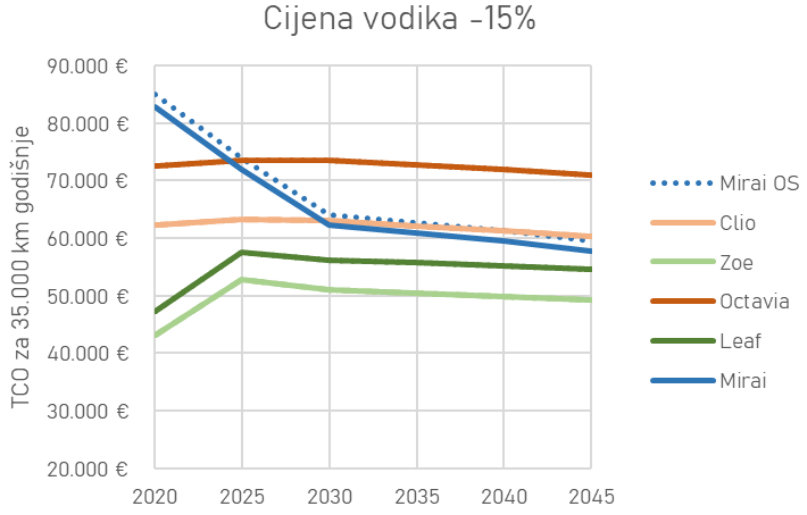

Cijena vodika -30%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

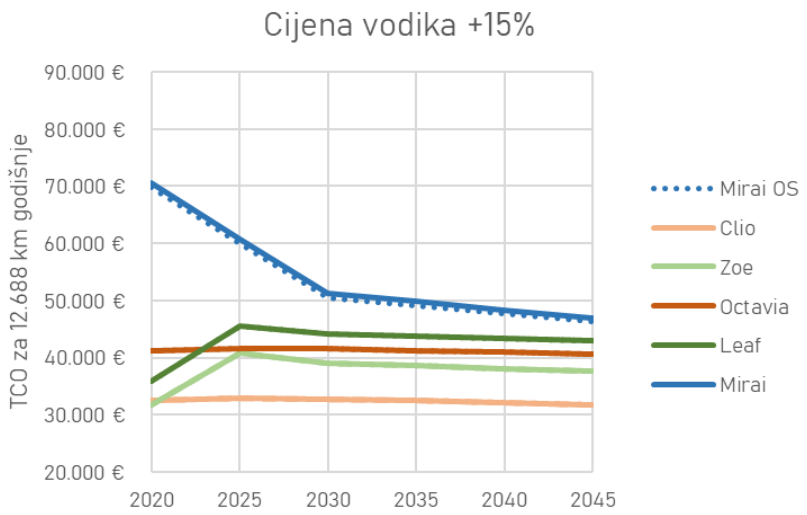

Cijena vodika -30%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

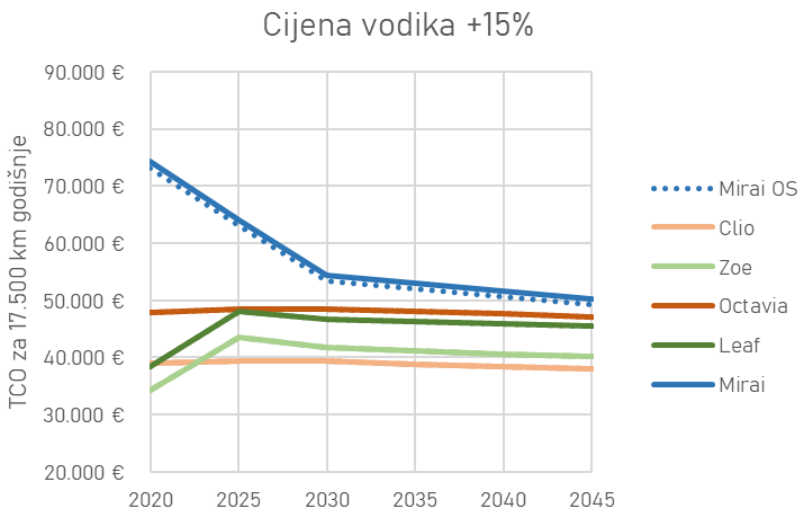

Cijena vodika -15%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

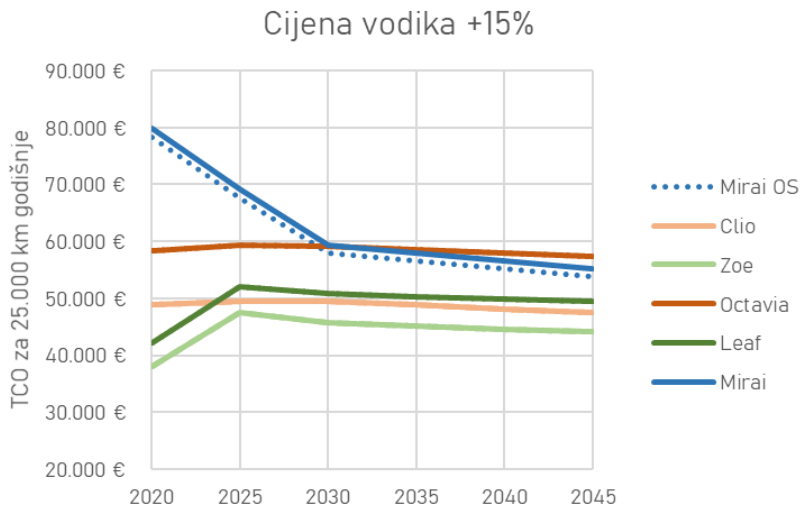

Cijena vodika -15%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

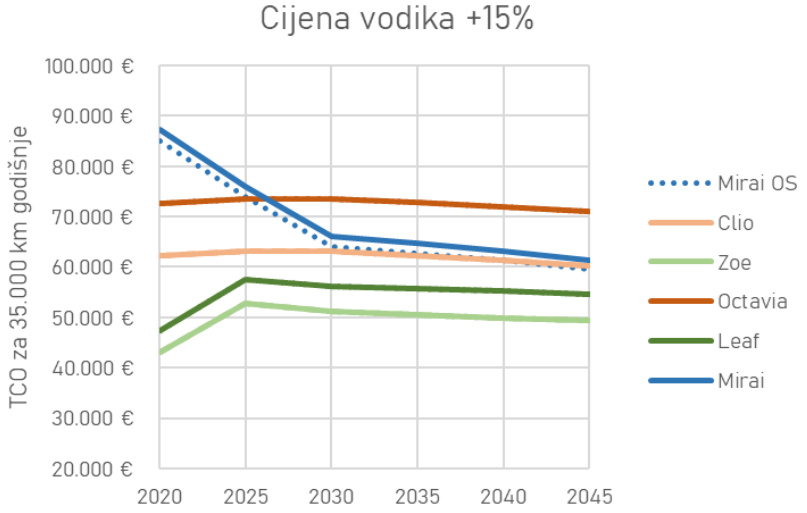

Cijena vodika -15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

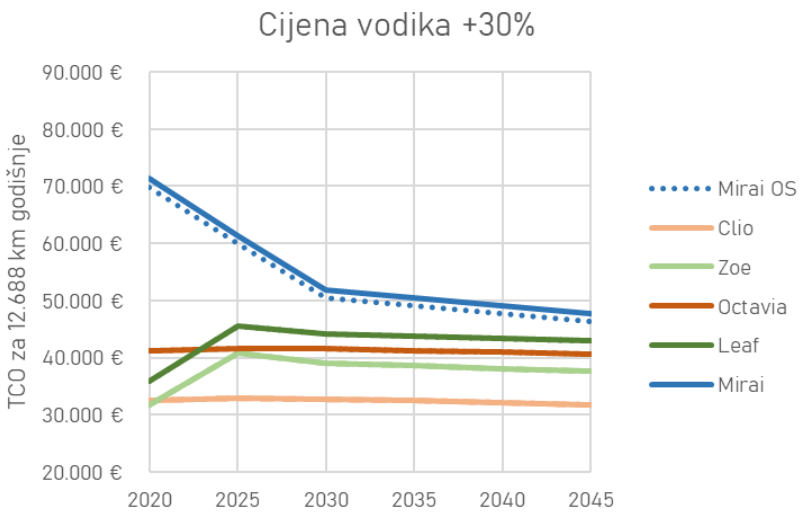

Cijena vodika -15%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

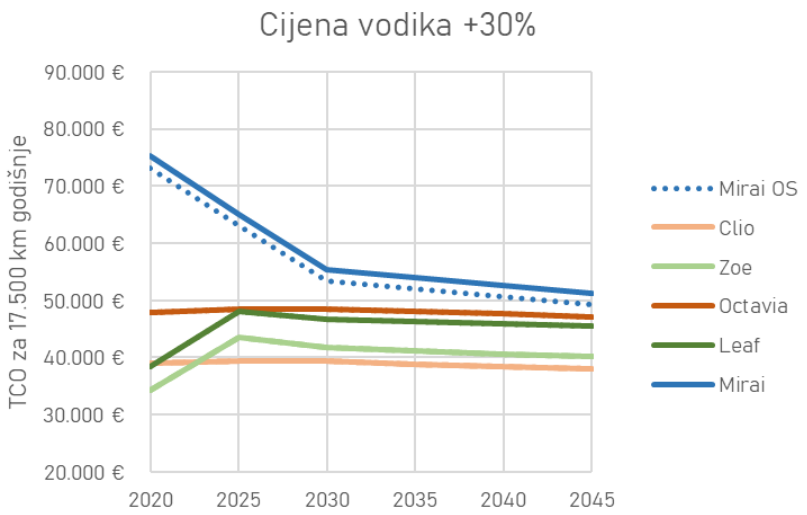

Cijena vodika +15%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

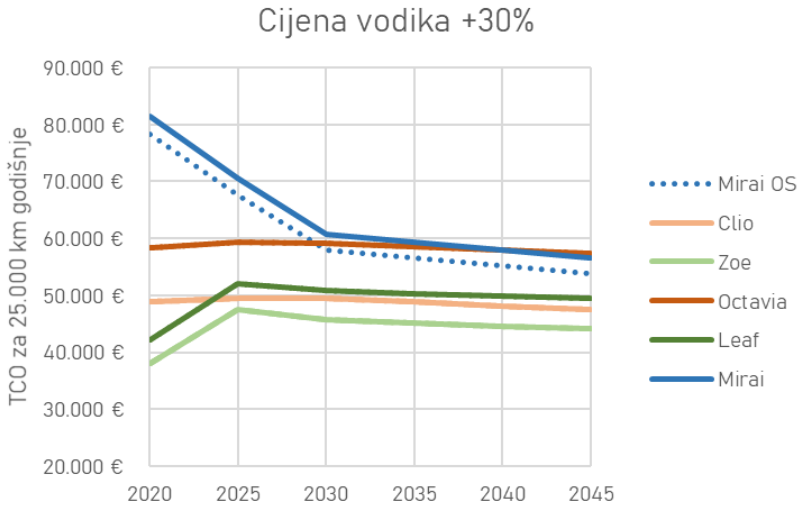

Cijena vodika +15%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

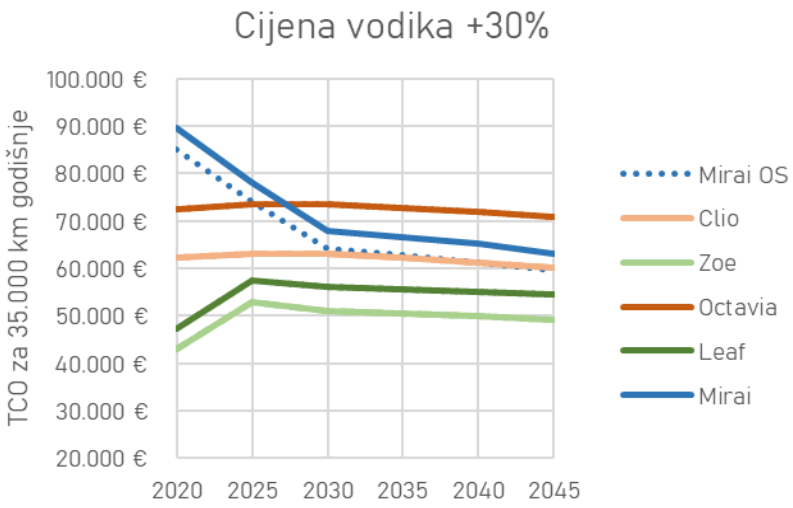

Cijena vodika +15%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

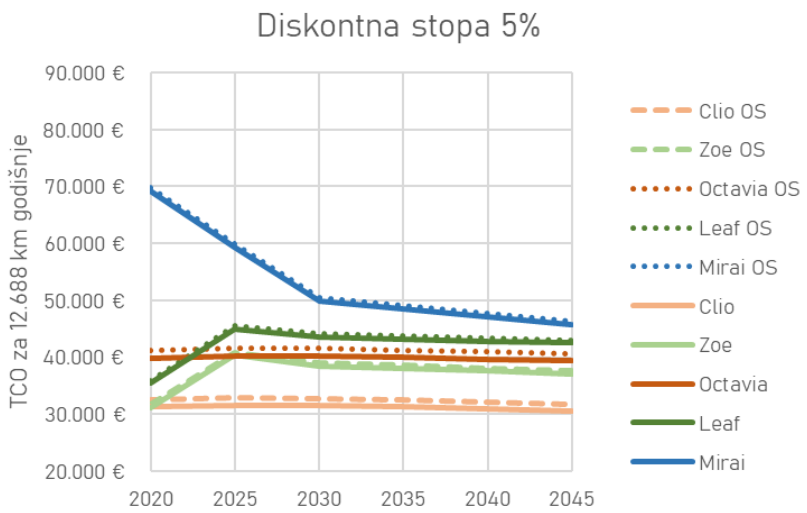

Cijena vodika +15%
TCO za 35.000 km godišnje
100.000 €
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

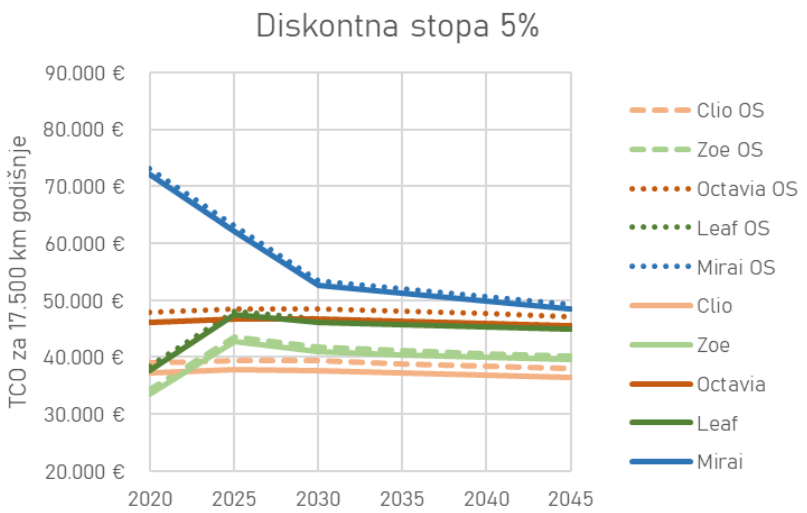

Cijena vodika +30%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

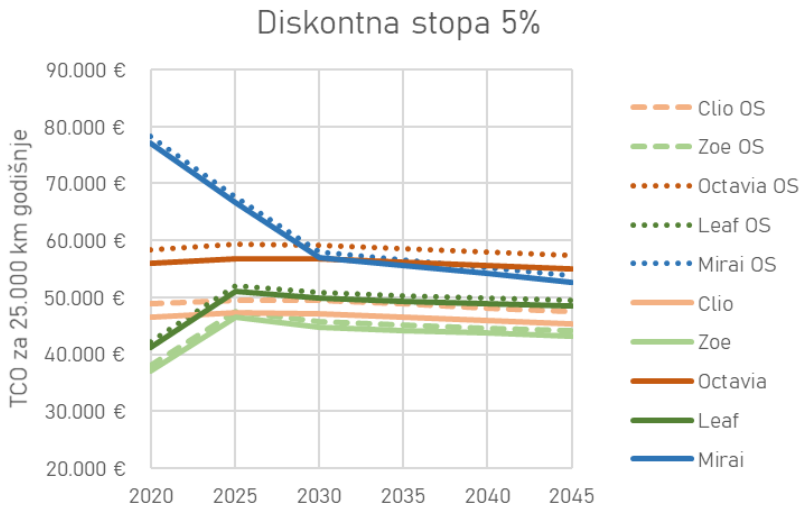

Cijena vodika +30%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

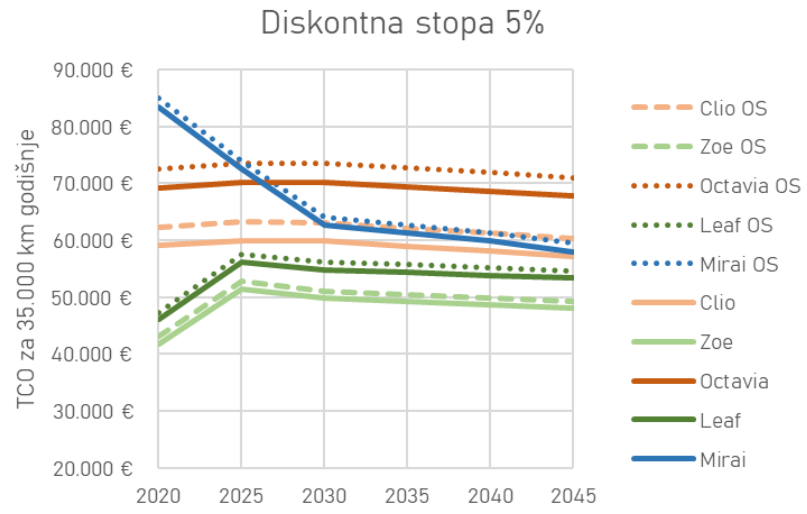

Cijena vodika +30%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

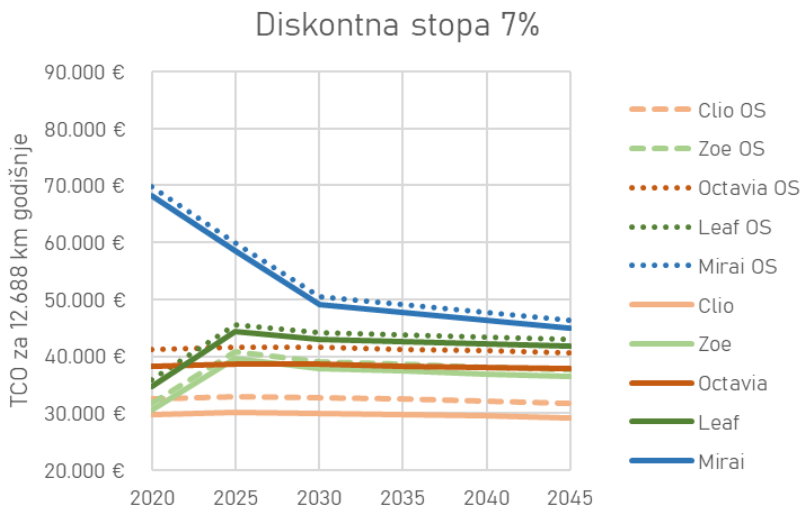

Cijena vodika +30%
TCO za 35.000 km godišnje
100.000 €
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

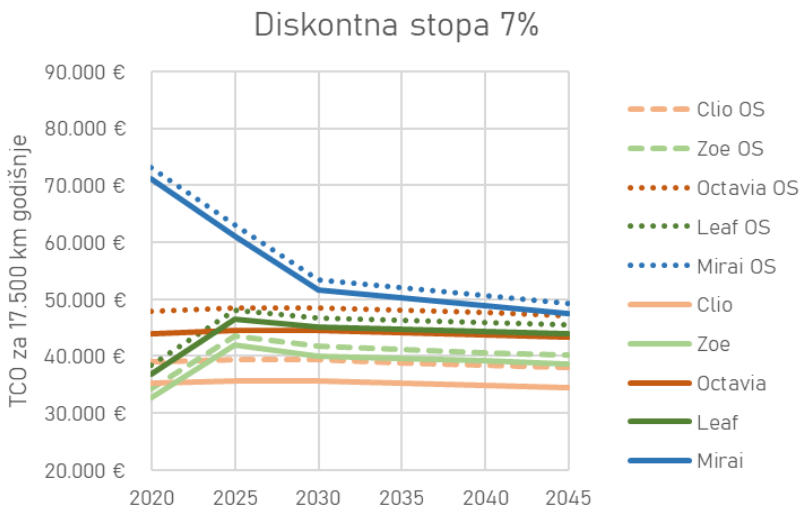

Diskontna stopa 5%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

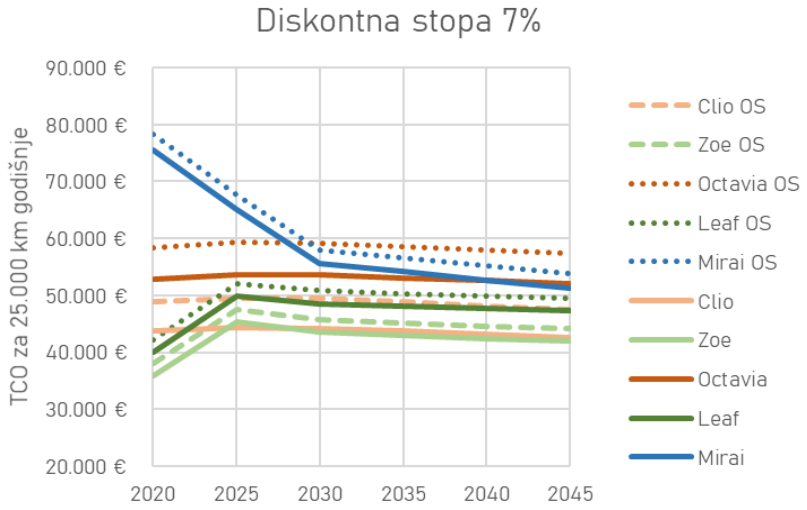

Diskontna stopa 5%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai

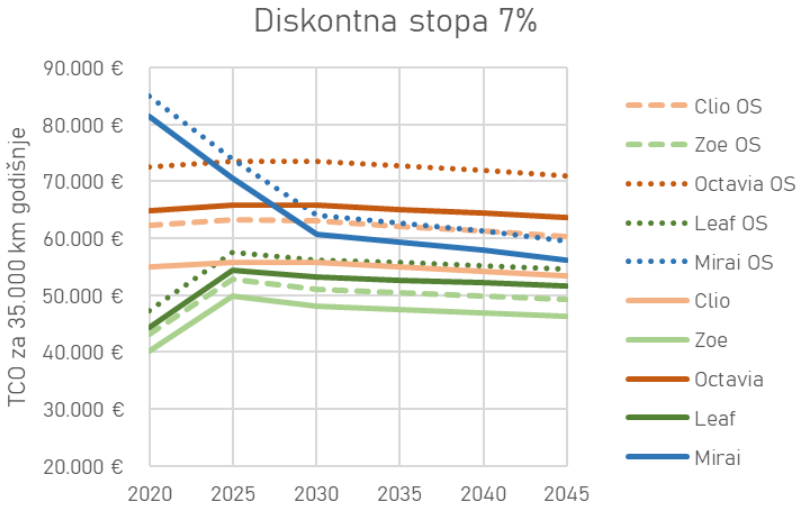

Diskontna stopa 5%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai


Diskontna stopa 5%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai


Diskontna stopa 7%
TCO za 12.688 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai


Diskontna stopa 7%
TCO za 17.500 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai


Diskontna stopa 7%
TCO za 25.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai


Diskontna stopa 7%
TCO za 35.000 km godišnje
90.000 €
80.000 €
70.000 €
60.000 €
50.000 €
40.000 €
30.000 €
20.000 €
2020
2025
2030
2035
2040
2045
Clio OS
Zoe OS
Octavia OS
Leaf OS
Mirai OS
Clio
Zoe
Octavia
Leaf
Mirai