

Prilozi za izradu strategije uvođenja zelenog vodika u energetske sustav Republike Hrvatske

Pavičić, Viktor

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:559937>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Viktor Pavičić
0035200234

Zagreb, srpanj 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MSc. AE.

Student:

Viktor Pavičić

Zagreb, srpanj 2021.

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

Ovom prilikom želio bih se zahvaliti svima koji su me podržavali tijekom mog diplomskog studija i pisanja diplomskog rada, ponajviše doc. dr. sc. Ankici Kovač na mentorstvu i na izuzetnoj susretljivosti i korisnim savjetima te stalnoj dostupnosti i mnogobrojnim uputama.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima, ponajviše svojim roditeljima bez kojih ništa od ovog ne bi bilo moguće.

Viktor Pavičić



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Viktor Pavičić** JMBAG: 0035200234

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prilozi za izradu strategije uvođenja zelenog vodika u energetski sustav Republike Hrvatske**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Contributions to the development of a strategy for the green hydrogen introduction into the energy system of the Republic of Croatia**

Opis zadatka:

S ciljem prilagodbe klimatskim promjenama donesen je Europski Zeleni plan koji daje smjernice o postizanju klimatski neutralne Europe. Europska unija povećala je svoje ambicije za smanjenje emisija stakleničkih plinova za 55% do 2030. godine u odnosu na 1990. godinu (do sada je bilo 40%). Kako bi se to postiglo potrebno je, između ostaloga fosilna goriva zamjenjivati zelenim vodikom. U okviru ovog diplomskog rada potrebno je:

1. Odrediti količine utrošenog fosilnog goriva (plinovitog, kapljevitog i krutog) polazeći od postojećeg „nultog scenarija smanjenja emisija CO₂ do 2050.“ za Republiku Hrvatsku. Očito ova potrošnja s maksimalne u 2020. godini mora u 2050. pasti na nulu.
2. Na temelju analize mjesta potrošnje i količina utrošenog fosilnog goriva iz točke 1. analizirati moguće zamjene od kojih je jedna zeleni vodik. Cilj je ove analize odrediti potrebnu količinu zelenog vodika (koja je očito nula u 2020. godini i koja raste do maksimalne u 2050. godini).
3. Polazeći od dobivenih količina vodika u točki 2., proračunati potrebne proizvodne kapacitete (konkretno instaliranu snagu fotonaponskih polja i elektrolizatora).

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

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:
6. svibnja 2021. 8. srpnja 2021. 12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:
 
Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MSc. AE. Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. ENERGIJA U RH	3
2.1. Emisija CO ₂	3
2.2. Ukupna potrošnja energije	4
2.3. Neposredna potrošnja energije	6
3. VODIK	14
3.1. Značajke	14
3.2. Proizvodnja	15
3.3. Pohrana	18
3.4. Primjena vodika kao goriva	19
3.5. Zeleni vodik	20
4. KLIMATSKA NEUTRALNOST RH	23
4.1. Potrebna električna energija	23
4.2. Potrebni instalirani kapaciteti	25
4.3. Ekonomski parametri za proizvodnju zelenog vodika	36
5. ZAKLJUČAK	42
LITERATURA	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Scenariji za smanjenje emisija CO ₂ [1]	2
Slika 2.	Emisija stakleničkih plinova prema Sn scenariju [1]	3
Slika 3.	Ukupna potrošnja energije u RH [1]	4
Slika 4.	Sn projekcija neposredne potrošnje energije [1]	6
Slika 5.	Sn projekcija neposredne potrošnje energije prema energentima [1]	7
Slika 6.	Neposredna potrošnja energije u industriji [1]	8
Slika 7.	Projekcija neposredne potrošnje energije u prometu [1]	10
Slika 8.	Projekcija neposredne potrošnje energije u kućanstvu [1]	12
Slika 9.	Vodik u odnosu na druga goriva [10]	15
Slika 10.	Proizvodnja vodika iz različitih izvora energije [11]	16
Slika 11.	Elektroliza vode [10]	16
Slika 12.	Sustav OIE i vodika [10]	18
Slika 13.	Energenti za ukupnu potrebnu energiju RH	21
Slika 14.	Potrebne količine zelenog vodika	23
Slika 15.	Proizvodnja električne energije iz OIE [38]	25
Slika 16.	Energija vjetra u RH [14]	26
Slika 17.	Offshore vjetroelektrana s onsite proizvodnjom H ₂ [37]	27
Slika 18.	Godišnja suma ozračenosti RH [16]	31
Slika 19.	Kretanje cijene proizvodnje vodika [30]	36
Slika 20.	LCOH (<i>eng. Levelized cost of hydrogen</i>) [30]	37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Energija RH	5
Tablica 2. Kretanje fosilnih goriva u industriji [1].....	9
Tablica 3. Kretanje fosilnih goriva u prometu [1].....	11
Tablica 4. Kretanje fosilnih goriva u kućanstvu [1].....	13
Tablica 5. Osnovne značajke vodika [9]	14
Tablica 6. Tipovi gorivnih članaka [9]	19
Tablica 7. Zeleni vodik za zadovoljavanje deficitne energije RH	20
Tablica 8. Zeleni vodik za zadovoljavanje energije dobivene fosilnim gorivom RH..	22
Tablica 9. Zeleni vodik za zadovoljavanje ukupne potrebne energije RH.....	22
Tablica 10. Potrebna količina energije za proizvodnju zelenog vodika	24
Tablica 11. Vjetroelektrane u RH [28]	28
Tablica 12. Ukupna snaga vjetroelektrana.....	29
Tablica 13. Potrebna površina za vjetroelektrane	30
Tablica 14. Sunčane elektrane u RH [36]	32
Tablica 15. Ukupna snaga FN modula.....	33
Tablica 16. Potrebna površina za sunčane elektrane	34
Tablica 17. Ukupna snaga elektrolizatora.....	35
Tablica 18. Predviđeni LOCE vjetroelektrana i sunčanih elektrana 2050. godine [31]	38
Tablica 19. Troškovi vjetroelektrana po godinama	39
Tablica 20. Troškovi sunčanih elektrana po godinama	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
OIE	[-]	Obnovljivi izvori energije
EU	[-]	Europska unija
RH	[-]	Republika Hrvatska
CCS	[-]	Carbon capture and storage
H ₂	[-]	Vodik
CO ₂	[-]	Ugljikov dioksid
HV _{H2}	J/kg _s	Ogrjevna vrijednost vodika
VE	[-]	Vjetroelektrane
FN	[-]	Fotonapon
SE	[-]	Sunčane elektrane
EUR	[-]	Euro
USD	[-]	Američki dolar
LCOE	[-]	Levelized cost of energy
LCOH	[-]	Levelized cost of hydrogen
IRENA	[-]	Međunarodna agencija za obnovljive izvore energije

SAŽETAK

S ciljem prilagodbe klimatskim promjenama donesen je Europski zeleni plan putem kojeg su propisane smjernice postizanja klimatski neutralne Europe do 2050. godine. Europska unija svoje je ambicije povećala gdje joj je cilj, do 2030. godine, smanjiti emisije stakleničkih plinova, u odnosu na 1990. godinu, za 55% (do sada je bilo 40%). Prilikom postizanja toga cilja, potrebno je smanjiti, odnosno potpuno ukinuti dobivanje energije korištenjem, a kao jedno od mogućih rješenja koje će u tom procesu pomoći predstavlja energija dobivena preko zelenog vodika. Sukladno time, prateći ambicije Europske unije, u ovom radu prikazana je projicirana potrošnja energije Republike Hrvatske do 2050. godine po svim sektorima. Uzimajući u obzir energiju dobivenu iz fosilnih goriva i deficit energije, proračunata je potrebna količina zelenog vodika za zadovoljavanje potreba u svim sektorima Republike Hrvatske. U konačnici, na temelju tih brojki, izračunata je snaga vjetroturbina i fotonaponskih modula preko kojih bi se proizvodila sva električna energija kao i snaga potrebnih elektrolizatora putem kojih bi se proizvodio sav zeleni vodik.

Ključne riječi: Europski zeleni plan, staklenički plinovi, zeleni vodik

SUMMARY

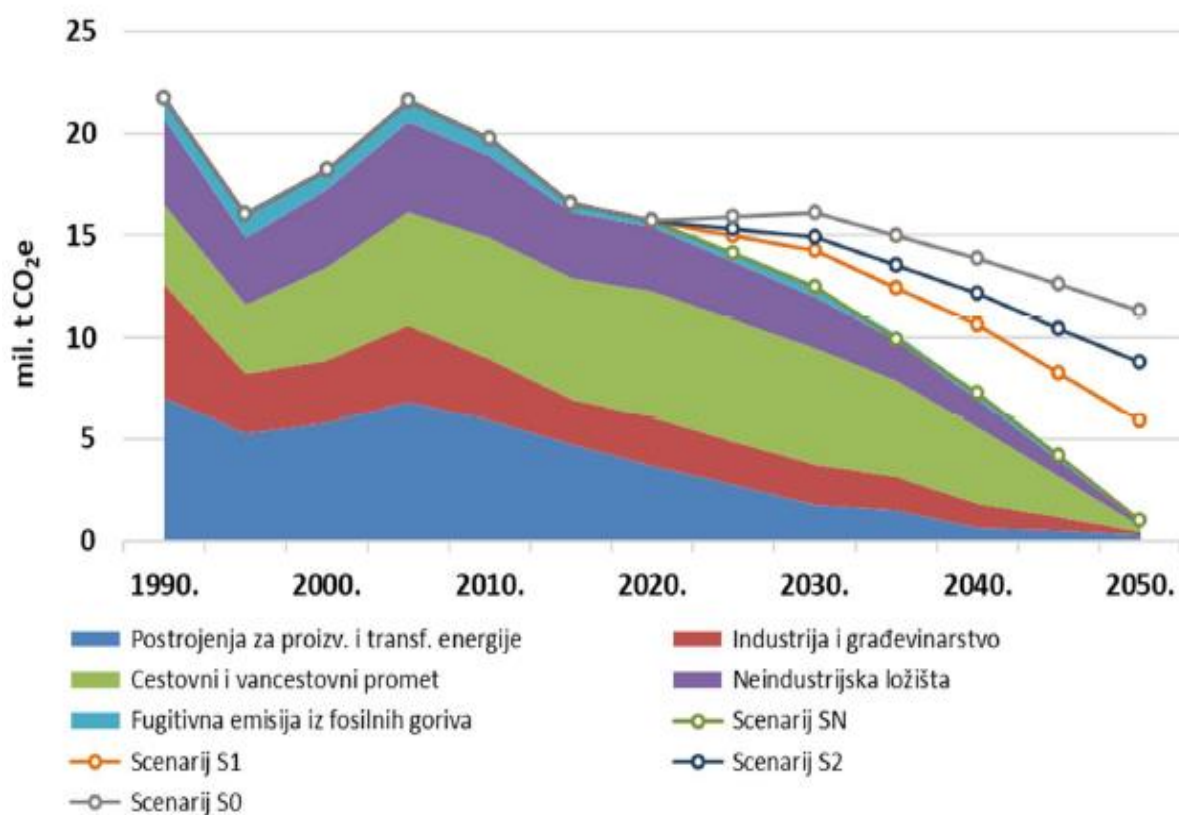
The European New Green Deal, which gives guidelines for achieving a climate – neutral Europe by 2050, was adopted aiming to adapt to climate changes. The European Union has increased its ambitions with the goal to reduce greenhouse gas emissions by 2030., compared to 1990., by 55% (so far it was 40%). In achieving this goal, the energy production using fossil fuels must be reduced, i.e. eliminated, and as one of the possible solutions is the energy obtained through green hydrogen. Accordingly, following the ambitions of the European Union, this work presents the projected energy consumption of the Republic of Croatia until 2050. in all sectors. Taking into account the energy obtained from fossil fuels and the energy deficit, the required amount of green hydrogen was calculated to meet the needs in all the sectors of the Republic of Croatia. In the end, based on these figures, the required power of wind turbines and photovoltaic modules through which all the necessary energy is produced, as well as the power of the needed electrolyzers through which all green hydrogen would be produced, was calculated.

Key words: European New Green Deal, greenhouse gas emissions, green hydrogen

1. UVOD

Emisije stakleničkih plinova u najvećem dijelu proizlaze iz energetskog sektora, a danas se klimatske promjene smatraju kao najveća prijetnja čovječanstvu i ukoliko se ozbiljno ne pozabavimo tim problemom, svijet kakav danas znamo, za par godina neće biti isti. Od 1750. godine globalna atmosferska koncentracija ugljikovog dioksida (CO₂) se povećala s 280 ppm na današnjih 414 ppm, što rezultira povećanjem od 47%. Ukoliko ništa ne poduzmemo, procjenjuje se da će koncentracija stakleničkih plinova do 2100. godine biti na 1000 ppm, a prosječna globalna temperatura (koja sada iznosi oko 14 °C) će se povećati za 6 °C. Sukladno tome, Pariškim sporazumom, na globalnoj razini, zacrtane su mjere kojima bi smanjili emisije stakleničkih plinova, čiji je rezultat zadržavanja rasta prosječne temperature na Zemlji ispod 2 °C, po mogućnosti i ispod 1,5 °C. Kao glavni lider u provođenju ovih mjera ističe se Europska unija (EU), koja nužne promjene vidi unutar prometnog i energetskog sektora. Stvaranje jedinstvenog tržišta koje bi bilo neovisno o teritorijalnim granicama, bez tehničkih i regulatornih zapreka predstavlja cilj EU [1].

Republika Hrvatska (RH) je tijekom 2019. godine izradila *Strategiju energetskog sektora RH*, kojom je, uz ostale kategorije, napravljen plan smanjenja emisija stakleničkih plinova. U strategiji su analizirana tri scenarija: Scenarij s postojećim mjerama S0, Scenarij umjerene energetske tranzicije S1 i Scenarij ubrzane energetske tranzicije S2 [1]. Niti jedan od predloženih scenarija ne teži postizanju klimatske neutralnosti do 2050. godine. Stoga je izradom nove projekcije Sn (Slika 1.) predloženo dodatno povećanje mjera i potrebna ulaganja u kojima bi mogli pratiti najambiciozniji scenarij EU. Nažalost niti u projiciranom Sn scenariju ne bismo mogli u potpunosti izbaciti emisije CO₂ (cementna industrija), no određenim mjerama i metodama bismo mogli preostale emisije pohranjivati putem prirodnih spremnika.



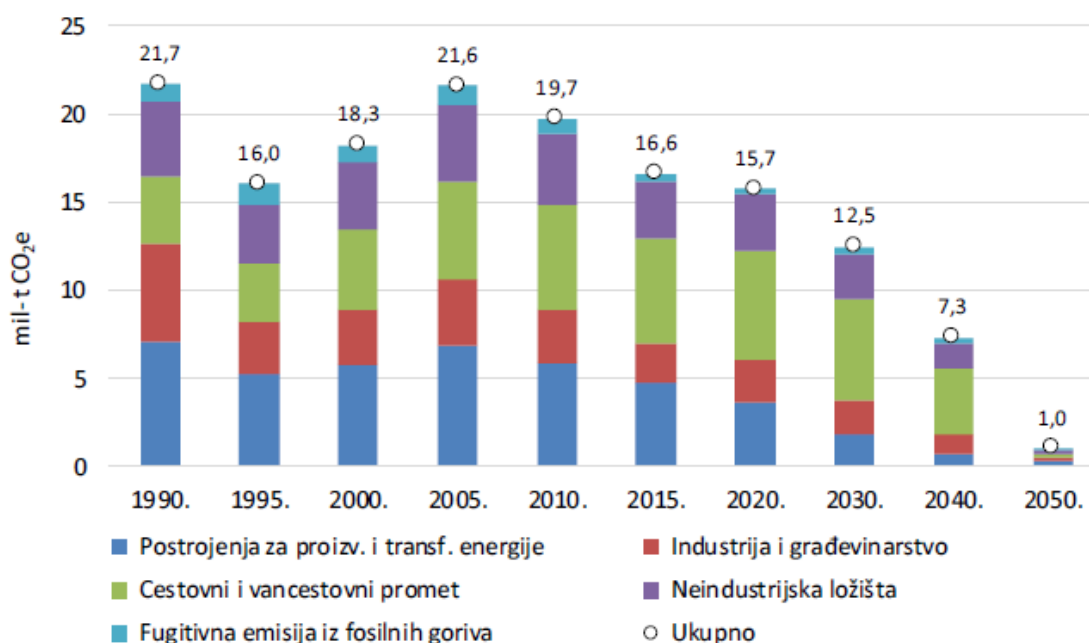
Slika 1. Scenariji za smanjenje emisija CO₂ [1]

Ukoliko bi gledali pojedinačno po sektorima, najveći doprinos ovom smanjenju emisija CO₂, očekuje se u postrojenjima za proizvodnju i transfer energije, cestovnom prometu i industriji i građevinarstvu.

2. ENERGIJA U RH

2.1. Emisija CO₂

Scenarijem Sn, osim neto nulte emisije stakleničkih plinova do 2050. godine, pretpostavlja se veliki porast cijena emisijskih jedinica stakleničkih plinova do 92 EUR₂₀₁₅/tCO₂e u 2050. godini. Postizanjem smanjenja emisija, određuju se snažne mjere povećanja energetske učinkovitosti, korištenja obnovljivih izvora energije (OIE) i pretpostavlja se primjena *Carbon capture and storage* (CCS) u termoelektranama, kogeneracijama, rafinerijama i industrijskim postrojenjima.

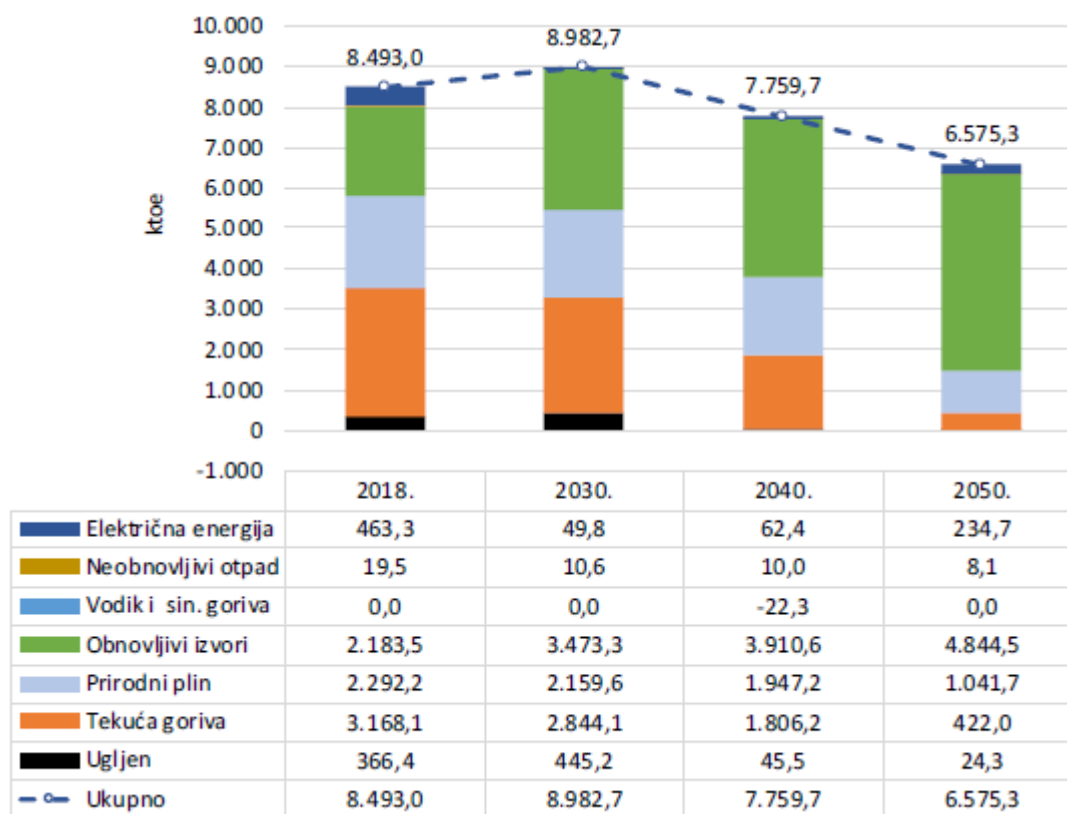


Slika 2. Emisija stakleničkih plinova prema Sn scenariju [1]

Slikom 2. prikazano je kretanje emisija CO₂ kroz povijest i predviđeno opadanje istih tih emisija do 2050. godine. Iz priložene slike vidimo da će do 2030. godine dominantan izvor emisije biti promet (46%), zatim neindustrijska ložišta (20%), industrija i građevinarstvo (15%), postrojenja za proizvodnju i transformaciju energije (14%) i fugitivni izvori emisije (5%). S druge strane, do 2050. godine, očekuje se drastičan pad emitiranja emisija CO₂, no i po Sn projekciji, teško je za očekivati da ćemo postići nultu stopu emisije.

2.2. Ukupna potrošnja energije

Ukupna potrošnja energije predstavlja zbroj ukupne proizvedene i uvezene primarne i transformirane energije umanjenu za ukupni izvoz primarne i transformirane energije. Slikom 3., Sn projekcijom, prikazana je ukupna potrošena energija u RH, odnosno oblik energije koji će se koristiti kako bi zadovoljili našu potrošnju u svim sektorima.



Slika 3. Ukupna potrošnja energije u RH [1]

Iz priloženog vidimo kako se očekuje pad korištenja fosilnih goriva (prirodni plin, tekuća goriva i ugljen) kroz godine i veliki porast korištenja energije dobivene isključivo preko OIE.

Tablicom 1., u periodu od 2020. do 2050. godine, prema projekciji Sn, prikazana je potrebna energija RH u svim sektorima zajedno s ukupnom predviđenom proizvedenom energijom iz fosilnih goriva u GWh. Sedmi stupac tablice 1. predstavlja deficit energije (u GWh), odnosno razliku između potrebne energije RH i energije

proizvedene iz fosilnih goriva. Očekuje se da će se deficit energije nadoknaditi koristeći isključivo OIE (sunčeva energija, energija vjetra, hidroenergija, i dr.)

Tablica 1. Energija RH

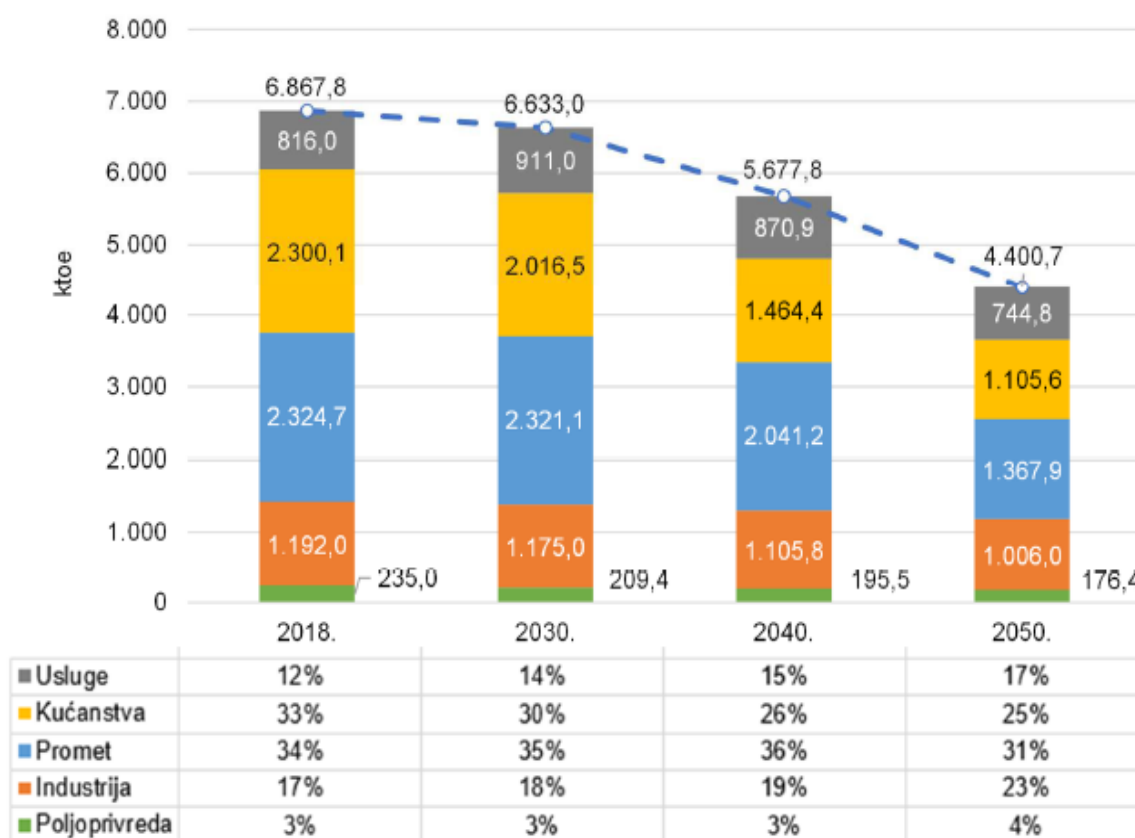
GODINE	PROIZVEDENA ENERGIJA IZ FOSILNIH GORIVA (GWh)				POTREBNA ENERGIJA	DEFICIT ENERGIJE
	PRIRODNI PLIN	TEKUĆA GORIVA	UGLJEN	UKUPNO	GWh	
2020.	25702,30	36053,00	4361,25	66116,55	99436,50	33319,95
2025.	25409,22	34564,94	4769,46	64743,63	101952,65	37209,02
2030.	25116,15	33076,88	5177,68	63370,71	104468,80	41098,09
2035.	23881,04	27041,49	2853,42	53775,96	97357,06	43581,10
2040.	22645,94	21006,11	529,17	44181,21	90245,31	46064,10
2045.	17380,45	12956,98	405,89	30743,32	83358,03	52614,70
2050.	12114,97	4907,86	282,61	17305,44	76470,74	59165,30

U odnosu na 2020. godinu, proizvedena energija iz fosilnih goriva će se najviše smanjivati kod tekućih goriva gdje će do 2030. godine njihov udio biti smanjen za 9%, a do 2050., prema projekciji, očekuje se smanjenje od 86,4%. Prirodni plin će se do 2030. godine smanjiti za 2,3%, a do 2050. za 52,9%, dok će se ugljen do 2030. prvo povećati za 15,6%, a do 2050. će se smanjiti za 93,5% u odnosu na 2020. godinu. Očekivana potrebna energija RH, Sn projekcijom će do 2030. godine narasti za 4,8%, unatoč snažnim trenutnim mjerama za povećanje energetske učinkovitosti, osobito u području poboljšanja toplinske izolacije i intenzivne obnove stambenog fonda. Nakon 2030. godine potrebna energija će se postupno smanjivati i 2050. će se smanjiti za 23% u odnosu na 2020. godinu. Paralelno tome, prateći direktive i projekciju EU, iz godine u godinu ćemo smanjivati proizvedenu energiju iz fosilnih goriva, no time povećavamo deficit energije koji moramo riješiti koristeći OIE.

2.3. Neposredna potrošnja energije

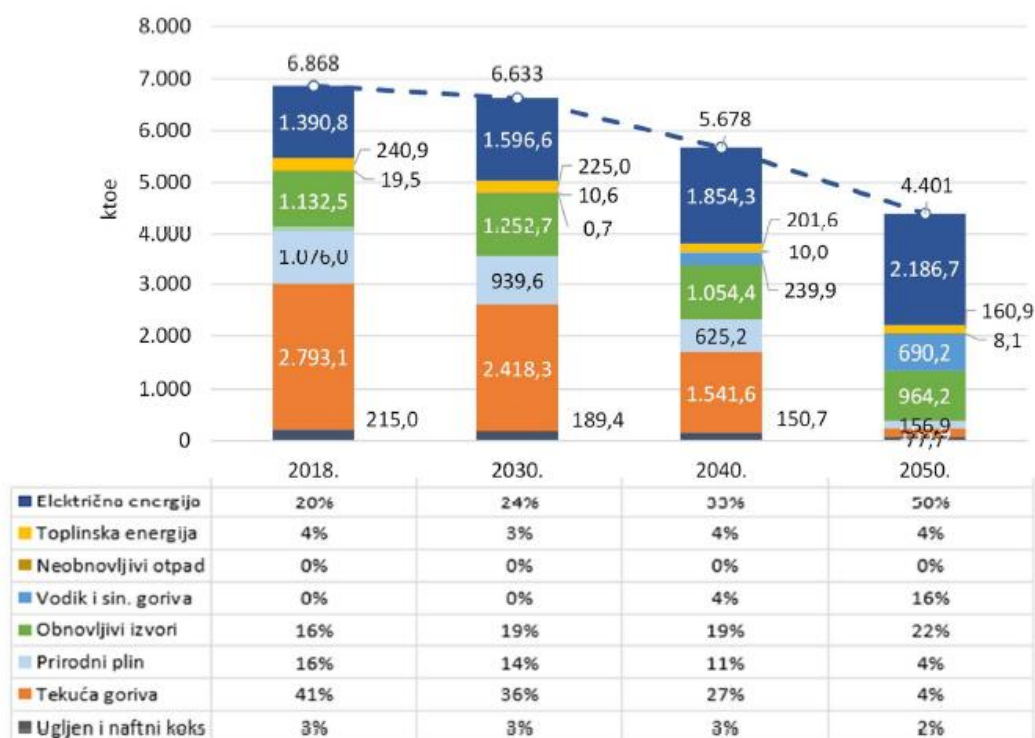
Neposredna potrošnja energije je ukupna potrošnja energije krajnjih kupaca, odnosno ukupna potrošnja energije u industriji, prometu, kućanstvima, sektoru usluga i poljoprivredi. Ukoliko neposrednoj potrošnji energije pridodamo neenergetsku potrošnju i ostalo dobivamo ukupnu potrošnju energije. Neenergetska potrošnja predstavlja potrošnju energenata u neenergetske svrhe, odnosno energent se koristi kao sirovina za daljnje proizvode, npr. petrokemijska industrija. Pod kategoriju ostalo, ubrajaju se gubici transporta i distribucije, potrošnja energije za pogon energetskih postrojenja i gubici transformacije [1].

Slikom 4. prikazan je Sn scenarij ukupne neposredne potrošnje energije.



Slika 4. Sn projekcija neposredne potrošnje energije [1]

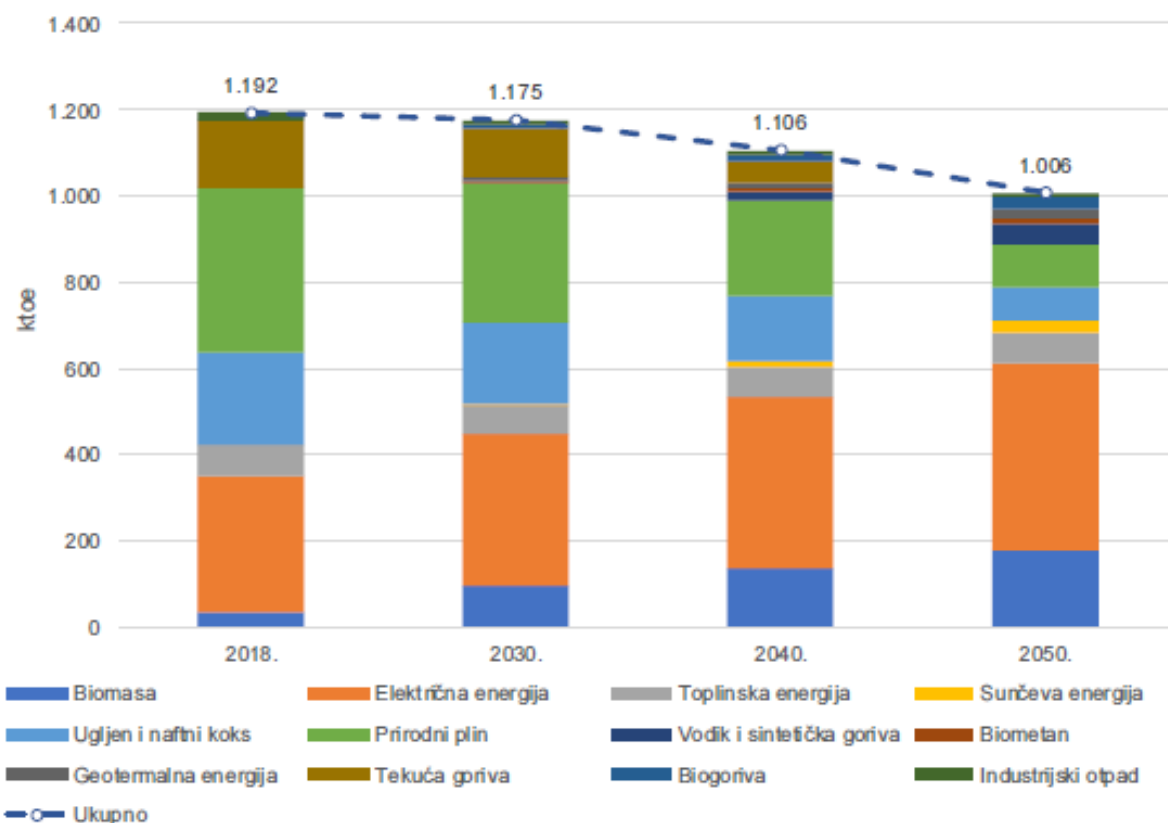
Ukupna neposredna potrošnja energije za 2018. godinu iznosila je 6.868 ktoe (kilotona ekvivalenta nafte). Projekcijom Sn očekuje se smanjenje potrošnje neposredne energije za 36%. Do 2030. godine neposredna potrošnja bi se blago smanjivala za 0,5% godišnje, dok bi u periodu od 2030. do 2050. godine, godišnje smanjenje iznosilo oko 2%. Najveće smanjenje neposredne potrošnje energije očekuje se u sektoru kućanstva, dok se najmanje smanjenje predviđa u sektoru usluga. Udio fosilnih goriva u neposrednoj potrošnji energije iznosio je oko 60%. Scenarijem Sn (slika 5.), udio fosilnih goriva bi se kontinuirano smanjivao i u 2050. godini bi iznosio oko 10%, što kao rezultat ne daje potpunu klimatsku neutralnost. Udio električne energije će se kontinuirano povećavati i u 2050. godini bi iznosio polovinu od ukupne neposredne potrošene energije. Sukladno tome, povećanjem potrošnje električne energije, povećat će se i udio OIE u proizvodnji te električne energije, gdje je cilj da sva ta električna energija bude proizvedena iz OIE [1].



Slika 5. Sn projekcija neposredne potrošnje energije prema energentima [1]

Industrija

Industrijski sektor predstavlja važan izvor emisija stakleničkih plinova čijom projekcijom, do 2050. godine, nećemo moći u potpunosti izbaci korištenje fosilnih goriva kao izvor dobivanja potrebne energije (cementna industrija) [1].



Slika 6. Neposredna potrošnja energije u industriji [1]

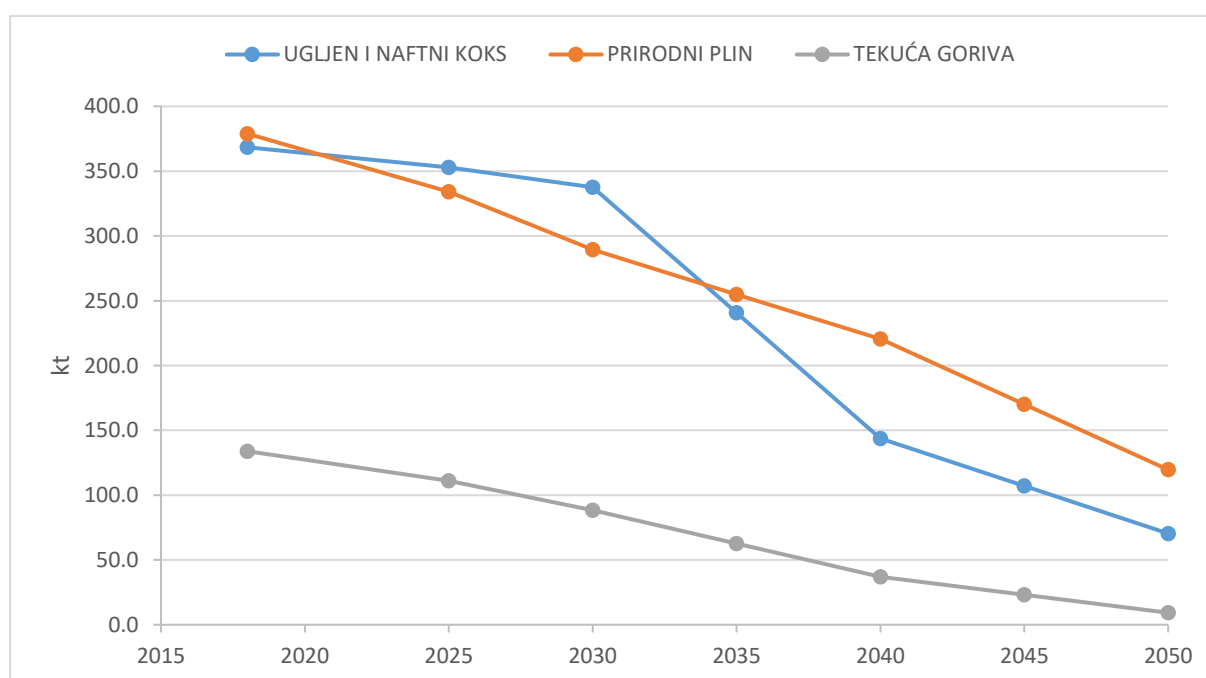
Prema slici 6. potrošnja energije u industriji će se smanjiti za 16% do 2050. godine, a upotreba fosilnih goriva će se sa 63% smanjiti na 17% u odnosu na 2018. godinu. Osim navedenih energenata, očekuje se značajan porast korištenja sunčeve energije, biometana i geotermalne energije, a postupno će se uvesti vodikova energija i sintetička goriva.

Tablicom 2. prikazana su projicirana kretnja fosilnih goriva (u kilotonama) do 2050. godine. Do 2030. godine očekuje se blago smanjenje fosilnih goriva, no nakon 2030. godine, prema projekciji, pad bi bio veći. Najviše bi se smanjilo korištenje energije iz ugljena i naftnog koksa, čiji bi se iznos smanjio za 81% 2050. godine. Ostala

fosilna goriva bi se linearno smanjivala i 2050. godine, prirodni plin bi se smanjio za 69%, a tekuća goriva za 93% [1].

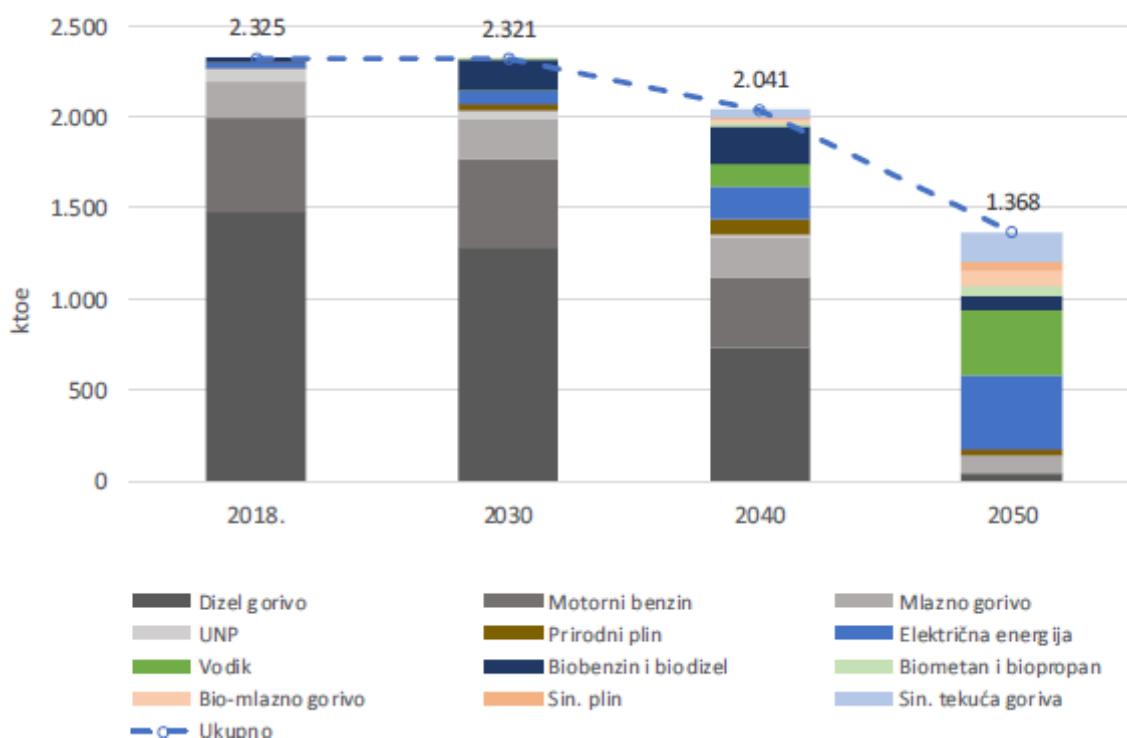
Tablica 2. Kretanje fosilnih goriva u industriji [1]

GODINE	UGLJEN I NAFTNI KOKS	PRIRODNI PLIN	TEKUĆA GORIVA
	kt		
2018.	368,4	378,9	133,9
2025.	352,9	334,1	111,2
2030.	337,5	289,3	88,5
2035.	240,6	254,9	62,7
2040.	143,8	220,5	37,0
2045.	107,1	170,1	23,2
2050.	70,4	119,6	9,3



Promet

Najveći udio u neposrednoj potrošnji energije zauzima sektor prometa gdje je uloga fosilnih goriva najveća i čiji će izazov za dekarbonizaciju biti najproblematičniji.



Slika 7. Projekcija neposredne potrošnje energije u prometu [1]

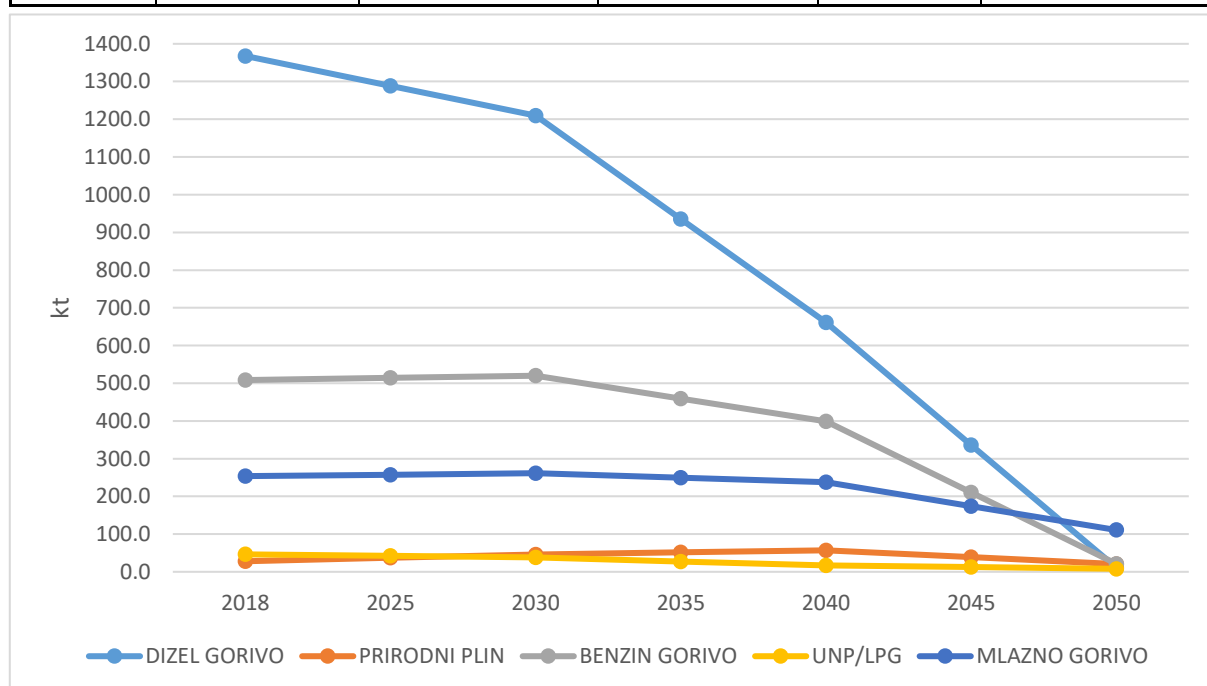
Slikom 7. prikazana je projekcija sektora prometa do 2050. godine. Vidimo kako su očekivanja da će potrošnja energije u 2050. godini iznositi oko 60% ostvarene potrošnje u 2018. godini. Razlog tome je zamjena svih vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem s učinkovitim električnim vozilima. Osim električne energije i električnih vozila na baterije, u planu je još i korištenje vozila na biogoriva u cestovnom i vodenom prometu, a 2040. i u zračnom. Od 2040. godine očekuje se i uvođenje vodika kao sintetičkih goriva čiji će udio iznositi 15%, odnosno 26% u 2050. godini [1].

Tablicom 3. prikazani su količinski podaci projicirane potrošnje fosilnih goriva u prometu u razdoblju od 2018. do 2050. godine. Do 2030. godine ne očekuje se drastično smanjenje korištenja fosilnih goriva, ali uvođenjem strožijih mjera koje EU nameće, kako bismo što više smanjili emisije CO₂ i time postigli klimatsku neutralnost,

u periodu od 2030. do 2050. godine, taj pad bi bio veći. Iz priloženog vidimo da će najveći pad biti kod smanjenja korištenja dizelskog (99%) i benzinskog goriva (96%), dok će se najmanje smanjenje dogoditi kod korištenja mlaznog goriva (58%).

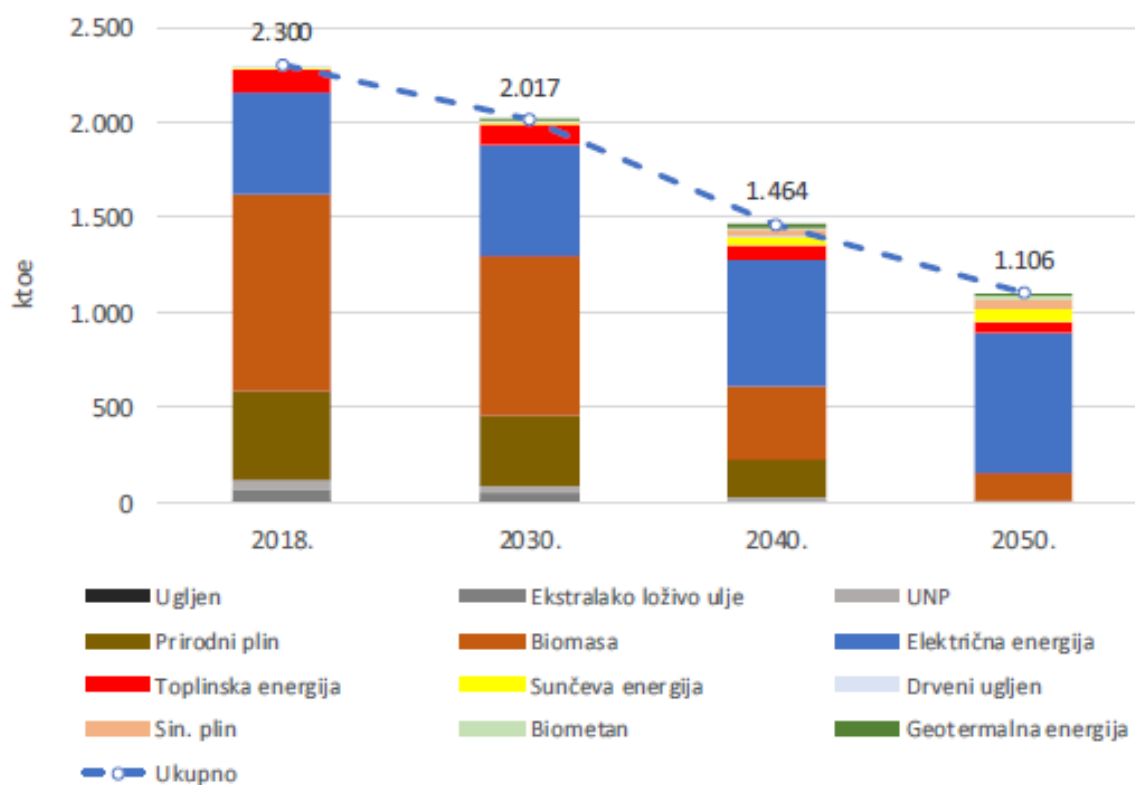
Tablica 3. Kretanje fosilnih goriva u prometu [1]

GODINE	DIZEL GORIVO	PRIRODNI PLIN	BENZIN GORIVO	UNP/LPG	MLAZNO GORIVO
	kt				
2018.	1367,7	27,9	508,7	46,3	253,4
2025.	1288,5	37,1	514,3	42,2	257,5
2030.	1209,3	46,3	519,9	38,1	261,5
2035.	935,1	51,6	459,6	27,6	249,7
2040.	660,8	57,0	399,3	17,1	238,0
2045.	336,1	38,8	210,4	12,6	174,5
2050.	11,5	20,6	21,4	8,0	111,0



Kućanstvo

Slikom 8. prikazana je neposredna potrošnja energije u sektoru kućanstva, odnosno popis energenata iz kojih se energija troši. Iz priloženog vidimo kako je glavna zadaća prvenstveno smanjiti potrošnju energije, bilo električne ili toplinske, gdje bi time smanjili i samu proizvedenu energiju. Potrošnja energije u kućanstvu, u odnosu na 2018. godinu, bi se smanjila za 52% [1].



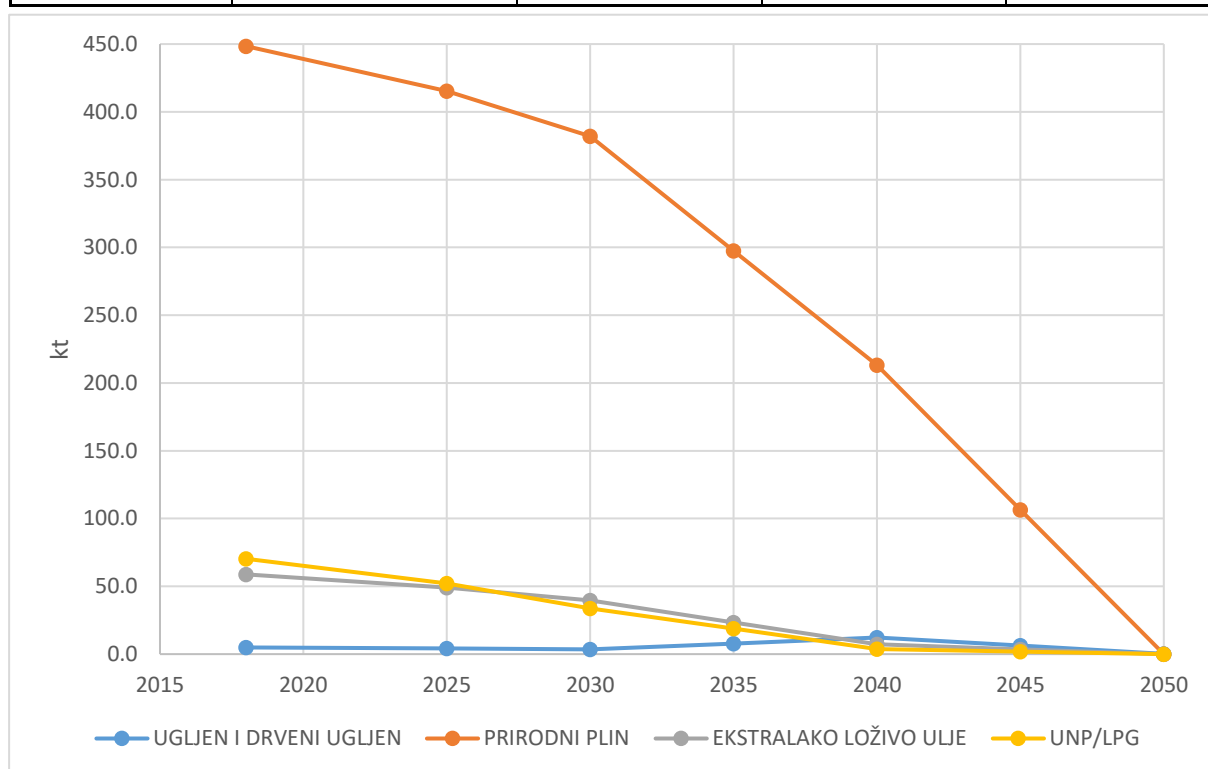
Slika 8. Projekcija neposredne potrošnje energije u kućanstvu [1]

Direktivom 2010/31/EU određeno je da svaka nova kuća/zgrada mora biti niskouglična i pametna [1]. Termin pametne zgrade karakterizira odličnu toplinsku izolaciju i vanjsku stolariju, nisku potrošnju energije hlađenja/grijanja, digitaliziran i automatiziran sustav i korištenje bilo kojeg OIE u cilju svladavanja svojih potreba.

Tablicom 4. prikazani su podaci i način kretanja fosilnog goriva u kućanstvu u razdoblju od 2018. do 2050. godine.

Tablica 4. Kretanje fosilnih goriva u kućanstvu [1]

GODINE	UGLJEN I DRVENI UGLJEN	PRIRODNI PLIN	EKSTRALAKO LOŽIVO ULJE	UNP/LPG
	kt			
2018.	5,0	448,5	58,8	70,3
2025.	4,2	415,2	49,2	52,1
2030.	3,4	382,0	39,6	33,8
2035.	7,8	297,6	23,4	18,7
2040.	12,3	213,1	7,2	3,7
2045.	6,2	106,6	3,6	1,8
2050.	0,2	0,0	0,0	0,0



Iz priloženog vidimo kako će se potrošnja fosilnih goriva do 2030. godine postupno smanjivati, no nakon toga pad će biti sve veći i veći. Najveće smanjenje se očekuje kod korištenja prirodnog plina, te je procjena prema Sn projekciji ta da ćemo u potpunosti izbaciti korištenje fosilnih goriva u ovom sektoru.

3. VODIK

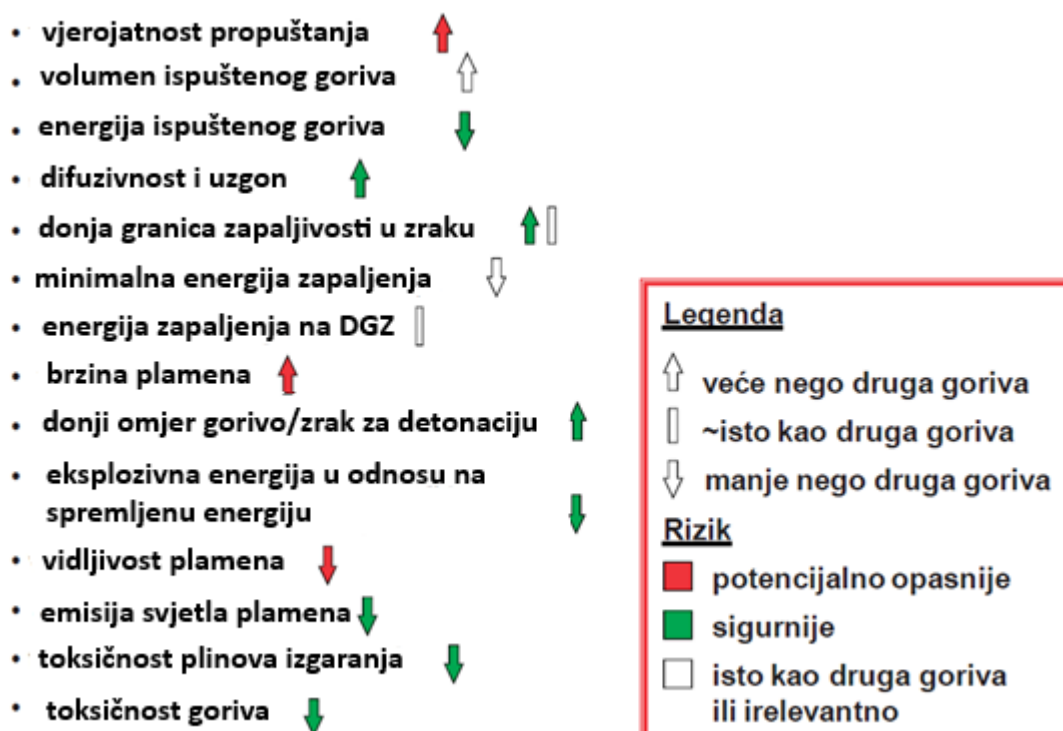
3.1. Značajke

Vodik (oznaka: H₂, njem. *Wasserstoff*, eng. *Hydrogen*) u svemiru je najčešći element. Na zemlji vodik nalazimo isključivo u vezanom obliku, odnosno u različitim kemijskim spojevima. Najlakši je element u prirodi i 14 puta je lakši od zraka. U tablici 5. dane su osnovne značajke vodika.

Tablica 5. Osnovne značajke vodika [9]

Donja ogrjevna vrijednost	10 800 kJ/m _n ³
Gornja ogrjevna vrijednost	12 770 kJ/m _n ³
1 normni kubni metar (m _n ³)	≈ 0,09 kg
Plinska konstanta	4 125 J/kgK
Specifična toplina	14 266 J/kgK (20 °C)
Gustoća (plin)	0,09 kg/m ³
Gustoća (tekućina)	70,9 kg/m ³ (-252 °C)

Vodik na zraku gori blijedoplavim plamenom gdje mu je temperatura 2045 °C, a zračenje plamena je desetak puta manje nego kod drugih gorivih plinova. Njegovim elektrokemijskim izgaranjem s kisikom nastaje samo vodena para, posve neškodljiva za okoliš. Donja granica zapaljivosti na zraku četiri puta je viša nego za benzin i dva puta viša od propana. Energija potrebna za zapaljenje na zraku je 12 puta manja nego kod benzina, no brzina izgaranja može biti i do 8 puta veća. Pri normalnim uvjetima vodik se ukapljuje na temperaturi oko -253 °C, te je takav tekući vodik proziran, bez boje i mirisa, nekoroziivan i nereaktivan i gustoća mu iznosi 1/40 gustoće vode. Slikom 9. prikazana su uspoređene značajke vodika i drugih goriva [10].

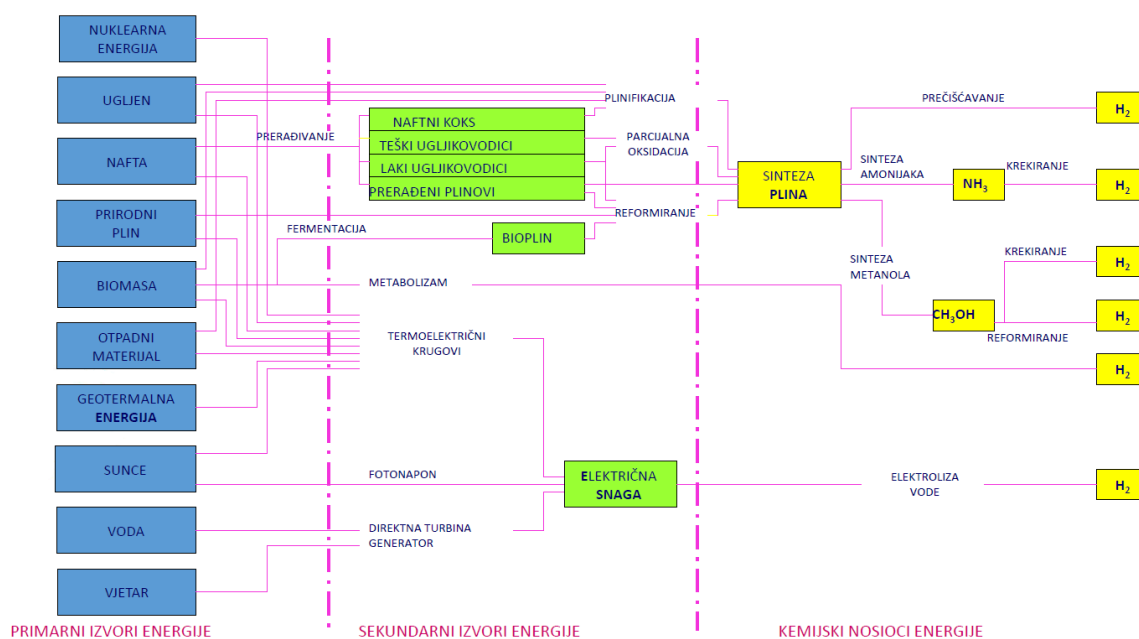


Slika 9. Vodik u odnosu na druga goriva [10]

Pri rukovanju s vodikom, njegovoj pohrani i uporabi, potrebno je se pridržavati zaštitnih mjera.

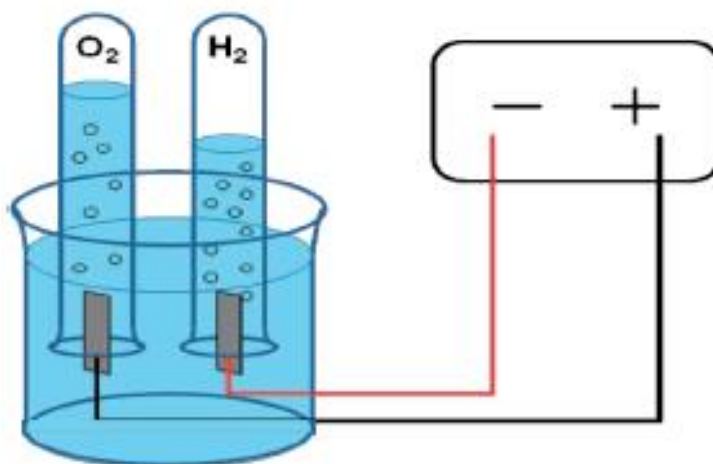
3.2. Proizvodnja

Danas u svijetu, najveće količine vodika dobivamo iz fosilnih goriva 96%, dok 4% proizvodimo elektrolizom vode korištenjem OIE. Za proizvodnju vodika potrebna je sirovina koja u sebi sadrži vodik, npr. voda ili različiti ugljikovodici plus energija. Vodik se danas proizvodi uglavnom putem reformiranja ugljikovodika vodenom parom i elektrolizom vode. Reformiranjem dobivamo vodik čiji je proces 3 puta jeftiniji od elektrolize, tamo se koristi toplinska energija na oko 800 °C, učinkovitost procesa je između 70 – 80%, no kao nusprodukt nakon reakcije dobivamo CO₂ [11]. Na slici 10. prikazani su svi mogući postupci proizvodnje vodika.



Slika 10. Proizvodnja vodika iz različitih izvora energije [11]

Osim proizvodnje vodika preko fosilnih goriva, znanstvenicima su zanimljivi procesi poput termokemijskog procesa rasplinjavanja biomase ili fotobiološka proizvodnja korištenjem sposobnosti nekih živih organizama poput algi, gdje se uz prisutnos sunčeve svjetlosti proizvodi vodik. Ipak jedini tehnološki komercijalni razvijeni proces bez popratnih emisija CO₂ i praktično primjenjiv je elektroliza vode. Elektroliza vode je proces razlaganja vode na vodik i kisik, prolaskom istosmjernje električne struje odgovarajućeg napona (Slika 11).



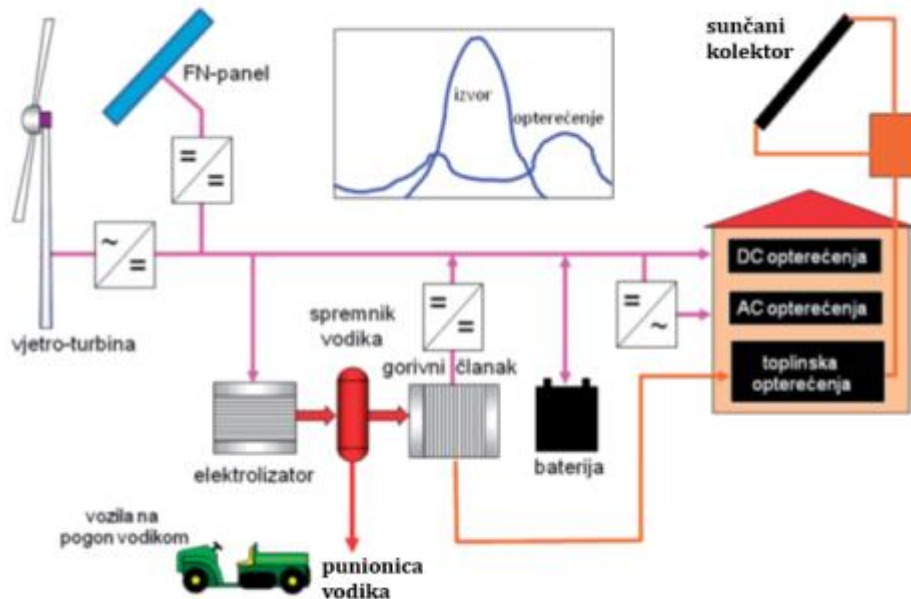
Slika 11. Elektroliza vode [10]

Sustavi za elektrolizu vode nazivaju se elektrolizatori. Ovisno o elektrolitu, imamo tri različite izvedbe elektrolizatora: elektrolizatori s alkalnim elektrolitom, elektrolizatori s protonski izmjenjivom membranom, elektrolizatori s keramičkim elektrolitom. Elektrolizatori s alkalnim elektrolitom mogu biti kapaciteta od 100 do 1000 m³, ali i preko 30 000 m³/h ukoliko se nalaze u neposrednoj blizini hidrocentrala [10]. Učinkovitost elektrolizatora proračunava se prema [11]:

$$\eta = \frac{E_{dobivena}}{E_{uložena}} = \frac{E_{H_2}}{E_{el}} = \frac{m_{H_2} \cdot HV_{H_2}}{U \cdot I \cdot t} \quad (1.1)$$

Učinkovitost elektrolizatora, prikazana kao odnos utrošene energije i energije koju vodik sadrži kroz ogrijevnu vrijednost (HV_{H_2}), u teoriji mogu biti čak i 100% [11], no u praksi to baš nije tako. U industrijskim elektrolizatorima dodatni gubici se javljaju zbog pretvorbe izmjenične struje u istosmjernu, zbog regulacije napona, zbog struje utrošene za rad pomoćnih uređaja potrebnih za rad postrojenja elektrolizatora (pumpe, puhala i dr.), stoga sama učinkovitost varira između 73 – 60% ovisno o utrošku energije. Noviji elektrolizatori mogu čak imati učinkovitost i do 80% [11].

Danas se u literaturama često koristi termin zeleni vodik koji označava vodik proizvedene procesom elektrolize vode, uz pomoć električne energije proizvedene iz OIE. Slika 12. prikazuje integrirani sustav proizvodnje zelenog vodika i njegovo korištenje. Proizveden vodik bi se pohranio u obliku stlačenog plina, koji bi se kasnije koristio za pogon automobila, grijanje, kuhanje ili proizvodnju električne energije.



Slika 12. Sustav OIE i vodika [10]

3.3. Pohrana

Iz prijašnjeg poglavlja smo se upoznali sa značajkama vodika, gdje pri atmosferskom tlaku i temperaturi, ima vrlo malu gustoću pa bi njegova pohrana pri takvim uvjetima zahtijevala ogroman volumen. Iz tog razloga vodik se pohranjuje kao stlačeni plin ili u ukapljenom stanju, no možemo ga pohraniti i u različitim spojevima poput metalnih i kemijskih hidrida. Najjednostavnija pohrana vodika je u posudama pod tlakom od 200 bara, no ukoliko bi vodik koristili kao gorivo u vozilima, tamo se vodik pohranjuje na tlakovima od 350 bara (npr. autobusi), te na 700 bara (osobni automobili). Prilikom tih tlakova, važno je napomenuti kako se vodik ne ponaša više kao idealni plin, te se mora uzeti u obzir koeficijent kompresibilnosti. Veći kapacitet pohranjenog vodika možemo postići s tekućim vodikom, no treba uzeti u obzir kako se vodik ukapljuje na temperaturi od $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ i da nam je za to potrebno uložiti veliku količinu energije. Uz to, veliki izazov predstavlja održavanje takve temperature, te čak i uz dobru izoaciju i posebne konstrukcije, potrebno je uzeti u obzir da se 1% vodika dnevno gubi iz razloga što se vodik jednostavno isparuje i ispušta u atmosferu [10].

3.4. Primjena vodika kao goriva

Za dobivanje električne energije iz pohranjenog vodika koristimo gorivne članke. Gorivni članci su elektrokemijski pretvarači energije koji iz kemijske energije vodika proizvode električnu energiju. Od goriva mogu biti vodik, sintetski plin koji predstavlja mješavinu vodika, ugljikovog monoksida (CO) i CO₂, prirodni plin ili metanol. Ovakvi uređaji imaju široku mogućnost primjene iz razloga što imaju vrlo dobar stupanj učinkovitosti, u teoriji on ide do 83% dok u praksi iznosi oko 50 %. Prednost rada gorivnih članaka je ta da im je nusproizvod čista voda, a uz to vrlo su tihi i ne ispuštaju u atmosferu nikakve štetne plinove [10].

Tablica 6. Tipovi gorivnih članaka [9]

Tip gorivnog članka	Elektrolit	Gorivo	Stupanj učinkovitosti	Radna temperatura	Način korištenja
S krutim oksidom, <i>SOFC</i>	Kruti oksidi ZrO ₂ /YO ₂	CH ₄ , H ₂ , CO	45 - 65%	900 – 1000 °C	Velike elektrane (samo el. energija) i mali kogeneracijski sustavi
S tekućim karbonatim, <i>MCFC</i>	Tekući karbonati, Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃	Prirodni i generatorski plin, H ₂	45-60%	650 – 700 °C	Velike elektrane (samo el. energija)
S fosforom kiselinom, <i>PAFC</i>	Fosforna kiselina H ₃ PO ₄	H ₂ , prirodni plin, metanol	35-42%	190 – 210 °C	Male elektrane (s kogeneracijom)
Alkalni, <i>AFC</i>	Kalijev hidroksid, KOH	H ₂ , prirodni plin, metanol	45-60%	60 – 130 °C	Specijalistički (svemirska tehnologija, uporaba u transportu)
S protonski izmjenjivom membrano, <i>PEMFC</i>	Kruta protonski izmjenjiva membrana	H ₂ , metanol, prirodni plin	30-40%	70 – 90 °C	Transport, mobilne primjene, male stacionarne primjene

Reakcije u gorivnim člancima se odvijaju na elektrodama između kojih se nalazi elektrolit. Ovisno o elektrolitu, u tablici 6. prikazani su svi tipovi gorivnih članaka, koje gorivo koriste, kolika im je radna temperatura, načini korištenja i njihov stupanj učinkovitosti. Do sada je u svijetu instalirano nekoliko desetaka tisuća jedinica različitih veličina, od manjih 1 W do nekoliko MW, a 90% njih su membranski gorivni članci.

3.5. Zeleni vodik

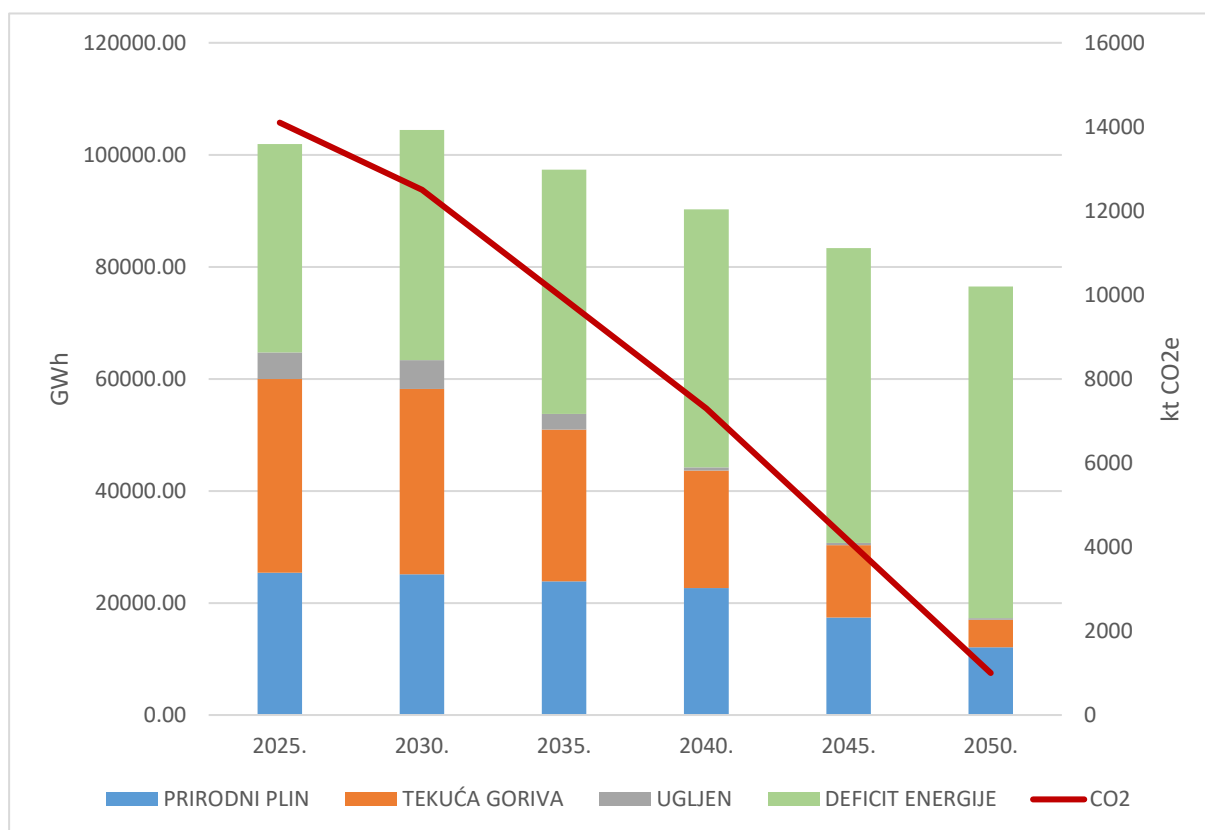
Iz poglavlja 2., iz Sn scenarija, prikazan je sustav potrošnje ukupne i neposredne energije, te koliko količinski će se fosilnog goriva trošiti u pojedinim sektorima do 2050. godine. Osim korištenja OIE, prvenstveno električne energije proizvedene iz sunnčanih i vjetroelektrana te hidroelektrana, za postizanje klimatske neutralnosti, značajnu ulogu ima zeleni vodik. Iz tablice 1. pokazali smo kolika će potrebna energije (u GWh) biti u RH kroz godine sve do 2050. Ukoliko bi svu deficitnu energiju iskoristili na način da ju proizvedeno iz zelenog vodika, preko pretvorbe $1 \text{ GWh} = 3\,600\,000 \text{ MJ}$ i 120 MJ/kg (donja ogrjevna vrijednost vodika), dobivamo podatke prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Zeleni vodik za zadovoljavanje deficitne energije RH

	DEFICIT ENERGIJE	ZELENI VODIK
GODINA	GWh	kt
2025.	37209,02	1116,27
2030.	41098,09	1232,94
2035.	43581,10	1307,43
2040.	46064,10	1381,92
2045.	52614,70	1578,44
2050.	59165,30	1774,96

Iz priložene tablice vidimo kako se iz godine u godinu potrebna količina zelenog vodika povećava što je i razumljivo iz razloga što se očekuje da će potrebna energija RH rasti, a udio proizvedene energije iz fosilnih goriva će padati, stoga će sami deficit energije, koju zeleni vodik mora pokriti, biti veći.

Na slici 13. prikazane su projicirane energije dobivene fosilnim gorivima zajedno s deficitom energije u GWh, čijom sumom dobijemo ukupnu potrebnu energiju za zadovoljavanje potreba RH, u periodu od 2025. do 2050. godine. Ukoliko bismo deficitnu energiju zamijenili proizvedenom energijom iz OIE (u konkretnom primjeru je zeleni vodik), smanjenjem korištenja fosilnih goriva, smanjivali bismo i emitirane emisije CO₂.



Slika 13. Energenti za ukupnu potrebnu energiju RH

Tablicom 8. prikazano je koliko kilotona zelenog vodika bi nam bilo potrebno ukoliko bi s njime pokrili energiju proizvedenu iz fosilnih goriva, te na kraju, iz tablice 9. možemo vidjeti koliko ukupno zelenog vodika bi nam bilo potrebno ukoliko bi ukupnu potrebnu energiju (deficitna + fosilna goriva) zamijenili koristeći vodik.

Tablica 8. Zeleni vodik za zadovoljavanje energije dobivene fosilnim gorivom RH

GODINA	PROIZVEDENA ENERGIJA IZ FOSILNIH GORIVA (GWh)				ZELENI VODIK
	PRIRODNI PLIN	TEKUĆA GORIVA	UGLJEN	UKUPNO	kt
2025.	25409,22	34564,94	4769,46	64743,63	1942,31
2030.	25116,15	33076,88	5177,68	63370,71	1901,12
2035.	23881,04	27041,49	2853,42	53775,96	1613,28
2040.	22645,94	21006,11	529,17	44181,21	1325,44
2045.	17380,45	12956,98	405,89	30743,32	922,30
2050.	12114,97	4907,86	282,61	17305,44	519,16

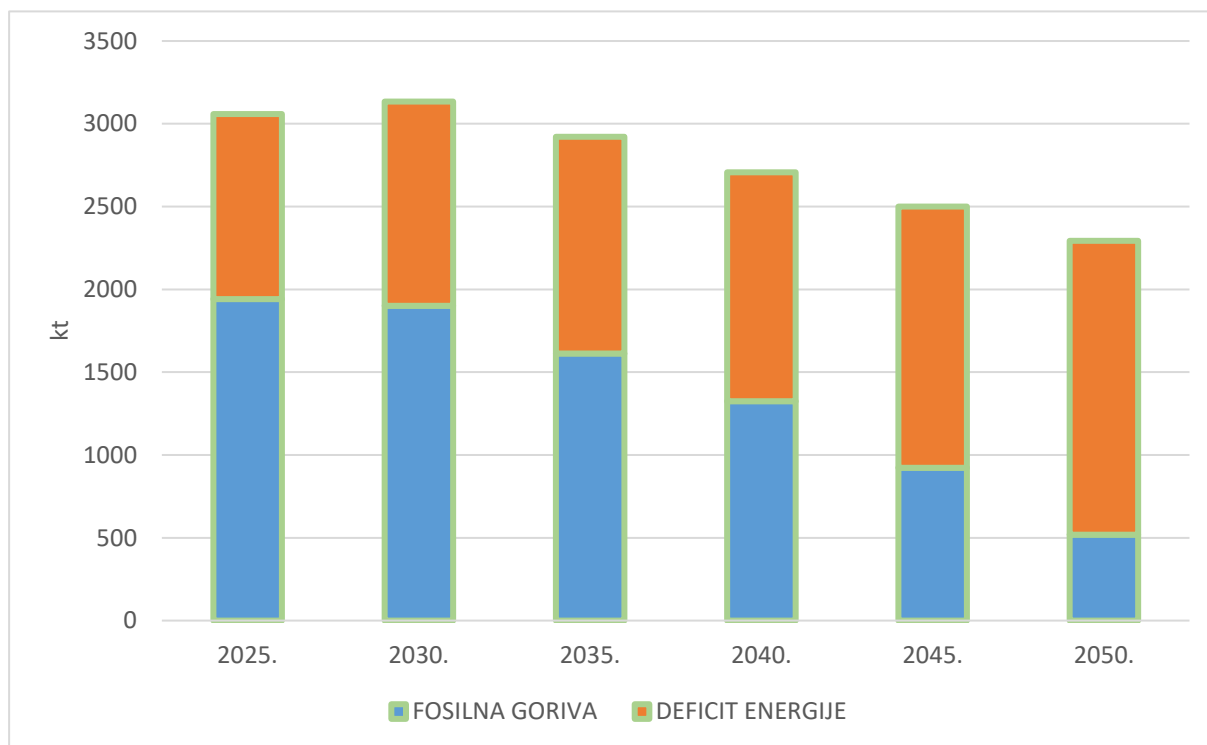
Tablica 9. Zeleni vodik za zadovoljavanje ukupne potrebne energije RH

GODINA	UKUPNA ENERGIJA	ZELENI VODIK
	GWh	kt
2025.	101952,65	3058,58
2030.	104468,80	3134,06
2035.	97357,06	2920,71
2040.	90245,31	2707,36
2045.	83358,03	2500,74
2050.	76470,74	2294,12

4. KLIMATSKA NEUTRALNOST RH

4.1. Potrebna električna energija

U prijašnjim poglavljima pokazano je koliko količinski zelenog vodika je potrebno za zadovoljavanje naših potreba, odnosno zamjene fosilnih goriva, nadoknađivanjem deficita energije i njihova ukupna suma (slika 14.).

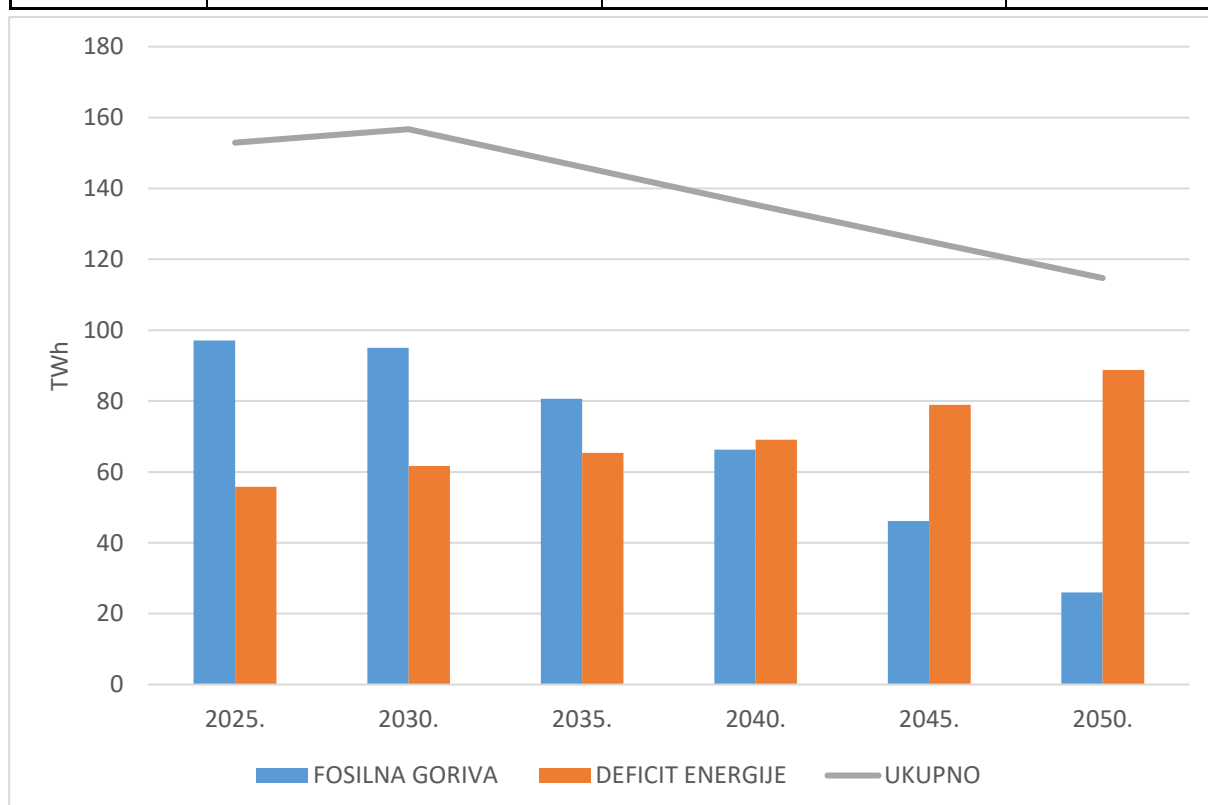


Slika 14. Potrebne količine zelenog vodika

U poglavlju 3.2 spomenut je proces elektrolize vode kojim proizvodimo zeleni vodik uz korištenje OIE. Za 1 kg proizvedenog vodika, uz elektrolizatore učinkovitosti od 70%, potrebna električna energija iznosi 50 kWh. Uzimajući takvu pretpostavku, u tablici 10. izračunato je koliko TWh električne energije je potrebno da se zadovolji, u periodu od 2025. do 2050. godine, potreba za proizvedenu količinu zelenog vodika.

Tablica 10. Potrebna količina energije za proizvodnju zelenog vodika

ELEKTRIČNA ENERGIJA ZA ELEKTROLIZU (TWh)			
GODINA	FOSILNA GORIVA	DEFICIT ENERGIJE	UKUPNO
2025.	97,1155	55,8135	152,929
2030.	95,056	61,647	156,703
2035.	80,664	65,3715	146,0355
2040.	66,272	69,096	135,368
2045.	46,115	78,922	125,037
2050.	25,958	88,748	114,706



Iz priloženog vidimo kako se očekuje da će, u periodu od 2025. do 2040. godine, veća potreba za električnom energijom biti za proizvodnjom zelenog vodika radi zamjene energije dobivene fosilnim gorivima, dok od 2040. veće potrebe će biti za deficitnu energiju. Osim toga, očekuje se da će ukupna proizvedena električna energija biti najveća 2030. godine i iznositi će oko 157 TWh, te će postupno padati.

4.2. Potrebni instalirani kapaciteti

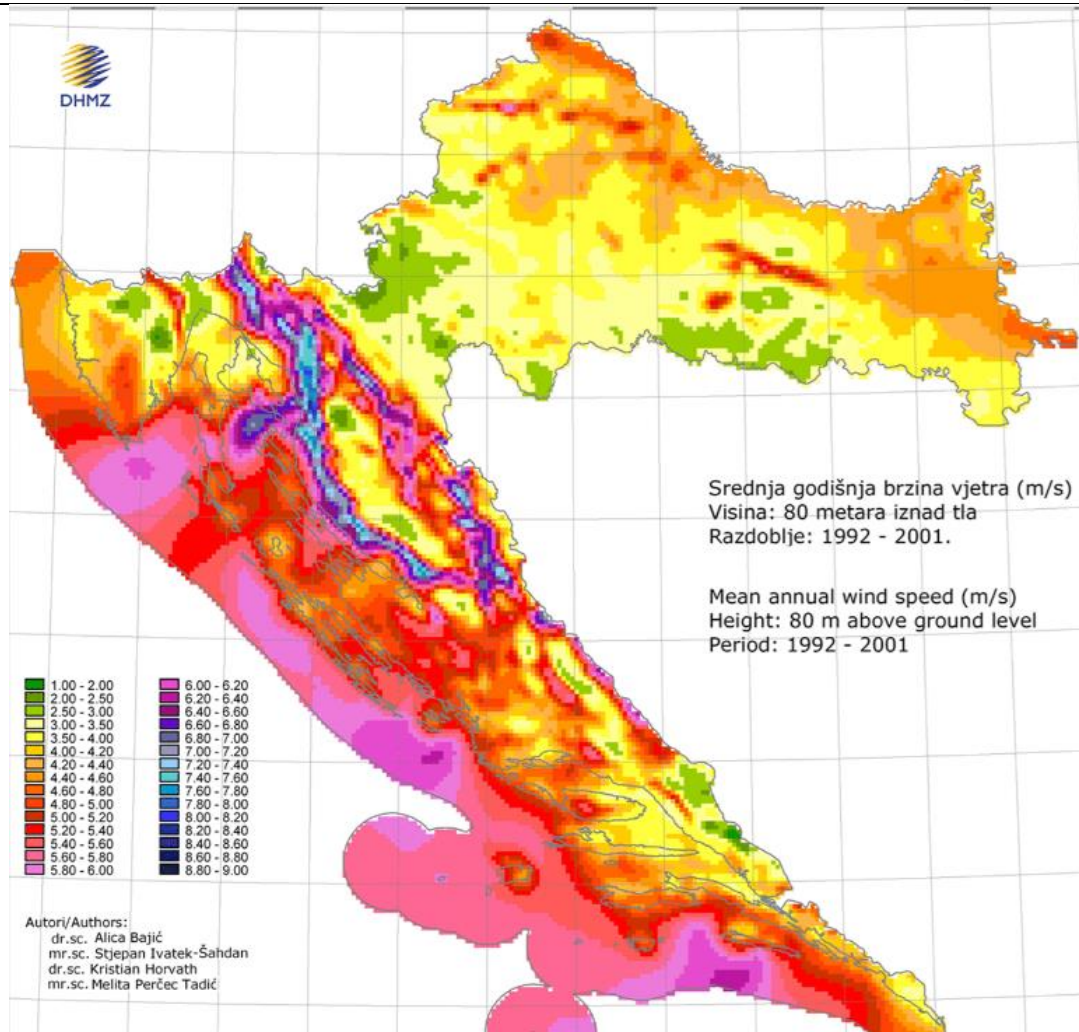
Energija vjetra

Potrebne količine proizvedene električne energije prikazane iz prijašnje tablice 10., dobivat ćemo isključivo preko OIE, konkretno iz energije vjetra i Sunca (slika 15).



Slika 15. Proizvodnja električne energije iz OIE [38]

RH svojom lokacijom i položajem u Europi ima jedno od najpovoljnijih uvjeta za proizvodnju električne energije iz energije vjetra i Sunca. Slika 16. prikazuje brzine vjetra u RH na visini od 80 m, gdje vidimo sva potencijalna mjesta za izgradnju vjetroturbina.



Slika 16. Energija vjetra u RH [14]

Osim kopna, veliki potencijal za proizvodnju električne energije se nalazi u sjevernom Jadranu, čiji bi doprinos bio značajan u proizvodnji električne energije preko offshore vjetroelektrana. Sjeverni Jadran ima vrlo dobru dubinu mora (ne veću od 60 m dubine) i vrlo povoljan vjetar, gdje vjetroturbine mogu biti fiksno postavljene. Jedan od mogućih rješenja predstavlja sustav prikazan na slici 17.



Slika 17. Offshore vjetroelektrana s onsite proizvodnjom H₂ [37]

U tablici 12. prikazani su po godinama podaci koliko električne energije moramo proizvesti da bi zadovoljili ukupno proizvodnju zelenog vodika. Ukoliko bi svu potrebnu električnu energiju proizvodili iz vjetroelektrana, bez pomoći energije proizvedene iz bilo kojih drugih OIE, dobili bi iznose snaga prikazane u tablici 11.

Prikazani podaci izračunati su temeljem sljedećih pretpostavki i formule:

Proizvedena energija =

Snaga vjetroturbine x 365 dana x 24 sata x faktor kapaciteta ^[15]

Faktor kapaciteta predstavlja godišnji postotak učinkovitosti proizvedene električne energije od ukupno instalirane snage. Kako bi bolje razumjeli uzmimo sljedeći primjer: Vjetroelektrana ukupne snage 2 MW, s faktorom kapaciteta 100% učinkovitosti podrazumijeva rad elektrane 24 sata, svakog dan u godini na optimalnom vjetru, te njena proizvedena električna energija iznosi 17 520 MWh [15].

Naravno, ovakva učinkovitost postoji samo u teoriji, stoga su znanstvenici istraživanjima odredili koeficijent, u ovisnosti o lokaciji, brzini i učestalosti vjetra i drugih parametara, koji za područje Europe iznosi 22%. Tablica 11. prikazuje dio instaliranih postojećih vjetroelektrana u RH, gdje je za svaku vjetroelektranu izračunat njen faktor kapaciteta.

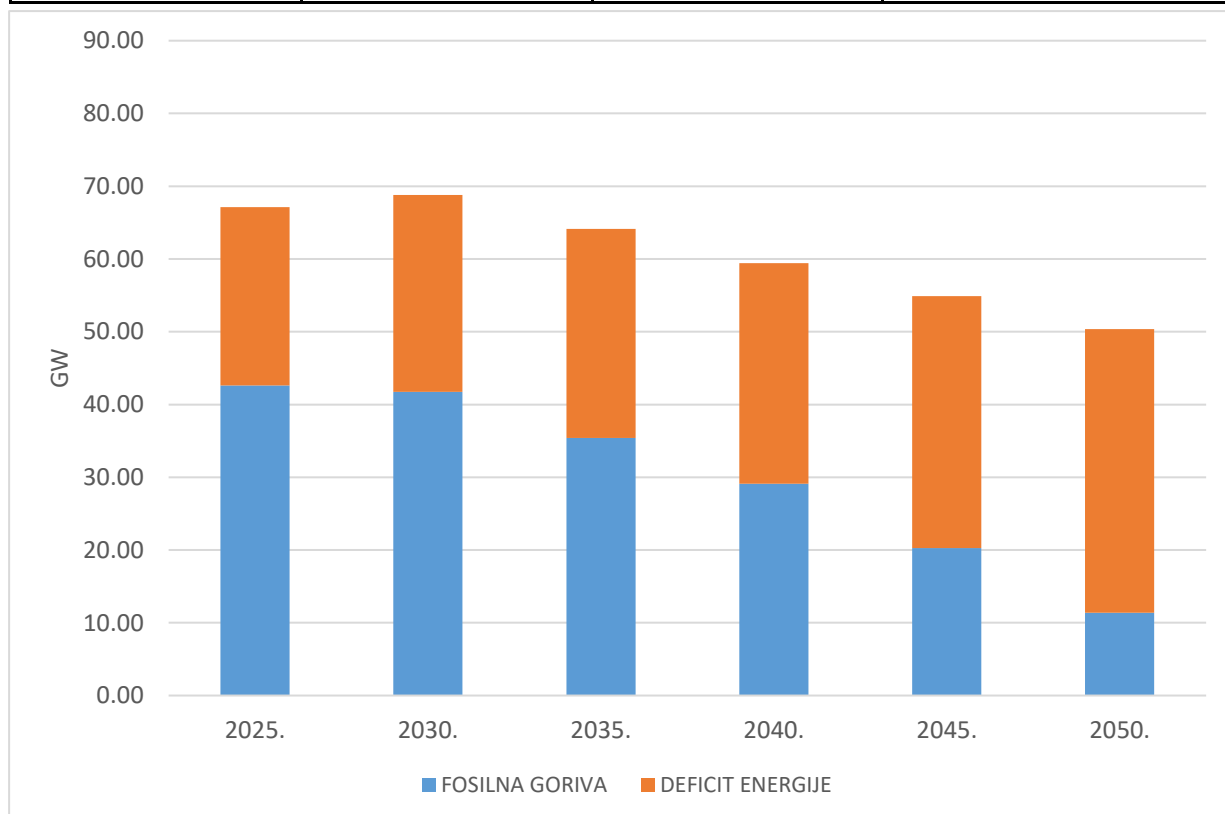
Tablica 11. Vjetroelektrane u RH [28]

Vjetroelektrana	Instalirana snaga (MW)	Godišnja proizvodnja (GWh)	Vjetroturbine i modeli	Faktor kapaciteta
VE Poštak	44,2	100	13 × SWT 108 – 3,4 MW	0,258
VE Danilo	43,7	100	19 × Enercon E-82 – 2,3 MW	0,258
VE Vrataruša	42	125	14 × Vestas V90 – 3 MW	0,323
VE Zelengrad	42	110	14 × Vestas V90 – 3 MW	0,284
VE Ogorje	42	100	14 × Vestas V112 – 3 MW	0,258
VE Kamensko-Voštane	40	114	14 × Siemens SWT-3.0-101 – 3 MW	0,294
VE Bruška	36,8	122	16 × Siemens SWT-93 – 2,3 MW	0,315
VE Ponikve	36,8	122	16 × Enercon E-70 – 2,3 MW	0,315
VE Rudine	34,2	85	12 × GE Energy 2,85-103 – 2,85 MW	0,220
VE Katuni	34,2	95	12 × GE Energy 2,85-103 – 2,85 MW	0,245
VE Jelinak	30	81	20 × Acciona AW 82/1500 – 1,5 MW	0,209
VE Glunča	20,7	53	9 × Enercon E-82 – 2,3 MW	0,137
VE Jasenice	11,5	44	5 × Enercon E-70 – 2,3 MW	0,114

Faktor kapaciteta pojedinih vjetroelektrana u RH varira između 11 i 32%, te je za proračun uzet faktor kapaciteta u iznosu od 26% (VE Ogorje).

Tablica 12. Ukupna snaga vjetroelektrana

SNAGA VJETROELEKTRANA, GW			
GODINA	FOSILNA GORIVA	DEFICIT ENERGIJE	UKUPNO
2025.	42,64	24,51	67,14
2030.	41,74	27,07	68,80
2035.	35,42	28,70	64,12
2040.	29,10	30,34	59,43
2045.	20,25	34,65	54,90
2050.	11,40	38,97	50,36



Iz priloženog vidimo kako bi za zadovoljavanje svih naših potreba, do 2050. godine, bilo potrebno instalirati vjetroelektrane ukupne snage 50 GW iz kojih bi proizvodili električnu energiju, potrebnu za proizvodnju zelenog vodika. Smanjenjem gubitaka nastalih interferencijom između vjetroturbina, vjetroelektrane zahtijevaju 0,1 km² površine zemlje, bez zapreka po 1 MW nominalnog kapaciteta, što znači da za vjetroelektranu snage 200 MW potrebna površina iznosi 20 km² [29]. Za izračun i prikaz tablice 13., uzete su Vestasove V112 turbine, gdje jedna vjetroturbina ima izlaznu snagu 3 MW. Osim potrebne ukupne površine, prikazan je ukupan broj instaliranih vjetroturbina.

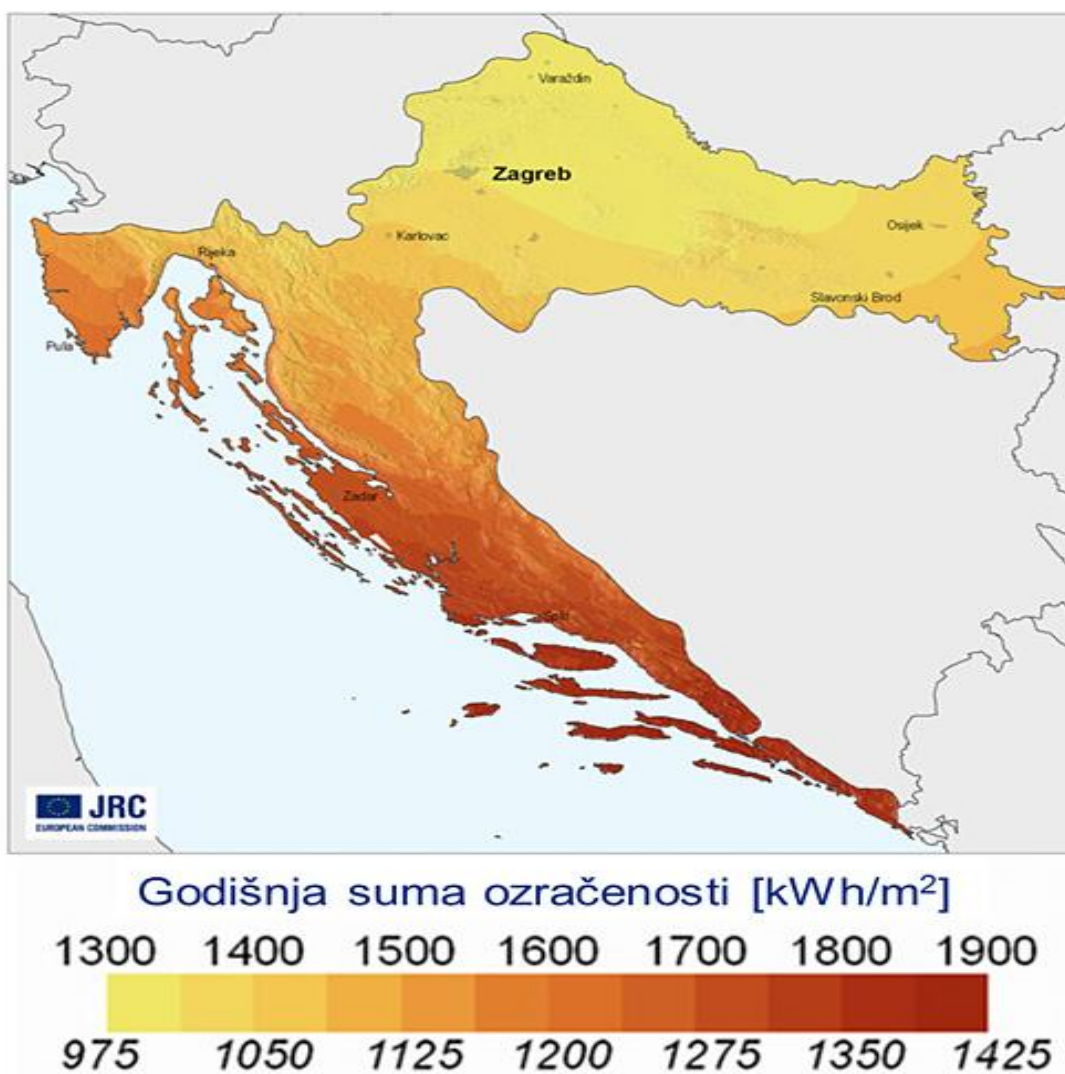
Tablica 13. Potrebna površina za vjetroelektrane

GODINA	UKUPNA SNAGA VJETROELEKTRANA (GW)	POTREBNA POVRŠINA (km ²)	POTREBAN BROJ VESTAS V112
2025.	67,14	6714	22382
2030.	68,80	6880	22934
2035.	64,12	6412	21373
2040.	59,43	5943	19811
2045.	54,90	5490	18300
2050.	50,36	5036	16788

Ukoliko bi htjeli u potpunosti dobivati svu potrebnu energiju iz vjetra do 2050. godine, ukupna potrebna površina iznosi oko 5 000 km², što odgovara površini Ličko-senjske županije i čini 9% ukupne površine RH, a potreban broj instaliranih Vestas V112 vjetroturbina je 16 788.

Energija Sunca

Na slici 18. prikazana je godišnja suma ozračenosti RH, gdje vidimo kako cijeli Jadran ima vrlo povoljnu ozračenost. Cilj EU je potaknuti, na lokalnoj razini, proizvodnju električne energije preko sunčanih elektrana, gdje bi svaka jedinica zadovoljavala svoje vlastite potrebe i bila energetske neovisna, a eventualne viškove vraćala u mrežu ili ih spremala u sustav baterija i/ili vodika.



Slika 18. Godišnja suma ozračenosti RH [16]

Osim lokalne proizvodnje električne energije preko fotonaponskih (FN) modula, glavnu ulogu bi imale manje sunčane elektrane duž cijelog Jadrana, ali i u ostalim dijelovima RH (tablica 14.).

Tablica 14. Sunčane elektrane u RH [36]

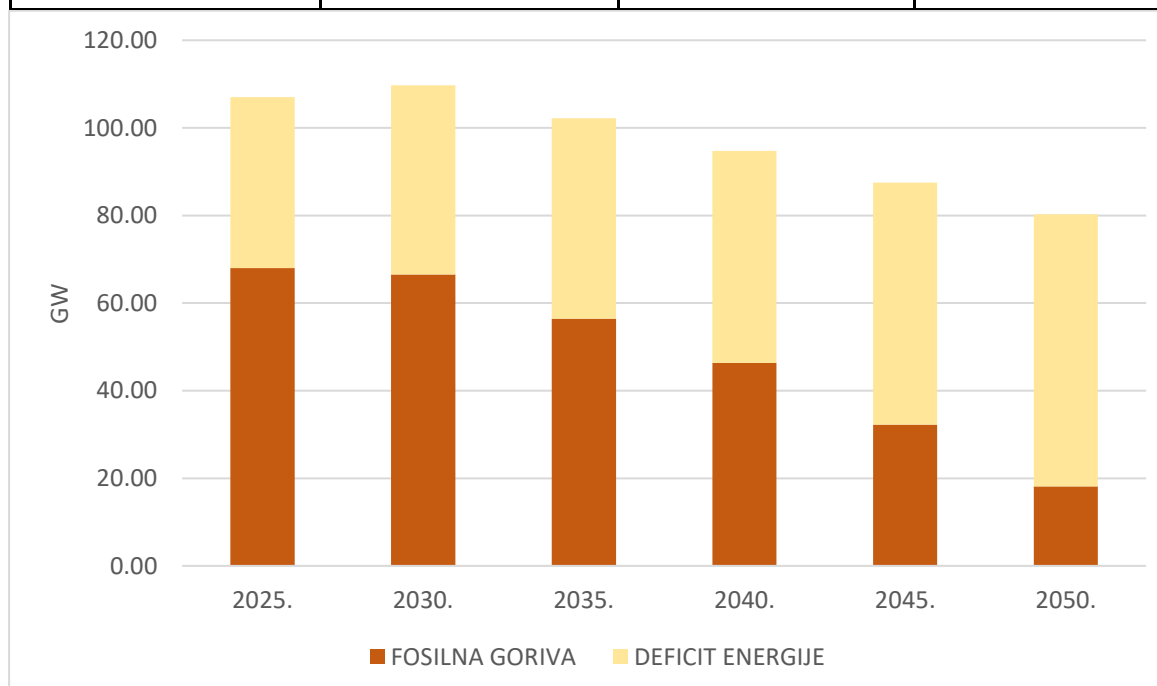
Sunčana elektrana	Instalirana snaga (MWp)	Godišnja proizvodnja (GWh)	FN moduli	Broj instaliranih FN modula	Površina (m ²)
SE Kanfanar 1	1	1,2	235 Wp	4256	21000
SE Orahovica 1	0,5	0,6	250 Wp	2000	15000
SE Petrokov	0,4	0,4	200 Wp	2000	3000
SE Vis	3,5	5	340 Wp	11200	55000

Najnovija sunčana elektrana nalazi se na otoku Visu, instalirane snage 3,5 MW, s pretpostavkom da će se godišnje proizvoditi oko 5 GWh. Takva sunčana elektrana zauzima površinu od 55 000 m² i opremljena je s 11 200 FN modula pojedinačne snage 340 Wp.

Temeljem te pretpostavke, u tablici 15. prikazana je potrebna ukupna snaga FN modula, ukoliko bi svu električnu energiju, potrebnu za proizvodnju zelenog vodika, proizvodili iz energije Sunca, bez pomoći električne energije proizvedene iz drugih oblika OIE.

Tablica 15. Ukupna snaga FN modula

SNAGA FN MODULA (GW)			
GODINA	FOSILNA GORIVA	DEFICIT ENERGIJE	UKUPNO
2025.	67,98	39,07	107,05
2030.	66,54	43,15	109,69
2035.	56,46	45,76	102,22
2040.	46,39	48,37	94,76
2045.	32,28	55,25	87,53
2050.	18,17	62,12	80,29



U tablici 16., u periodu od 2025. do 2050. godine, prikazana je ukupna potrebna površina i broj ukupno instaliranih FN modula izlazne snage 340 Wp, ukoliko bi htjeli u potpunosti dobivati svu potrebnu energiju iz Sunca do 2050. godine.

Tablica 16. Potrebna površina za sunčane elektrane

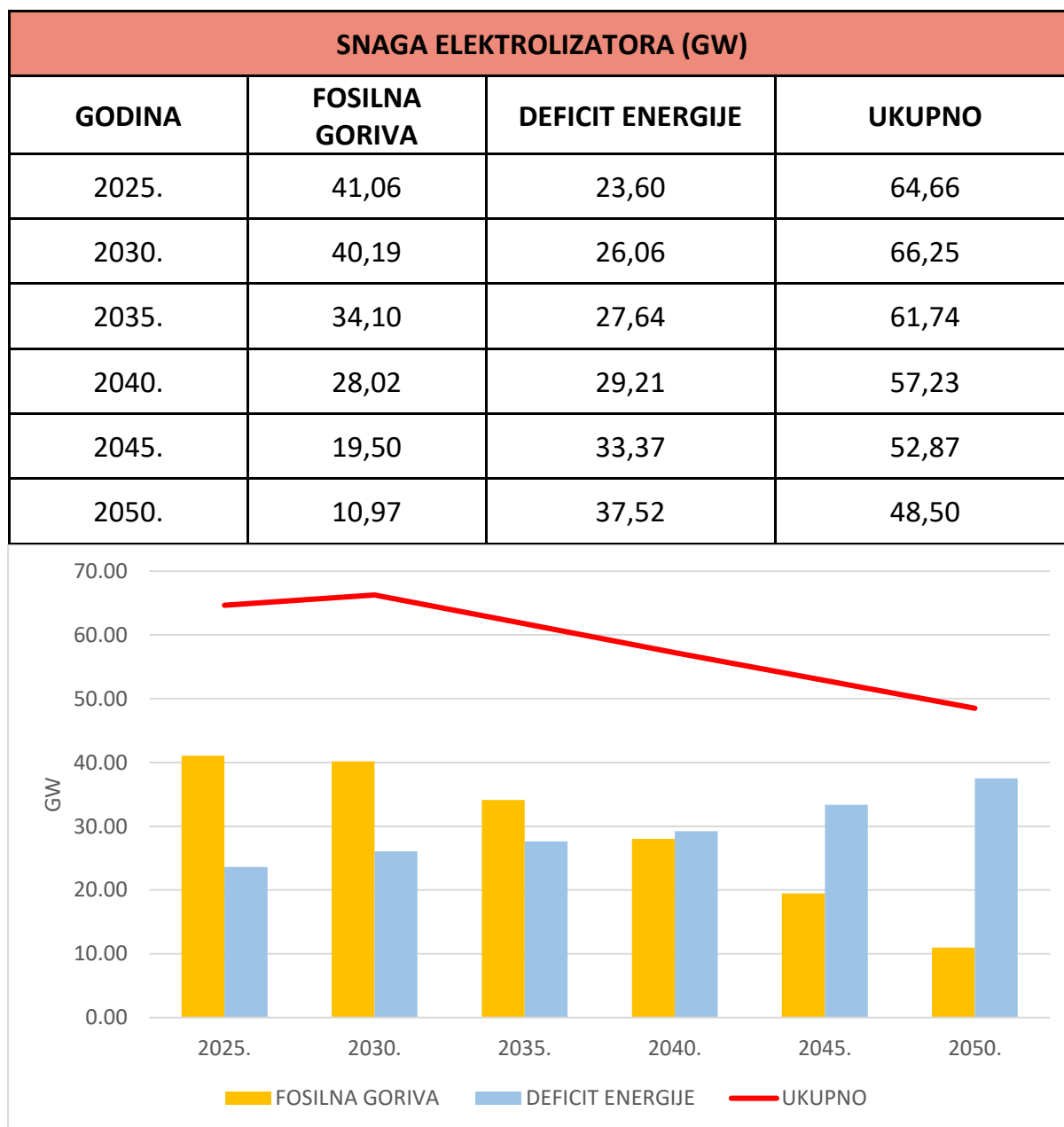
GODINA	SNAGA FN MODULA (GW)	POTREBAN BROJ MODULA SNAGE 340 Wp	POVRŠINA (km ²)
2025.	107,05	342560960	1682
2030.	109,69	351014720	1724
2035.	102,22	327119520	1606
2040.	94,76	303224320	1489
2045.	87,53	280082880	1375
2050.	80,29	256941440	1262

Iz priloženog vidmo kako bi do 2050. godine, za ukupno instaliranu snagu sunčanih elektrana od 80,29 GW, bilo potrebno oko 257 000 000 FN modula izlazne snage 340 Wp i njihova potrebna površina bi bila 1 262 km², što odgovara 22 940 sunčanih elektrana Vis, odnosno 2,3 % ukupne površine RH.

Elektrolizator

Uz proračun snage vjetroturbina i FN modula, potrebno je odrediti ukupnu snagu instaliranih elektrolizatora. U tablici 17. prikazani su podaci ukupne potrebne instalirane snage elektrolizatora, u periodu od 2025. do 2050. godine, kojom bi zadovoljili ukupnu potrebnu proizvodnju zelenog vodika.

Tablica 17. Ukupna snaga elektrolizatora

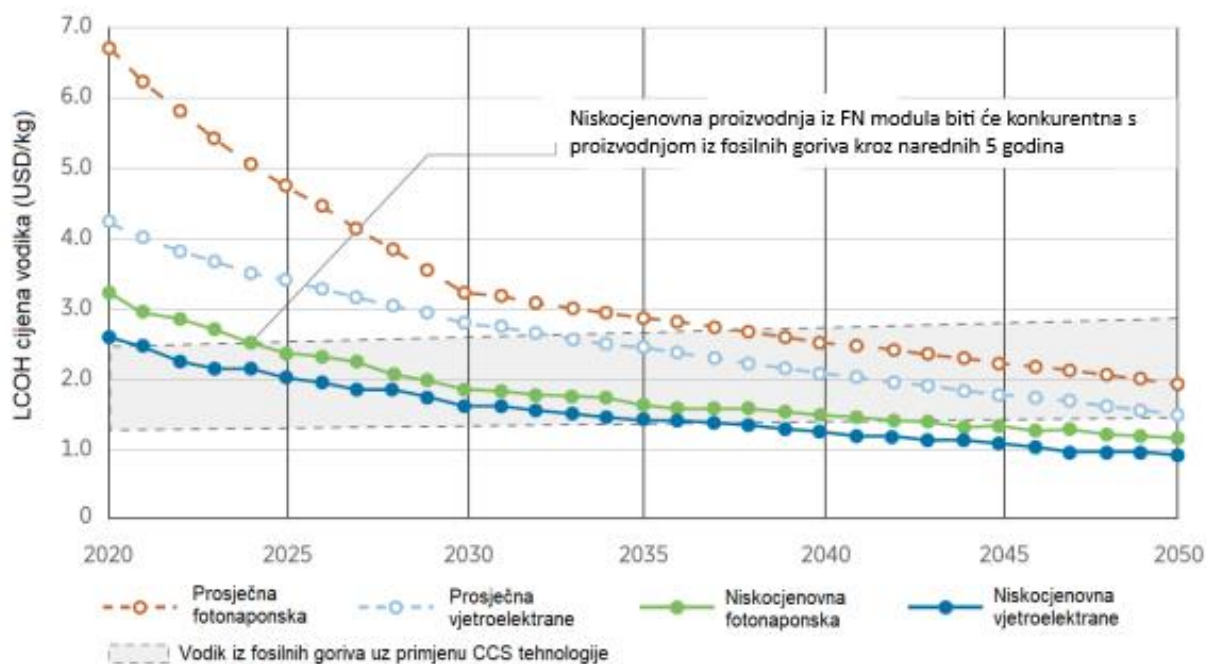


Temeljem sljedećih pretpostavki se vršio proračun [17]:

- 1 MW elektrolizatora (učinkovitosti 70%) za 1 sat proizvede 18 kg zelenog vodika
- potrebna električna energija će se dobivati iz kombinacije sunčanih i vjetroelektrana gdje se očekivani rad elektrolizatora procjenjuje na 2 628 sati godišnje (30% u godini)

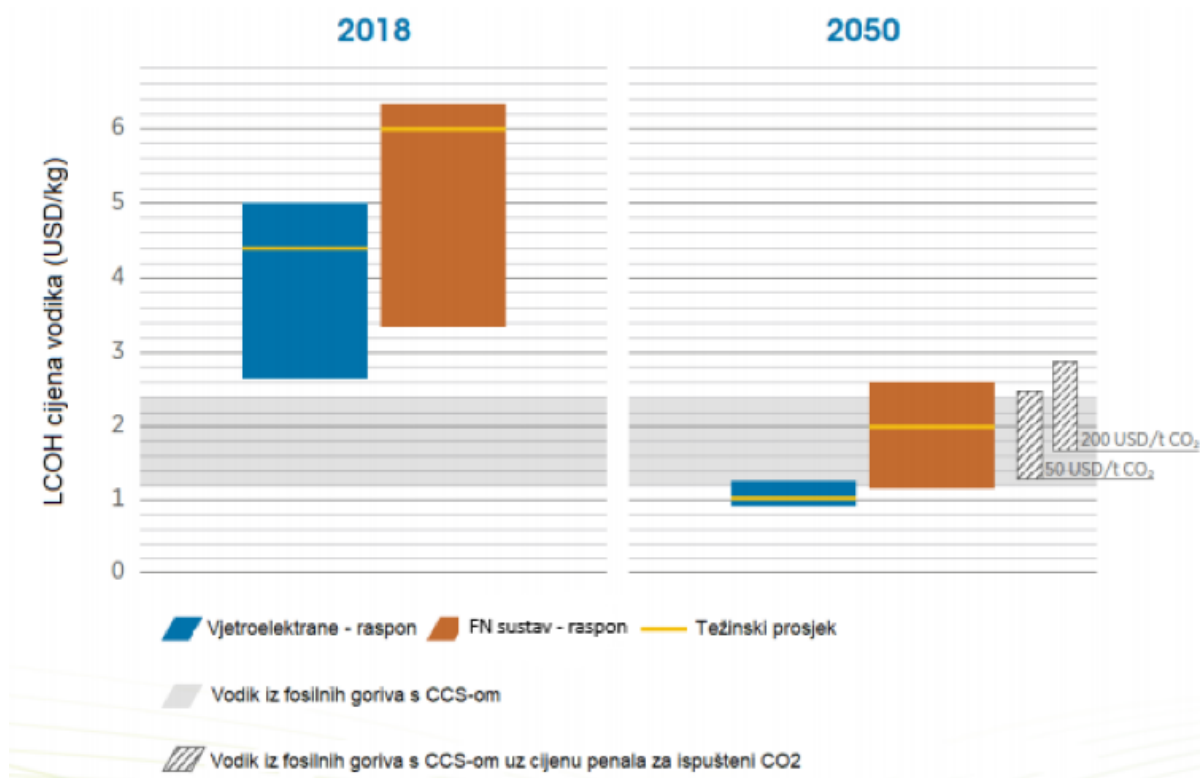
4.3. Ekonomski parametri za proizvodnju zelenog vodika

Slika 19. prikazuje predviđenu kretanju cijena proizvodnje vodika u periodu od 2020. do 2050. godine



Slika 19. Kretanje cijene proizvodnje vodika [30]

Iz priložene slike vidimo kako se očekuje da će energija za proizvodnju vodika, dobivena niskom cijenom iz FN modula i niskom cijenom iz vjetroturbina, sustići energiju dobivenu iz fosilnih goriva kroz narednih 5 godina, dok se 2040. očekuje da će cijena proizvodnje vodika iz OIE biti najjeftinija. Na slici 20. prikazan je raspon očekivane cijene vodika po kilogramu u ovisnosti o načinu proizvedene električne energije.



Slika 20. LCOH (eng. *Levelized cost of hydrogen*) [30]

Cijena zelenog vodika iz OIE se kreće između 4 – 7 USD / kg, dok se 2050. očekuje na oko 1 USD / kg proizvedena samo korištenjem OIE.

Ukupna instalirana snaga u svijetu, do 2050. godine, se procjenjuje na 1700 GW. Današnja cijena elektrolizatora iznosi 849 USD / kW, a daljnji razvoj i ulaganja, kao i povećanje radnih sati elektrolizatora, dovest će do pada cijene na očekivanih 200 USD / kW do 2050. godine [30].

Cijena energije dobivene iz OIE (LCOE, eng. *levelized cost of energy*) jedan je od najbitnijih ekonomskih parametra za proizvodnju zelenog vodika. LCOE za vjetroelektrane i sunčane elektrane se razlikuju i dosta ovise od cijene na lokalnom tržištu rada do dostupnosti samog energetskeg resursa. LCOE za onshore vjetroelektrane varira, gdje LCOE za vjetroelektrane postavljene na lokaciji s najboljom kvalitetom vjetra može iznositi 28 USD / MWh, dok se za najgori slučaj uzima LCOE od 63 USD / MWh. LCOE za FN modul, učinkovitosti 18%, danas je između 60 – 80 USD / MWh. Daljnim napretkom tehnologije vjetroturbina, razvojem modernijeg

sustava određivanja najpovoljnijih resursa vjetra i Sunca (povećanje faktora kapaciteta), kao i povećanja učinkovitosti FN modula s 18% na 27%, procjenjuje se da će 2050. godine iznositi (tablica 18.): [30]

- Cijena elektrolizatora: 200 USD / kW
- LCOE vjetroturbine: 23 USD / MWh, faktora učinkovitosti 45%
- LCOE vjetroturbine: 11 USD / MWh, faktora učinkovitosti 60%
- LCOE FN modula: 22 USD / MWh, faktora učinkovitosti 18%
- LCOE FN modula: 4,5 USD / MWh, faktora učinkovitosti 27%

Tablica 18. Predviđeni LOCE vjetroelektrana i sunčanih elektrana 2050. godine [31]

GODINA	VJETROELEKTRANE				SUNČANE ELEKTRANE			
	PROSJEČNI SLUČAJ		NAJBOLJI SLUČAJ		PROSJEČNI SLUČAJ		NAJBOLJI SLUČAJ	
	η	LCOE (USD / MWh)	η	LCOE (USD / MWh)	η	LCOE (USD / MWh)	η	LCOE (USD / MWh)
2018.	0,34	63	0,47	28	0,18	80	0,27	18
2050.	0,45	23	0,6	11		22		4,5

Uz navedene cijene, potrebno je uzeti u obzir i početnu investicijsku cijenu vjetroturbina i FN modula, kao i njihovu cijenu održavanja. Srednja cijena izgradnje offshore vjetroelektrane u svijetu 2018. godine je iznosila 1210 USD / kW [33]. Danas, iako cijene padaju, trošak kapitala za istu tehnologiju nešto je veći u RH u odnosu na ostatak svijeta, stoga procijenjena vrijednost ukupnog troška izgradnje iznosi 1100 USD / kW. Troškovi održavanja vjetroelektrana u Europi su se kretali uglavnom između 10 i 30 EUR / MWh proizvedene energije, stoga je uzeta vrijednost za RH u iznosu od 18 USD / MWh [33].

Ukupan trošak izgradnje sunčane elektrane u RH se procjenjuje na 700 USD / kWp [32], uz pretpostavljene troškove održavanja u iznosu od 15 USD / MWh (Europa 10 – 18 USD / MWh) [33].

U tablici 19. prikazani su ukupni investicijski troškovi, troškovi održavanja i LCOE za prosječan i najbolji slučaj vjetroelektrana u RH.

Tablica 19. Troškovi vjetroelektrana po godinama

VJETROELEKTRANE							
GODINA	SNAGA (GW)	INVESTICIJSKI TROŠAK (1100 USD / kW)	TROŠKOVI ODRŽAVANJA (18 USD / kW)	PROSJEČNI SLUČAJ		NAJBOLJI SLUČAJ	
				USD / MWh	LCOE	USD / MWh	LCOE
2025.	67,14	73854000000	1208520	63	4229820	28	1879920
2030.	68,8	75680000000	1238400	55	3784000	24	1651200
2035.	64,12	70532000000	1154160	47	3013640	21	1346520
2040.	59,43	65373000000	1069740	39	2317770	18	1069740
2045.	54,9	60390000000	988200	31	1701900	15	823500
2050.	50,36	55396000000	906480	23	1158280	11	553960

U tablici 20. prikazani su ukupni investicijski troškovi, troškovi održavanja i LCOE za prosječan i najbolji slučaj sunčanih elektrana u RH.

Tablica 20. Troškovi sunčanih elektrana po godinama

SUNČANE ELEKTRANE							
GODINA	SNAGA (GW)	INVESTICIJSKI TROŠAK (700 USD / kWp)	TROŠKOVI ODRŽAVANJA (15 USD / kW)	PROSJEČNI SLUČAJ		NAJBOLJI SLUČAJ	
				USD / MWh	LCOE	USD / MWh	LCOE
2025.	107,05	74935000000	1605750	80	8564000	18	1926900
2030.	109,69	76783000000	1645350	68,4	7502796	15,3	1678257
2035.	102,22	71554000000	1533300	56,8	5806096	12,6	1287972
2040.	94,76	66332000000	1421400	45,2	4283152	9,9	938124
2045.	87,53	61271000000	1312950	33,6	2941008	7,2	630216
2050.	80,29	56203000000	1204350	22	1766380	4,5	361305

Iz priloženih tablica vidimo kako su, usprkos daljnjem napretku i razvitku tehnologija i materijala, početni investicijski troškovi i troškovi održavanja i dalje veliki, čija se ukupna investicija do 2050. godine procjenjuje na 55,4 milijarde USD (vjetroelektrane) i 56,2 milijarde USD (sunčane elektrane). Osim spomenutih vjetroelektrana i sunčanih elektrana, ukoliko se postigne ciljana projekcija 200 USD po kilovatu instalirane snage elektrolizatora, ukupna investicija samih elektrolizatora se procjenjuje na 9,7 milijardi USD. Sumiranjem svih troškova, procjenjuje se ukupni iznos od 65 milijardi USD, ukoliko bi svu proizvedenu električnu energiju dobivali iz

OIE, konkretno ili iz sunčanih ili iz vjetroelektrana te proizvodili zeleni vodik za zadovoljavanje ukupnih potreba RH.

Ovim proračunom hipotetski je prikazano koliko količinski zelenog vodika bi nam bilo potrebno da se zadani Sn scenarij zadovolji i da RH do 2050. godine bude klimatski neutralna. Do 2050. godine, prema realnom scenariju, tehnologija zasnovana na zelenom vodiku se očekuje da će iznositi 5% (2040. godine) i 20% (2050. godine) u industriji, dok se najviše predviđa korištenje u prometu, 2040. godine 22% i 2050. godine 48%.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su podaci koliko RH emitira emisije CO₂ na godišnjoj razini i koliko će, preko projekcije Sn, emitirati do 2050. godine, ukoliko bi težili klimatskoj neutralnosti. Paralelno tome prikazani su podaci potrebne energije RH, koliko energije bi se dobivalo iz fosilnih goriva do 2050. godine i smanjenjem korištenja fosilnih goriva, prikazano je koliki deficit energije ćemo imati. Rješavanje problema deficita energije predstavlja veliki izazov za današnje i buduće inženjere. Glavnu ulogu u rješavanju problema imat će proizvedena energija iz OIE, prvenstveno proizvedena električna energija u sustavima sunčanih elektrana, vjetroelektrana i hidroelektrana. Jedno od rješenja problema deficitne energije i zamjene fosilnih goriva je korištenje zelenog vodika,. Za 1 kg vodika dobijemo isti iznos energije kao što dobijemo za 2,8 kg benzina. Sukladno tome, u drugom dijelu su prikazani podaci, koji bi nam u teoriji trebali, ukoliko bi svu deficitnu energiju i energiju proizvedenu iz fosilnih goriva, u svim sektorima, nadomjestili energijom proizvedenom iz zelenog vodika.

Na kraju, temeljem analize i izračuna potrebnog zelenog vodika, izračunato je koliku snagu FN modula i/ili vjetroturbina moramo instalirati kako bi proizveli potrebnu električnu energiju za proces elektrolize. Proračunata je snaga samih elektrolizatora putem kojih bi proizvodili zeleni vodik, te su određeni ukupni troškovi izgradnje potrebnih sunčanih elektrana, vjetroelektrana i elektrolizatora.

Zeleni vodik ima ogroman potencijal, gdje se daljnjim razvojem novih tehnologija i poticanja investitora na ulaganje u zeleni vodik, uz OIE, nudi mogućnost energetske neovisnosti i klimatske neutralnosti.

LITERATURA

- [1] MULTI SCENARIJ za energetske sektor
- [2] [Izvešće o provedbi politika i mjera_2021](#)
- [3] <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/item/436-vodik-je-gorivo-buducnosti.html>
- [4] https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen_en#eu-hydrogen-strategy
- [5] Strategija energetskeg razvoja RH 2030 s pogledom na 2050.pdf
- [6] https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.html
- [7] <https://pdf.sciencedirectassets.com>
- [8] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [9] Bernard Franković, Claudia Jedriško, Kristian Lenić, Anica Trap – ISTRAŽIVANJA I RAZVOJ TEHNOLOGIJE VODIKA
- [10] Frano Barbir- Vodik i gorivni članci
- [11] <https://hydrogen.hr/en>
- [12] https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e4afa7d-d077-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=37085&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search
- [13] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>
- [14] https://meteo.hr/klima_e.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8
- [15] <https://www.wind-watch.org/faq-output.php>
- [16] <http://www.jadran-oie.com/cd/407/zasto-energija-sunca>
- [17] https://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2020/10/2020_1MWELX_Spec102120_F.pdf

-
- [18] http://www.chem.gla.ac.uk/cronin/media/papers/Chisholm-Chapter_16_2016.pdf?
- [19] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/alkaline-water-electrolysis>
- [20] <https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators>
- [21] <https://pv-magazine-usa.com/2020/03/26/electrolyzer-overview-lowering-the-cost-of-hydrogen-and-distributing-its-productionhydrogen-industry-overview-lowering-the-cost-and-distributing-production/>
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer_electrolyte_membrane_electrolysis
- [23] http://www.uigi.com/h2_conv.html
- [24] <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72740.pdf>
- [25] <http://hybalance.eu/wp-content/uploads/2019/10/Large-scale-PEM-electrolysis.pdf>
- [26] <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3157/hydrogen-production-from-renewables/>
- [27] <https://www.waterpoint.pl/en/News/water-electrolysis/>
- [28] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj
- [29] https://hr.wikipedia.org/wiki/Utjecaj_vjetroelektrana_na_okolis
- [30] <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogenfrom-renewable-power>
- [31] <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
- [32] <https://www.hgk.hr/documents/171120bukovac5a12f75dc9d12.pdf>
- [33] IRENA (2019), Renewable Power Generation Costs in 2018, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [34] <https://www.cell.com/cell-reports-physical-science>
- [35] https://theicct.org/sites/default/files/publications/final_icct2020_assessment_of%20hydrogen_production_costs%20v2.pdf

-
- [36] <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/neintegrirane-suncane-elektrane/3422>
- [37] <https://www.cleanenergywire.org/news/massive-offshore-wind-expansion-could-solve-german-hydrogen-strategy-gridlock>
- [38] <https://www.evwind.es/2020/01/21/hydrogen-from-wind-energy-and-solar-power-the-future/73170>