

# Implementacija P2G tehnologija u model elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske korištenjem softverskih alata EnergyPLAN i Python

---

Aščić, David

Master's thesis / Diplomski rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:413200>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

IMPLEMENTACIJA *P2G* TEHNOLOGIJA U MODEL  
ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE  
KORIŠTENJEM SOFTVERSKIH ALATA ENERGYPLAN I PYTHON

Diplomski rad

David Aščić

N260

Zagreb, 16. studeni 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

IMPLEMENTACIJA P2G TEHNOLOGIJA U MODEL ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA  
REPUBLIKE HRVATSKE KORIŠTENJEM SOFTVERSKIH ALATA ENERGYPLAN I  
PYTHON  
DAVID AŠČIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Ovaj rad predstavlja studiju hrvatskog elektroenergetskog sustava te modeliranje istog uzimajući u obzir povećanje instaliranih kapaciteta odobalnih vjetroelektrana. Model je izrađen kroz nekoliko koraka te je analizirano četiri scenarija s naglaskom na smanjenje kritičnog viška proizvedene električne energije. Drugim riječima prikazana su moguća rješenja skladištenja viškova električne energije koristeći tehnologije kemijske konverzije (P2G). Korištena su dva softvera kako bi se opisao mogući modeli sustava, jedan od njih je EnergyPLAN koji je korišten za izradu prvog, baznog slučaja za 2016. godinu te slučaja u kojem se povećava kapacitet obnovljivih izvora energije (OIE). Izrađene su zatim krivulje koje opisuju povećanje viška proizvodnje električne energije koje su zatim služile kao ulazni podaci za izradu trećeg i četvrtog modela koji su obrađeni u interpreterskom programu *Python*. U njima su implementirane tehnologije za kemijsku konverziju koje uključuju tehnologiju elektrolize i metanacije. Na taj su se način viškovi skladištili u obliku kemijske energije plinova vodika i metana. Ovaj rad prikazuje potencijal hrvatskog energetskog sustava te okvire u kojima je moguće djelovati kako bi se postigao veći udio OIE u energetskom miks, smanjile emisije ugljikovog (IV) oksida istovremeno smanjujući količinu uvezene električne energije ili prirodnog plina, tj povećavajući energetska neovisnost Republike Hrvatske.

Ključne riječi: EnergyPLAN, kemijska konverzija (P2G), vjetroenergija, OIE, Hrvatska

Diplomski rad sadrži: 47stranica, 10 tablica, 36 slika i 35 referenci

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Doc.dr.sc. Luka Perković, docent RGNF

Ocjenjivači: Doc.dr.sc. Luka Perković, docent RGNF  
Izv.prof.dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar, izv. profesor RGNF  
Izv.prof.dr.sc. Domagoj Vulin, izv. profesor RGNF

Datum obrane: 16. studeni 2018.

University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology  
and Petroleum Engineering

Graduate Engineer of  
Petroleum Engineering Thesis

IMPLEMENTATION OF P2G TECHNOLOGY INTO A MODEL OF THE ELECTRICITY  
SYSTEM OF THE REPUBLIC OF CROATIA BY USING SOFTWARE ENERGYPLAN AND  
PYTHON  
DAVID AŠČIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Institute of Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

This paper presents a study of the Croatian power system and modeling it, taking into account the increase of installed capacity of renewable energy sources (RES). The model was developed in several steps and four scenarios were analyzed with a focus on reducing the critical surplus of electricity produced. In other words, potential solutions for the storage of electricity surpluses are presented using chemical conversion technology (P2G). Two software were used to describe possible system models, one of which was EnergyPLAN used to produce the first, basic case for 2016, and a case where OIE capacity increased. Curves have been made describing the increase in surplus electricity production, which then served as the input data for the third and fourth models that were processed in the Python interpreter. In these scenarios chemical conversion technologies are implemented, they include electrolysis and methanation. This way, surpluses were stored in the form of chemical energy sources of hydrogen and methane gases. This paper presents the potential of the Croatian energy system and the framework in which it is possible to achieve a higher share of RES in the energy mix, reduce the emissions of carbon (IV) oxide while simultaneously reducing the amount of imported electricity or natural gas.

Keywords: EnergyPLAN, P2G, wind power, RES, Croatia

Thesis contains: 47 pages, 10 tables, 36 figures and 35 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: doc.dr.sc. Luka Perković, profesor RGNF

Reviewers: Doc.dr.sc. Luka Perković, docent RGNF  
PhD Daria Karasalihović Sedlar, professor at RGNF  
PhD Domagoj Vulin, professor at RGNF

Date of defense: November 16, 2018.

## Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Zadatak rada	2
2. Programski alat EnergyPLAN	3
2.1 Zašto EnergyPLAN?	4
3. Hipoteza	6
4. Tehnologije kemijske konverzije	9
4.1. Elektroliza	10
4.1.1 Elektroliza lužnate otopine	11
4.1.2. Elektroliza protonski propusnom membranom (engl. PEM electrolysis)	11
4.1.3. Elektroliza alkalno propusnom membranom (engl. Alkaline exchange membrane)	12
4.2 Metanacija	13
5. Elektroenergetski sustav Republike Hrvatske	15
5.1. Energetska situacija u Republici Hrvatskoj	15
5.2 Energetski miks u RH	16
5.3 Proizvodnja električne energije u RH	17
5.3.1. Hidroelektrane	17
5.3.2. Termoelektrane	18
5.3.3. Obnovljivi izvori energije	19
5.3.3.1. vjetroenergija	20
5.3.3.2. solarna energija	22
6. Preliminarni izračun proizvodnje energije	23
6.1. Analiza brzine vjetra	23
6.2. Analiza proizvodnje električne energije elektranom	24
7. Referentni model	27
7.1. Distribucijske krivulje	27
7.1.1. Krivulja potrošnje električne energije	27
7.1.2. Krivulja toplinskog opterećenja	28
7.1.3. Krivulja proizvodnje električne energije vjetroelektranama	29
7.1.4. Krivulja proizvodnje električne energije hidroelektranama	29
7.2. Izrada referentne godine	31
7.2.1. Kartica electricity - demand	31
7.2.2. Kartica heating - demand	32
7.2.3. Kartica supply - electricity only	32
7.2.4. Ekonomski parametri	32
7.2.5. Usporedba modela s energetsom bilancom	34
8. Model elektroenergetskog sustava	35
8.1. Metodologija	35
8.2. OIE scenarij	38
8.3. H <sub>2</sub> i SNG scenariji	41
8.4. Usporedba scenarija	45
9. Zaključak	47

Popis slika:	
Slika 2-1	<i>Sučelje programskog simulatora EnergyPLAN</i> 3
Slika 3-1	<i>Integracija i međudjelovanje izvora energije, energetske mreže i tehnologije</i> 6
Slika 3-3	<i>Predviđanje pada proizvodnje prirodnog plina od 2006. - 2016. godine</i> 7
Slika 3-4	<i>Projekcija proizvodnje nafte i kondenzata do 2050. godine</i> 8
Slika 3-5	<i>Projekcija proizvodnje prirodnog plina do 2050. godine</i> 8
Slika 4-1	<i>Šematski prikaz elektrolize</i> 11
Slika 4-2	<i>Shematski prikaz PEM elektrolize</i> 13
Slika 4-3	<i>Odnos tlaka, temperature i stupnja pretvorbe</i> 15
Slika 4-4	<i>Koncept skladištenja viškova obnovljive energije u obliku energije SNG-a</i> 16
Slika 4-5	<i>Shema dijagrama toka energije u procesnom lancu.</i> 16
Slika 5-1	<i>Proizvodnja primarne energije u Hrvatskoj</i> 18
Slika 5-2	<i>Ukupna potrošnja energije u Hrvatskoj</i> 19
Slika 5-3	<i>Grafički prikaz proizvodnje energije iz hidroelektrana.</i> 20
Slika 5-4	<i>Proizvodnja električne energije iz OIE.</i> 23
Slika 5-5	<i>Porast proizvodnje od 1990. do 2016 godine</i> 23
Slika 5-6	<i>Vjetro potencijal Republike Hrvatske</i> 24
Slika 5-7	<i>Solarni potencijal Hrvatske</i> 26
Slika 6-1	<i>Satni prikaz prosječnih brzina vjetra</i> 27
Slika 6-2	<i>Prosječna proizvodnja električne energije po satima</i> 29
Slika 7-1	<i>Distribucijska krivulja potrošnje električne energije</i> 30
Slika 7-2	<i>Krivulja toplinskog opterećenja</i> 32
Slika 7-3	<i>Krivulja proizvodnje električne energije vjetroelektranama</i> 32
Slika 7-4	<i>Distribucijska krivulja akumulacijskih hidroelektrana za Hrvatsku za 2016. godinu</i> 33
Slika 7-5	<i>Distribucijska krivulja protočnih hidroelektrana za Hrvatsku za 2016. godinu</i> 34
Slika 8-1	<i>Model sustava kada se koristi samo vodik</i> 40
Slika 8-2	<i>Model sustava kada se koriste vodik i metanacija</i> 41
Slika 8-3	<i>Analiza utjecaja povećanja kapaciteta OIE na CEEP</i> 43
Slika 8-4	<i>Ovisnost emisija CO<sub>2</sub> o povećanju OIE.</i> 44
Slika 8-5	<i>Proizvodnja električne energije iz OIE</i> 45
Slika 8-6	<i>Satna raspodjela kritičnog viška proizvodnje električne energije u baznom slučaju</i> 47
Slika 8-7	<i>Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u H<sub>2</sub> scenariju za bazni slučaj</i> 48
Slika 8-8	<i>Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u SNG scenariju za bazni slučaj</i> 48
Slika 8-9	<i>Satna raspodjela kritičnog viška proizvodnje električne energije u slučaju maksimalno analiziranog kapaciteta</i> 49
Slika 8-10	<i>Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u H<sub>2</sub> scenariju za maksimalno analizirani kapacitet</i> 49
Slika 8-11	<i>Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u H<sub>2</sub> scenariju za maksimalno analizirani kapacitet</i> 50
Slika 8-12	<i>Ciljevi dobiveni modeliranjem</i> 50
Slika 8-13	<i>Usporedba modela</i> 51

Popis tablica:

Tablica 5-1 <i>Podaci o proizvodnji i nabavi električne energije</i>	15
Tablica 5-2 <i>Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj</i>	17
Tablica 5-3 <i>Termoelektrane u Republici Hrvatskoj</i>	18
Tablica 5-4 <i>SWOT analiza implementacije vjetroagregata na odobalnim lokacijama</i>	22
Tablica 6-1 <i>Tehnički podaci o vjetroelektrani NREL 5 MW Offshore</i>	24
Tablica 6-2 <i>Varijable proračuna.</i>	25
Tablica 7-1 <i>Podaci o cijenama goriva u € / GJ za 2015</i>	33
Tablica 7-2 <i>Varijabilni troškovi i cijena održavanja, pretpostavka za 2020</i>	33
Tablica 7-3 <i>Investicijski troškovi i vijek trajanja nekih postrojenja za 2015godinu</i>	33
Tablica 7-4 <i>Rezultat referentnog EnergyPLAN modela za 2016..</i>	34

Popis korištenih oznaka i jedinica:

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m <sup>2</sup>	površina kretanja lopatica
C <sub>p</sub>	-	koeficijent pretvorbe (0,4)
v	m/s	brzina vjetra
t	h	vrijeme
ρ	kg/m <sup>3</sup>	gustoća zraka, (1,23 kg/m <sup>3</sup> )
e <sub>CEEPul</sub>	Wh	energija kritičnog viška na ulazu u sustav
e <sub>CEEPiz</sub>	Wh	energija kritičnog viška na izlazu u sustav
e <sub>elz</sub>	Wh	energija na ulazu u sustav elektrolize
e <sub>H2,elz</sub>	Wh	energija na izlazu iz sustava elektrolize
e <sub>H2,s,ul</sub>	Wh	energija vodika na ulazu u sustav skladišta
e <sub>H2,s,iz</sub>	Wh	energija vodika na izlazu iz sustava skladišta
e <sub>H2/SNG</sub>	Wh	energija vodika potrebna za jedan Wh SNG-a
e <sub>el/SNG</sub>	Wh	energija CO <sub>2</sub> potrebna za 1 Wh SNG-a
e <sub>SNG</sub>	Wh	energija sadržana u plinu (SNG) na izlazu iz sustava
e <sub>el</sub>	Wh	energija proizvedena u elektrani na izlazu iz sustava
η <sub>elz</sub>	-	učinkovitost elektrolize
η <sub>seq</sub>	-	učinkovitost sekvenciranja
X <sub>CO2/SNG</sub>	kg	količina CO <sub>2</sub> potrebna za 1 TWh SNG-a
X <sub>H2/SNG</sub>	kg	količina H <sub>2</sub> potrebna za 1 TWh SNG-a
P <sub>SNG</sub>	W	snaga SNG postrojenja
P <sub>el</sub>	W	snaga elektrane



## 1. Uvod

U današnje vrijeme izgradnja novih elektrana teška je odluka. Kako bi se izgradila potrebno je poduzeti niz analiza i mjera kojima se predviđa cijena električne energije, cijena izgradnje, operativni troškovi same elektrane, cijena energenata i još mnogi drugi parametri. Također parametre analize potrebno je proširiti uzimajući u obzir utjecaj elektrane na regionalno tržište. Za takve se analize danas koriste programski alati, kao što je *EnergyPLAN* koji imaju mogućnost obrade velike količine podataka u relativno kratkom vremenu. *EnergyPLAN* analizira podatke o ukupne potražnje koje se unutar programa zadaju u tri glavne skupine: potražnja za električnom energijom, potražnja za toplinom te transport. Ulazne podatke zadaje korisnik, a sadrže informacije o elektranama, ranije navedenim količinama potražnje, parametre proizvodnje energije iz obnovljivih izvora kao i cijene i troškove pojedine komponente sustava. Također ima mogućnost analize proizvodnje vodika i sintetskog prirodnog plina (u daljnjem tekstu - *SNG*), koja ima važnu ulogu u izradi ovakvog modela elektroenergetskog sustava budući da će se model bazirati na proizvodnji energije tehnologijama kemijske koverzije (u daljnjem tekstu - *P2G*), tj. “pretvorbom” viškova energije u oblike koje je moguće skladištiti.

Kao što je poznato u hrvatskom energetsom sustavu događa se niz promjena, prva je porast proizvodnje energije iz obnovljivih izvora (posebice vjetra), a druga je pad proizvodnje neobnovljivih energenata (nafte i plina). Europska unija postavila je zadatak smanjenja emisija stakleničkih plinova za najmanje 80% do 2050. godine u odnosu na emisije 1990. godine (europa.eu, 2011). Ova direktiva zahtijeva temeljne promjene u strukturi proizvodnje energije, tj. potiče porast udjela obnovljivih izvora u energetsom miks. Problem ovakvih izvora njihova je isprekidanost te posljedično neusklađenost sa prilikama na tržištu.

U sklopu rada obrađeni su podaci o brzini vjetra na području sjevernog Jadrana. Na njemu se nalazi 19 platformi, a podaci su prikupljeni u razdoblju od dvije godine s platforme *Anamaria A*, a pomoću njih prikazana je moguća proizvodnja vodika, *SNG*-a i električne energije ukoliko se pristupi izgradnji odobalnih kapaciteta (vjetroelektrana) za proizvodnju električne energije. Ovim načinom moguće je postići sinergiju dvaju sustava, tj. pravovremenom prenamjenom platformi i istovremenom izgradnjom odobalnih vjetroelektrana.

## 1.1. Zadatak rada

Ovaj će rad prikazati optimalan model hrvatskog elektroenergetskog sustava koristeći programski simulator *EnergyPLAN* i analizu pomoću interpretera *Python*. Nadalje, okvirima energetske tranzicije bit će prikazane mogućnosti koje omogućuju povećanje fleksibilnosti i sigurnosti opskrbe energijom. Svrha rada je optimizacija sustava uzimajući u obzir zadatke Europske Unije. Drugim riječima prikaz scenarija koji ima najveći utjecaj na smanjenje emisija ugljičnog dioksida, povećanje proizvodnje energije iz obnovljivih izvora te koji će imati najmanji kritični višak proizvodnje električne energije.

Analizom će se prikazati sljedeći rezultati:

- CEEP (critical excess electricity production)
- Ukupna potrošnja energenata
- CO2 emisije
- Cijena sustava

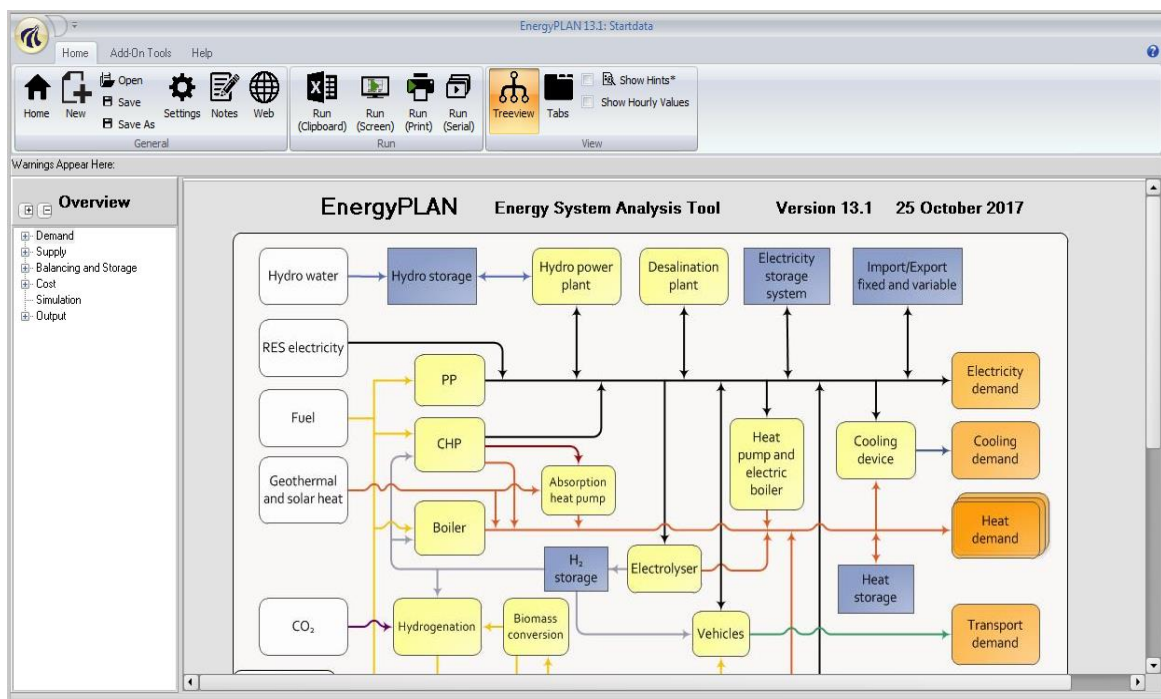
## 2. Programski alat EnergyPLAN

Za izradu novog modela elektroenergetskog sustava korišten je programski simulator *EnergyPLAN* koji služi za izradu i procjenu energetske sustava država i regija. *EnergyPLAN* je deterministički simulacijski alat, izrađen na sveučilištu u Danskoj, koji funkcionira prema principu ulazni podaci / izlazni podaci. Ulazni podaci su potražnja, kapaciteti te regulacijske strategije koje naglašavaju odnos uvoz / izvoz i višak proizvodnje električne energije. Izlazi su energetske bilance, ukupna godišnja potrošnja goriva te uvoz / izvoz električne energije (Lund i sur., 2007).

Termoelektrane, proizvodnja toplinske te električne energije spadaju u ulaze, a udjeli obnovljivih izvora energije (OIE, engl. *RES*), emisije CO<sub>2</sub>, uvoz i izvoz električne energije i višak proizvedene električne energije (engl. *CEEP*) spadaju u izlaze.

EnergyPLAN, ulazno - izlazni model, prikazan je na slici 2.1., a sastoji se od tri glavna područja:

- električna energija,
- toplinska energija,
- transport.



Slika 2-1 Sučelje programskog simulatora EnergyPLAN

Model proračunava izlaze prema satnim opterećenjima, primjerice podaci o brzinama vjetra moraju biti uneseni u program za svaki sat u godini, tj. 8784 podatka. Time se postiže optimiziran rad sustava. Nadalje, program zahtijeva odabir regulacijske strategije, a moguće je odabrati između tehničke i tržišne. Bitno je poznavati na koji način program koristi određenu regulacijsku strategiju. Tehnička podrazumijeva optimizaciju rada na način da se pokušavaju smanjiti potrošnja goriva te uvoz / izvoz, dok tržišna projektira najbolji rad sustava prema ekonomskim čimbenicima. Dalje se dijele na četiri tehničke podstrategije i tri tržišne.

Budući da će u radu biti opisan model sustava u kojem velik dio energije proizlazi iz obnovljivih izvora koristit će se tehnička regulacijska strategija, a cijene tehnologija bit će zadane ručno. Bit će uključena podstrategija u kojoj se uravnotežuju zahtjevi za električnom i toplinskom energijom (kogeneracijska postrojenja rade ovisno o potrebi za oba oblika energije). Na taj će način biti moguće pronaći najbolja rješenja obzirom na cijenu i vijek trajanja određene tehnologije.

## **2.1 Zašto EnergyPLAN?**

Zbog velike količine različitih programskih jezika i alata koji postoje na tržištu, teško je odabrati onaj koji će najbolje opisati određeni problem. Svaki je modeliran i izrađen na poseban način uzimajući u obzir regiju u kojoj se koriste, tehnologije koje razmatra i. Potrebno je postaviti pitanje: “Koji je primaran fokus modela?” Odgovor na pitanje za ovaj rad je: “Na koji način Hrvatska energetika može implementirati najveću količinu obnovljivih izvora energije u svoj sustav.”

Razlozi zbog kojih je odabran EnergyPLAN prikazani su kroz niz natuknica i opisani u nastavku:

- Programski alat ima jednostavno korisničko sučelje i vrijeme potrebno za učenje osnova modelirana regionalnog sustava iznosi nekoliko dana do tjedana, ovisno o kompleksnosti.
- Razmatra tri primarna sektora bilo kojeg nacionalnog sustava električnu energiju, toplinu i transport. Fleksibilan je na način da može integrirati tehnologije poput kogeneracijskih postrojenja, toplinskih pumpi, električnih vozila kao i tehnologije za proizvodnju vodika i SNG-a.
- Korišten je za simulaciju nekoliko nacionalnih sustava.

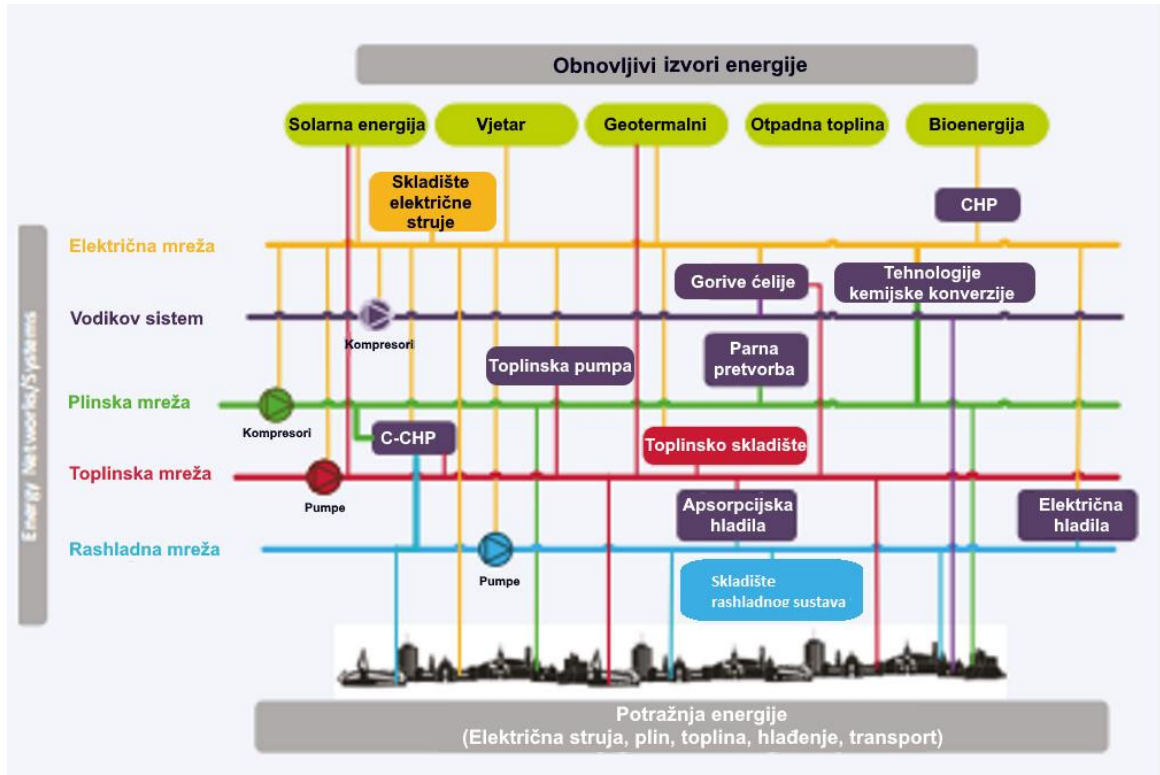
- Postoji velika količina članaka koji se bave modeliranjem sustava pomoću ovog programskog alata.

Ovo su samo neke od prednosti korištenja EnergyPLAN-a. Detaljniji pregled moguće je pronaći na ([www.energyplan.eu](http://www.energyplan.eu)).

### 3. Hipoteza

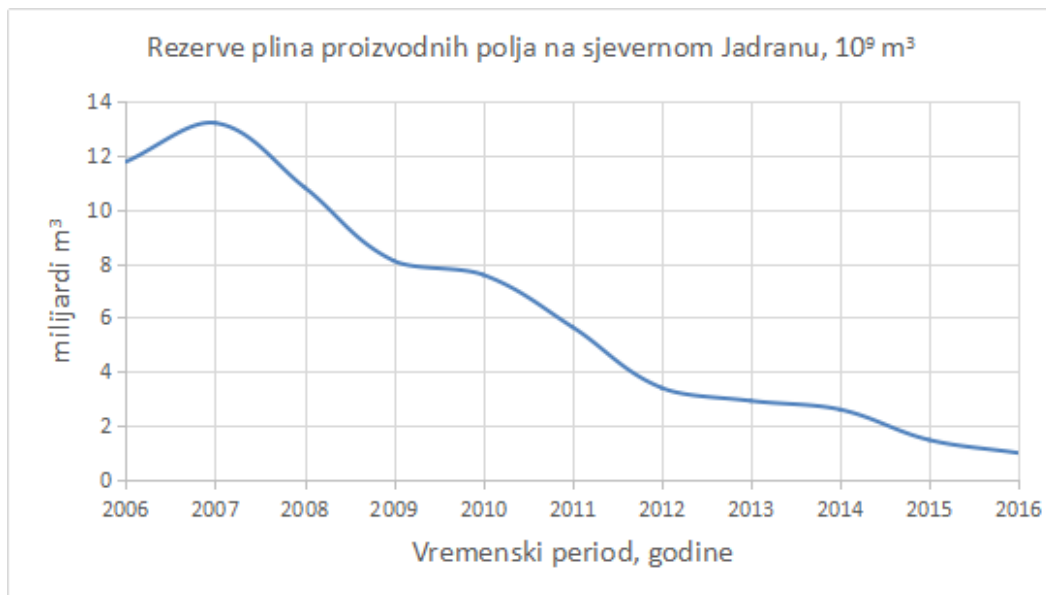
Integracija proizvodnje električne energije u velikoj mjeri dobivene iz obnovljivih izvora energije, poput vjetrova, u elektroenergetski sustav mora se suočiti s izazovom izrade integriranih strategija reguliranja takvog složenog sustava. Obnovljivci moraju međudjelovati s ostalim produkcijskim jedinicama kako bi sustav mogao osigurati ravnotežu između ponude i potražnje (Lund, 2006).

Hipoteza rada jest da je moguće modelirati i izgraditi sustav u kojem će biti minimalne količine emisija CO<sub>2</sub>, a većina potrebne energije dobivat će se iz energije vjetrova. Izgradnjom odobalnih vjetrovskih parkova može se osigurati relativno siguran izvor energije, a sinergijom s plinskim sustavom omogućava se skladištenje viškova proizvedene energije. To se postiže pomoću tehnologija kemijske konverzije (engl. Power to Gas, P2G). One omogućavaju stabilizaciju elektroenergetskog sustava na način da viškove proizvedene energije pretvara u oblik energije koji je moguće skladištiti, tj. spremna viškove u obliku kemijske energije vodika i umjetno proizvedenog metana. Na slici 3-1 prikazani su mogući odnosi između različitih izvora energije i mreža i ključnih tehnologija koje omogućuju integraciju među njima.

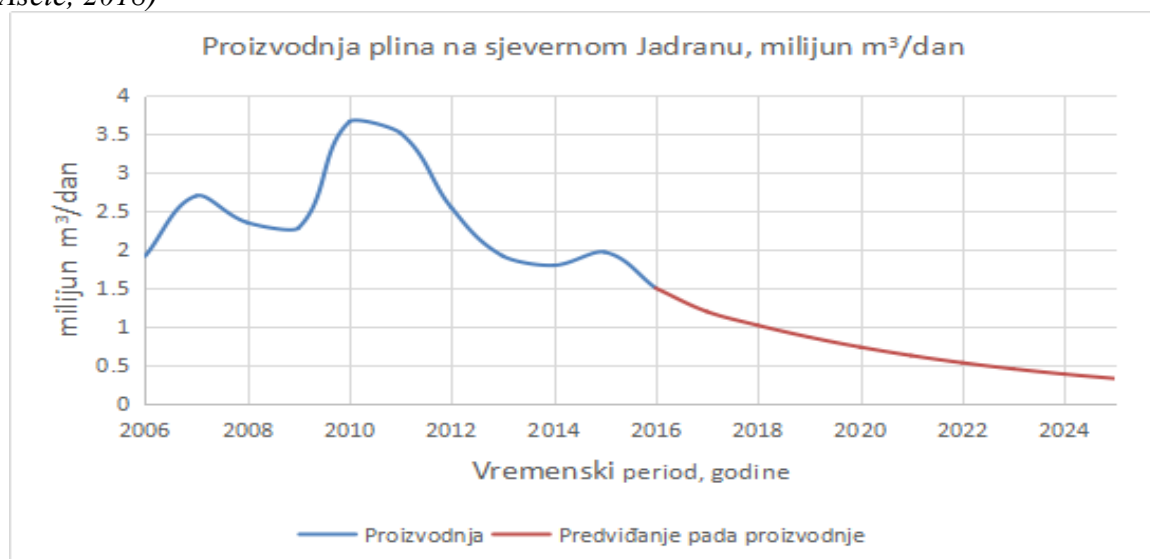


Slika 3-1 Integracija i međudjelovanje izvora energije, energetske mreže i tehnologije, (preuređeno od: Richard i sur., 2018)

Hrvatski energetska sustav trenutno veliku količinu energije dobiva s plinskih eksploatacijskih polja u sjevernom Jadranu. Proizvodnjom s tri eksploatacijska područja u 2016. podmirilo se 48,2 posto ukupnih potreba (EIHP, 2016). Na području sjevernog Jadrana (tri razradne koncesije) ukupno je instalirano 19 proizvodnih i 1 kompresorska platforma s ukupno 52 proizvodne bušotine (INA, 2017). Godine 2010. dosegnut je vrhunac proizvodnje prirodnog plina te je ona od tada u konstantnom padu. U 2017. godini proizvodnja je pala do razine 7,7 Mboe / dan što je 17 postotno smanjenje u odnosu na isto razdoblje 2016. Razlog pada, uz prirodni pad proizvodnje, također je veći udio proizvedene vode u plinu (INA, 2017). Problem koji se javlja neisplativost je pridobivanja prirodnog plina počevši od 2025. godine. Na slikama 3-2 i 3-3. grafički su prikazani pad proizvodnje i rezervi.

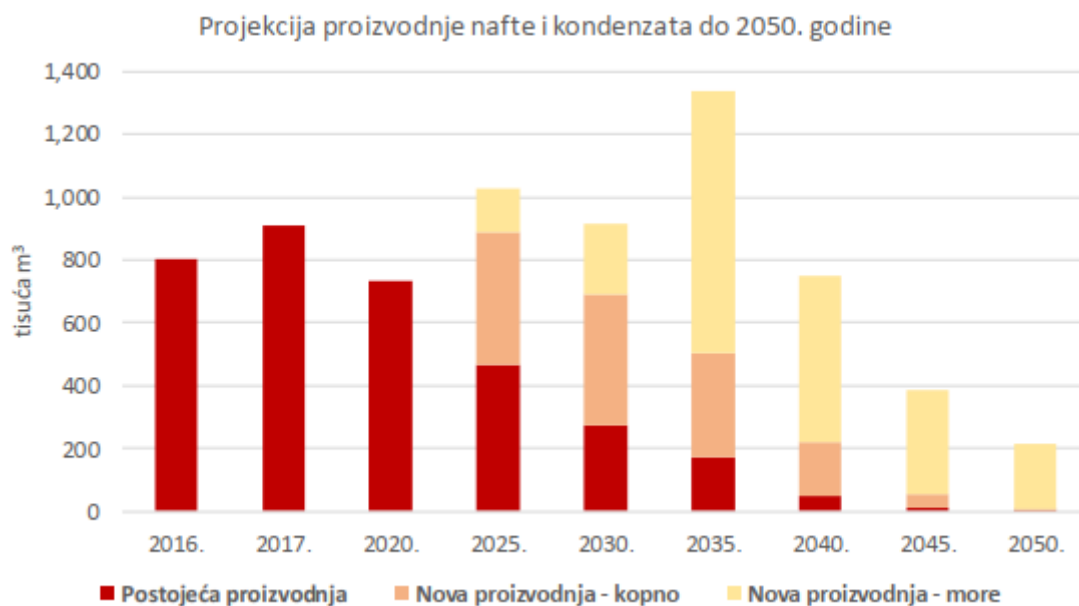


Slika 3-2 Pad rezervi prirodnog plina od 2006. - 2016. godine, (preuzeto iz Klabučar, Aščić, 2018)

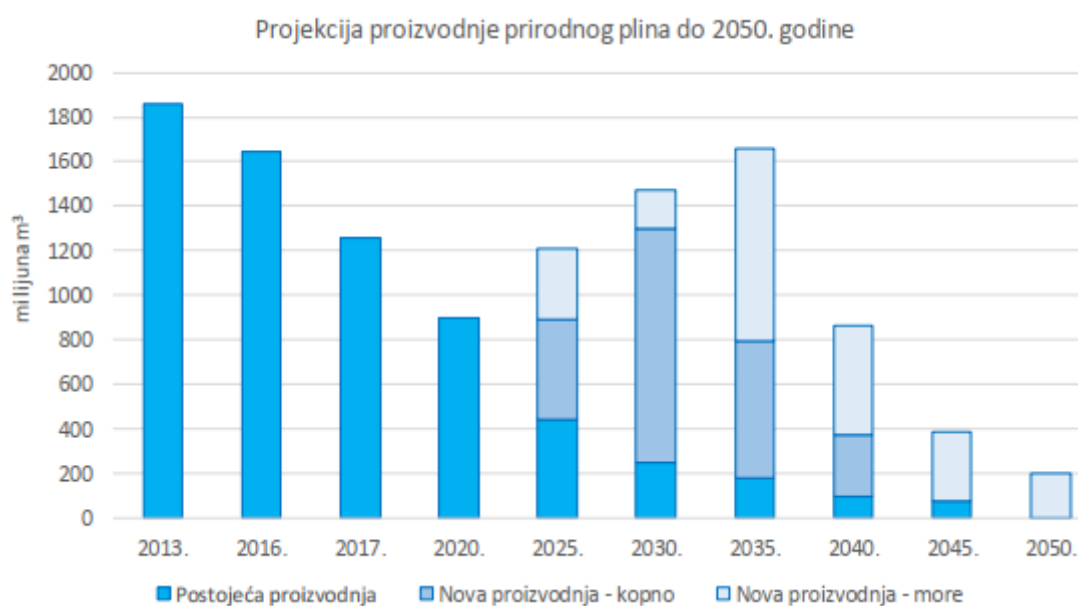


Slika 3-4 *Predviđanje pada proizvodnje prirodnog plina od 2006. - 2016. godine, (preuzeto iz Klabučar, Aščić, 2018)*

Bitno je napomenuti da ove krivulje prikazuju padove rezervi i proizvodnje uz pretpostavku da nema razvoja novih polja te da ne postoje ulaganja u istraživanje i obnavljanje rezervi. S druge strane, u studiji koju je izradio EHIP (2018), izrađene su krivulje koje opisuju proizvodnju ugljikovodika do 2050. godine, a prikazane su na slikama 3-4 i 3-5.



Slika 3-5 *Projekcija proizvodnje nafte i kondenzata do 2050. godine (preuzeto iz: ES RH, 2018)*





Slika 3-6 *Projekcija proizvodnje prirodnog plina do 2050. godine (preuzeto iz: ES RH, 2018)*

Stoga, potrebno je pravilno i precizno reagirati te se pripremiti za neizbježan trenutak prestanka proizvodnje ugljikovodika s ovog područja. Ovim će se radom pokušati prikazati mogućnost prilagodbe hrvatskog energetskeg sustava za tranziciju u niskougljično gospodarstvo. Pri tome koristit će se već navedene tehnologije na način da se postojeća postrojenja, tj. platforme, prenamjene u procesne jedinice za proizvodnju vodika i sintetskog prirodnog plina. Na taj je način moguće osigurati sigurnost opskrbe energijom te učinkovito skladištiti viškove električne energije. Ovakav sustav može integrirati energetske tokove, energetske transformacije i osigurati dobavu na regionalnoj ili nacionalnoj razini.

#### 4. Tehnologije kemijske konverzije

Tehnologije kemijske konverzije (engl. *Power to Gas; P2G*) jedan su od prijedloga prevladavanja isprekidanosti vjetroenergije i sličnih oblika (Ikäheimo,2015). Dvije su osnovne vrste tehnologije: elektroliza pomoću koje se dobiva vodik i nadogradnja u obliku procesa metanacije kojom se dobiva sintetski prirodni plin (SNG). Proizvedeni plin (SNG) može se koristiti u kogeneracijskim postrojenjima ili kondenzacijskim elektranama kada nisu dostupni jeftiniji izvori energije. Dodatno, SNG se može koristiti u transportu, a otpadna toplina procesa može se koristiti za grijanje. Dobiveni vodik moguće je koristiti za ponovno dobivanje električne energije sagorijevanjem u gorivnim ćelijama, no problem cjelokupnog procesa je njegova niska učinkovitost koja iznosi približno 40 %.

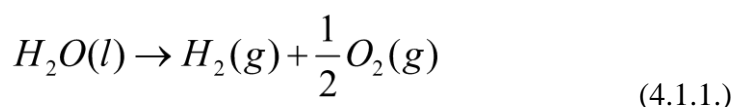
Velika prednost izgradnje ovakvih jedinica na sjevernom Jadranu očituje se u mogućnosti transporta postojećom infrastrukturom te čak mogućim skladištenjem u iskorištena plinska ležišta. Izgradnjom ovakvih sustava imajući na umu ovakav koncept može se značajno pridonijeti rukovanju energijom jer se omogućuje bolje iskorištavanje isprekidanih resursa poput vjeter i sunca. Budući da P2G iskorištava infrastrukturu prirodnog plina, ona omogućuje prijelaz na ekonomičan vodik bez emisije stakleničkih plinova (Maroufmashat,2017)

Prema Maroufmashatu neke od prednosti P2G tehnologija su:

- Koriste se dokazane tehnologije (elektroliza, metanacija),
- Pruža najveću gustoću pohrane energije od trenutno dostupnih tehnologija za pohranu energije,
- Moguće je sezonsko skladištenje,
- Moguće je pohraniti i distribuirati energiju u postojećom infrastrukturom prirodnog plina
- U kombinaciji s tehnologijama metanacije i hvatanja CO<sub>2</sub> (engl. *Carbon Capture and Storage; CCS*), moguće je proizvoditi prirodni plin uz smanjenje ugljičnog otiska,
- Unapređuje upotrebu čiste tehnologije u sektoru industrije stvarajući gospodarski razvoj.
- Postoji širok spektar primjene.

## 4.1. Elektroliza

Elektroliza je najšire primjenjivana tehnologija za dobivanje ekstremno čistog vodika (Hydrogen production by alkaline). Prvi je put uspješno provedena 1800. godine. To je proces u kojem se pomoću vanjskog izvora napona stvara istosmjerna struja. Njenim se djelovanjem molekula vode razlaže na svoje sastavne komponente: vodik ( $H_2$ ) i kisik ( $O_2$ ). Kemijska jednačba elektrolize šematski je prikazana na slici 4-1, a glasi:

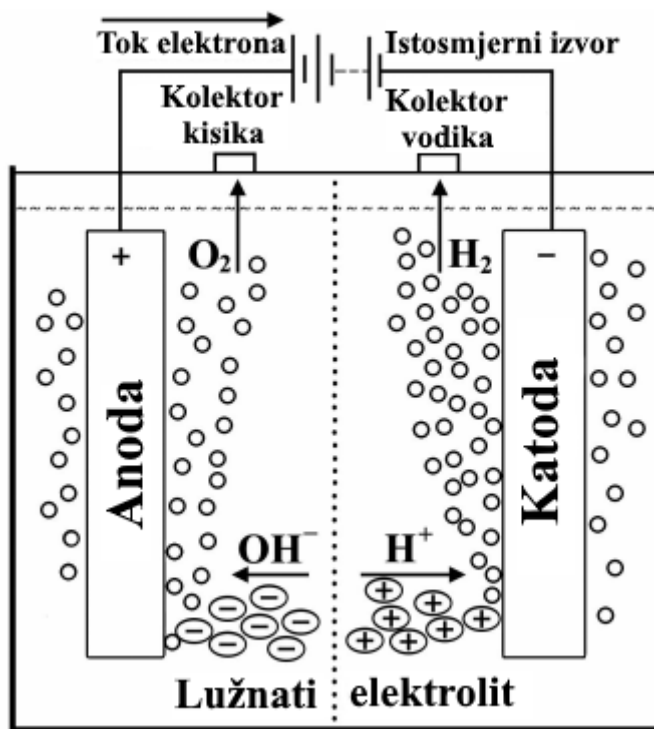
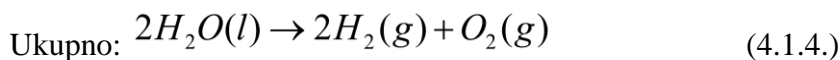
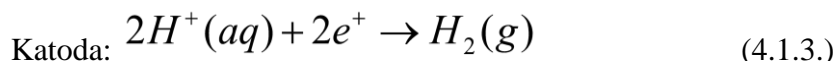
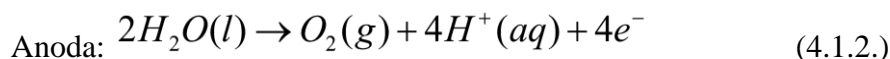


Cjelovita reakcija je zapravo redoks reakcija, a sastoji se od:

Oksidacije kisika na anodi

Redukcije vodika na katodi

Jednačbe glase:



Slika 4-1 Šematski prikaz elektrolize (preuređeno od Diogo i sur. 2013)

Tri su najpoznatije metode elektrolize vode:

- Elektroliza lužna te otopine (engl. Alkaline electrolysis)
- Elektroliza protonski propusnom membranom (engl. *Proton exchange membrane*)
- Elektroliza anionski propusnom membranom (engl. *Anion exchange membrane*)

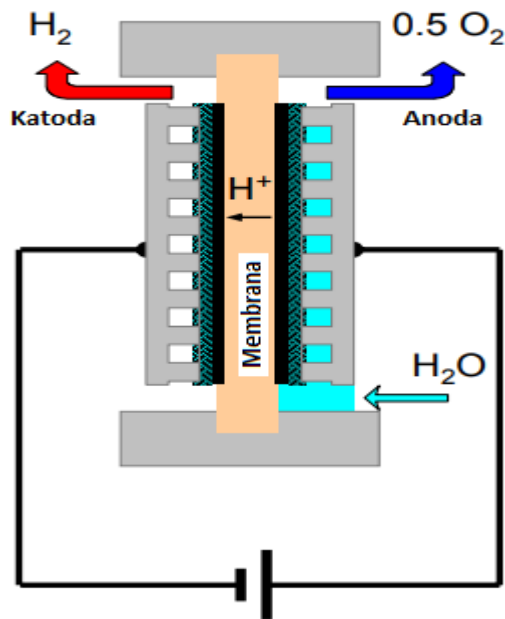
#### **4.1.1 Elektroliza lužnate otopine**

Za razlaganje vode pomoću elektrolize potreban je takozvani elektrolitički članak koji se sastoji od dvije elektrode koje su spojene na vanjski strujni krug i uronjene u elektrolitsku otopinu. Po potrebi se može koristiti membrana koja ima ulogu razdvajanja nastalih plinova. Proces se odvija pri atmosferskom tlaku i rasponu temperatura od 40-90 °C

Međutim, ova metoda dobivanja vodika nije primjenjiva na sjevernom Jadranu, budući da ima neka ograničenja, a ona su rad pri malim gustoćama struje, atmosferski radni tlak te najveće ograničenje: nemogućnost rada u slučajevima varijacija struje i napona. Kako se u radu govori o dobivanju električne energije iz vjetra kojeg karakterizira promjenjivost i isprekidanost, ovaj uvjet mora biti ispunjen. Iz tog se razloga ova metoda neće razmatrati.

#### **4.1.2. Elektroliza protonski propusnom membranom (engl. PEM electrolysis)**

Elektroliza protonski propusnom membranom (*PEM*) je elektroliza vode u ćeliji koja je opremljena čvrstim polimernim elektrolitom koji je odgovoran za provođenje protona, odvajanje plinova produkata i električnu izolaciju elektroda. Ova metoda elektrolize je uvedena je kako bi se prevladali problemi parcijalnog opterećenja, niske gustoće struje i niskog radnog tlaka. PEM elektroliza pruža održivo rješenje za proizvodnju vodika te se može nositi s izmjenjivim izvorima energije kao što su vjetroenergija i solarna energija (Carmo i sur.,2013). PEM membrana omogućava jednostavan dizajn jedinice te visoki radni tlak od maksimalno 35 MPa. Prednost visokog radnog tlaka očituje se u činjenici da nije potrebna dodatna kompresija pri skladištenju ili transportu. Jedini nedostatak ove metode je visoka kiselost procesa, tj. vrijednost pH iznosi približno dva, što zahtijeva korištenje skupih i rijetkih metala poput platine, zlata ili iridija (Carmo i sur.,2013). Slika 4-2 prikazuje shemu PEM elektrolize.



Slika 4-1 Shematski prikaz PEM elektrolize (preuređeno od Smolinka, 2010)

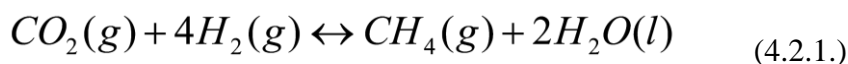
#### 4.1.3. Elektroliza alkalno propusnom membranom (engl. Alkaline exchange membrane)

AEM-bazirana elektroliza smatra se spojem dvaju ranije navedenih modela, a u budućnosti može postati potencijalna zamjena postojećim PEM sustavima u vidu smanjenja visokih kapitalnih troškova. Ovo smanjenje troškova postiže se zamjenom tipičnih skupih katalizatora i materijala same ćelije s metalima koji, iako korodiraju u kiselom PEM okruženju, stabilni su u lužnatim sredinama. U teoriji, ovaj pristup vrlo je obećavajuć, ali testiranje postojećeg stanja tehnike pokazalo je tehnološke nedostatke u pogledu stabilnosti, trajnosti i električne učinkovitosti. Modeliranje je pokazalo da se uštede ostvarene nižim kapitalnim ulaganjima obično niveliziraju povećanjem operativnih troškova. Dodatno, toplinska nestabilnost AEM-a zahtijeva da se jedinice koriste pri nižim temperaturama nego kod tipičnog PEM sustava i na taj način usporavajući kemijsku kinetiku (Ayers i sur, 2017). AEM je nova tehnologija koja se još mora razvijati kako bi postala konkurentna trenutnim tehnologijama elektrolize.

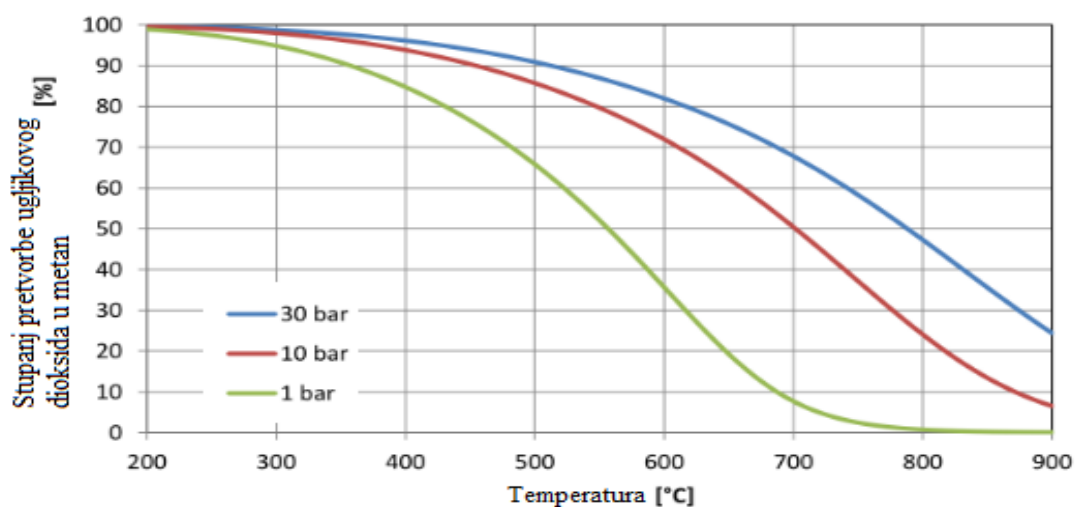
## 4.2 Metanacija

Hydrogenacija je kemijska reakcija koja se često primjenjuje u kemijskoj industriji. To je zapravo hidrogenacija organskih spojeva, točnije njome se opisuje reakcija između molekularnog vodika i drugog organskog spoja, a izvodi se u katalitičkoj sredini. Dvije najpoznatije reakcije hidrogenacije su metanacije ugljikovog dioksida i ugljikovog monoksida, tj. reakcija jednog ili drugog spoja s vodikom kako bi se u konačnici proizveo metan ili drukčije rečeno sintetski prirodni plin (u daljnjem tekstu - SNG). Konverzija CO<sub>2</sub> u metan (SNG) naziva se još i *Sabatierov proces*, prema osnivaču (Granitsiotis, 2015). Sve većim naglaskom na razvoj P2G tehnologija kojima se rješava skladištenje viškova obnovljive električne energije, ovaj proces postaje sve važniji dio energetskih sustava (Helmeth).

Reakcija se odvija prema formuli:

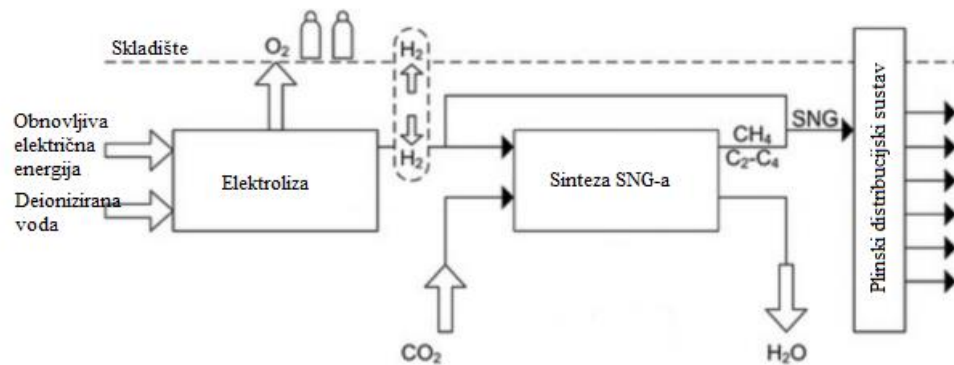


Proces je izrazito egzoterman i spontano se odvija na sobnoj temperaturi, a količina energije koja se razvije prikazuje se kao promjena entalpije reakcija i iznosi:  $\Delta H = -165 \text{ kJ/mol}$ . Primjeni li se Le Chatelierov princip, vidljivo je kako povećanje temperature ne pogoduje konverziji ugljikovog dioksida, s druge strane povećanje tlaka utječe na poboljšanje stupnja pretvorbe. Može se dakle zaključiti kako je kontrola povećanja temperature bitan zadatak pri izvođenju ove reakcije te je u tu svrhu potrebno implementirati učinkovit sustav odvođenja topline. Na slici 4-3 prikazan je odnos stupnja pretvorbe, tlaka i temperature.

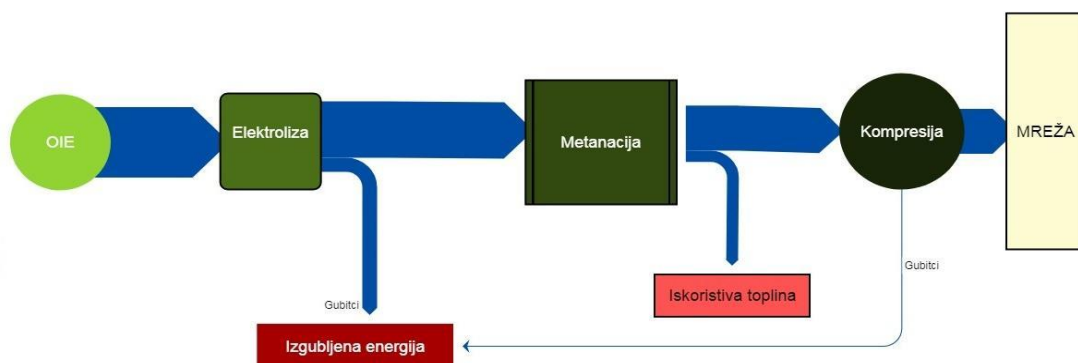


Slika 4-3 Odnos tlaka, temperature i stupnja pretvorbe (preuređeno od Helmeth)

Shema cjelokupnog procesnog lanca i shema dijagrama toka energije prikazani su na slikama 4-4 i 4-5. Višak proizvedene električne energije dovodi se do jedinice za elektrolizu vode gdje se djelovanjem struje ona razlaže na svoje sastavnice. Kisik se odvaja i skladišti budući da se može koristiti u drugim granama industrije (industrija čelika, stakla, emajla, sredstvo pri zavarivanju te kao dio smjese za raketno gorivo). Vodik se usmjerava prema reaktoru gdje se prije ulaska mješa s ugljikovim dioksidom u stehiometrijskom omjeru 1:4. Mogući raspon temperatura reaktora ovisi o korištenom katalizatoru koji je načešće na bazi nikla te se tada one kreću od 200 - 550 °C kako bi se izbjeglo stvaranje otrovne atmosfere pri niskim ili dezintegracija katalizatora pri visokim temperaturama (Schaaf i sur, 2014). Produkti reakcije su SNG i voda. Dio proizvedenog plina vraća se u struju vodika pomičući na taj način ravnotežu reakcije prema produktima. Na taj se način pozitivno djeluje na stupanj pretvorbe CO<sub>2</sub>. Preostali se dio plina otprema u plinsku mrežu ili u skladišta ukoliko nema potrebe za potrošnjom.



Slika 4-4 Koncept skladištenja viškova obnovljive energije u obliku energije SNG-a (preuređeno od Schaaf i sur, 2014)



Slika 4-5 Shema dijagrama toka energije u procesnom lancu.

## 5. Elektroenergetski sustav Republike Hrvatske

### 5.1. Energetska situacija u Republici Hrvatskoj

Kada se uspoređi hrvatska sa zemljama koje čak imaju lošiji prirodni potencijal, poput Belgije i Austrije, vidi se stagnacija u polju obnovljivih izvora. Obje navedene države zabilježile su rast ukupnih kapaciteta fotonaponskih sustava i vjetroelektrana. Godine 2017. Hrvatska je zabilježila porast kapaciteta od 147 MW vjetroelektrana, izgrađenih na kopnu, u odnosu na 2016. Tako su kapaciteti vjetroelektrana iznosili ukupno 613 MW na kraju 2017. godine (Fraile i sur, 2017). Što se tiče fotonaponskih sustava zabilježen je rast od 2,4 MW u 2016. i 2,1 MW u 2017., a ukupni kapaciteti na kraju 2017. iznosili su 51,5 MW (EurObserv'ER, 2018).

Prema podacima iz 2017. HEP Opskrba raspolagala je s 15.5 TWh proizvedene i kupljenje električne energije, a kupcima je prodala 7,4 TWh (HEP opskrba d.o.o.,2017). Podaci o proizvodnji i nabavi električne energije prikazani su u tablici 5-1, a u nastavku će detaljnije biti opisan svaki segment proizvodnje.

Tablica 5-1 Podaci o proizvodnji i nabavi električne energije

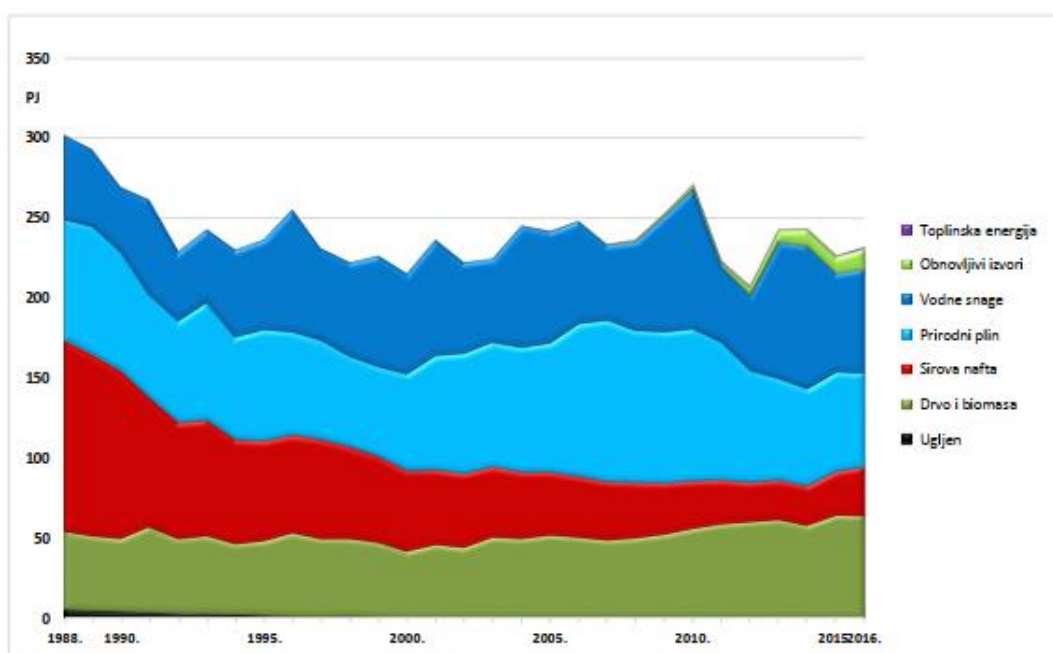
Proizvodnja i nabava električne energije	GWh
Hidroelektrane	4990
Termoelektrane	3504
Nuklearna elektrana Krško	2984
Otkup iz OIE	1931
Uvoz	2190
SUMA	15559

Vidljivo je kako najveći udio u proizvodnji električne energije u Hrvatskoj imaju hidroelektrane s približno 5 TWh proizvedene energije, a najmanji udio imaju obnovljivi izvori. Ako se žele posići ciljevi Europske Unije, potrebno je drastično povećati proizvodnju energije iz obnovljivaca, tj. drugim riječima potrebno je iskoristiti prirodni potencijal Republike Hrvatske.



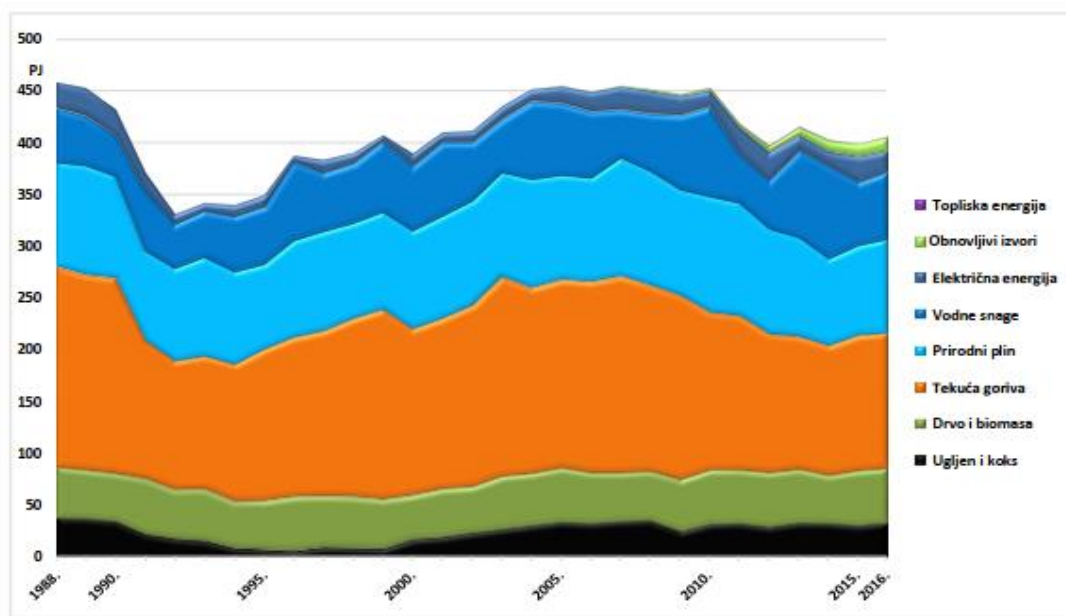
## 5.2 Energetski miks u RH

Hrvatska trenutno uvozi 45 % primarne energije, sa stalnom tendencijom porasta. Trenutno najveći udio u energetskom miksu u Hrvatskoj u proizvodnji električne energije imaju hidroelektrane, što Hrvatsku zapravo svrstava među europske države koje imaju visok udio obnovljivih izvora energije u energetskom miksu (Karasalihović Sedlar, 2015). Na slikama 5-1 i 5-2 prikazani su udjeli u proizvodnji i potrošnji energije do 2016.



Slika 5-1 Proizvodnja primarne energije u Hrvatskoj (preuzeto od: Granić i sur, 2018)

Za razdoblje od 2011. do 2016. razvoj proizvodnje primarnih oblika energije pokazuje pad udjela prirodnog plina s 38,1 na 24,8 posto, dok su udjeli nafte i biomase porasli za približno jedan posto. Također udio OIE povećan je za 5,5 %. Vidljiv je trend rasta udjela OIE u ukupnoj proizvodnji i potrošnji energije (Granić i sur, 2018).



Slika 5-2 Ukupna potrošnja energije u Hrvatskoj (preuzeto od: Granić i sur, 2018)

Prosječna potrošnja energije po stanovniku iznosila je 2321 kg ekvivalentne nafte što iznosi 97,125 TJ. Vidljiv je trend pada udjela potrošnje tekućih goriva kao i prirodnog plina, a udjeli ostatalih izvora energije su povećani: vodne snage za 5,2 %, biomasa za 0,6 % te ugljen i koks za 0,3 % (ES RH, 2018).

## 5.3 Proizvodnja električne energije u RH

### 5.3.1. Hidroelektrane

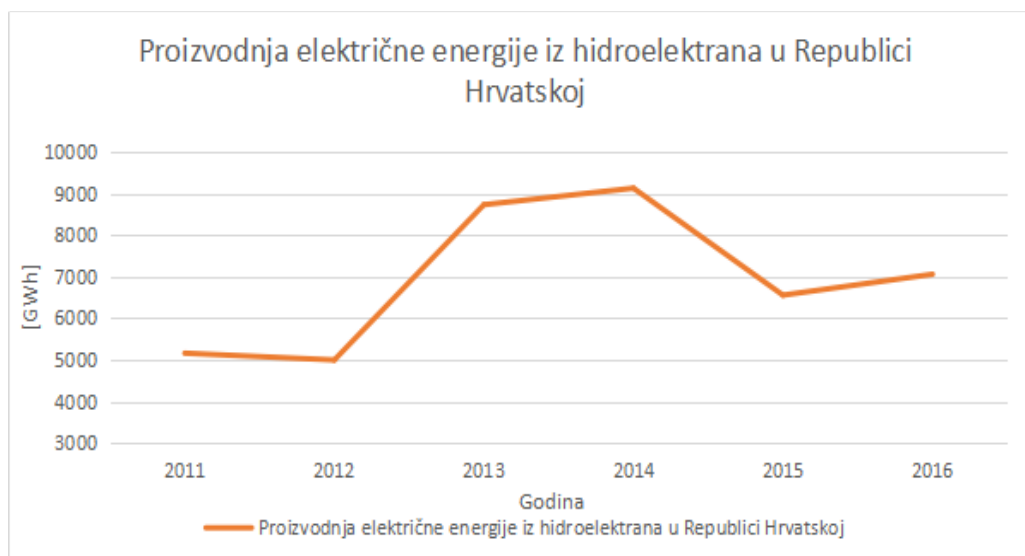
U Republici Hrvatskoj, postoji velik broj izgrađenih hidroelektrana. Razlikuju se dva tipa: akumulacijske kojih u Hrvatskoj ima 15 i protočne kojih ima 12, ukupnog su kapaciteta 2198.7 MW te zadovoljavaju gotovo 50 % hrvatskih potreba za električnom energijom (EIHP,2016). Najveća hidroelektrana nalazi se na rijeci Cetini, snage je 535 MW, a isporučuje gotovo trećinu ukupne hidroenergije (Wikipedia). Uz velike, postoji i 36 izgrađenih malih hidroelektrana od kojih je 15 u vlasništvu HEP-a, a 21 je privatno vlasništvo, a njihova ukupna snaga iznosi približno 45 MW (Granić i sur, 2018).

Popis hidroelektrana, snage veće od 10 MW prema Granić i sur., prikazan s pripadajućim kapacitetima nalazi se u tablici 5-2.

Tablica 5-2 Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj

Hidroelektrane			
Akumulacijske	Snaga [MW]	Protočne	Snaga [MW]
HE Zakučac	538	HE Varaždin	94,0
RHE Velebit	276	HE Čakovec	76,0
HE Orlovac	237	HE Dubrava	76,0
HE Senj	216	HE Gojak	55,5
HE Dubrovnik	252	HE Rijeka	36,8
HE Vinodol	94,5	HE Miljacka	24,0
HE Kraljevac	46,4	HE Lešće	41,2
HE Peruća	61,4		
HE Đale	40,8		
HE Sklope	22,5		
RHE Buško Blato	10,5		

Grafički prikaz proizvodnje hidroelektrana vidljiv je na slici 5-3. Podaci su preuzeti iz godišnjeg izvješća Energetskog instituta Hrvoje Požar za 2016. godinu.



Slika 5-3 Grafički prikaz proizvodnje energije iz hidroelektrana.

### 5.3.2. Termoelektrane

Hrvatska ima ukupno osamtermoelektrana s tim da su tri kondenzacijske za proizvodnju električne energije, a ostale su kogeneracijska postrojenja za proizvodnju električne i toplinske energije. Raspoloživa snaga termoelektrana (uključujući i TE Plomin d.o.o.) iznosi 1906 MW, a udio proizvodnih kapaciteta iznosi 38.5 % (EIHP,2016). Termoelektrane u sastavu HEP grupe, skupa sa snagom, proizvedenom energijom u 2016. te gorivom na kojim su pogonjene navedene su u tablici 5-3.

Tablica 5-3 Termoelektrane u Republici Hrvatskoj (EIHP,2016); \*-Prirodni plin

Termoelektrana	Raspoloživa snaga [MW]	Energija u 2016. [GWh]	Gorivo
TE Sisak	631	277,7	Loživo ulje / PP*
TE-TO Zagreb	422	710,9	PP* / loživo ulje
TE Rijeka	303	0	Loživo ulje
TE Plomin (A)	105	819,3	Ugljen
EL-TO Zagreb	89	215,6	PP / loživo ulje
KTE Jertovec	74	0,6	PP / ekstralako ulje
TE-TO Osijek	90	86,6	Loživo ulje / PP
TE Plomin (B)	192	1531,3	ugljen
SUMA	1906	3047,9	

### 5.3.3. Obnovljivi izvori energije

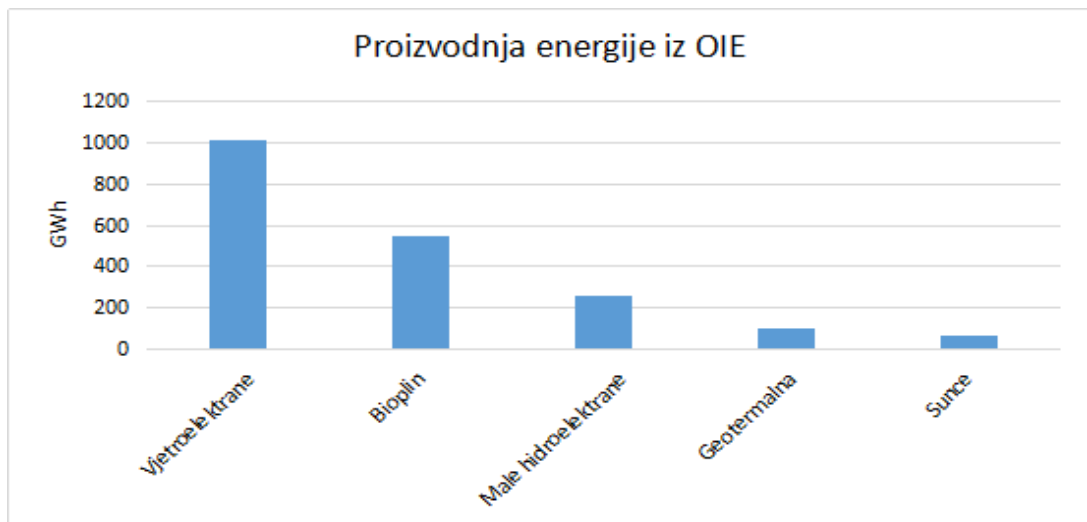
Obnovljivi izvori energije (OIE) uz energetske efikasnost (EE) predstavljaju glavne temelje energetske sigurnosti, održive energetike i ublažavanja klimatskih promjena [Duić i sur. (2011) i Šimleša (2009)]. Razlog tomu je što su široko prepoznati kao resursi koji pridonose sigurnosti određene regije, ne utječu na emisije štetnih plinova, značajno manje utječu na okoliš i visoka razina prihvaćanja u populaciji.

Obnovljivi izvori energije bitan su čimbenik u energetske sustavu nacije. Implementacijom većih kapaciteta otkriva se široka paleta mogućih smjerova za dugoročna rješenja problema koji se u hrvatskoj energetici javljaju:

- Visoka ovisnost o nafti i plinu,

- Hrvatska ima relativno male rezerve fosilnih goriva i velike potencijale OIE,
- Potencijali OIE gotovo su potpuno neiskorišteni (osim kod velikih HE),
- Dvije trećine ukupnih emisija štetnih plinova u Hrvatskoj dolaze iz energetike.

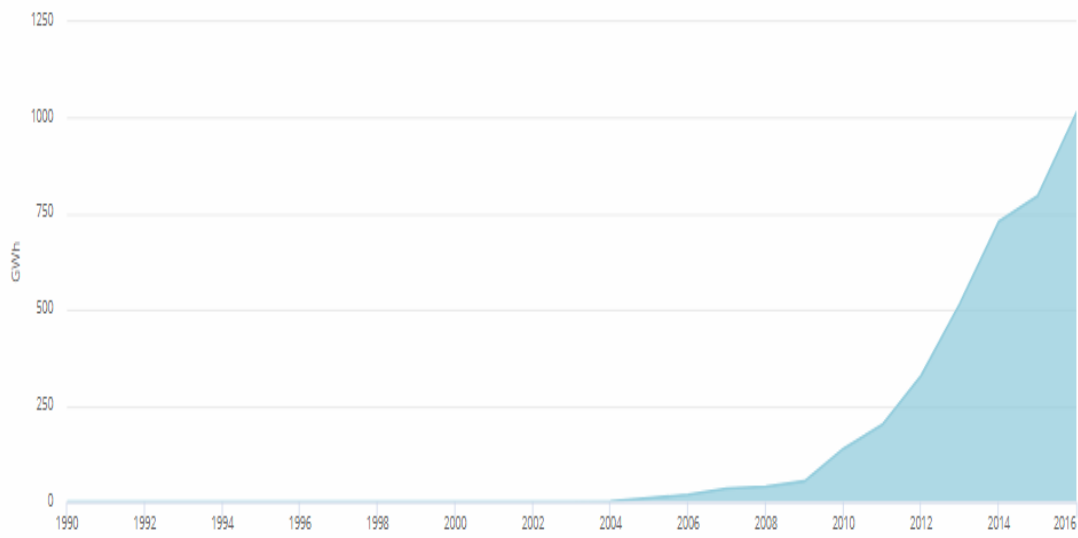
Proizvodnja električne energije 2016. iz vjetroelektrana iznosila je 1014,2 GWh, a energije generirana fotonaponskim ćelijama iznosila je 65,5 GWh, tj. ukupno proizvedeno iz ova dva izvora iznosilo je 1079,7 GWh ili 3,886 PJ, a uključujući ostale (biomasa, bioplin, geotermalna) 1625,4 GWh ili 127 % (EIHP,2016). Na slici 5-4 prikaz je proizvodnje energije iz OIE.



Slika 5-4 Proizvodnja električne energije iz OIE.

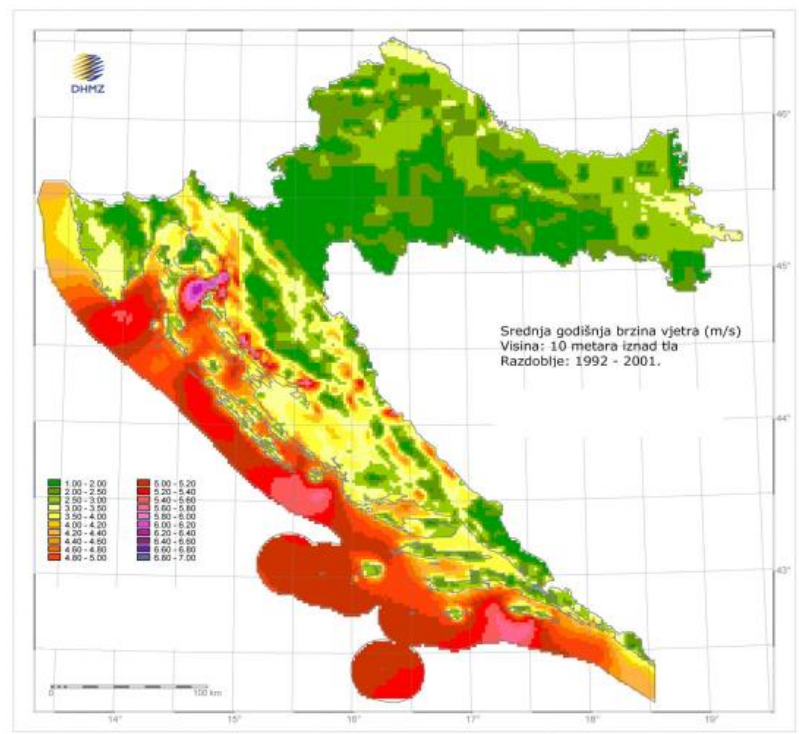
### 5.3.3.1. Vjetroenergija

Prema podacima iz 2016. građena snaga vjetroelektrana u Hrvatskoj iznosi 483,1 MW, ukupna proizvedena električna energija 1014,2 GWh (EIHP,2016). Najveće vjetroelektrane su prema Jerkić (2014): VE Vrataruša (42 MW), VE Jelinak (30 MW), VE Bruška (36,8 MW), VE Pometno Brdo (17,5 MW). Na slici 5-5 prikazan je porast proizvodnje od 1990. do 2016 godine. Maksimalni iskoristivi potencijal procijenjen je na 7 - 9 GW na kopnenom prostoru cijele Republike Hrvatske.



Slika 5-5 Porast proizvodnje od 1990. do 2016 godine ( preuzeto od: IEA,2018)

Sve navedene elektrane nalaze se na kopnu, ali u sklopu ovog rada bitno je navesti prednosti i nedostatke odobalnih postrojenja. Na slici 5-6 vidljiv je velik potencijal vjetra na području sjevernog Jadrana gdje brzine vjetra variraju od 3,5 - 5,2 m/s što je idealan raspon. Vjetroelektrane se pokreću pri brzinama vjetra od 3,5 m/s, a isključuju pri brzinama većim od 25 m/s kako ne bi došlo do oštećenja.



Slika 5-6 Vjetro potencijal Republike Hrvatske (preuređeno od: Šimić, 2010)

Brzina vjetra nije jedina činjenica koja ide u korist izgradnje ovakvih odobalnih postrojenja na području sjevernog Jadrana, daljnje prednosti su prema (Cuffari (2018) i WindEnergyTechnologiesOffice):

- Idealna dubina mora, 20 - 30 m,
- Stabilnija kretanja krzine vjetra,
- Veća količina energije,
- Netaknut vizalni dojam,
- Povaćanje bioraznolikosti mora (nije u potpunosti dokazao).

Dakako, postoje i nedostaci, a neki od njih su:

- Potreba za čvršćim i stabilnijim materijalima,
- Izrada je skuplja od klasičnih postrojenja na kopnu,
- Relativno je komplicirano dovesti energiju do kopna.

Na odobalnom području Hrvatska raspolaze s približno 10000 km<sup>2</sup> prostora za smještaj elektrana, a prosječna brzina vjetra iznosi 8 m/s (Granić i sur, 2018).

U sklopu rada izrađena je i SWOT analiza implementacije vjetroagregata na odobalnim lokacijama i prikazana u tablici 5-4

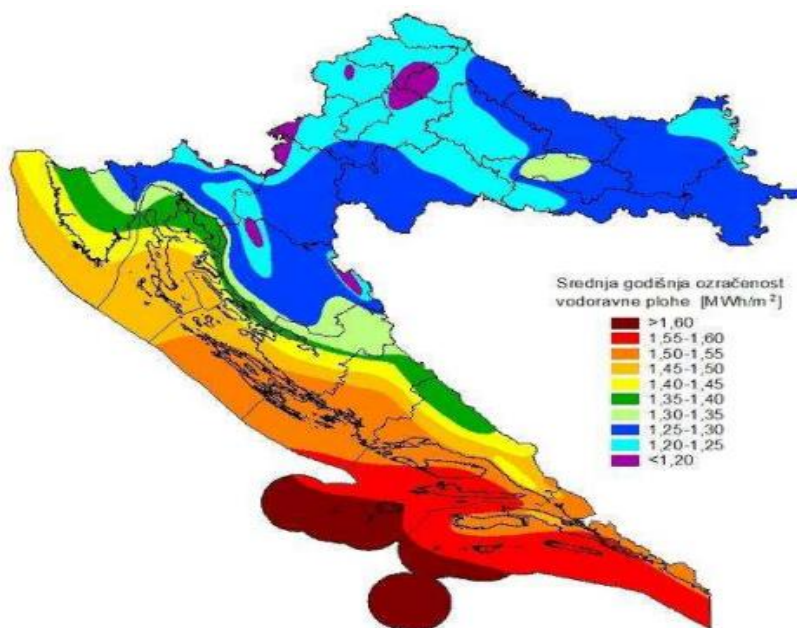
Tablica 5-4 SWOT analiza implementacije vjetroagregata na odobalnim lokacijama

Snage (engl. <i>Strengths</i> )	Slabosti (engl. <i>Weakness</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visok potencijal</li> <li>- Podrška stanovništva</li> <li>- Interes za ulagače</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Loša koordinacija institucija zaduženih za OIE</li> <li>- Nedovoljna educiranost</li> <li>- Slaba financijska potpora</li> </ul>
Mogućnosti (engl. <i>Opportunities</i> )	Prijetnje (engl. <i>Threats</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Veći angažman regionalnih upravnih tijela</li> <li>- EU fondovi</li> <li>- Stimulativne subvencije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utjecaj lobija</li> <li>- Rast potrošnje energije</li> </ul>

U daljnjim poglavljima bit će prikazana moguća proizvodnja električne energije te proizvodnja vodika i metana koristeći jednu elektranu nazivne snage 5 MW.

### 5.3.3.2. Solarna energija

Instalirana snaga sunčanih elektrana 2016. iznosio je 55.8 MW, a proizvelo se 65,5 GWh električne energije, a do 2030. očekuje se rast kapaciteta do 200 MW. Potencijal je prikazan na slici 5-7, a prosječna ozračenost vodoravne plohe iznosi 1,2 - 1,6 MWh/m<sup>2</sup>. Ukupan broj pogona u radu na kraju 2017. godine iznosio je 1223 sustava, a u posljednjim fazama projekta nalazi se osam postrojenja snage 1972 MW (Granić i sur, 2018). Prema procjenama ukupni potencijal iznosi približno 5303 MW koji godišnje može proizvesti oko 6400 GWh električne energije (Granić i sur, 2018). No, fotonaponski sustavi nisu glavna tema rada i neće se dalje obrađivati.



Slika 5-7 Solarni potencijal Hrvatske (preuređeno od: Čolak, 2012)

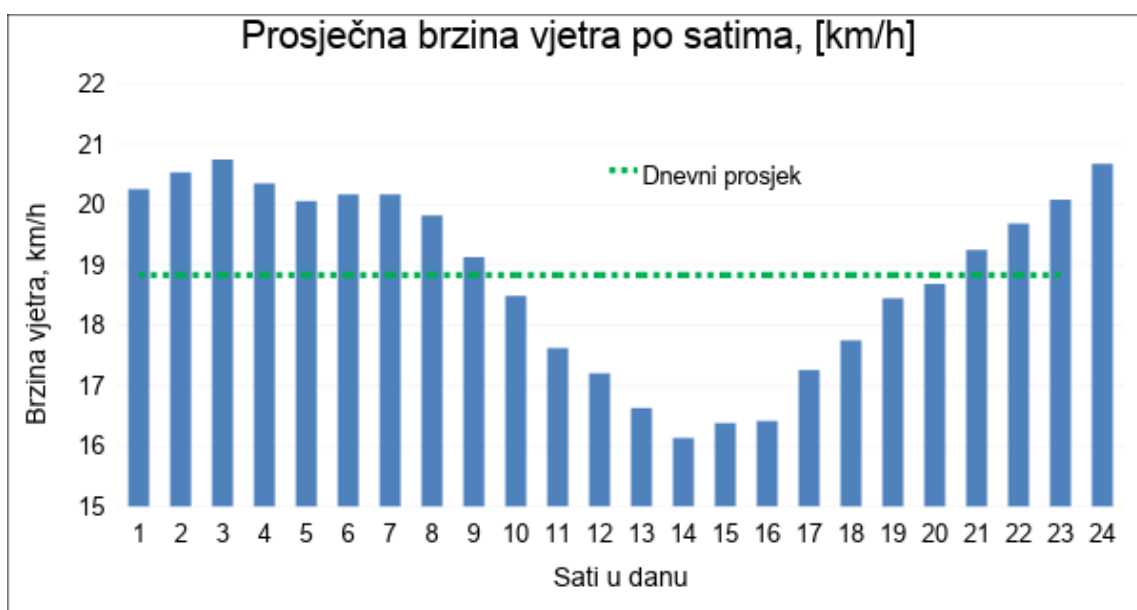


## 6. Preliminarni izračun proizvodnje energije

U ovom će poglavlju biti prikazani rezultati analize brzine vjetra proizvodnje električne energije, proizvodnje vodika i metana koristeći tehnologije konverzije. Svrha je pokazati potencijal za OIE u Hrvatskoj koji će biti prikazan u dnevnoj rezoluciji.

### 6.1 Analiza brzine vjetra

Podaci o brzinama vjetra dobiveni su iz INA d.d., mjereni su na lokaciji platforme Anamaria A u trajanju od dvije godine na visinama od 2 i 10 metara. Pretpostavka je da se podaci mogu primjeniti za bilo koju platformu na ovom području. Mjerenja su se odvijala svake tri sekunde te je dostavljeno nekoliko milijuna podataka koji su softverskom obradom prevedeni u satne vrijednosti. Zatim se pristupilo izračunu potencijala u kojem su vrijednosti brzina manje od 3 m/s i veće od 25 m/s izbačene iz proračuna jer kako je navedeno u poglavlju 5.3.3.1 pri tim brzinama vjetroelektrane ne mogu raditi tj. vrijednosti iskaču iz radnog raspona elektrane. Na slici 6-1 nalazi se satni prikaz prosječnih brzina, vidljive su dnevne varijacije, tj. brzine su veće u noćnim satima, pa se može zaključiti kako će i proizvodnja energije u tim satima biti veća. Budući da se vrijeme proizvodnje ne poklapa s vremenom potrošnje, kako bi se uspješno iskoristili kapaciteti potrebno je izgraditi sustav skladištenja viškova, tj. potrebno je sustav u integrirati procesne jedinice za kemijsku konverziju.



Slika 6-1 Satni prikaz prosječnih brzina vjetra (preuzeto od Klabučar, Aščić, 2018)

## 6.2 Analiza proizvodnje električne energije elektranom

Za ulazne podatke korištene su srednje brzine vjetra iz poglavlja 6.1. Razmatrana vjetroelektrana je NREL 5 MW Offshore. Podaci o modelu vjetroelektrane preuzeti su iz (Jonkman i sur., 2009) i prikazani u tablici 6-1:

Tablica 6-1. Tehnički podaci o vjetroelektrani NREL 5 MW Offshore

Snaga	5 MW
Konfiguracija	Tri kraka
Radni raspon	3 - 25 m/s
Brzina rotora	12.1 rpm
Učinkovitost generatora	94,4 %
Duljina kraka	61,5 m
Visina tornja	87,6 m

Proračun je proveden prema formuli iz *The Royal Academy of Engineering*:

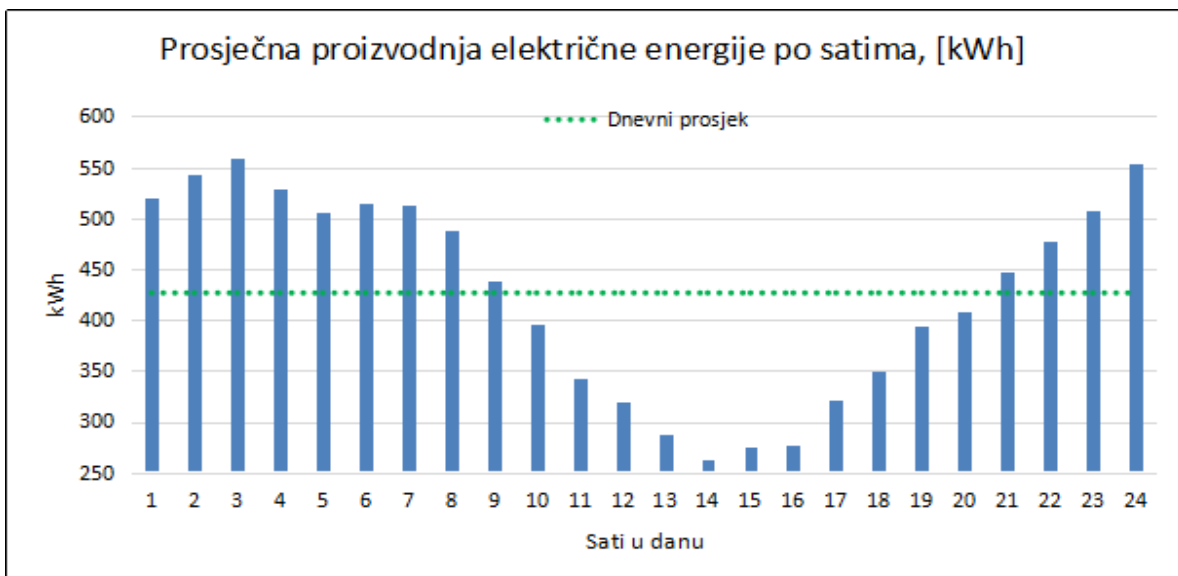
$$E = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \times t \quad [\text{Wh}] \dots \dots \dots (6.2.1.)$$

Značenja varijabli objašnjena su u tablici ispod.

Tablica 6-2 Varijable proračuna.

P	gustoća zraka
A	površina kretanja lopatica
V	brzina vjetra
C <sub>p</sub>	koeficijent pretvorbe
T	protoklo vrijeme

Srednja proizvodnja električne energije prikazana je na slici 6-2. Vidljive su varijacije unutar dana. Maksimum iznosi oko 560 kWh, a minimum oko 260 kWh. Prosječna dnevna proizvodnja iznosi približno 430 kWh.



Slika 6-2 Prosječna proizvodnja električne energije po satima (preuzeto od Klabučar, Aščić, 2018)

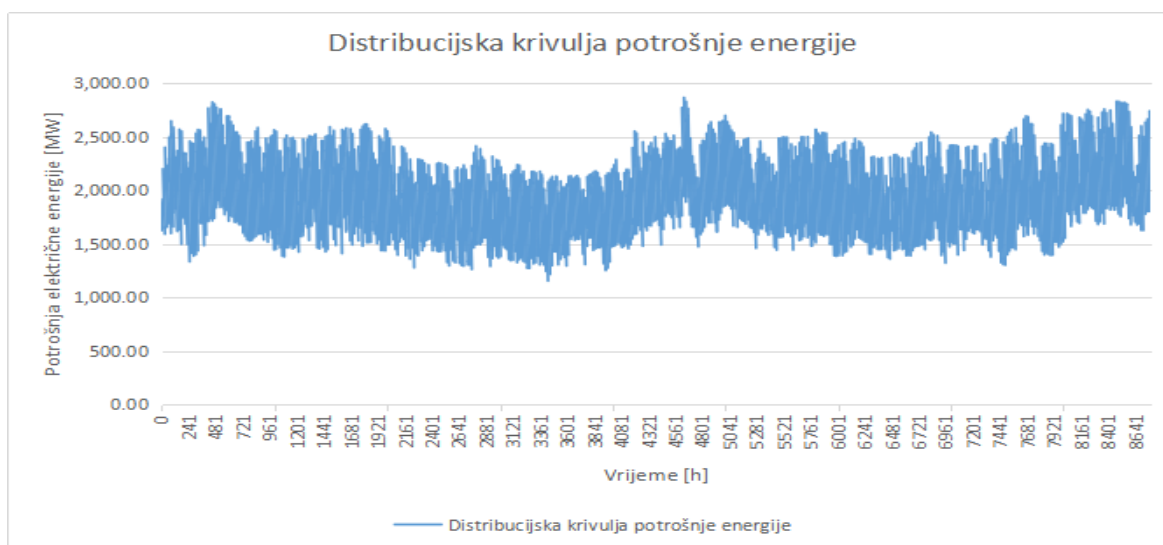
## 7. Referentni model

Kako bi se model izradio potrebno je izraditi i u program unijeti satne distribucijske krivulje snage vjetrova, po jednu krivulju za snagu svake vrste hidroelektrane (akumulacijske i protočne) te krivulje toplinskog opterećenja za odabranu godinu. One skupa s podacima o sustavu, nakon obrade u softveru, trebaju dati reprezentativan model. Drugim riječima nakon izrade analize energetske bilance za danu godinu, dobiveni podaci modela moraju odgovarati rezultatima koje je moguće pronaći na stranicama Međunarodne energetske agencije (IEA) za tu godinu s pretpostavljenim dopuštenim odstupanjem od 3 %. Ukoliko odstupanja budu u granicama, model se proglašava valjanim te se može koristiti kao osnova za nastavak proračuna. Bitno je napomenuti kako se krivulje u program unose u obliku tekstualne datoteke (.txt), sastoje se od 8784 satne vrijednosti.

### 7.1 Distribucijske krivulje

#### 7.1.1. Krivulja potrošnje električne energije

Podaci o potrošnji električne energije, tj. o opterećenju mreže preuzeti su se internetske baze podataka na (ENTSO-E,2018). Distribucija potrošnje vidljiva je na slici 7-1. Na slici nisu vidljive dnevne varijacije, ali se zato može uočiti sezonski karakter potrošnje. Povećana potrošnja vidljiva je u ljetnim mjesecima kada se električna energija koristi u svrhu hlađenja, a razina opterećenja iznosi približno 2800 MW. Također vidljivo je povećanje i u zimskim mjesecima pa se može pretpostaviti kako određen postotak stanovništva koristi električne grijalice za proizvodnju toplinske energije.



Slika 7-1 Distribucijska krivulja potrošnje električne energije

### 7.1.2. Krivulja toplinskog opterećenja

Sljedeća bitna krivulja je krivulja toplinskog opterećenja. Podaci o srednjim satnim temperaturama mogu se generirati u programu METEONORM. Ovaj softver nije besplatan te se u ovom radu nije koristio, ali bitno je napomenuti njegove mogućnosti. Za ovaj rad korištena je dostupna krivulja toplinskog opterećenja koja opisuje 2012. godinu te će zbog toga podaci odstupati od stvarnih. No, teoretski govoreći, moguće je izračunati satna toplinska opterećenja koristeći formulu:

$$Q_h = \frac{Q_{uk}}{\sum (T_u - T_v)} \times \Delta T_i \quad (7.2.1.)$$

Gdje su:

$Q_h$  - toplinsko opterećenje u danom satu

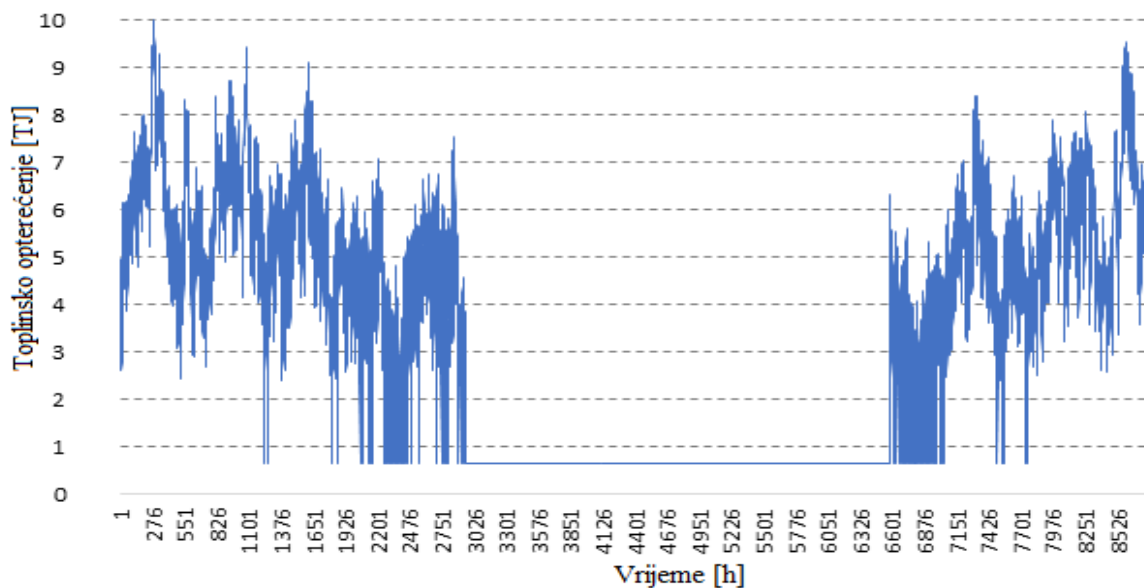
$Q_{uk}$  - ukupna potrošnja toplinske energije

$T_u$  - pretpostavljena unutarnja temperatura (22 °C)

$T_v$  - srednja vrijednost temperature zraka u satu

$\Delta T_i$  - stupanj - sat, (razlika između vanjske i unutarnje temperature za određeni sat)

Podatak ukupne potrošnje toplinske energije moguće je pronaći na internetskim stranicama Međunarodne energetske agencije (IEA). Nakon izračuna podataka dobija se krivulja oblika prikazanog na slici 7-2. Vidljivo je da se toplinska energija troši samo u zimskim mjesecima kada za to postoji potreba, a u ovom slučaju vrijednosti dosežu 10 TJ.

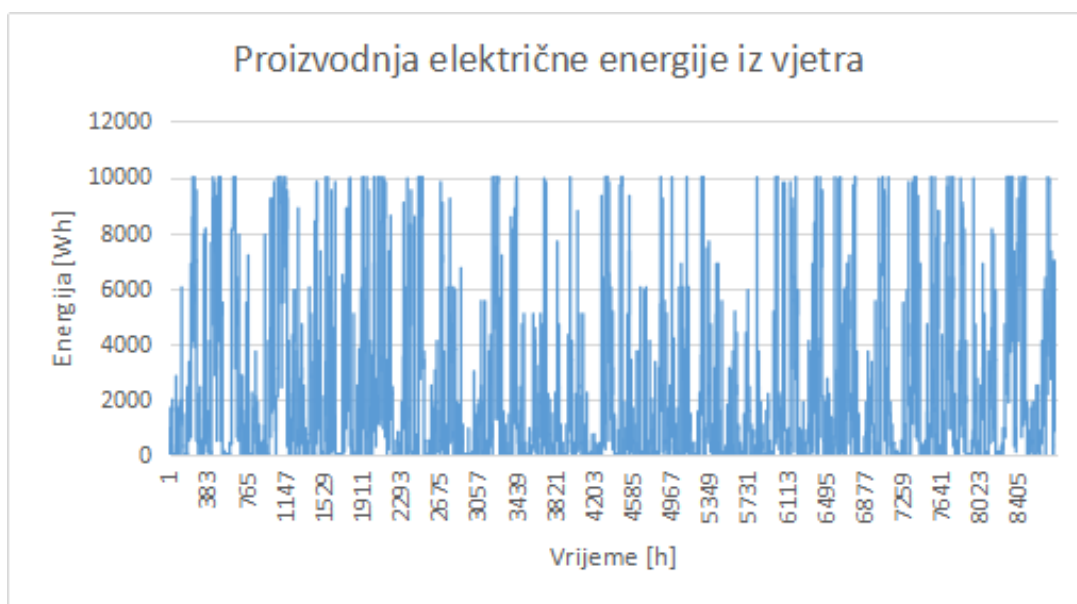


Slika 7-2 Krivulja toplinskog opterećenja (preuzeto od: Connolly i sur., 2015)

### 7.1.3. Krivulja proizvodnje električne energije vjetroelektranama

Za izradu krivulje odobalne vjetroenergije referentnog koristit će se podaci već ugrađeni u bazu EnergyPLAN-a. Podaci su navedeni za cijelu Hrvatsku, ne samo sjeverni Jadran. Za dobivanje energije sa odobalnih postrojenja bit će izrađena nova distribucijska krivulja budući da EnergyPLAN takva postrojenja svrstava u posebnu podskupinu.

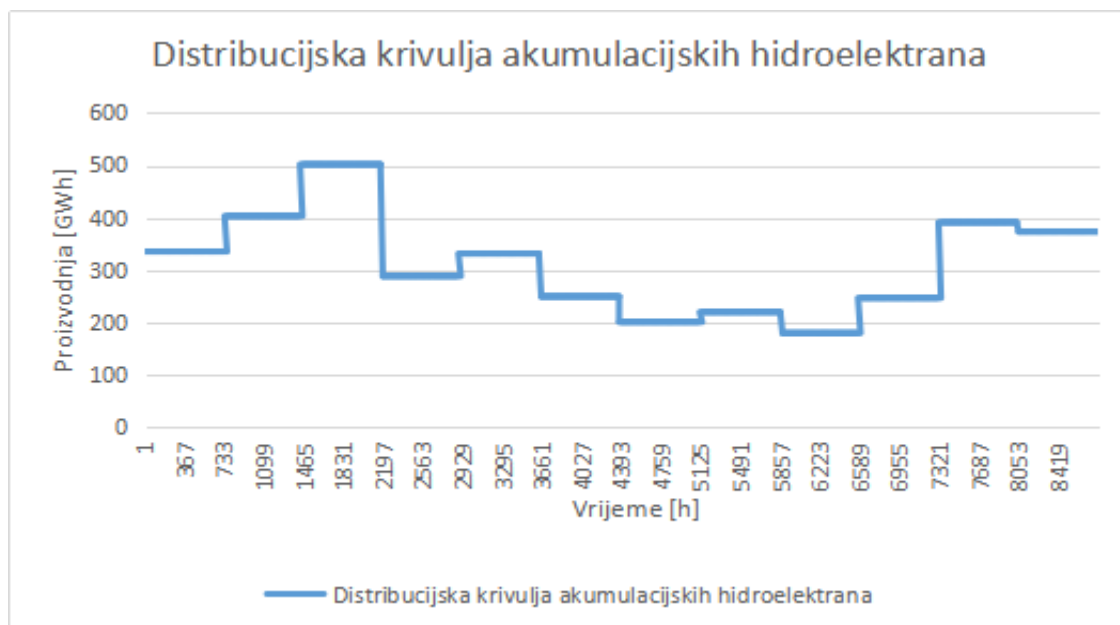
Na slici 7-3 prikazana je klasična distribucijska krivulja za vjetroenergiju.



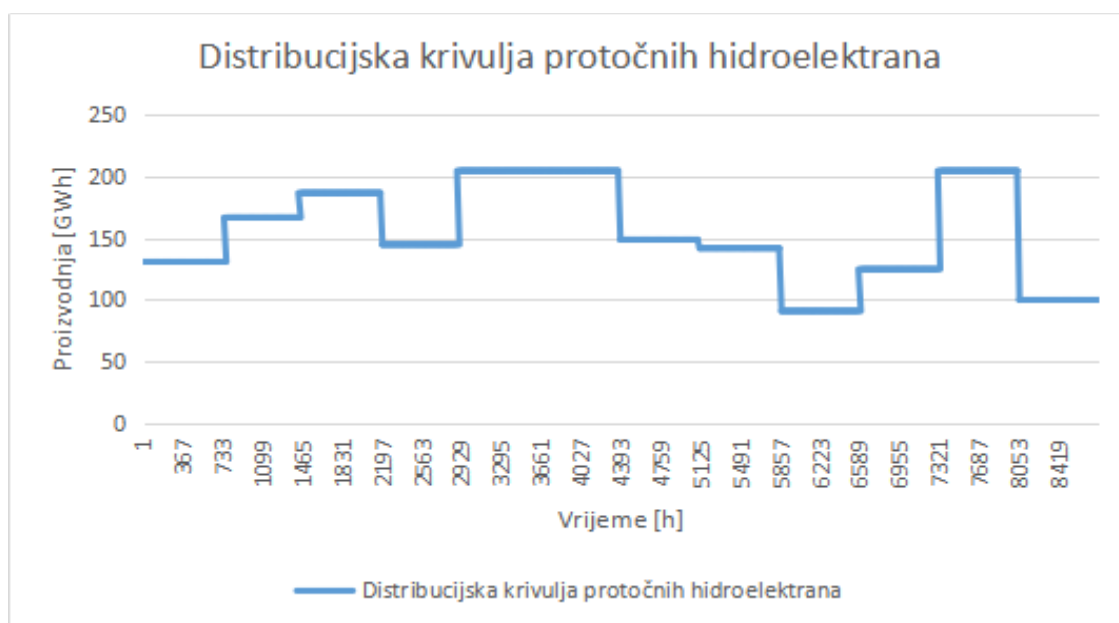
Slika 7-3 Krivulja proizvodnje električne energije vjetroelektranama

### 7.1.4. Krivulja proizvodnje električne energije hidroelektranama

Podaci za izradu ovih krivulja preuzeti su s online baze podataka na [33] kao i za podatke o vjetru. Podaci su obrađeni u dva seta, po jedan za svaki tip hidroelektrane (protočne i akumulacijske), a prikazani su kao srednje mjesečne vrijednosti proizvodnje. Na slikama 7-4 i 7-5 prikazane su krivulje za navedene tipove elektrana.



Slika 7-4 Distribucijska krivulja akumulacijskih hidroelektrana za Hrvatsku za 2016. godinu



Slika 7-5 Distribucijska krivulja protočnih hidroelektrana za Hrvatsku za 2016. godinu

### **7.1.5. Ostali ulazni podaci**

Postoji još niz podataka koje je potrebno implementirati u softver kako bi se pravilno izračunali parametri modela, a najbitnije su još:

- Krivulja insolacije - proizvodnja električne energije iz fotonaponski modula. U ovom se slučaju također koriste podaci srednjih vrijednosti.
- Uvoz i izvoz električne energije - EnergyPLAN ima opciju zadavanja točne količine koja se izvozi ili uvozi. Ova je stavka bitna za Hrvatsku budući da ima proizvodne kapacitete izvan granica. To je naravno nuklearna elektrana Krško koja se nalazi u suvlasništvu sa Slovenijom. Nuklearna elektrana je posebna u ovom slučaju jer se za pretpostavku njezinog rada koristi konstantna krivulja. Razlog tomu je priroda rada ovakve jedinice, tj. bazni način rada i male promjene opterećenja.

## **7.2. Izrada referentne godine**

Kako bi se referentna godina pravilno izradila potrebno je u EnergyPLAN unijeti nekoliko setova podataka. Nakon unosa prikazat će se rezultati modela koji trebaju korespondirati s podacima iz IEA za navedenu godinu.

U nastavku bit će prikazane i pojašnjene najbitnije stavke potrebne za izradu. Svi podaci su preuzeti iz godišnjeg izvješća Energetskog instituta Hrvoje Požar. Nakon što se prikaže vjerodostojnost softvera, tj. nakon usporedbe energetske bilance i modela, pristupit će se izradi novog sustava koji će sadržavati metode objašnjene u poglavlju 4. kako bi se analizirala mogućnost korištenja P2G tehnologija u svrhe poboljšanja energetske sustava.

### **7.2.1 Kartica electricity - demand**

Hrvatski energetske sustav karakterizira velik uvoz električne energije. Prema podacima EHIP-a u 2016. godini uvezeno je 8731,3 GWh električne energije što je gotovo 50% vrijednosti ukupne potrošnje (18349,5 GWh). No bitno je napomenuti kako se energija proizvedena u NE Krško tretira kao uvezena. S druge strane, Hrvatska ima i izvoz električne energije koji je u 2016. iznosio 3200,4 GWh. U ovoj kartici bilo potrebno unijeti podatke o potrošnji te uvozu i izvozu. U polje electricity demand unesena je vrijednost proizvodnje u iznosu od 12,82 TWh, a u polje fixed import/export razlika vrijednosti uvoza



i izvoza. Prema podacima EIHP-a uvezeno je 8731,3 GWh, a izvezeno 3200,4 GWh pa je stoga vrijednost upisana u polje iznosila 5530,9 GWh, odnosno 5,531 TWh.

### **7.2.2. Kartica heating - demand**

Toplinski sustav podijeljen je na tri komponente: individualno grijanje, mala kogeneracija i velika kogeneracija s mogućnošću kondenzacije. Glavni distribucijski fajl u ovoj kartici krivulja je satnog toplinskog opterećenja. U male toplane spadaju sve toplane u Republici Hrvatskoj koje nemaju kogeneraciju, a zadovoljavaju potrošnju od 2,316 PJ ili 0,64 TWh godišnje. Javne toplane, tj. termoelektrane promatraju se kao velika kogeneracijska postrojenja čija učinkovitost iznosi 90 %, a u 2016 godini ukupna proizvodnja toplinske energije iznosila je 9,026 PJ što je ekvivalentno 2,51 TWh (EIHP,2016).

### **7.2.3 Kartica supply - electricity only**

Ova kartica zahtijeva unos podataka o obnovljivim izvorima energije te unos distribucijskih krivulja za odgovarajuće elemente sustava. Prema podacima iz poglavlja 5.3.3.1. i 5.3.3.2. instalirani kapaciteti vjetroelektrana iznosili su 438,1 MW i proizvedeno je ukupno 1014,2 GWh električne energije, a kapaciteti fotovoltaičnih ćelija iznosili su 55,8 MW i proizvedeno je 65,5 GWh.

Hidroelektrane također spadaju pod ovu karticu. Instalirani kapaciteti protočnih elektrana u 2016. iznosili su 423,8 MW, a akumulacijskih 1774,9 MW.

### **7.2.4 Ekonomski parametri**

EnergyPLAN ima mogućnost cjelokupne ekonomske analize sustava, a za nju potrebno je u model uvrstiti podatke o troškovima sustava. U EnergyPLAN-u prikazani su kroz tri kartice:

- Investicijski i fiksni troškovi,
- Varijabilni troškovi i cijena održavanje
- Cijena goriva

Većina podataka potrebnih za analize već postoje u bazi podataka, a dostupni su službenim stranicama softvera. Neki od bitnijih podataka prikazani su u tablicama nastavku.

Tablica 7-1 Podaci o cijenama goriva u € / GJ za 2015 (EnergyPLAN cost database, 2018).

Cijena €/GJ	Ugljen	Loživo ulje	Dizel	Benzin	Prirodni plin	Biomasa	Nuklearna
Niska	2,2	6,1	11	11,9	6,3	4,6	1,5
srednja	2,8	11,6	16	16,4	8,3	6	1,5
Visoka	3,5	17	20,9	20,8	10,4	7,3	1,5

Tablica 7-2 Varijabilni troškovi i cijena održavanja, pretpostavka za 2020 (EnergyPLAN cost database, 2018).

Sektor grijanja i CHP sustavi	
Jedinica	V i O&M [€/MWh]
Kotao	0,9
CHP	2,9
Električno grijanje	0,4
Elektrane	
Hidroelektrana	1,19
Termoelektrana	2,9
Geotermalna	15
Spremnici	
Pumpa	1,19
Turbina	1,19
Elektrolizer	0

Tablica 7-3 Investicijski troškovi i vijek trajanja nekih postrojenja za 2015godinu (EnergyPLAN cost database, 2018).

Tehnologija	Investicija [M€/jedinica]	Vijek trajanja [godina]
PEM elektrolizer	1,9	15
Reaktor	1,89	20
Odobalna vjetroelektrana	2,49	25
Vjetroelektrana	1,07	25
Fotonaponske ćelije (srednje)	1,25	30
Akumulacijska hidroelektrana	2,45	60
Protočna hidroelektrana	5,5	60
Termoelektrana (ugljen)	1,93	40

### 7.2.5 Usporedba modela s energetsom bilancom

Rezultati dobiveni obradom u softveru prikazani su i uspoređeni sa stvarnim podacima Međunarodne energetske agencije u tablici 7-4.

Tablica 7-4 *Rezultat referentnog EnergyPLAN modela za 2016.*

Dio sustava	Modelirana proizvodnja [TWh]	Stvarni podaci proizvodnje [TWh]	Apsolutna pogreška	Odstupanje [%]
Hidroelektrane	7,200	7,058	142	2
Vjetroelektrane	0,98	1,014	34	3
Termoelektrane	4,77	4,682	88	1,8
Emisije CO <sub>2</sub>	15,9 [Mt]	15,86 [Mt]	0.25	0,25

Usporedbom u tablici 7-4, moguće je zaključiti kako rezultati modela u velikoj mjeri odgovaraju statističkim podacima. Zaključuje se da je referentni scenarij valjan i da distribucijske krivulje zadovoljavajuće opisuju energetske sustav te se može nastaviti s daljnjom analizom i nadogradnjom sustava.

## 8. Model elektroenergetskog sustava

### 8.1 Metodologija

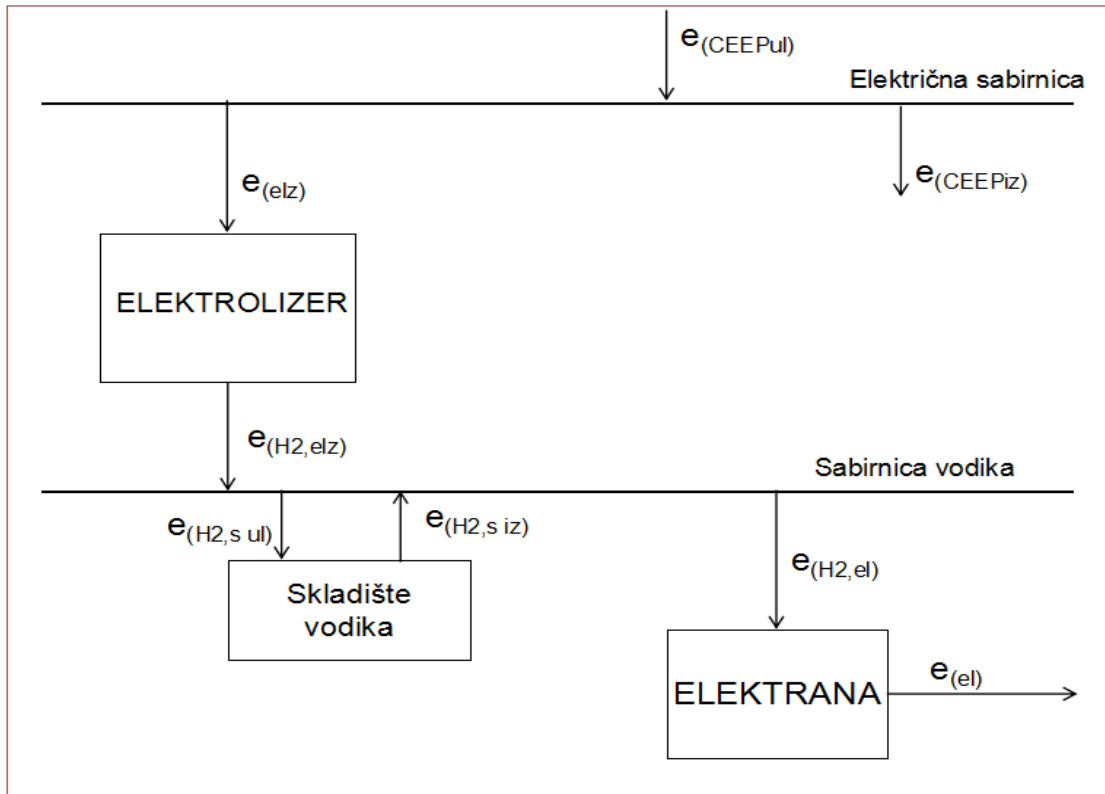
Implementacijom različitih kapaciteta odobalnih vjetroelektrana, postrojenja za proizvodnju vodika te jedinica za proizvodnju SNG-a izvedeni su parametri o CEEP-u (engl. *Critical excess electricity production*), emisijama CO<sub>2</sub> te proizvodnji energije.

Razrađena su ukupno četiri sustava:

- Bazni - prikazuje trenutno stanje sustava i na njega se nadovezuju ostali sustavi
- OIE - pretpostavlja povećanje instaliranih kapaciteta odobalih vjetroelektrana. Prikazuje podatke o potencijalu sjevernog Jadrana te kakav utjecaj na Hrvatsku može imati izgradnja ovakvog sustava.
- H<sub>2</sub> - pretpostavlja izgradnju kapaciteta za elektrolizu koji koriste višak energije proizvedene u OIE scenariju kako bi se proizvodio vodik te na taj način skladištili viškovi.
- SNG - pretpostavlja izgradnju kapaciteta za hidrogenaciju, tj. Sabatierovih reaktora u kojima se proizvedeni vodik u kemijskoj reakciji s CO<sub>2</sub> pretvara u sintetski prirodni plin.

Prva su dva sustava modelirani u *EnergyPLAN*-u. Softveru koji promatra i simulira ponašanje nacionalnog energetskog sustava kroz parametre navedene u poglavlju 2. metodologija korištena za izradu baznog modela opisana je u poglavlju 7, no iako postoje, ekonomski parametri nisu analizirani već samo navedeni kako bi se prikazala i ta mogućnost softvera.

OIE scenarij modeliran je prema parametru kritičnog viška proizvodnje energije te je promatran utjecaj povećanja OIE na CEEP, emisije CO<sub>2</sub>, proizvodnju energije iz OIE. Podaci dobiveni u ovom scenariju korišteni su za daljnje modeliranje trećeg i četvrtog scenarija, a najbitniji su CEEP, uvoz i izvoz električne energije. Podaci su spremljeni u satnoj rezoluciji, a daljnji modeli izrađeni su u interpreterskom programskom jeziku *Python*. Izrađene su jednadžbe ravnoteže prema kojima se modeli prikazani na slikama 8-1 i 8-2 računali. Prema njima je, za svaki model, izrađena funkcija cilja koja uključuje maksimalno smanjenje kritičnog viška proizvedene energije.



Slika 8-1 Model sustava kada se koristi samo vodik (vlastita grafika)

U ovom se sustavu mogu izvesti ukupno četiri jednadžbe ravnoteže, ali je također potrebno uvesti pet ograničenja, a značenja pojedinih varijabli bit će prikazane u tablici nakon prikaza oba modela.

Jednadžbe ravnoteže glase:

$$\text{Ravnoteža CEEP-a: } e_{CEEPul} - e_{CEEPiz} - e_{elz} = 0 \quad (8.1.1)$$

$$\text{Ravnoteža vodika: } e_{elz} = e_{H_2,elz} * \frac{1}{\eta_{elz}} \quad (8.1.2)$$

$$\text{Ravnoteža skladišta } e_{H_2,elz} - e_{H_2,s,ul} + e_{H_2,s,iz} - e_{H_2,el} = 0 \quad (8.1.3)$$

$$\text{Ravnoteža elektrane } e_{H_2,el} = e_{el} * \frac{1}{\eta_{H_2,el}} \quad (8.1.4)$$

Jednadžbe ograničenja glase:

$$e_{el} \leq \min(e_{uvoz}, P_{el}) \quad (8.1.5)$$

$$e_{elz} \leq P_{elz} \quad (8.1.6)$$

$$e_{CEEP,iz} \geq 0 \quad (8.1.7)$$

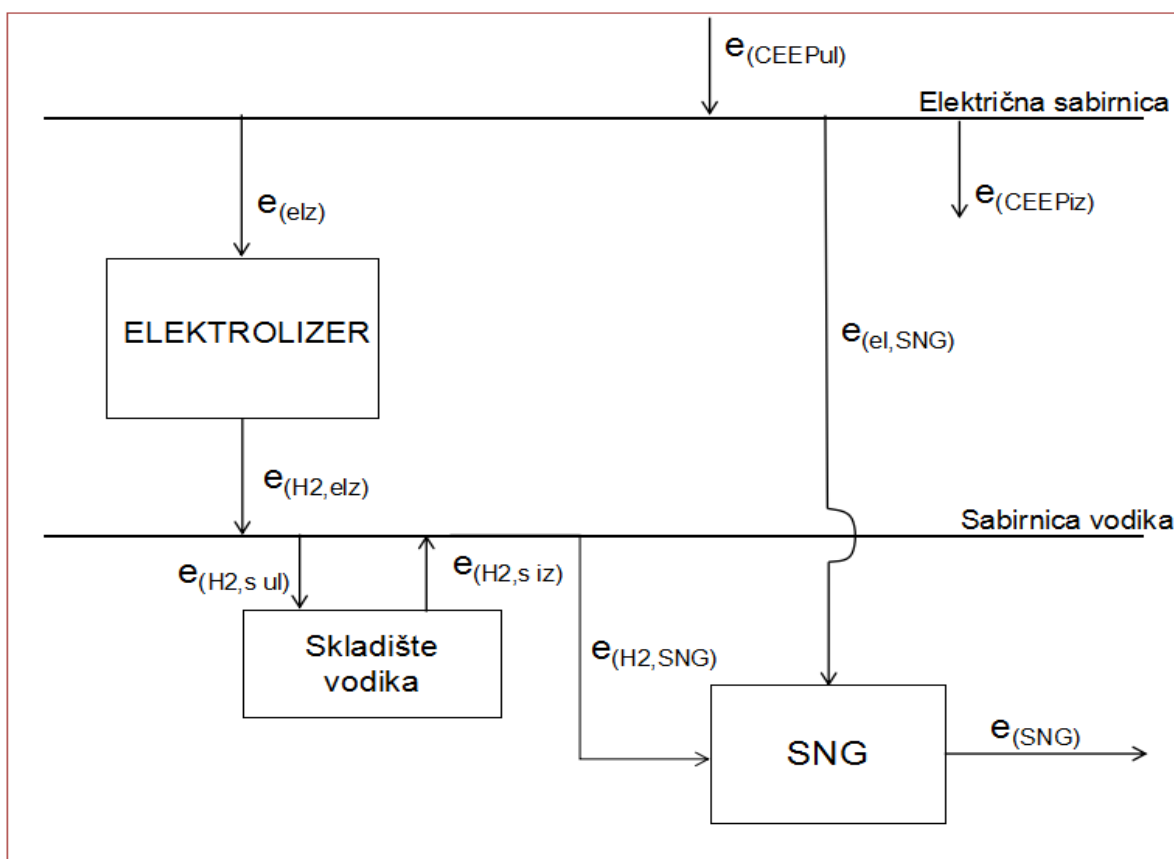
$$0 \leq E_{t-1} + e_{H_2,s,ul} - e_{H_2,s,iz} \leq E_{H_2,maks} \quad (8.1.8)$$

Nepoznate varijable u ovakvom sustavu su:  $e_{el}$ , te ulaz i izlaz parametara skladišta vodika. Ulazni podaci preuzeti su iz *EnergyPLAN-a*, a sadrže *inpute*:  $e_{CEEP,ul}$  te  $e_{uvoz}$ . Prema navedenim jednadžbama sastavljena je funkcija cilja koja pretpostavlja minimalnu vrijednost, označena je s  $Y$ , definirana kao umnožak izlaznog CEEP-a i njegovog troška umanjenog za umnožak proizvedene energije i njezine cijene, a glasi:

$$Y = P_{CEEP} \times \left[ e_{CEEP,ul} - \frac{1}{\eta_{elz}} \times \left( \frac{1}{\eta_{H_2el}} \times e_{el} + e_{H_2,s,ul} - e_{H_2,s,iz} \right) \right] - P_{el} \times e_{el} \quad (8.1.9)$$

Očekivane prednosti sustava su smanjena količina kritičnog viška energije te smanjena količina potrebnog uvoza električne energije. Rezultati će biti prikazani za svaki scenarij u posebnom podpoglavlju.

Sljedeći model sličan je upravo opisanom, razlikuju se u tome što se elektrana iz modela s vodikom zamjenjuje postrojenjem za proizvodnju SNG-a. Model i elementi sustava prikazani su na slici 8-2.



Slika 8-2 Model sustava kada se koriste vodik i metanacija (vlastita grafika)

U ovom su sustavu također izvedene četiri jednadžbe ravnoteže koje glase:

$$\text{Ravnoteža CEEP-a: } e_{CEEPul} - e_{CEEPiz} - e_{elz} - e_{el,SNG} = 0 \quad (8.1.10)$$

$$\text{Ravnoteža vodika: } e_{elz} = e_{H_2,elz} * \frac{1}{\eta_{elz}} \quad (8.1.11)$$

$$\text{Ravnoteža skladišta } e_{H_2,elz} - e_{H_2,s,ul} + e_{H_2,s,iz} - e_{H_2/SNG} = 0 \quad (8.1.12)$$

$$\text{Ravnoteža SNG jedinice } e_{H_2/SNG} + e_{el,SNG} - e_{SNG} = 0 \quad (8.1.13)$$

Gdje su:

$$e_{el,SNG} = \eta_{seq} \times x_{CO_2/SNG} \times e_{SNG} \quad (8.1.14)$$

$$e_{H_2/SNG} = x_{H_2/SNG} \times e_{SNG} \quad (8.1.15)$$

U ovom sustavu postoje tri varijable koje je potrebno naći, a to su:  $e_{SNG}, e_{H_2,s,ul}$  te  $e_{H_2,s,iz}$ . Za ulazne podatke u ovom se scenariju iz EnergyPLAN-a uzima samo parametar  $e_{CEEP,ul}$ , a izvedena funkcija cilja glasi:

$$Y = P_{CEEP} \times \left[ e_{CEEP} - \eta_{seq} \times x_{CO_2/SNG} \times e_{SNG} - \frac{1}{\eta_{elz}} (e_{H_2,s,ul} - e_{H_2,s,iz} + x_{H_2/SNG} \times e_{SNG}) \right] - P_{SNG} \times e_{SNG} \quad (8.1.16)$$

Očekivane prednosti sustava su smanjena količina kritičnog viška energije te smanjena količina potrebnog uvoza prirodnog plina. Rezultati će kao i za prethodni model biti prikazani u sljedećim poglavljima.

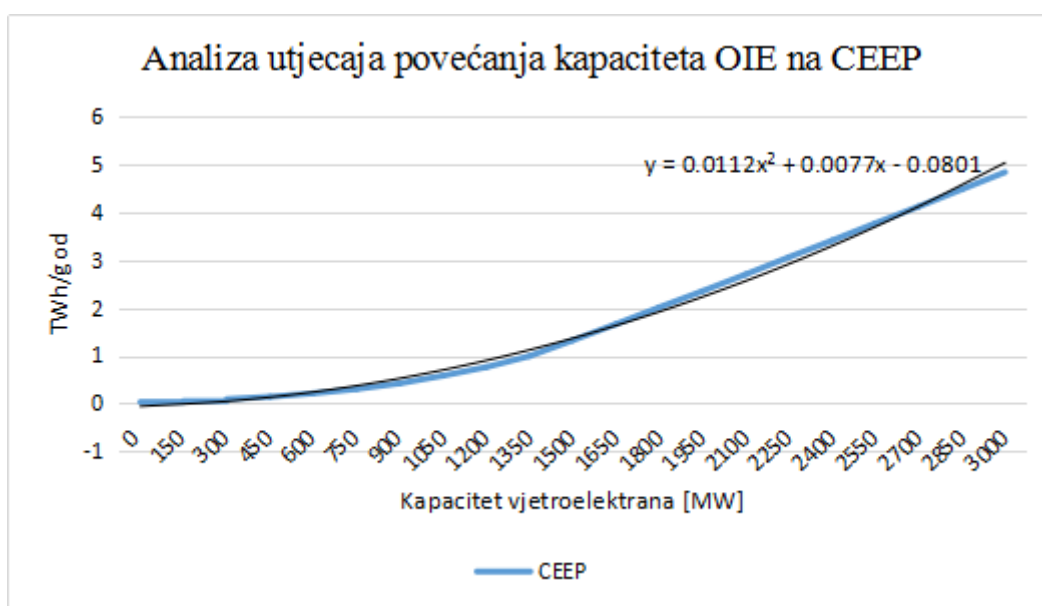
## 8.2 OIE scenarij

Prvi korak u izradi ovog modela bio je određivanje i izrada krivulje kritičnog viška energije. Odredila se na način da se kroz niz izračuna povećavao instalirani kapacitet odobalnih vjetroelektrana uz pretpostavku baznog stanja kapaciteta fotovoltaičnih ćelija kroz nekoliko slučajeva, što je za posljedicu imalo i povećanje CEEP-a. Kapaciteti vjetroelektrana su se mijenjali s korakom od 150 MW od 0 do 3000 MW, a za fotoćelije pretpostavljen je bazni scenarij s kapacitetom od 55,8 MW. Tako se dobilo 20 izračuna za

scenarij u kojem se pretpostavlja samo rast kapaciteta vjetroelektrana, bez implementacije P2G tehnologija. Dobiveni su podaci o nekoliko parametara:

- Kritični višak proizvodnje energije (engl. *CEEP*),
- Emisije CO<sub>2</sub>,
- Proizvodnja električne energije iz OIE

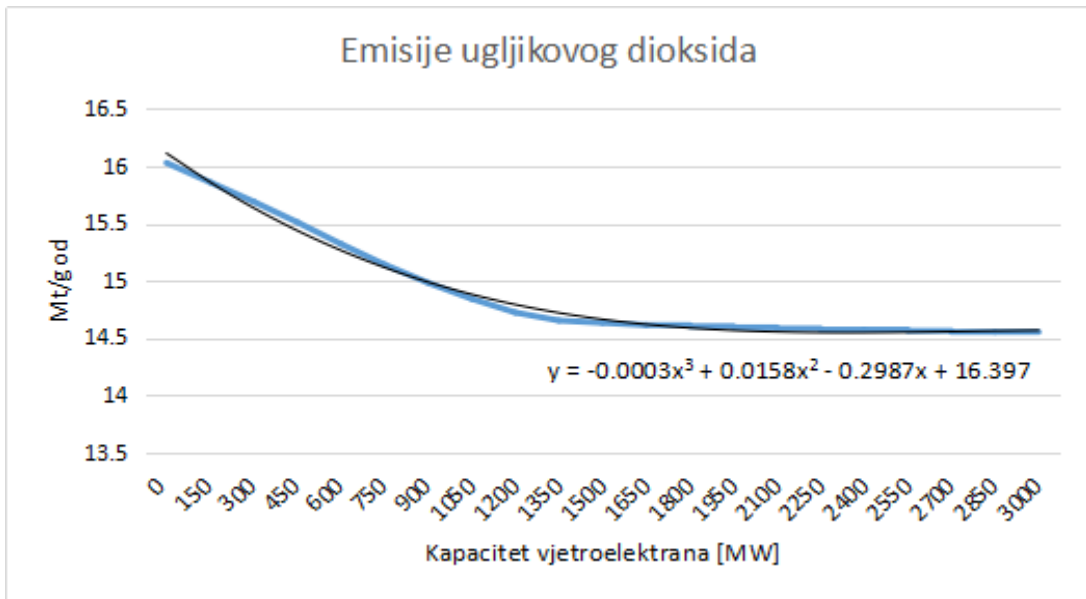
Podaci su obrađeni u MS Excel-u te su dobivene krivulje za navedene parametre koje su prikazane na slikama 8-3, 8-4 i 8-5.



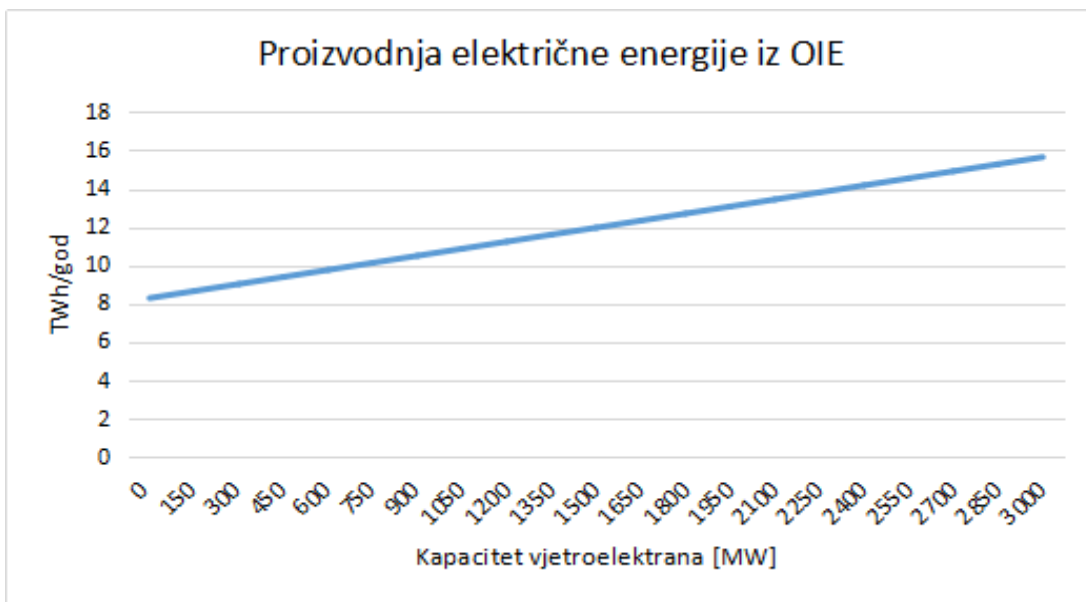
Slika 8-3 Analiza utjecaja povećanja kapaciteta OIE na CEEP

Iz slike je vidljivo kako CEEP raste instalacijom kapaciteta OIE, a krivuljom drugog reda može se opisati porast. Kada bi se na sjevernom Jadranu instalirali kapaciteti od približno 1400 MW, višak proizvedene energije tada bi iznosio 1TWh godišnje, što je značajan iznos. Nadalje, pristupilo se izračunu godišnjih emisija CO<sub>2</sub> i proizvodnji energije iz obnovljivih izvora energije. U ovaj izračun uzeli su se u obzir već instalirani kapaciteti obnovljivih izvora. Na slikama 8.2.2. i 8.2.3. prikazane su krivulje smanjenja emisija i proizvodnja energije iz OIE u već navedenim slučajevima.





Slika 8-4 Ovisnost emisija CO<sub>2</sub> o povećanju OIE.



Slika 8-5 Proizvodnja električne energije iz OIE

Ovi grafovi služe kao prikaz potencijala hrvatske energetike, a vidljivo je kako je moguće postaviti sustav tako da veliki udio energije dolazi iz OIE. Implementacijom 1200 MW vjetroelektrana postiže se 10 postotno smanjenje emisija, tj. 1.5 Mt/god, a proizvodnja iz OIE u odnosu na baznu godinu zabilježila bi gotovo 40 % povećanja. Ovaj scenarij prikazuje način smanjenja ovisnosti o fosilnim gorivima i uvoz električne energije.

### 8.3 H<sub>2</sub> i SNG scenariji

Ovi scenariji pretpostavljaju implementaciju jedinica za elektrolizu uz korištenje vodika u postrojenju za izgaranje te jedinica za proizvodnju SNG-a. Analizirano je ukupno 11 slučajeva od kojih će ovdje biti prikazani samo bazni slučaj te slučaj s maksimalnim kapacitetom vjetroelektrana (3 GW). Svaki izračun se razlikuje u instaliranom kapacitetu vjetroelektrana, a korak između svake analize iznosio je 300 MW. Prvi korak u analizi bio je izrada tablice u programu *MS Excel* koja sadrži podatke o četiri parametra za svaki korak analize, a uključuju podatke o: kritičnom višku proizvedene energije, uvozu i izvozu električne energije te uvozu prirodnog plina. Ti podaci su dobiveni ranije izrađenom analizom u programskom softveru *EnergyPLAN* i prikazani su u satno rezoluciji tj. 8784 vrijednosti za svaki slučaj. Zatim je izrađena programska skripta koja učitava podatke iz tablice i izrađuje matrice s pojedinim vrijednostima. Zatim su izrađene jednadžbe koje proračunavaju energetske tokove prikazane u poglavlju *Metodologija*, a također su zadane jednadžbe ograničenja. Implementirane su u programu kao funkcija koja se može pozivati unutar programa kako bi se izračunale varijable prema kojima se sustav modelirao. Nakon izrade funkcija pristupilo se izradi programa koji računa vrijednosti za svaki pojedini slučaj. Unutar njega postavljeno je pet parametara koji se ne mogu mijenjati, a to su:

- Učinkovitost elektrolize
- Učinkovitost sekvestracije CO<sub>2</sub>
- Količina CO<sub>2</sub> potrebnog za proizvodnju jednog TWh SNG-a
- Količina H<sub>2</sub> potrebnog za proizvodnju jednog TWh SNG-a
- Iskoristivost elektrane (postrojenja za izgaranje vodika)

Parametri koje je moguće mijenjati i o kojima ovise rezultati i izgled krivulja su:

- Električna snaga elektrolizera [MW-e]
- Maksimalni kapacitet H<sub>2</sub> spremnika [GWh]
- Maksimalna snaga H<sub>2</sub> elektrane [MW-e]
- Maksimalna izlazna snaga SNG postrojenja [MW]

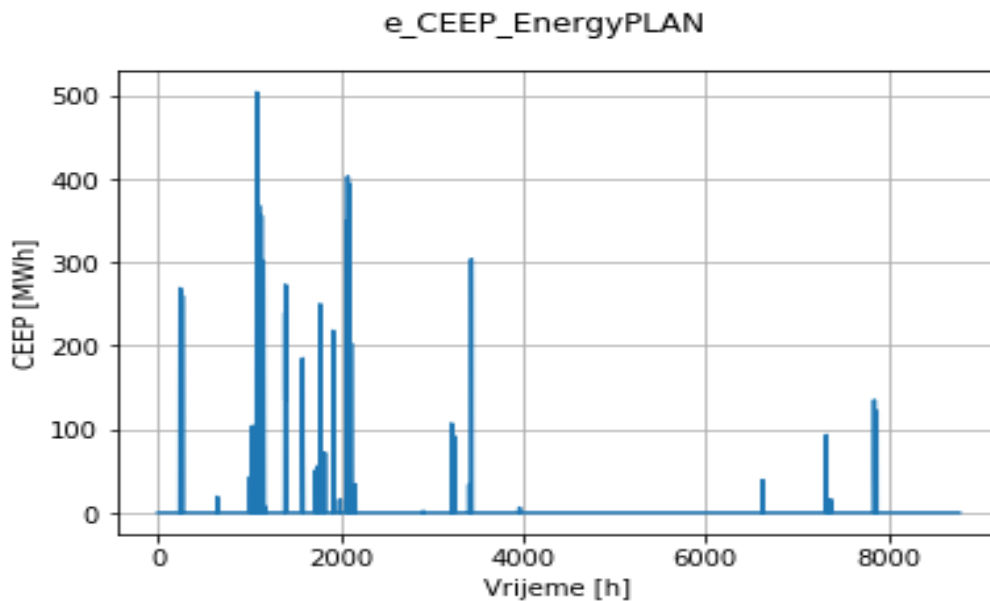
Uz još jedan parametar koji određuje slučaj koji se želi izračunati. Ovisno o njemu uzimaju se određene vrijednosti CEEP-a, uvoza i izvoza električne energije te uvoza plina iz generiranih matrica. Za izradu krivulja za određeni slučaj korištena je nova skripta koja uzima izračunate podatke i prikazuje ih grafički. Izlaz sadrži ukupno devet grafova za svaki slučaj, a ovdje će biti prikazani samo neki.

Prvi graf u svakom slučaju opisuje promjenu CEEP-a u svakom satu u godini. Ostalih osam podijeljeno je u dvije skupine po četiri grafa, za slučaj H<sub>2</sub> i slučaj SNG, koji opisuju:

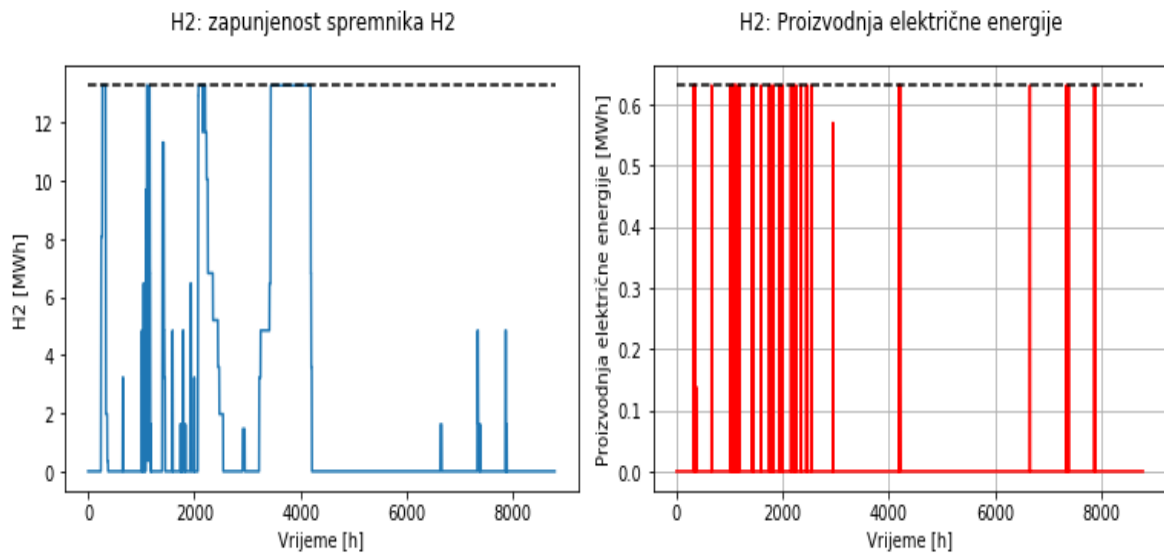
- Zapunjenost spremnika vodika
- Proizvodnju električne energije
- Potrošnju energije elektrolizera
- Omjer stvarno proizvedene i maksimalno moguće energije

U nastavku, na slikama 8-6, 8-7 i 8-8 prikazani su grafovi za zapunjenost spremnika vodika i proizvodnju električne energije za H<sub>2</sub> i SNG slučajeve, kao i raspodjela CEEP-a po satima. Bitno je napomenuti da su promjenjivi parametri postavljeni na sljedeće vrijednosti:

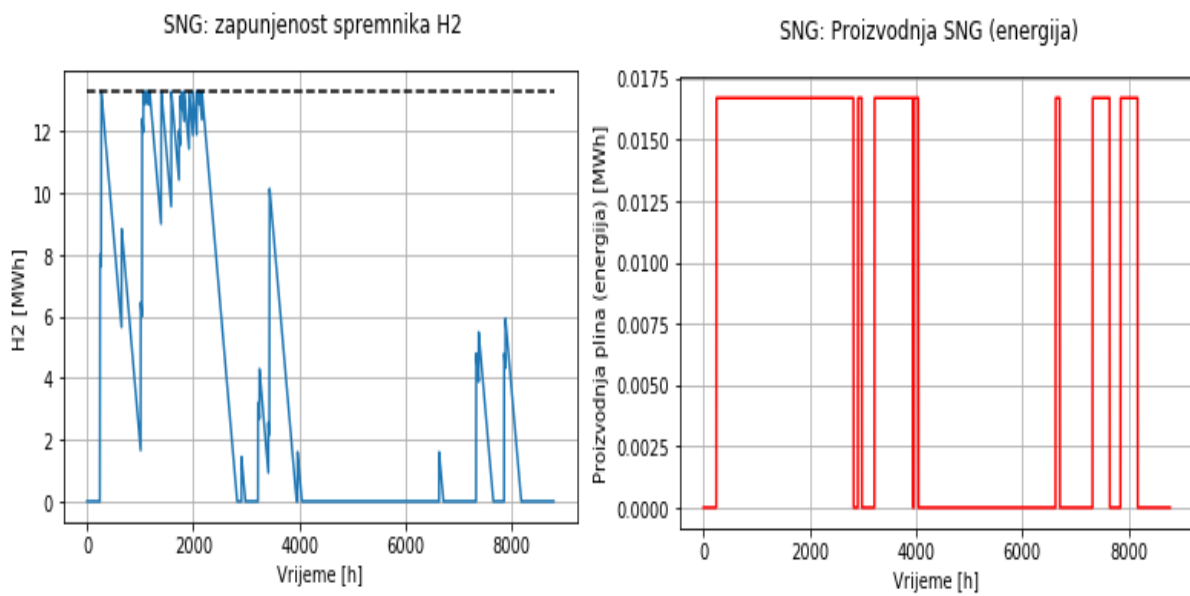
- Električna snaga elektrolizera; 850 MW-e
- Maksimalni kapacitet H<sub>2</sub> spremnika; 0,08 GWh
- Maksimalna snaga H<sub>2</sub> elektrane; 150 MW-e
- Maksimalna izlazna snaga SNG postrojenja; 90 MW



Slika 8-6 Satna raspodjela kritičnog viška proizvodnje električne energije u baznom slučaju

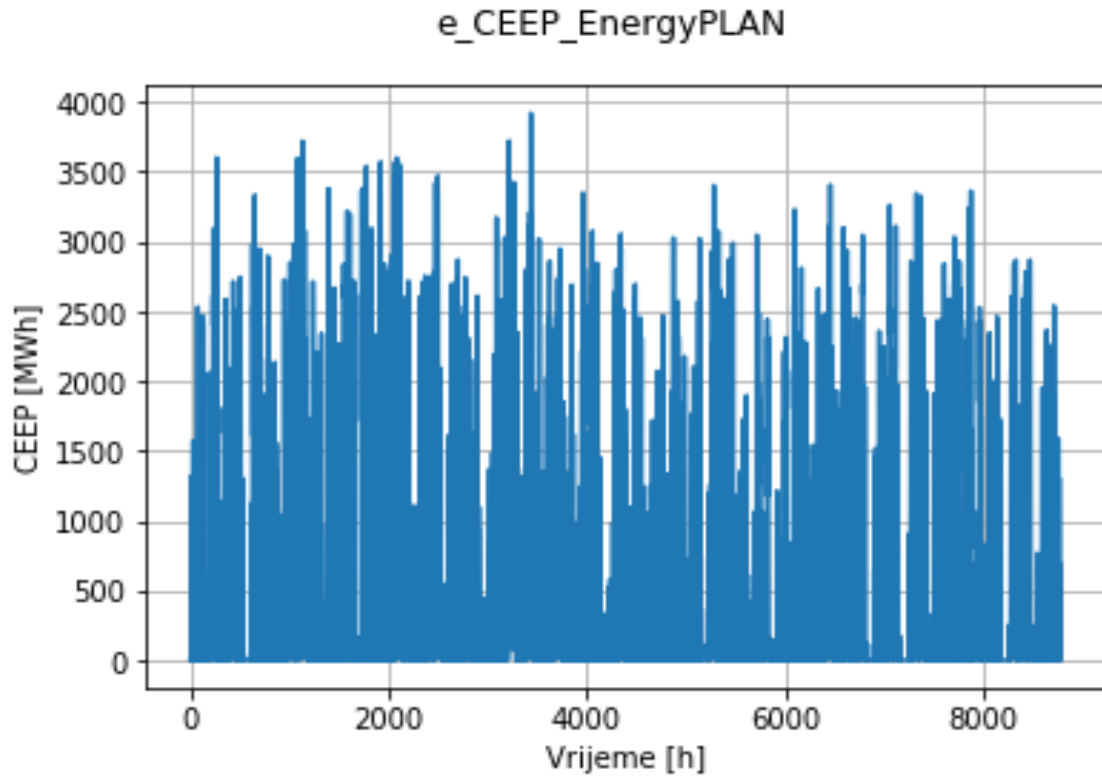


Slika 8-7 Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u H<sub>2</sub> scenariju za bazni slučaj

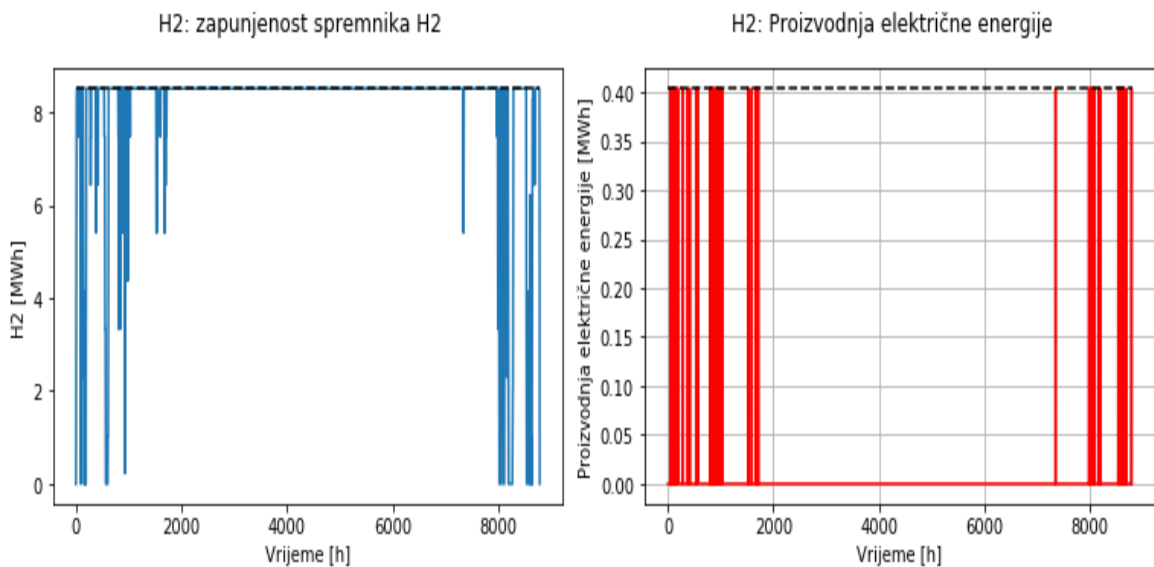


Slika 8-8 Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u SNG scenariju za bazni slučaj

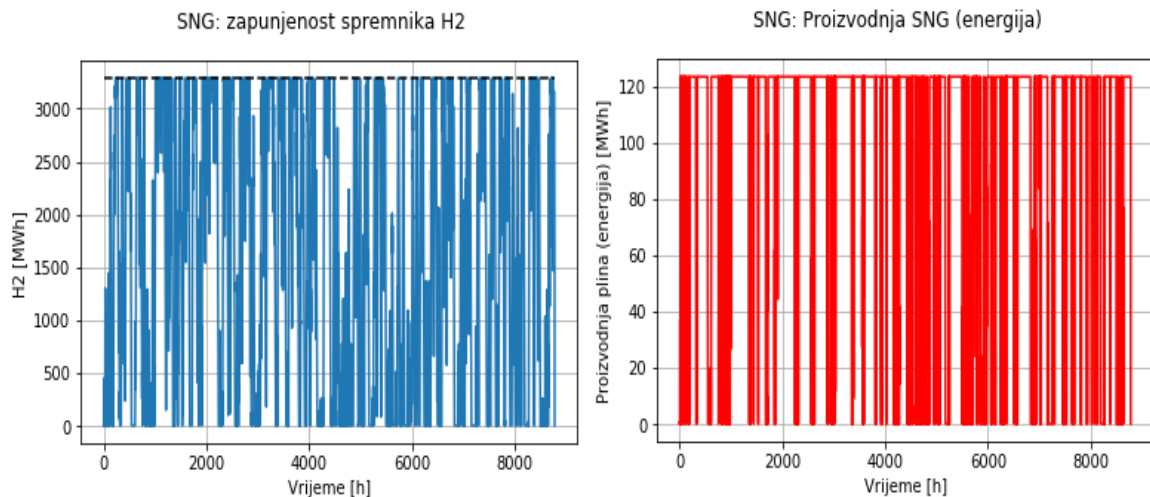
Nadalje, na slikama 8-9, 8-10 i 8-11 prikazani su isti grafovi, ali uzevši uobzir maksimalno povećanje kapaciteta.



Slika 8-9 Satna raspodjela kritičnog viška proizvodnje električne energije u slučaju maksimalno analiziranog kapaciteta



Slika 8-10 Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u H<sub>2</sub> scenariju za maksimalno analizirani kapacitet

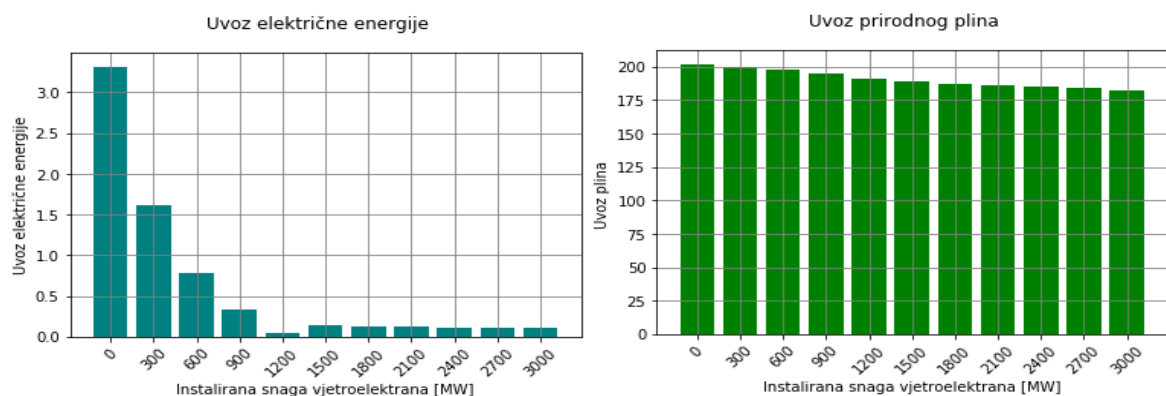


Slika 8-11 Zapunjenost spremnika vodika i proizvodnja električne energije u H<sub>2</sub> scenariju za maksimalno analizirani kapacitet

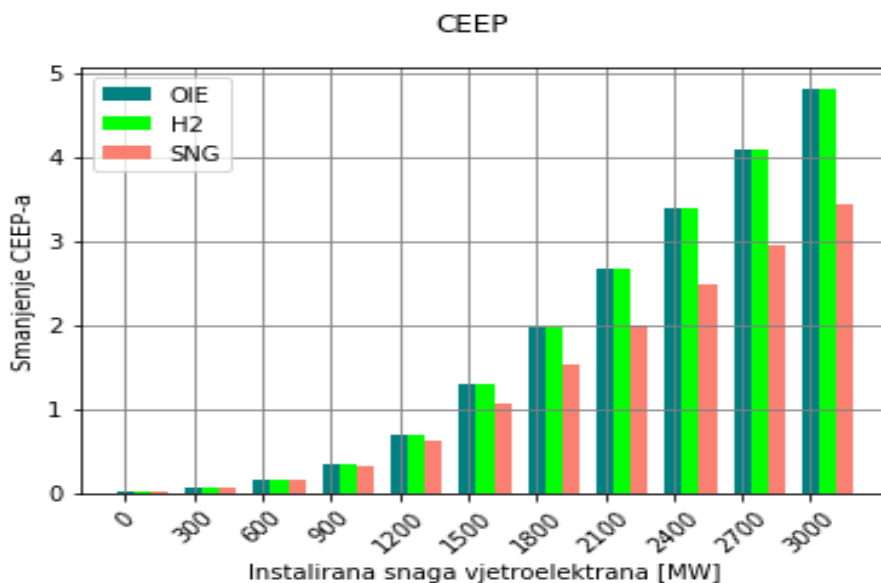
Vidljiva je korelacija između zapunjenosti spremnika vodika i proizvodnje električne energije, odnosno plina (koji je iskazan u jedinici energije). U satima u kojima postoji određena količina vodika u skladištu postoji i proizvodnja. Nepravilnosti krivulje proizlaze iz činjenice da je energije dobivena iz OIE isprekidanog karaktera, drugim riječima u određenim satima postoji veća proizvodnja.

#### 8.4. Usporedba scenarija

U ovom je poglavlju prikazana usporedba tri scenarija za Republiku Hrvatsku. Prikazan je pregled ciljeva koji svaki scenarij ostvaruje, a vidljivi su na slikama 8-12 i 8-13. U scenariju OIE vidljiv je porast CEEP-a, a podaci dobiveni služili su kao ulazni podaci za izradu H<sub>2</sub> i SNG modela. Vidljivo je ostvarenje ciljeva svakog scenarija, tj. smanjenje uvoza električne energije kao i smanjenje uvoza prirodnog plina.



Slika 8-12 Ciljevi dobiveni modeliranjem



Slika 8-13 *Usporedba modela*

Ovaj rad služi kao preliminarni pregled podataka u vidu poboljšanja elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske. No kako bi se moglo sa sigurnošću ukazati na isplativost provedbe ovakvih projekata potrebno je izraditi dodatne studije poput ekonomske analize i studije izvedivosti.

## 9. Zaključak

U ovom radu prikazane su mogućnosti poboljšanja elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske koristeći tehnologije kemijske konverzije. Implementacija ovakvih postrojenja na plinske platforme predstavljala bi značano poboljšanje u vidu energetske neovisnosti Hrvatske.

Sinergijom postojeće plinske infrastrukture i elektroenergetskog sustava, odnosno odobalnim vjetroparkovima koji koriste ustaljeniji vjetar na otvorenom moru za stabilniju proizvodnju električne energije moguće je poboljšati postojeći sustav. Jedini problem je intermitencija, tj. isprekidanost vjetra pa se tako proizvodnja ne poklapa sa stvarnom potrošnjom te tako nastaju kritični viškovi proizvedene električne energije koji negativno utječu na elektroenergetski sustav (promjene frekvencije, napona i dr.). Zadatak skaldištenja tada preuzimaju tehnologije kemijske konverzije (P2G). Procesne jedinice instalirane na postrojenja u sjevernom Jadranu skladište viškove u obliku kemijske energije plinova vodika i metana. Proizvedeni plinovi mogu se koristiti u svim sektorima djelatnosti i kućanstvima, za grijanje, industriju transport i druge potrebe ili skladištiti ako za njima nema potreba.

Rezultati analize pokazuju kako je moguće smanjiti ukupan uvoz plina za 10% instalacijom postrojenja za SNG izlazne snage 90 MW i 1200 MW vjetroelektrana. Emisije ugljikovog dioksida za 1,5 Mt godišnje, tj. također za 10 %, a ukupnu proizvodnju električne energije moguće je povećati za 40 %, tj. na 11.5 TWh godišnje što iznosi preko 50 % trenutnih potreba Hrvatske za električnom energijom.

Daljnjim analizama potrebno je pronaći optimalan odnos kapaciteta vjetroelektrana i procesnih jedinica koje se postavljaju na platforme. Koristeći jednadžbe dane u radu uz male promjene sustava moguće je provesti analizu za bilo koje područje, uzimajući u obzir samo promjenu parametara distribucijskih krivulja, izlaznih snaga postrojenja i kapaciteta skladišta vodika. No, kako bi se u konačnici opravdala izgradnja ovakvih sustava potrebno je provesti ekonomsku analizu za svaku opciju za svaku lokaciju posebno. Ovaj rad služi kao preliminarni pregled podataka u vidu poboljšanja elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske.



## LITERATURA:

- A Roadmap for moving to a competitive lowcarbon economy in 2050, (2011). URL: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/roadmap\\_fact\\_sheet\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/roadmap_fact_sheet_en.pdf) (13.9.2018.)
- Aalborg University. EnergyPLAN: Advanced Energy System Analysis Computer Model. Dostupno na: <http://www.energyplan.eu/>
- Ayers, K. E. , Capuano, C. B., Wiles, L. (2017.): AEM Electrolysis Progress and Impact on the Cost of Hydrogen; Gaylord National Resort and Convention Center,
- Carmo, M.; Fritz, D.L.; Mergel, J.; Stolten, D.; (2013): A comprehensive review on PEM water electrolysis. Elsevier,
- Čolak D. (2012): ENERGIJA SUNCA KAO ZNAČAJAN POTENCIJAL SMANJENJA ENERGETSKE OVISNOSTI REPUBLIKE HRVATSKE, separat diplomskog specijalističkog rada
- Connolly,D., Drysdale, D., Hansen K., Novosel, T., (2015): Creating Hourly Profiles to Model both Demand and Supply, Background Report 2. URL:<https://hre.aau.dk/wp-content/uploads/2018/09/STRATEGO-WP2-Background-Report-2-Hourly-Distributions-1.pdf> (3.10.2018)
- Cuffari B. (2018) : Offshore vs. Onshore Wind Farms URL:<https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=704> (28.9.2018.)
- Diogo M., Santos, F.; César A., Sequeira, C.; Figueiredo, J., L., (2013): Hydrogen production by alkaline water electrolysis Quím. Nova, vol.36 São Paulo
- Duić N., Krajačić G., Graça Carvalho M., Zmijarević Z., Vad Mathiesen B., Anić Vučinić, A. (2011): Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO2 emissions reduction. Applied Thermal Engineering 31, 2073-2083.
- EIHP, Energija u Hrvatskoj (2016): Godišnji energetske pregled; Ministarstvo zaštite okoliša i energetike,
- EnergyPLAN Cost Database Version 4.0, Sustainable Energy Planning Research Group, Aalborg University, [www.EnergyPLAN.eu/costdatabase/](http://www.EnergyPLAN.eu/costdatabase/)
- ENTSO-E, Power Statistics (2018) URL:<https://www.entsoe.eu/data/power-stats/> (5.10.2018.)
- Fraile, D., Mbistrova, A., Pineda, I., Tardieu, P.: Wind EUROPE (2017), Wind in power, Annual combined onshore and offshore wind energy statistics,.

- Granić G., Kojaković A, Mandarić A , A. Bačan , B. Kulišić , B. Jelavić, B. Vuk ,B. Židov , D. Golja , D. Bajs , D. Đurđević, D. Šaša , G. Čogelja , K. Stupin , L. Horvath , M. Matosović, M. Božičević Vrhovčak , M. Zidar , M. Salopek, M. Tot, M. Perović , M. Skok, M. Zeljko, N. Matijašević, R. FabekS. Živković, S. Knežević,T. Baričević ,T. Čop ,T. Borković, V. Vorkapić, Ž. Jurić, Ž. Fištrek, D. Pešut, V. Bukarica, D. Jakšić, L. Krstanović, A. Kinderman Lončarević, J. Brajković, M. Karan, D. Maljković, G. Majstrović, Energetski institut Hrvoje Požar (2018): Analize i podloge za izradu energetske strategije Republike Hrvatske, Zelena knjiga, Nacr. STU-18-00046/1
- Granitsiotis, G. (2017): Methanation of Carbon Dioxide, Experimental research of separation enhanced methanation of CO<sub>2</sub>, Technische Universiteit Delft
- Helmeth, Integrated High-Temperature ELeCtrolYsis and METHAnation for Effective Power to Gas Conversion: Methanation process URL: <http://www.helmeth.eu/index.php/technologies/methanation-process> (19.9.2018.)
- HEP opskrba d.o.o. član HEP grupe (2017): Izvori energije, Struktura izvora električne energije u 2017. URL: <http://www.hep.hr/opskrba/trziste-elektricne-energije/trziste/izvori-energije/1385> (20.9.2180)
- Ikäheimo, J., Kiviluoma, J. (2015): Operating P2G in a power system with large amounts of PV, wind power and hydro power VTT Technical Research Centre of Finland, dostupno na <https://www.researchgate.net/publication/296679886>
- INA-Industrija nafte (2017); Godišnje izvješće: Izvješće o poslovanju
- International energy agency: Statistics (2018) URL:<https://www.iea.org/statistics>
- Jerkić E.: VE u regiji (2014) URL:<http://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-u-regiji> (28.9.2018)
- Jonkman, J., Butterfield,S., Musial, W., Scott, G., (2009): Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development Technical Report NREL/TP-500-38060
- Karasalihović Sedlar, D., Jukić, L. (2015): Utjecaj Strategije niskougličnog razvoja Republike Hrvatske na energetske sektor nafte i plina. Nafta i plin, 36-46.
- Klabučar B., Aščić, D. (2018): Analiza mogućnosti upotrebe plinske infrastrukture odobalnih eksploatacijskih polja sjevernog Jadrana za iskorištavanje plave energije, Rektorova nagrada
- Lund H. (2006): Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply. Renewable Energy 31 503–515

- Lund H., Duić N., Krajačić G., Graca Carvalho M. (2007): Two energy system analysis models: A comparison of methodologies and results. *Energy* 32, 948-954.
- Maroufmashat, A., Fowler, M., (2017.): Transition of Future Energy System Infrastructure; through Power-to-Gas Pathways; Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, *Energies*, 10, 1089; doi:10.3390/en10081089
- PHOTOVOLTAIC BAROMETER, a study carried out by EurObserv'ER, contract no. ENER/C2/2016-487/SI2.742173
- Richard H., Gazis E., Edge J., Rhodes A., Gross R. (2018): Unlocking the potential of Energy Systems Integration. Imperial College London. An Energy Futures Lab Briefng Paper,
- Schaaf, T., Grünig, J., Schuster, R. M., Rothenfluh., T., Orth A., (2014.): Methanation of CO<sub>2</sub> - storage of renewable energy in a gas distribution system; *SpringerOpen Journal*,
- Šimić Z. (2010): Energija vjetra, Korištenje energije vjetra za proizvodnju el. energije  
URL: [http://oie.mingo.hr /UserDocsImages/Vjetar%20prezentacija.pdf](http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Vjetar%20prezentacija.pdf) (30.9.2018)
- Šimleša D. (2009): OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE; Studija ostvarivosti,
- Smolinka, T.: PEM Water Electrolysis - Present Status of Research and Development, Review lecture (2010) URL: [https://www.sintef.no/globalassets/project/nexpel/pdf/hp-3d\\_pem-electrolysis\\_smo1.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/nexpel/pdf/hp-3d_pem-electrolysis_smo1.pdf) (18.9.2018.)
- The Royal Academy of Engineering: Wind Turbine Power Calculations, RWE npower renewables, Mechanical and Electrical Engineering, Power Industry
- Wikipedia: Hidroelektrane u Hrvatskoj;  
URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane\\_u\\_Hrvatskoj#HE\\_Zakućac](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj#HE_Zakućac) (22.9.2018)
- WIND ENERGY TECHNOLOGIES OFFICE: Advantages and Challenges of Wind Energy URL: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy> (22.9.2018.)

## **IZJAVA O AUTORSTVU RADA:**

Ja, David Aščić, pod punom moralnom odgovornošću, izjavljujem da sam autor diplomskog rada pod naslovom: IMPLEMENTACIJA P2G THENOLOGIJA U MODEL ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA REPUBLIKE HRVATSKE KORIŠTENJEM SOFTVERSKIH ALATA ENERGYPLAN I PYTHON izrađenog na zavodu za naftno rudarstvo pod mentorstvom docenta. Luke Perkovića te da u navedenom radu nisu na nedozvoljen način korišteni dijelovi tuđih radova.

U Zagrebu, 8.11.2018.

Potpis studenta:

---