

Koncept sustava za proizvodnju zelenog vodika uporabom energije vjetra

Kadi, Lovro

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:271562>

Rights / Prava: [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**KONCEPT SUSTAVA ZA PROIZVODNJU ZELENOG VODIKA
UPORABOM ENERGIJE VJETRA**

Rijeka, rujan 2022.

Lovro Kadi

0035203930

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**KONCEPT SUSTAVA ZA PROIZVODNJU ZELENOG VODIKA
UPORABOM ENERGIJE VJETRA**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Igor Wolf

Rijeka, rujan 2022.

Lovro Kadi

0035203930

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

IZJAVA

Sukladno Pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tijekom studija, uz pomoć navedene literature i savjeta mentora.

Lovro Kadi

Rijeka, rujan 2022.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Igoru Wolfu na zadavanju teme rada, strpljenju i stručnom vodstvu prilikom izrade ovog rada. Također, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na svojoj pruženoj podršci tijekom studiranja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAVI I ENERGIJA VJETRA	3
2.1. Razvoj hibridnih energetske sustava	4
2.2. Energija vjetra - matematički model	6
3. VODIK	9
3.1. Elektroliza vode	9
3.1.1. Termodinamička načela elektrolize	11
3.2. Tipovi elektrolizatora	12
3.2.1. PEM elektrolizatori	13
3.3. O pohrani vodika	16
3.4. O gorivnim člancima	18
4. STANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA U RH	20
4.1. Prijenosno područje Split	22
4.2. Potrošnja električne energije na lokaciji	24
5. SUSTAV PROIZVODNJE VODIKA UZ KORIŠTENJE ENERGIJE VJETRA	25
5.1. Sustav vjetroelektrane	25
5.1.1. Analiza podataka o brzini vjetra	25
5.1.2. Proračun vjetroagregata	28
5.1.3. Smještaj vjetroagregata u prostoru	32
5.1.4. Shema spajanja vjetroagregata na elektrodistribucijsku mrežu	34
5.2. Proizvodnja vodika	36
5.3. Kompresija i spremnici za pohranu vodika	41

5.4. Smanjenje emisija	44
5.5. Ekonomska analiza	45
5.5.1. Investicijski troškovi	45
5.5.2. Troškovi upravljanja i održavanja	47
5.5.3. Prihodi od prodaje vodika	48
5.5.4. Prihodi od prodaje električne energije	48
5.5.5. Potrebna cijena električne energije	51
5.5.6. Analiza profitabilnosti uz prodaju vodika	51
6. REZULTATI	54
7. ZAKLJUČAK	59
8. LITERATURA	60
POPIS OZNAKA I KRATICA	63
SAŽETAK	66
SUMMARY	67

1. UVOD

Zagađenje okoliša, skokovi cijena fosilnih goriva i promjenjiva geopolitička klima samo su neki od razloga zbog kojih sve više raste potreba za razvojem i korištenjem obnovljivih izvora energije. Iako su fosilna goriva još uvijek dominantan izvor energije, važno je napraviti tranziciju prema korištenju izvora energije koji su manje štetni za planet Zemlju. Emisije štetnih plinova, ponajviše ugljikovog dioksida, uzrok su globalnog zatopljenja i ubrzanog kolapsa klime kakvu poznajemo. Izvori energije koji su sigurniji za okoliš i koji će se sve više koristiti su energija vjetra, vode, Sunca i biomasa.

Prema *Izvešću o europskoj strategiji za vodik*, EU parlament smatra da je važno ulagati u infrastrukturu proizvodnje, pohrane i transporta zelenog vodika kako bi se osigurala energetska stabilnost i smanjile štetne emisije. Prema njihovim procjenama, do 2050. godine oko 14 % europske potražnje za energijom pokrivać bi zeleni vodik.

Kao izvor energije vjetar je neiscrpan, besplatan i ne zagađuje okoliš. Prema definiciji, vjetar je kretanja zraka koja je nastala zbog razlika u tlaku. U prirodi se zrak kreće s prostora većeg tlaka prema području manjeg tlaka. Što je ta razlika tlaka veća, veća je i brzina nastalog vjetra [1]. Energija vjetra može se iskoristiti pretvorbom u električnu energiju u vjetroelektranama. Međutim, neka ograničenja koja dolaze u sklopu proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana su: neredovito i nejednoliko puhanje vjetra te poteškoće sa skladištenjem/transportom energije [2].

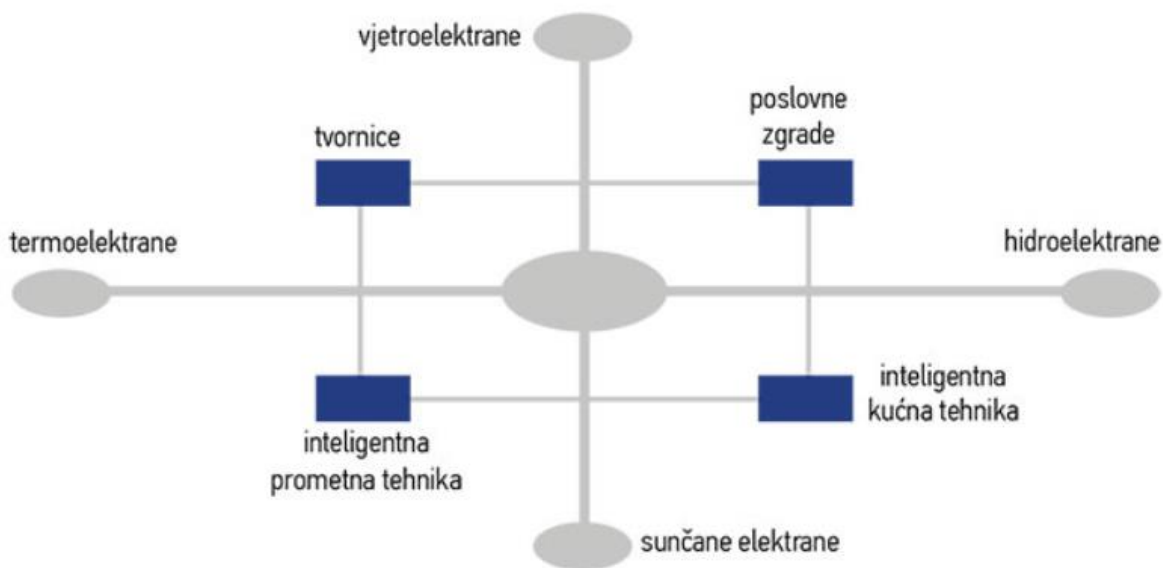
Energetski sustav baziran na vodiku mogao bi riješiti navedene probleme. Višak proizvedene električne energije iz vjetroelektrane može se iskoristiti za proizvodnju vodika elektrolizom. Taj vodik se može pohraniti i pretvoriti ponovno u električnu energiju u gorivnim člancima ili plinskim turbinama. Budući da ne stvara štetne emisije, vodik proizveden elektrolizom iz obnovljivog izvora energije kao što je vjetar, nameće se kao čisti i održivi prijenosnik energije. Zbog brojnih prednosti kao što su ekološka sigurnost, velika učinkovitost pretvorbe energije i znatna gustoća energije (između 120 i 142 MJ/kg) vodik se naziva „gorivom budućnosti“. Međutim, volumetrijska gustoća energije tekućeg vodika iznosi oko 8 MJ/L, dok primjerice za benzin ona iznosi 32 MJ/L [3]. Dakle, u odnosu na ostale energente vodik zahtijeva mnogo veće spremnike za pohranu jednake količine sadržane energije. Vodik proizveden iz obnovljivih izvora energije naziva se

zelenim vodikom. Neki od izazova upotrebe vodika kao izvora energije su njegovo skladištenje i transport budući da se radi o najmanjoj molekuli nekog kemijskog elementa, a u smjesi sa zrakom je i eksplozivan.

U sklopu ovog diplomskog rada dati će se pregled aktualnih tehnologija hibridnih energetske sustava baziranih na obnovljivim izvorima energije s posebnim naglaskom na zeleni vodik. Koncipirat će se sustav za proizvodnju i pohranu vodika uporabom energije vjetra uz modeliranje i analizu ekonomske isplativosti tog sustava. Pretpostavljena lokacija postrojenja je otok Brač. U konačnici će se procijeniti i potencijalno smanjenje emisija stakleničkih plinova implementacijom takvog sustava u energetske mrežu.

2. HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAVI I ENERGIJA VJETRA

Hibridni energetska sustavi su sustavi u kojima se kombinirano koriste dva ili više izvora energije, odnosno sustava za pohranu energije. Neke od mogućih kombinacija su vjetroelektrane sa sunčanim elektranama, hidroelektrane sa sustavom pohrane energije, sunčane elektrane sa elektranom na biomasu, plinske termoelektrane u kombinaciji sa sustavom pohrane energije itd. Prema [4], svjetski kapaciteti za pohranu energije su u naglom porastu iz godine u godinu. Tako su svjetski kapaciteti pohrane energije u 2020. porasli za gotovo 50% u odnosu na godinu ranije, a taj trend nastavlja se i dalje. Kina je trenutno vodeća zemlja u porastu energetska kapaciteta. Sustavi za pohranu energije pružaju određenu razinu fleksibilnosti vezano uz uravnoteženje ponude i potražnje električne energije. Moguće je rješavanje brojnih problema vezanih uz promjenjivu proizvodnju i potrošnju energije poput vršne potrošnje. U novije doba razvio se pojam *prosumer* koji označava potrošača koji je ujedno i proizvođač električne energije, dakle on ju može pohraniti te trgovati njome. U takvim slučajevima pohrana energije rješava probleme s nepredvidljivošću proizvodnje u sunčanim ili vjetroelektranama koje su ovisne o vremenskim prilikama. Na slici 1 prikazan je jednostavni primjer idealnog hibridnog sustava opskrbe energijom kakav bi se mogao koristiti u budućnosti.



Slika 1. Hibridni sustav opskrbe energijom [4].

2.1. Razvoj hibridnih energetske sustava

Posljednjih godina intenzivno se istražuju nove mogućnosti i poboljšanja postojećih sustava generiranja i pohrane električne energije korištenjem obnovljivih izvora energije.

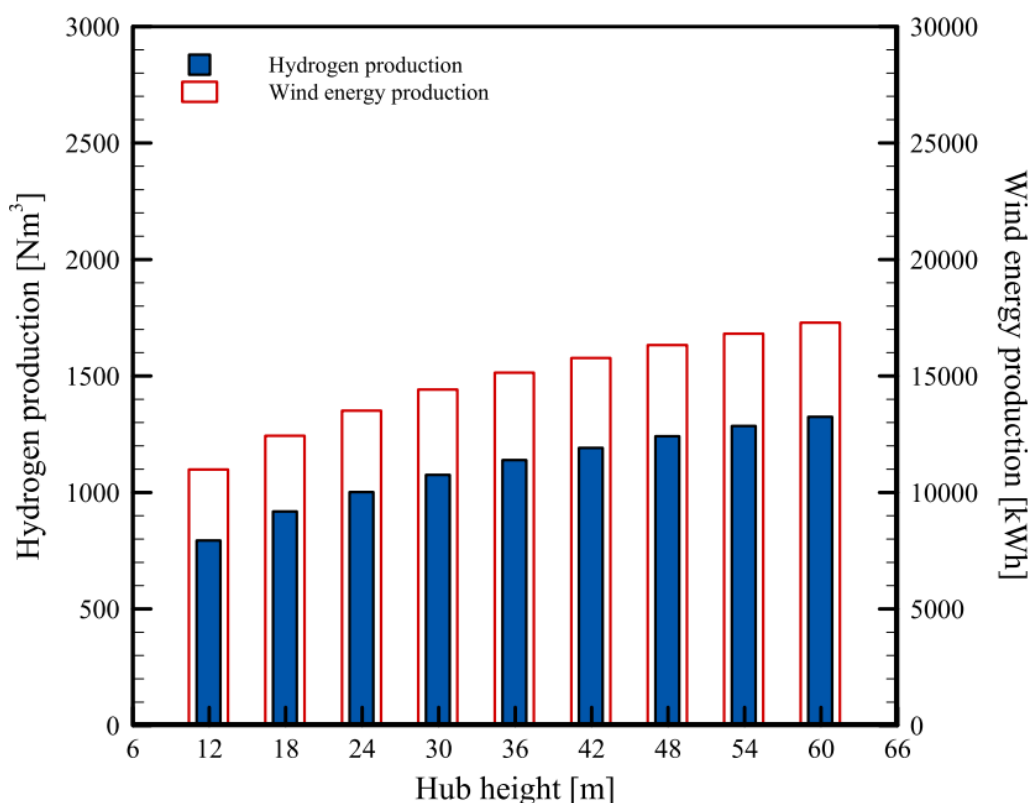
Primjerice, u istraživanju Brka S. et al. [5], analizira se jedan samostalni sustav baziran na vodiku i razmatra se na koji način se može optimizirati veličina i rad takvog sustava. Optimizacijom se želi postići učinkovitije korištenje obnovljivih izvora energije uz najniže investicijske troškove s maksimalnim iskorištenjem instaliranih komponenti. Analizirane komponente uključuju PEM gorivne članke, PEM elektrolizatore, spremnike plinovitog vodika pri atmosferskom tlaku i vjetroagregat snage 2 kW (visina rotora 18 m). Neke od korištenih metoda u tom istraživanju su moderne metode genetskog algoritma i neuralnih mreža. Zaključak istraživanja bio je da ovakav moderni pristup koji koristi umjetnu inteligenciju daje bolje rezultate od tradicionalnog modeliranja sustava.

U istraživanju Yilmaz F. et al. [6], analizira se hibridni sustav sunčeve elektrane, vjetroelektrane i klasičnog Rankineovog ciklusa uz proizvodnju i pohranu vodika. Glavni cilj tog istraživanja bio je termodinamička analiza sustava. Analizirane su energetska i eksergetska učinkovitost sustava, brzina kojom se proizvodi vodik i električna energija, nepovrativost procesa i razne druge varijacije koje utječu na sustav (brzina vjetra, intenzitet sunčevog zračenja, referentna temperatura itd.). Iz dobivenih rezultata uočeno je da ovakav sustav nije štetan za okoliš, da ukupna energetska učinkovitost cijelog sustava iznosi 21%, a ukupna snaga Rankineovog ciklusa i vjetroelektrane iznosi redom 195,9 kW i 326,5 kW. Proizvodnja vodika iz tog istraživanja iznosi 5,25 kg/s, a trostupanjska kompresija je korištena prije pohrane u spremnike.

Još jedno zanimljivo istraživanje, [7], proveli su južnoafrički znanstvenici Ayodele T.R. i Munda J.L. koji su analizirali potencijal i ekonomsku isplativost hibridnog sustava za proizvodnju vodika pomoću energije vjetra na više lokacija u Južnoj Africi. Na temelju podataka o izmjenim brzinama vjetra analizirali su koji parametri rada vjetroelektrane imaju najveći utjecaj na proizvodnju vodika. Srednje brzine vjetra izmjerene na visini 60 m iznosile su od 5 m/s do 8 m/s, ovisno o lokaciji. U sklopu tog istraživanja odabrano je nekoliko različitih vjetroagregata raznih

proizvođača s različitim parametrima rada. U konačnici, zaključeno je da je brzina vjetra imala najveći utjecaj na proizvodnju vodika, a ne vrsta i proizvođač vjetroagregata.

U radu Gokcek M. iz 2010. godine [8], opisana je proizvodnja vodika pomoću manjeg sustava za elektrolizu pogonjenog energijom vjetra. Uspoređena je dobivena količina vodika i generirana električna energija pri različitim visinama rotora vjetroagregata. Korišteni vjetroagregat bio je snage 6 kW, dok je vodik bio proizveden pomoću PEM elektrolizatora. Godišnja proizvodnja vodika iznosila je 102,37 kg, a godišnje generirana električna energija 15,15 MWh. Najveća količina vodika proizvedena je početkom godine. Na slici 2 prikazani su dobiveni rezultati iz istraživanja na kojima se vidi kako o visini postavljanja rotora (engl. *hub height*) ovisi generirana energija (engl. *wind energy production*) i proizvodnja vodika (engl. *hydrogen production*). S porastom visine rotora rastu i navedene veličine.



Slika 2. Proizvodnja vodika i električne energije pri različitim visinama rotora [8].

2.2. Energija vjetra - matematički model

Prema definiciji, vjetar je gibanje atmosferskog zraka koje je uzrokovano razlikom tlaka na nekom području. Budući da se površina Zemlje nejednoliko zagrijava (zbog čimbenika poput nadmorske visine, blizine vodenih površina itd.) stvaraju se područja nižih temperatura zraka i područja viših temperatura zraka. Rotacija Zemlje stvara silu koja djeluje na sva tijela s relativnim gibanjem u odnosu na Zemlju. Zbog oblika Zemlje koji nije savršeno sferičan, ta sila najveća je na polovima, a najmanja na ekvatoru. Tako nastaje tzv. Coriolisov efekt koji utječe na smjer vjetrova i morskih struja. Hladniji zrak je veće gustoće od toplijeg zraka pa zbog toga stvara veći tlak na određenu površinu. Gustoća zraka ovisi o relativnoj vlažnosti zraka i temperaturi. Različiti tlakovi nastoje se sami izjednačiti strujanjem zraka, a to strujanje naziva se vjetar. Područja oko ekvatora primaju više sunčeva zračenja od područja većih zemljopisnih širina jer se kut upada sunčevih zraka smanjuje s porastom zemljopisne širine, a dio sunčeve energije se zbog duljeg puta upija u atmosferi.

Prilikom gibanja čestica zraka, kinetička energija se jednim dijelom pretvara u mehaničku energiju na vjetroagregatu. Pomoću mehaničke energije pogoni se generator koji generira električnu energiju. Kinetička energija vjetra može se izraziti kao:

$$E_k = \frac{1}{2} m \bar{u}^2 \quad (2.1)$$

gdje je: m [kg] - masa zraka

\bar{u} [m/s] - srednja brzina vjetra.

Izraz za snagu vjetra može se dobiti derivacijom izraza za kinetičku energiju po vremenu:

$$P_v = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \bar{u}^2, \text{ [W]}. \quad (2.2)$$

Maseni protok vjetra koji prolazi kroz rotor vjetroagregata jednak je:

$$\dot{m} = \rho A \bar{u}, [\text{kg/s}]. \quad (2.3)$$

gdje je: ρ [kg/m³] - gustoća zraka

A [m²] - površina koju omeđuje rotor turbine tijekom svoje vrtnje.

Uvrštavanjem izraza (2.3) u izraz (2.2) dobiva se konačni izraz za snagu vjetra, iz kojeg je vidljivo da snaga vjetra ovisi o gustoći zraka, površini (promjeru) rotora i trećoj potenciji brzine vjetra:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A \bar{u}^3, [\text{W}]. \quad (2.4)$$

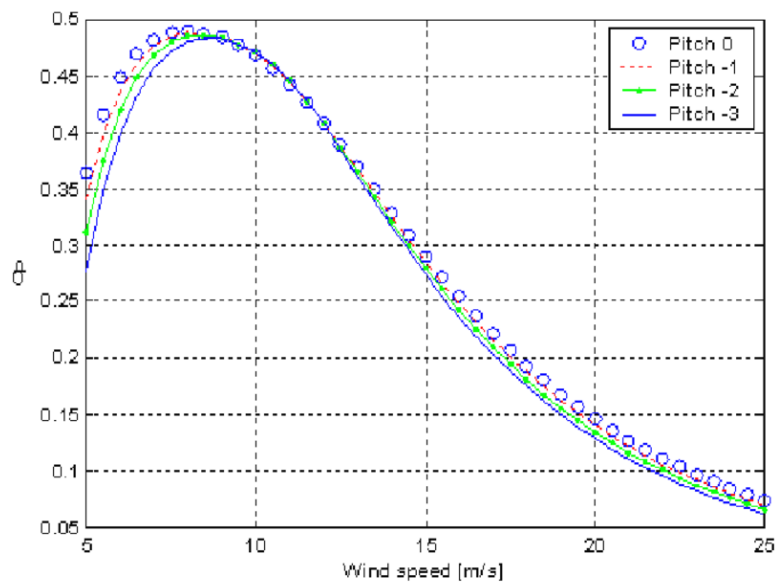
Još jedan pojam koji se često koristi je gustoća snage vjetra (engl. *Wind Power Density*, WPD). Ona se definira kao srednja godišnja snaga vjetra koja je dostupna po jedinici površine rotora vjetroagregata:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3, [\text{W/m}^2]. \quad (2.5)$$

Najveći utjecaj na snagu vjetra ima brzina vjetra. Međutim, ni jedna vjetroturbina ne može pretvoriti svu kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju na lopaticama rotora. O tome govori Betzovo pravilo, prema kojem se maksimalno 59,3 % kinetičke energije vjetra može pretvoriti u korisnu mehaničku energiju [9]. Ono ukazuje na stupanj aerodinamičke pretvorbe raspoložive energije u slobodnoj struji vjetra u snagu na vratilu vjetroagregata. Jedan dio ukupne kinetičke energije vjetra nije moguće iskoristiti budući da se vjetar ne može u potpunosti zaustaviti prolaskom kroz vjetroagregat. Kada bi se iskoristila ukupna kinetička energija čestice, ona se više ne bi mogla gibati. Koeficijent snage C_p bitna je veličina koja prikazuje udio raspoložive snage

vjetra koja se može iskoristiti za dobivanje snage na vjetroagregatu. On ovisi, između ostaloga, o brzini vjetra. Na slici 3 prikazana je ovisnost koeficijenta C_p o brzini vjetra (engl. *wind speed*) pri različitim nagibima lopatica rotora (engl. *pitch*) [10]. Maksimalna teorijska vrijednost koeficijenta snage C_p naziva se Betzov limit koji iznosi ranije spomenutih 59,3%. Dakle, snaga vjetroagregata definirana je kao umnožak snage vjetra P_v i koeficijenta snage C_p :

$$P = P_v C_p, \text{ [W]}. \quad (2.6)$$



Slika 3. Ovisnost koeficijenta C_p o brzini vjetra (engl. *wind speed*) pri različitim nagibima lopatica rotora (engl. *pitch*) [10].

3. VODIK

Vodik (H) je kemijski element s atomskim brojem 1. Na Zemlji se u elementarnom obliku nalazi vrlo rijetko i u malim količinama. No, on je jedan od osnovnih gradivnih članova u organskim spojevima i kao takav stvara kemijske veze s najviše ostalih elemenata. Pri atmosferskom tlaku i temperaturi vodik je plin bez boje, mirisa i okusa. 14,4 puta je lakši od zraka, a njegove molekule (H_2) su iznimno malene u usporedbi s ostalim plinovima. U smjesi sa zrakom je eksplozivan, a metale čini krtima. Zbog tih činjenica teško ga je jednostavno uskladištiti.

Prema istraživanju Nnabuife G. et al. [11], dva su najčešća principa dobivanja vodika. Prvi princip temelji se na izdvajanju vodika iz ugljikovodika u procesima reformiranja (npr. parno reformiranje metana). Drugi princip temelji se na proizvodnji vodika elektrolizom vode. Za proces elektrolize potrebno je dovoditi električnu energiju izvana. Od ostalih procesa kojima se može dobiti vodik važno je izdvojiti rasplinjavanje biomase, reformiranje tekućih derivata biomase i termo-kemijsko cijepanje vode. Postoje još i biokemijski postupci proizvodnje vodika koji koriste mikroorganizme za dobivanje vodika, no oni se rijetko koriste u praksi.

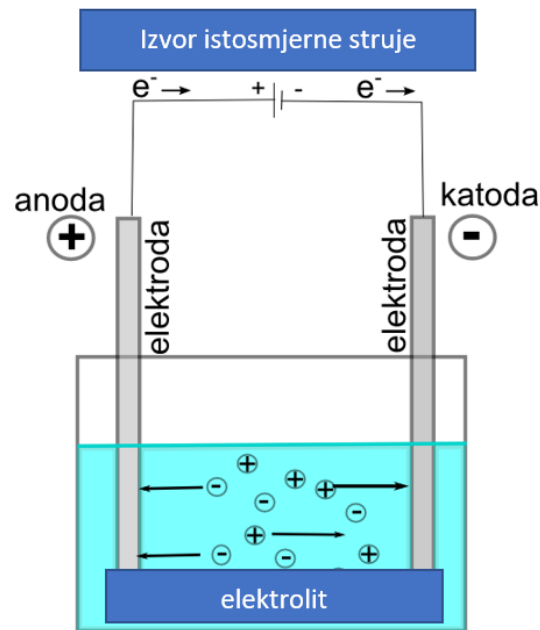
Vodiku se daje pridjev u obliku boje kako bi se istaklo na koji način je on proizveden. Sivi vodik je vodik dobiven parnim reformiranjem metana ili prirodnog plina. Smeđi vodik je proizveden iz smeđeg ugljena (lignita). On je najštetniji za okoliš budući da se nusprodukti (ugljikov dioksid i ugljikov monoksid) ne prikupljaju tijekom proizvodnje, već odlaze u atmosferu. Plavi vodik je vodik tijekom čije proizvodnje se dio nastalog ugljika prikuplja i pohranjuje (CCS). Zeleni vodik je ekološki najčišći jer je proizveden koristeći obnovljive izvore energije.

3.1. Elektroliza vode

Voda se već desetljećima razlaže na vodik i kisik raznim procesima elektrolize kako bi se ispunili zahtjevi kemijske, vojne, svemirske i medicinske industrije [11]. Iako je za elektrolizu vode potrebno utrošiti više energije po jedinici proizvedenog vodika nego kod proizvodnje vodika iz ugljikovodika, prednosti i primjene elektrolize su brojne. Voda je danas mnogo dostupnija i

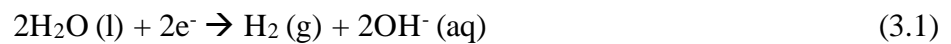
jeftinija od ugljikovodika, a uz nju je vezano i manje geopolitičkih problema ukoliko nema nestašica. S energetskeg gledišta, elektroliza omogućuje pretvaranje električne energije u čisto gorivo ako je električna energija generirana iz OIE-a. Kao posljedica toga, elektroliza može povezivati nekoliko različitih grana energetskeg tržišta.

Osnovni princip elektrolize vode prilično je jednostavan (slika 4). Katoda i anoda spojene su na vanjski izvor istosmjerne struje.

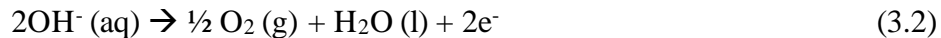


Slika 4. *Proces elektrolize* [12].

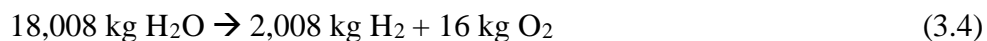
Na katodi se odvija reakcija redukcije i nastaje plinoviti vodik:



Na anodi se odvija reakcija oksidacije i nastaje plinoviti kisik:



Ukupna reakcija procesa elektrolize može se zapisati kao:



3.1.1. Termodinamička načela elektrolize

Za dijeljenje vode na vodik i kisik potrebna je određena količina energije. Minimalna potrebna energija za tu reakciju može se izračunati pomoću Gibbsove slobodne energije (ΔG). Pri standardnim uvjetima, izraz za Gibbsovu slobodnu energiju potrebnu za dijeljenje vode na vodik i kisik jednak je izrazu (3.6). Međutim, tijekom te reakcije stvara se određeni porast entropije pa je primjerenije umjesto ΔG koristiti promjenu entalpije ΔH (pri standardnim uvjetima ona iznosi $\Delta H = 285\,840 \text{ J/mol}$).

$$\Delta G = nFE_{rev} \quad (3.6)$$

gdje je: n - broj elektrona

$F = 96500 \text{ C/mol}$ (Faradayeva konstanta)

$E_{rev} = 1,23 \text{ V}$ (reverzibilni napon).

Iz tog razloga, minimalni potrebni napon (V_{TN}) za elektrolizu vode računa se prema izrazu (3.7).

$$V_{TN} = \frac{\Delta G}{nF} + \frac{T\Delta S}{nF} = \frac{\Delta H}{nF} = \frac{285840}{2 \cdot 96500} = 1,48 \text{ V} \quad (3.7)$$

gdje je: ΔS - promjena entropije, J/K

T - temperatura, K.

Učinkovitost pretvorbe energije računa se iz dobitaka pretvorbe električne energije u kemijsku energiju. Najčešće se učinkovitost procesa elektrolize računa pomoću gornje ogrjevne moći vodika. Budući da se u procesu elektrolize voda dostavlja u sustav u tekućem agregatnom stanju, učinkovitost elektrolize η se može računati prema izrazu (3.8), [13]. Učinkovitosti PEM elektrolizatora u praksi se kreću oko 65 %, uz predviđanja rasta do 70 %.

$$\eta = \frac{V_{TN}}{V_c} = \frac{1,48}{V_c} \quad (3.8)$$

gdje je: V_c - napon ćelije, V.

3.2. Tipovi elektrolizatora

Glavni dio svakog sustava za elektrolizu je elektrolizator. Elektrolizatori su najčešće povezani na mrežu električne energije i dodatno vodeno postrojenje. Rade na principu izdvajanja vodika i kisika iz molekula vode s tipičnim vrijednostima proizvodnje od 5 do 30 kg H₂ na sat. Primjerice, sustav s elektrolizatorom od 10 MW je dovoljan za proizvodnju vodika za pogon čak 130 gradskih autobusa [14]. Elektrolizatori se najčešće dijele prema tipu elektrolita koji se u njima koristi. Elektroliti mogu biti kruti ili tekući, a danas se najviše koriste PEM i alkalni elektrolizatori.

Osnovni tipovi elektrolizatora su:

- Alkalni elektrolizator (engl. *Alkaline electrolyzer*, AE)
- Elektrolizator s protonski propusnom membranom - PEM elektrolizator (engl. *Proton Exchange Membrane*, PEM)
- Elektrolizator s krutim oksidom (engl. *Solid Oxide electrolyzer*, SOE).

Alkalni elektrolizatori u sebi sadrže tekući elektrolit koji je najčešće u obliku vodenih otopina kalijeve lužine (KOH) ili natrijeve lužine (NaOH). Tehnologija alkalnih elektrolizatora je vrlo razvijena, jeftiniji su te vrlo komercijalizirani. Učinkovitost alkalnih elektrolizatora iznosi 70 do 80 %. Nedostaci ovih elektrolizatora su što rade na niskom tlaku (od 3 do 30 bar) i pri niskim gustoćama struje (tok električne struje po ploštini presjeka vodiča, čiji smjer se podudara sa smjerom gibanja pozitivnih električnih naboja) [15].

PEM elektrolizatori sadrže krutu membranu koja dopušta protonima prolazak od anode do katode, a elektronima prijeći put. Oni imaju mogućnost visoke gustoće struje, kompaktnih su konstrukcija i brzih odziva. Imaju mogućnost brzog stvaranja vodika visoke čistoće (99,99 %) i učinkovitost im je visoka (80 do 90 %). Nedostatak PEM elektrolizatora je njihova relativno visoka cijena.

SOE elektrolizatori imaju prednost postizanja iznimno visoke učinkovitosti i visokog radnog tlaka, no zahtijevaju rad na visokim temperaturama (od 700 do 800 °C). Kad elektrolizator radi pri visokom tlaku tada se smanjuje potreba za sekundarnom kompresijom vodika prije pohrane i skladištenja. SOE elektrolizatori nisu u širokoj komercijalnoj upotrebi.

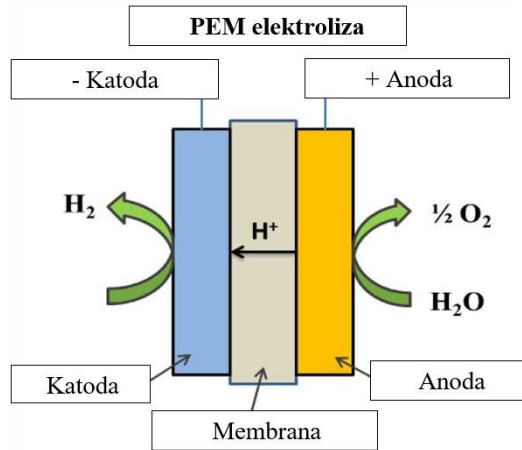
3.2.1. PEM elektrolizatori

Prvi PEM elektrolizatori razvijeni su tijekom 1960-ih kako bi se prevladali nedostaci alkalnih elektrolizatora. PEM elektrolizatori tehnološki su slični tehnologiji PEM gorivnih članaka, gdje se kao elektrolit koristi protonski propusna membrana (npr. *Nafion*, *fumapem*). Takve membrane su dobre jer imaju veliku vodljivost protona, malu debljinu i mogu raditi pri visokim tlakovima. Vezano uz održivost i utjecaj na okoliš, PEM elektrolizatori se koriste kao jedna od boljih opcija za pretvorbu energije iz obnovljivih izvora u čisti vodik. Još jedna od prednosti PEM elektrolize

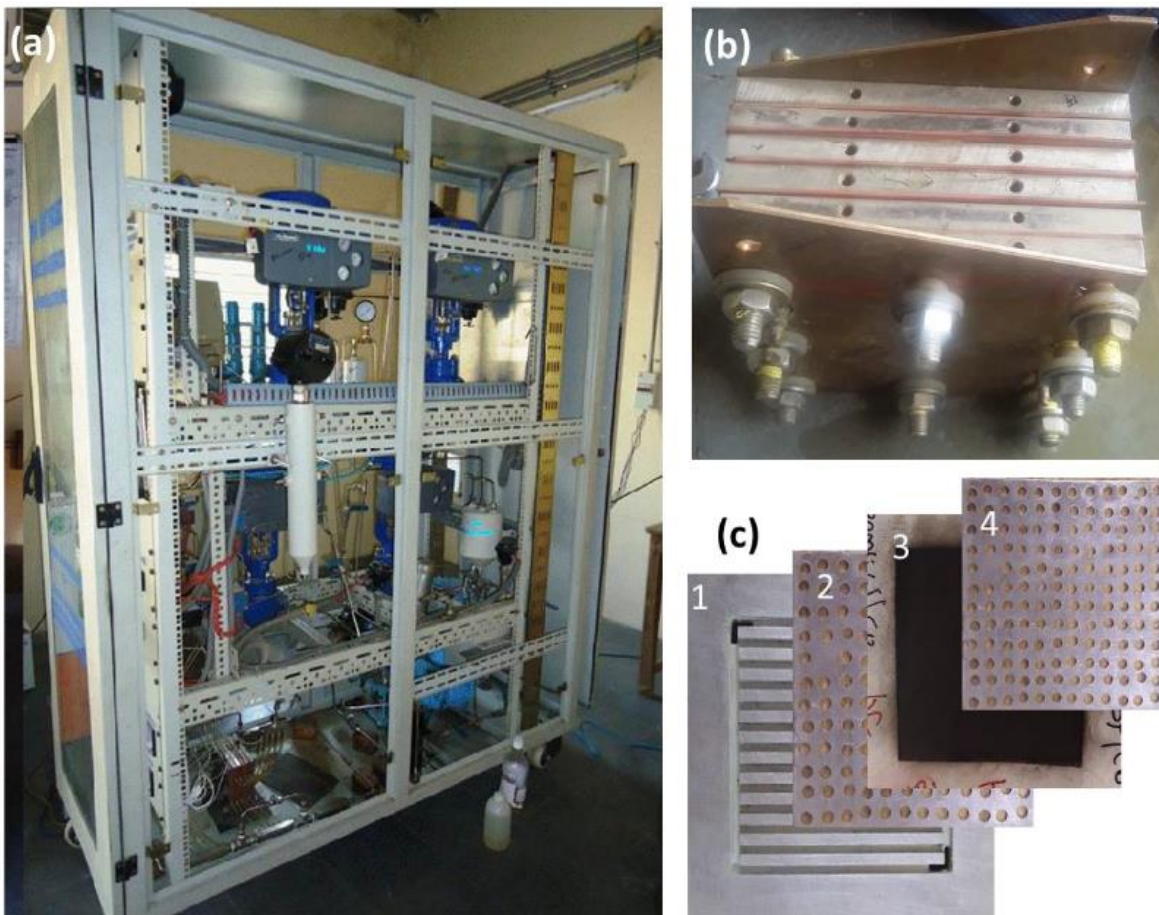
je brzi odziv na oscilacije ulazne električne energije, što je čest slučaj kod hibridnih sustava s vjetroelektranama i solarnim panelima. Osim čistog vodika, kao nusprodukt procesa dobiva se i kisik. Balansiranje i upravljanje postrojenjem PEM elektrolizatora je relativno jednostavno, čime oni postaju atraktivna opcija u industrijskoj primjeni. Međutim, zbog skupljih materijala koji se nalaze u PEM elektrolizatorima kao što su platina/paladij ili iridijev (IV) oksid/rutenijev (IV) oksid (Pt/Pd, IrO₂/RuO₂), glavni izazov njihove buduće primjene je sniženje troškova proizvodnje i rada takvih uređaja.

Princip rada PEM elektrolizatora:

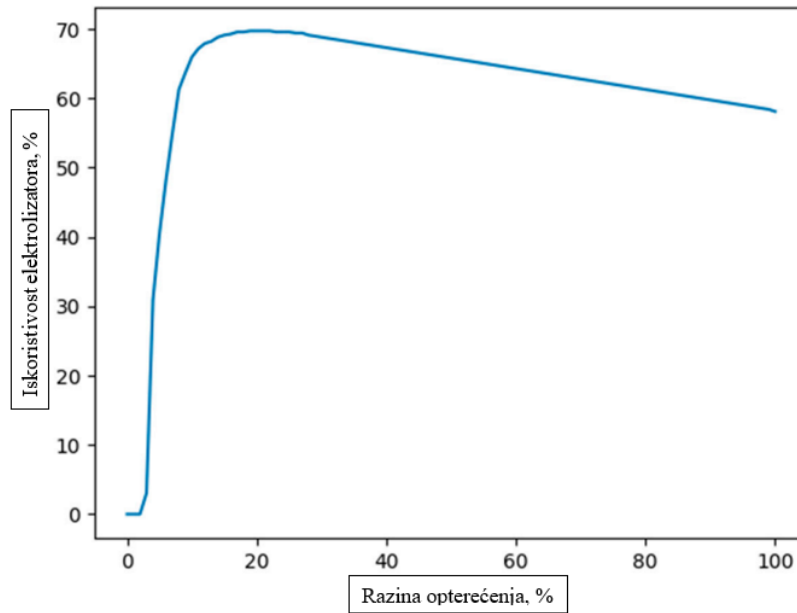
Voda se elektrokemijskim procesom dijeli na vodik i kisik na pripadnim elektrodama. Vodik na katodi, a kisik na anodi. Voda se pumpa na stranu anode gdje se dijeli na kisik (O₂), protone (H⁺) i elektrone (e⁻). Protoni putuju na stranu katode putem vodljive membrane. Elektroni izlaze iz anode kroz vanjski strujni krug, čime se stvara pokretačka energija reakcije. Na strani katode protoni i elektroni se rekombiniraju i stvaraju vodik, slika 5. Najvažniji dijelovi PEM ćelije elektrolizatora su: sklop membrana/elektroda (engl. *Membrane Electrode Assembly*, MEA), kolektori struje i separacijske ploče. Na slici 6 prikazan je jedan tipični PEM elektrolizator s osnovnim dijelovima PEM ćelije. Kao katodni katalizatori elektrokemijskih reakcija u PEM elektrolizatorima koriste se razni plemeniti metali. Zanimljivo je da PEM elektrolizatori rade s većom iskoristivosti pri opterećenjima manjim od nominalnih, što takve uređaje izdvaja od ostalih kada je u pitanju energetska sektor [16]. Na slici 7 prikazana je tipična krivulja iskoristivosti PEM elektrolizatora s obzirom na opterećenje.



Slika 5. Shematski prikaz PEM elektrolizatora [13].



Slika 6. (a) Tipični PEM elektrolizator, (b) svežanj PEM ćelija, (c) osnovni dijelovi PEM ćelije: 1 - Bipolarna ploča, 2 - anodni kolektor struje, 3 - Sklop membrana/elektroda (MEA), 4 - katodni kolektor struje [13].



Slika 7. Krivulja iskoristivosti PEM elektrolizatora, prema IRENA-i [16].

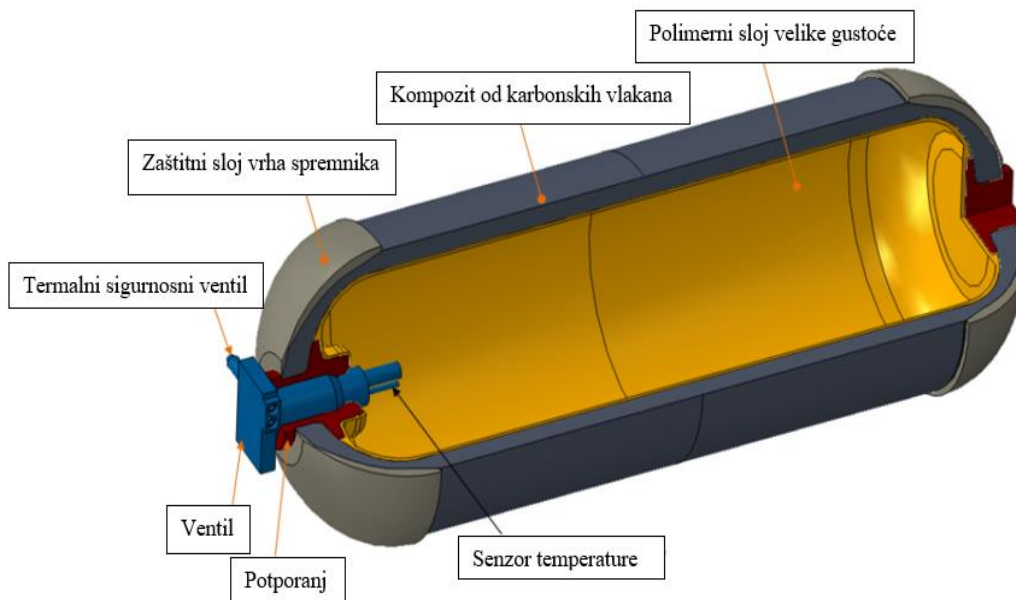
3.3. O pohrani vodika

Vodik se može skladištiti i pohranjivati na mnogo različitih načina [17]. Neke od čestih metoda pohrane vodika navedene su u nastavku, uz prednosti i nedostatke u zagradama:

- Fizikalna pohrana:
 - pohrana u obliku komprimiranog plina (komercijalno dostupno, potrebna velika količina energije za kompresiju)
 - hladna/krio-kompresija (povoljno s gledišta potrebnog volumena, potrebna velika količina energije za kompresiju i ukapljivanje)
 - pohrana u obliku tekućine (komercijalno dostupno, gubici vodika, problemi sa sigurnošću)
- Kemijska pohrana:
 - adsorpcija vodika (reverzibilnost procesa na licu mjesta, potrebna visoka temperatura za oslobađanje vodika)
 - kemijski hidridi (povoljno s gledišta potrebnog volumena, termalna nestabilnost)

- pohrana bazirana na ugljiku (reverzibilnost procesa na licu mjesta, gubici vodika).

Pohrana vodika u plinovitom stanju zahtijeva spremnike pod visokim tlakom (350-700 bar), slika 8. Takvi spremnici su nužni budući da vodik ima nisku volumetrijsku gustoću energije, što znači da zauzima relativno velik volumen za određenu količinu pohranjene energije. Energija potrebna za kompresiju vodika na tlak od 200 bar iznosi oko 10 % donje ogrjevne moći vodika ($H_d = 33,33$ kWh/kg), a energija potrebna za kompresiju vodika na tlak od 800 bar iznosi 15,5 % donje ogrjevne moći vodika. Vodik u tekućem stanju zauzima manje volumena od vodika u plinovitom stanju za istu količinu sadržane energije, no za njegovu pripremu potrebna je energija u iznosu oko 40 % donje ogrjevne moći vodika. Pohrana vodika u tekućem stanju zahtijeva vrlo niske temperature (temperatura vrelišta vodika pri atmosferskom tlaku je $-252,8$ °C). Vodik se može pohraniti i na površini krutina (adsorpcija) ili unutar krutina (apsorpcija), za što je potrebna energija ekvivalentna 8 % donje ogrjevne moći vodika. Uzimajući u obzir sve navedeno, uz činjenicu da je komprimiranje vodika najčešće korištena metoda, u ovome radu vodik će se pohranjivati u plinovitome stanju pri povišenom tlaku.



Slika 8. Spremnik za komprimirani vodik [17].

3.4. O gorivnim člancima

Gorivni članci su uređaji koji neposredno pretvaraju kemijsku energiju sadržanu u nekoj tvari u istosmjernu električnu struju. Sastoje se od dviju elektroda uronjenih u elektrolit. Na anodi se oksidira gorivo, primjerice vodik, a elektroni se odvođe preko vanjskog kruga i trošila do katode. Na katodi se neki drugi kemijski spoj reducira pomoću elektrona oslobođenih na anodi. Negativni i pozitivni ioni koji su produkti reakcije spajaju se u elektrolitu, dok se nastali produkt odvođi iz gorivnog članka. Gorivni članci ne sadrže pokretne dijelove i rade bez stvaranja buke. Njihova primjena danas još nije široko rasprostranjena (osim vojne i svemirske industrije), primarno zbog njihove cijene. Gorivni članci koriste se kao dio UPS sustava, u mobilnim jedinicama za generiranje električne energije, u vojnim dronovima, brodovima, podmornicama, ali i u cestovnim vozilima [18]. Postoji nekoliko različitih vrsta gorivnih članaka, a razlikuju se pretežno po vrsti elektrolita.

Gorivni članci mogu se podijeliti na niskotemperaturne i visokotemperaturne gorivne članke.

- niskotemperaturni:

- gorivni članci s direktnom pretvorbom metanola (**DMFC**):
 - elektrolit, gorivo, temperatura: protonski propusna membrana, metanol, <100 °C
 - snaga: od 100 mW do 1 kW
 - primjena: vozila i manji uređaji
- gorivni članci s polimernom membranom (**PEMFC**):
 - elektrolit, gorivo, temperatura: protonski propusna membrana, vodik, <100 °C
 - snaga: od 100 W do 500 kW
 - primjena: vozila, manji generatori i lokalne jedinice
- gorivni članci s alkalnim elektrolitom (**AFC**):
 - elektrolit, gorivo, temperatura: vodena otopina KOH, vodik, <100 °C
 - snaga: od 10 kW do 200 kW
 - primjena: svemirska industrija

- visokotemperaturni:

- gorivni članci s fosfornom kiselinom (**PAFC**):
 - elektrolit, gorivo, temperatura: fosforna kiselina, vodik, od 150 °C do 200 °C
 - snaga: <10 MW
 - primjena: elektrane
- gorivni članci s rastaljenim karbonatima (**MCFC**):
 - elektrolit, gorivo, temperatura: rastaljeni karbonati, prirodni plin (ugljen), 650 °C
 - snaga: 100 MW
 - primjena: elektrane, u kombinaciji s plinskim/parnim turbinama
- gorivni članci s čvrstim oksidom (**SOFC**):
 - elektrolit, gorivo, temperatura: cirkonijeva keramika, prirodni plin (ugljen), od 800 °C do 1000 °C
 - snaga: <100 MW
 - primjena: elektrane, u kombinaciji s plinskim/parnim turbinama

4. STANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA U REPUBLICI HRVATSKOJ

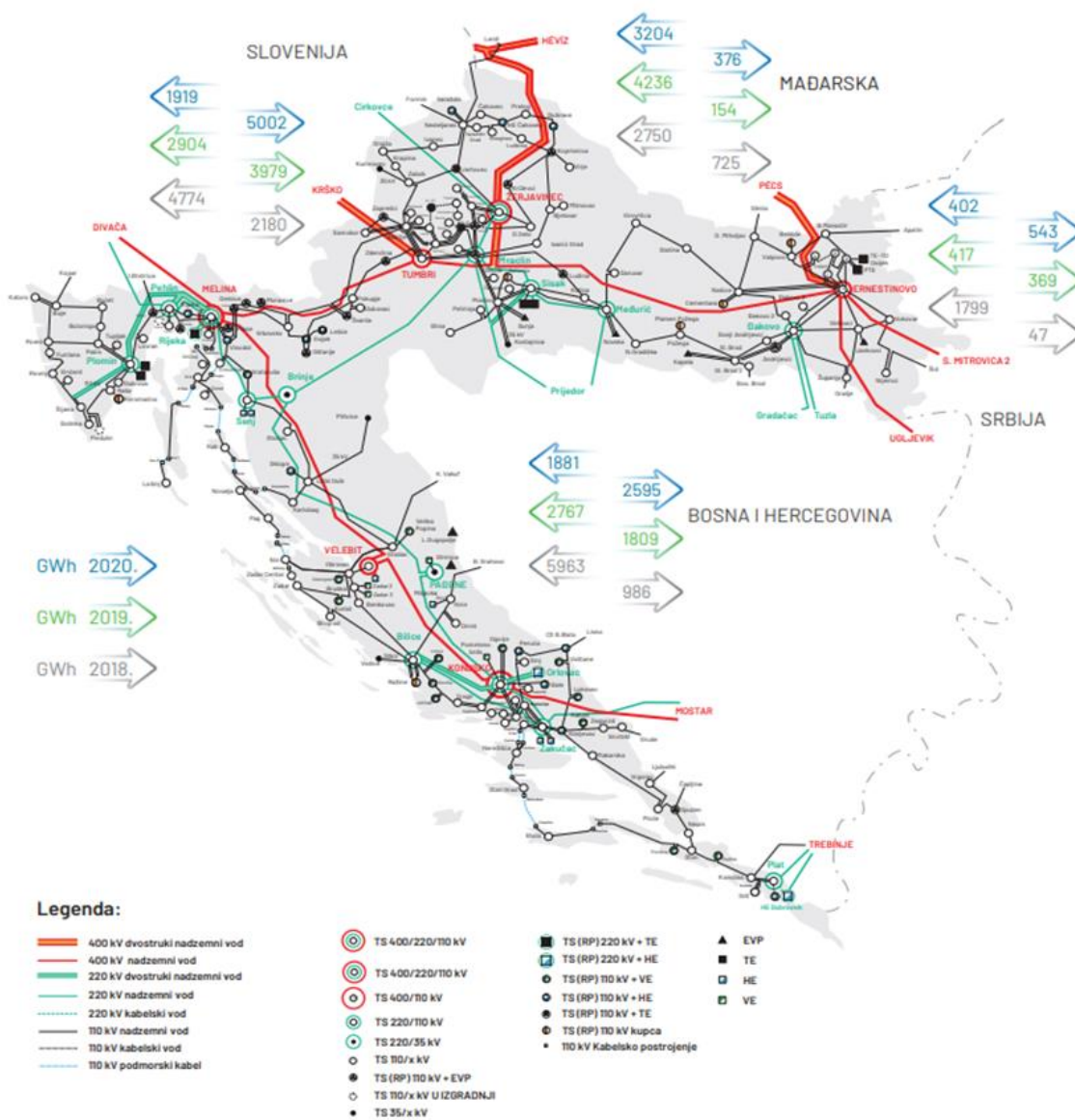
Najveći udio električne energije Republika Hrvatska dobiva iz konvencionalnih elektrana (termoelektrane i hidroelektrane). U tablici 1 prikazana je generirana električna energija tijekom 2018., 2019. i 2020. godine ovisno o tipu elektrane u RH. Vidi se da je u Republici Hrvatskoj tijekom 2020. godine u vjetroelektranama dobiveno tek nešto više od 14% ukupno generirane električne energije. Međutim, ako bi se pogledali raniji trendovi moglo bi se vidjeti da je iz godine u godinu taj udio električne energije iz vjetroelektrana sve veći (2012. godine taj udio iznosio je samo 3,3%, 2015. godine 7,2%, a npr. 2019. godine oko 12%). Dakle, vidljivo je da iz godine u godinu Republika Hrvatska sve više električne energije proizvodi koristeći energiju vjetra.

Tablica 1: *Proizvedena električna energija u RH, GWh – izvor HOPS, [19].*

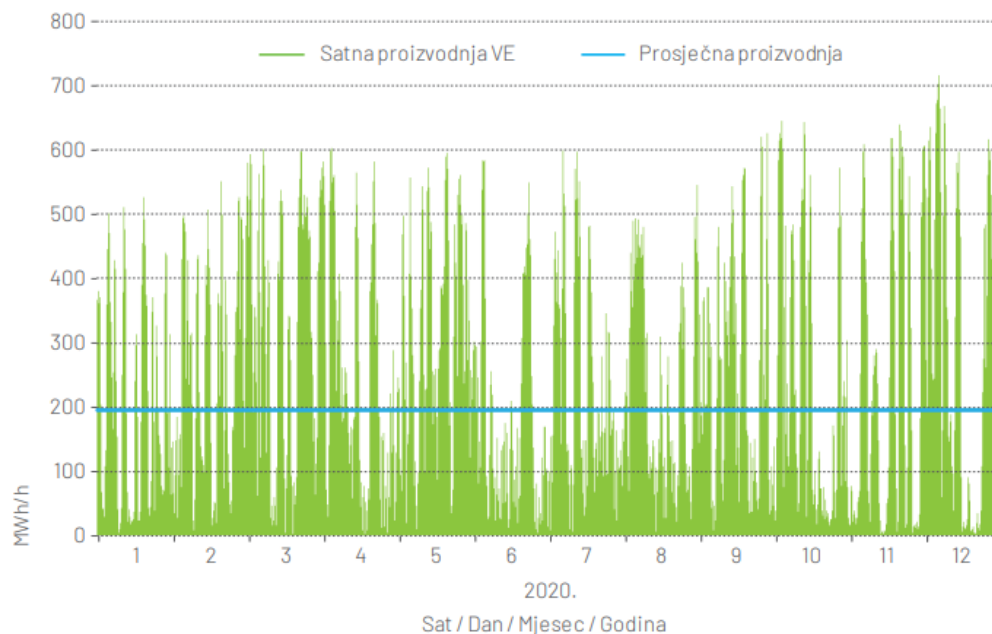
Tip elektrane	2018.	2019.	2020.
Hidroelektrane	6 691	5 606	5 134
Termoelektrane	3 206	3 709	4 073
Vjetroelektrane	1 240	1 343	1 594

Prema zadnjim aktualnim izvještajima Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS) [19], tijekom 2020. godine Republika Hrvatska isporučila je svim kupcima izravno priključenima na prijenosnu mrežu ukupno 1 057 GWh električne energije. Na slici 9 prikazana je shema prijenosne mreže s prekograničnom razmjenom električne energije tijekom 2018., 2019. i 2020. godine. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana na kraju 2020. godine iznosila je 801,3 MW. Na slici 10 prikazana je satna i prosječna proizvodnja u vjetroelektranama tijekom 2020. godine. Ukoliko bi se u Hrvatskoj povećao udio obnovljivih izvora energije, smanjio bi se uvoz električne energije iz inozemstva i dodatno bi se uštedjelo. Također, značajno bi se smanjila proizvodnja energije u termoelektranama koje su štetne za okoliš. Hrvatska je na geografski povoljnoj lokaciji i dobro je povezana sa zemljama u susjedstvu, a i nalazi se na području bogatom resursima poput sunčeve

energije i energije vjetra. Budući da se ranije spomenuti udio proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana povećava na godišnjoj razini, vidi se da se ovdje pokušavaju pratiti trendovi ostalih europskih zemalja u korištenju obnovljivih izvora energije.



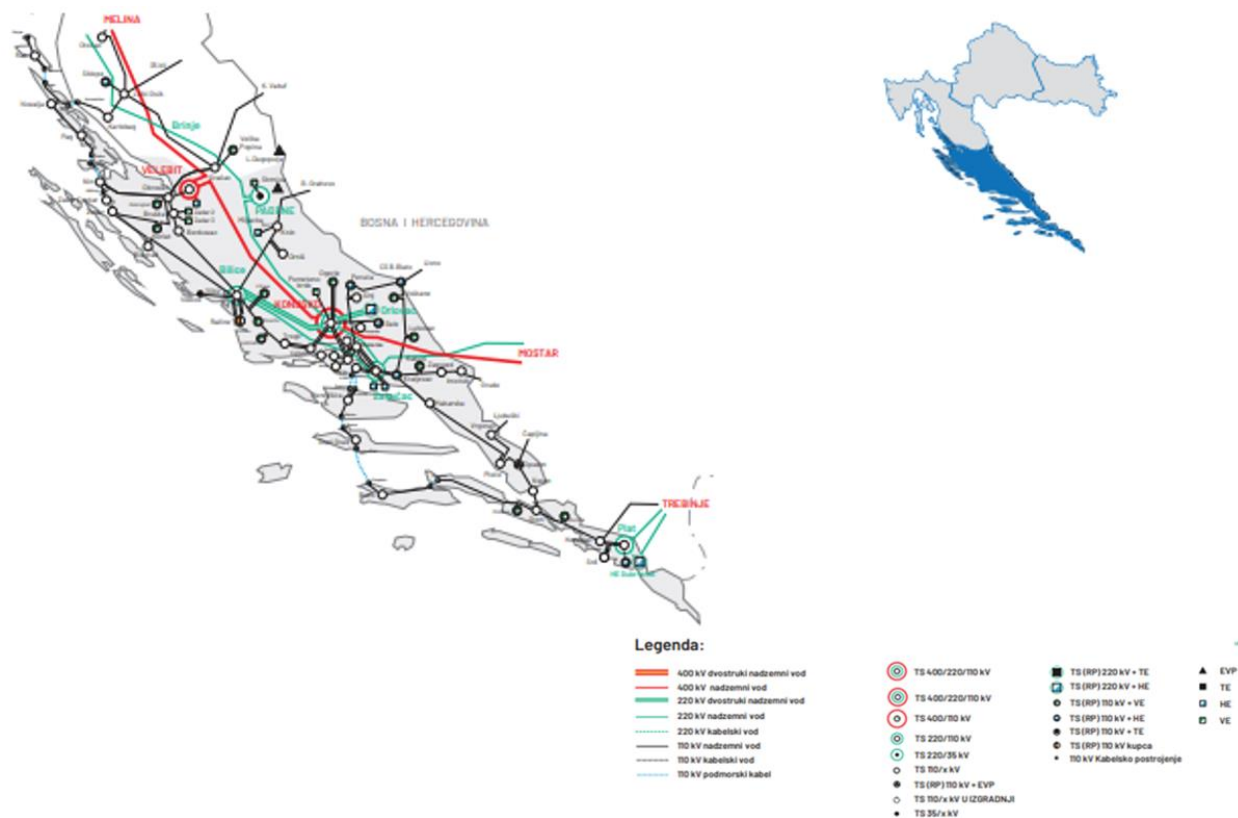
Slika 9. Shema prijenosne mreže RH s prekograničnom razmjenom el. energije [19].



Slika 10. Proizvodnja električne energije vjetroelektranama u RH tijekom 2020. godine [19].

4.1. Prijenosno područje Split

Kao što je navedeno u uvodnom dijelu, pretpostavljena lokacija postrojenja je otok Brač koji pripada Prijenosnom području Split. U cijeloj RH je instalirano (prema aktualnim podacima) ukupno 28 vjetroelektrana ukupne instalirane snage 980,95 MW [19]. Samo tijekom 2021. u RH su u rad puštene tri nove vjetroelektrane, od kojih su dvije u prijenosnom području Split (VE Korlat, VE Krš-Pađene, VE Senj) [19]. Prijenosno područje Split obuhvaća teritorij prikazan na slici 11. U tablici 2 prikazan je popis aktivnih vjetroelektrana Prijenosnog područja Split.



Slika 11. Prijenosno područje Split [19].

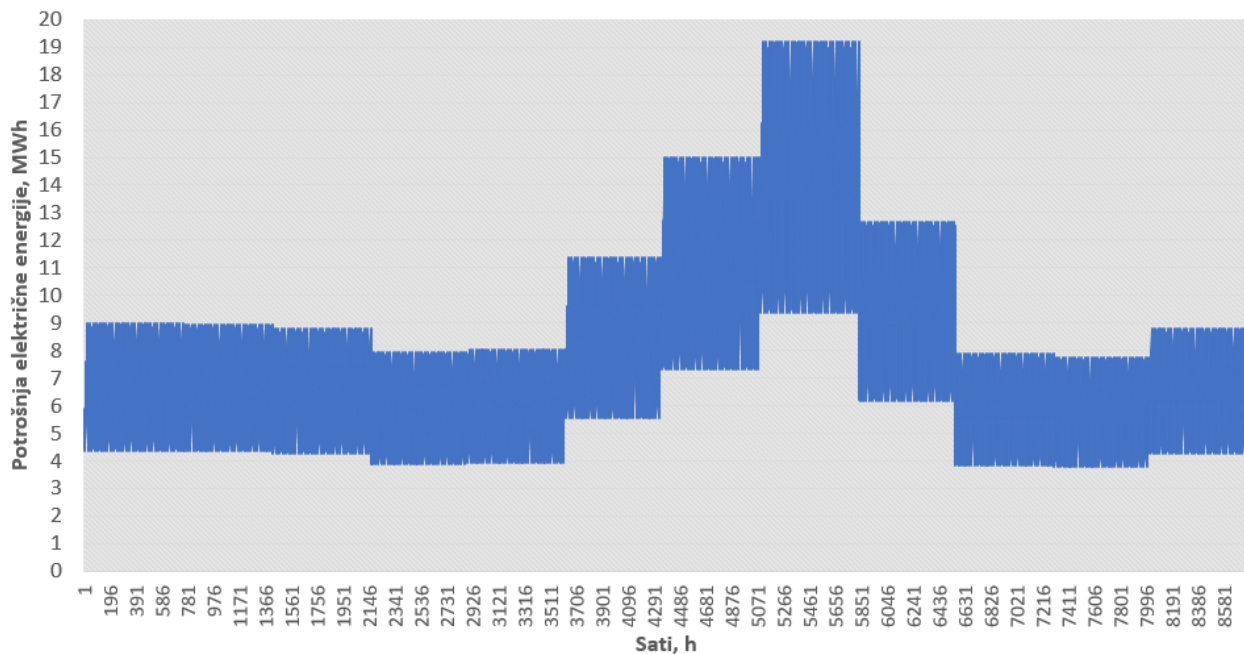
Tablica 2. Aktivne vjetroelektrane na Prijenosnom području Split [19].

Vjetroelektrana	Broj vjetroagregata	Snaga, MW
VE Rudine	12	34,2
VE Ponikve	16	36,8
VE Katuni	14	34,2
VE Lukovac	16	48
VE Kamensko-Voštane	12	40
VE Ogorje	14	42
VE Pometeno brdo	17	20
VE Jelinak	20	30
VE Glunča	9	20,7
VE Velika glava	19	43,7
VE Korlat	18	58
VE Zadar 4	4	9,2
VE Zelengrad	14	42
VE Velika Popina	4	9,2
VE Krš-Pađene	48	142

Proizvođači vjetroagregata za ove vjetroelektrane su: *Siemens, Vestas, Enercon, GE Energy, Nordex, Acciona i Končar*. Ukupna duljina nadzemnih vodova i kabela splitskog prijenosnog područja (naponskih razina 400 kV, 220 kV i 110 kV) iznosi 1 905,7 km. Na ovome području raspoređena su ukupno 53 transformatora sveukupne snage 3 985 MVA, [19].

4.2. Potrošnja električne energije na lokaciji

Hipotetska lokacija ugradnje hibridnog sustava vjetroelektrane uz proizvodnju vodika je otok Prijenosnog područja Split s ukupnom potrošnjom električne energije ekvivalentnom potrošnji otoka Brača. Zbog nedostupnosti boljih podataka, pretpostavka o mjesečnoj/satnoj potrošnji električne energije napravljena je na temelju podataka za otok Unije te je jednaka za svaki dan u godini. Na slici 12 prikazana je pretpostavljena satna potrošnja električne energije na lokaciji.



Slika 12. Pretpostavljena potrošnja električne energije na lokaciji.

5. SUSTAV PROIZVODNJE VODIKA UZ KORIŠTENJE ENERGIJE VJETRA

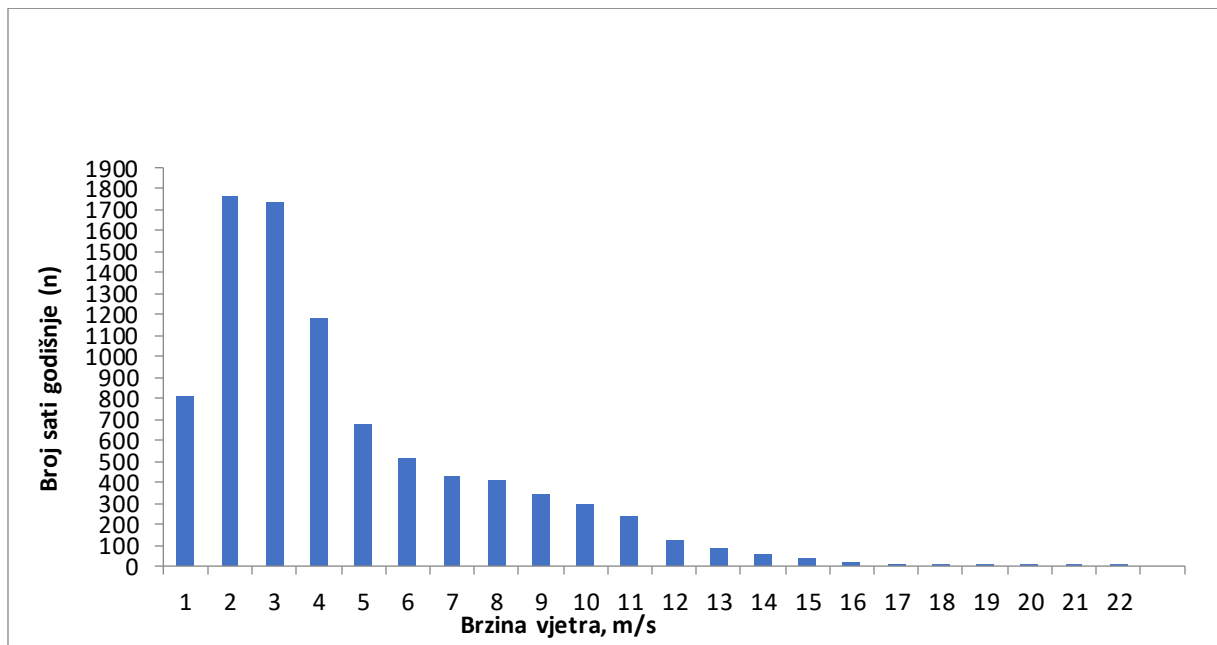
U radu je koncipiran sustav za proizvodnju i pohranu vodika korištenjem energije vjetra na lokaciji u Splitsko-dalmatinskoj županiji. Na temelju lokalnih podataka mjerenja brzine vjetra i podataka o potrošnji energije na tom području istražiti će se ekonomska isplativost hibridnog sustava proizvodnje i pohrane zelenog vodika. Odabrana lokacija ima obilježja otoka veličine Brača, koja uključuju potrošnju električne energije takvog otoka. Navedeni sustav modeliran je uz određivanje ukupne snage odabranih vjetroagregata i elektrolizatora. U periodima tijekom godine kada je proizvodnja električne energije iz vjetroagregata veća od lokalne potrošnje električne energije proizvodit će se vodik. Dobiveni vodik bit će pohranjen u odgovarajuće spremnike za komprimirani vodik koje je potrebno dimenzionirati. Komprimiranje vodika ima određene prednosti nad ostalim metodama pohrane koje su objašnjene u ranijem poglavlju rada. U periodima tijekom godine kada je lokalna potrošnja električne energije veća od proizvodnje električne energije iz vjetroagregata koristit će se uskladišteni vodik. U konačnici, odredit će se ukupni troškovi izgradnje i rada uz procjenu potencijalnog smanjenja emisije stakleničkih plinova takvog sustava.

5.1. Sustav vjetroelektrane

5.1.1. Analiza podataka o brzini vjetra

Proračun za ovaj rad izrađen je korištenjem dostupnih podataka o izmjeranim brzinama vjetra na lokaciji. Dostupni podaci predstavljaju vrijednosti brzine vjetra za reprezentativnu godinu okolice grada Splita (Marjan). Brzine vjetra mjerene su na visini 10 m iznad razine tla (standardna visina mjerenja brzine vjetra) u razdoblju od 1.10.2003. do 30.9.2012. godine. Podaci su uređeni i obrađeni u programu *MS Excel* zbog velikog broja ulaznih vrijednosti. Na slici 13 prikazan je

dijagram učestalosti određene brzine vjetra tijekom godine (izraženo brojem sati), na visini od 10 m.



Slika 13. Učestalost pojave određene brzine vjetra tijekom godine, 10 metara iznad tla (Split, Marjan).

Pretpostavimo da se rotor vjetroagregata želi postaviti na neku veću visinu iznad razine tla kako bi se iskoristile veće brzine vjetra koje se tamo pojavljuju. U tom slučaju potrebno je izmjerene brzine vjetra na 10 m visine korigirati kako bi se dobio novi set podataka o brzinama vjetra na traženoj visini. U realnim proračunima rade se mjerenja na većim visinama tijekom dužeg vremenskog perioda kako bi se dobili što pouzdaniji podaci. Korekcija se provodi uz pomoć sljedećeg izraza:

$$v/v_r = \left(\frac{z-z_0}{z_r}\right)^\alpha, \tag{5.1}$$

gdje je: v - brzina vjetra na željenoj visini, v_r - brzina vjetra na referentnoj visini, m/s

z - željena visina na kojoj se određuje brzina vjetra, m

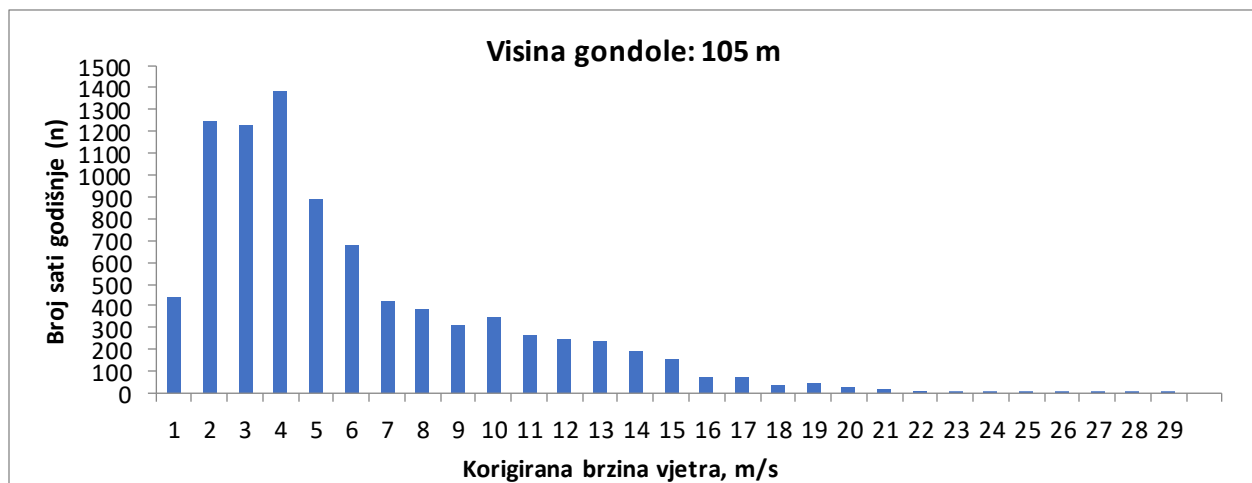
z_r - referentna visina (10 m)

z_0 - visina hrapavosti (0,03 m, za otvorene površine bez ograda i živica),

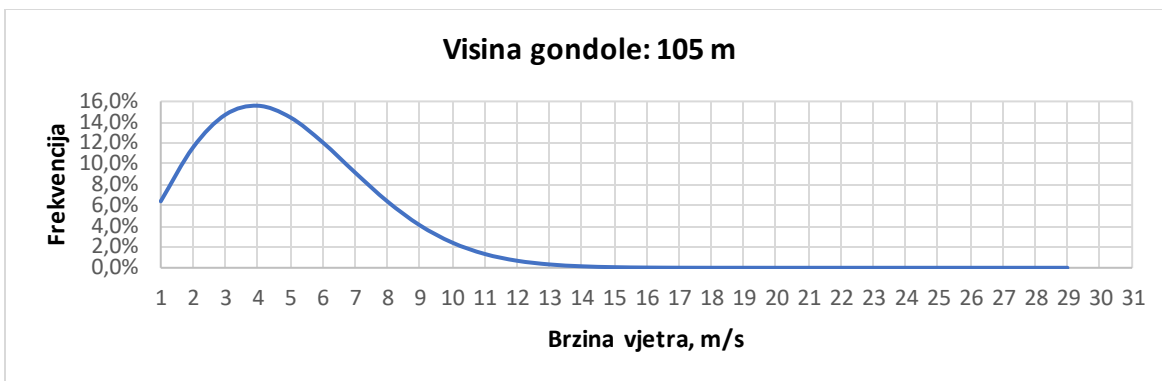
α - koeficijent hrapavosti površine (0,12, za otvorene površine bez ograda i živica).

Razmotrene su dvije različite visine postavljanja rotora: 105 m iznad razine tla i 166 m iznad razine tla. Na slici 14 prikazani su korigirani podaci učestalosti određene brzine vjetra tijekom godine za visinu 105 m iznad razine tla. Za ovaj set podataka može se konstruirati i tzv. *Weibullova krivulja* koja prikazuje aproksimaciju vjerojatnosti pojave neke brzine vjetra tijekom godine. Na slici 15 prikazana je Weibullova krivulja za brzine vjetra na 105 m visine iznad tla tijekom reprezentativne godine. Ovakvi dijagrami mogu se izraditi i za visinu gondole 166 m. Oblik pojedine Weibullove krivulje definiran je parametrom oblika vjetra $k = 2$ (tzv. *Rayleigheva distribucija*), prosječnom brzinom vjetra v i parametrom skaliranja c . Jednadžba Weibullove krivulje glasi:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (5.2)$$



Slika 14. Korigirana učestalost pojave određene brzine vjetra tijekom godine, 105 m iznad tla.



Slika 15. Weibullova krivulja, 105 m iznad tla.

Vidljivo je da je na visini od 10 metara iznad tla najviše sati tijekom godine vjetar puhao brzinom od 2 do 3 m/s, dok je izračunata prosječna brzina iznosila 4,2 m/s. Prosječna brzina vjetra na 105 m visine iznosi 5,52 m/s. Dakle, može se zaključiti da s porastom visine iznad tla raste brzina vjetra. Također, uočljivo je da će se vjetar izrazito velike brzine tijekom godine rijetko pojaviti (maksimalna postignuta brzina vjetra tijekom reprezentativne godine iznosila bi 28,5 m/s za visinu 105 m). Na visini 166 m iznad razine tla prosječna brzina vjetra tijekom godine iznosi 5,83 m/s, dakle nešto više nego na visini 105 m. Krivulja za slučaj visine 166 m ima sličan tok kao krivulja za visinu 105 m sa malim razlikama u razdiobi podataka.

5.1.2. Proračun vjetroagregata

Budući da brzine vjetra na lokaciji nisu pretjerano velike potrebno je odabrati vjetroagregate koji su dizajnirani za klasu jako sporih vjetrova uz male turbulencije [20]. Tip vjetroagregata se odabire iz kataloga proizvođača. Zbog čim realnije procjene i analize ovog sustava odabrani su vjetroagregati proizvođača *Vestas*. To je poznati proizvođač opreme iz Danske koji je od svog osnutka 1898. g. do danas postao nezaobilazno ime u svijetu energetike. Odabrana su dva različita modela *Vestas* vjetroagregata jednakih nazivnih snaga i različitih promjera rotora. Rotori su postavljani na dvije različite visine.

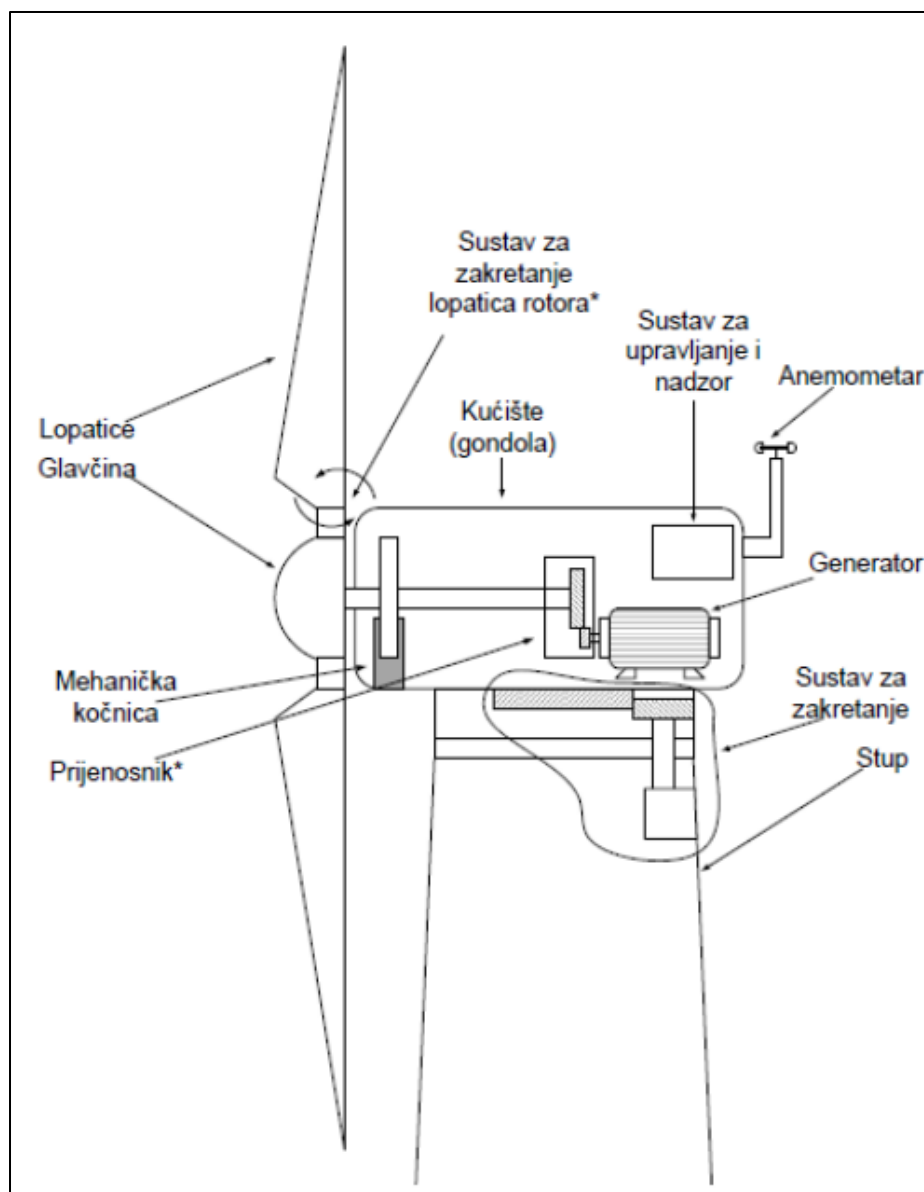
Odabrani modeli vjetroagregata su:

- **V150-4200**, visina rotora na 105 m i 166 m
- **V136-4200**, visina rotora na 105 m i 166 m

U tablici 3 prikazane su tehničke karakteristike odabranih vjetroagregata, a na slici 16 prikazani su osnovni dijelovi jednog vjetroagregata ovakvog tipa.

Tablica 3. *Tehničke karakteristike odabranih vjetroagregata [21].*

Proizvođač	Vestas	Vestas
Model	V150-4200	V136-4200
Nazivna snaga	4200 kW	4200 kW
Promjer rotora	150 m	136 m
Brzina pokretanja	3 m/s	3 m/s
Nazivna brzina vjetra	9,9 m/s	13,5 m/s
Brzina zaustavljanja	22,5 m/s	25 m/s
Max.brzina vrtnje generatora	1485 min ⁻¹	1485 min ⁻¹
Napon generatora	800 V	800 V
Broj lopatica	3	3
Klasa vjetra	IEC IIIb	IEC IIb/S
Površina rotora, A:	17671,46 m ²	14527 m ²

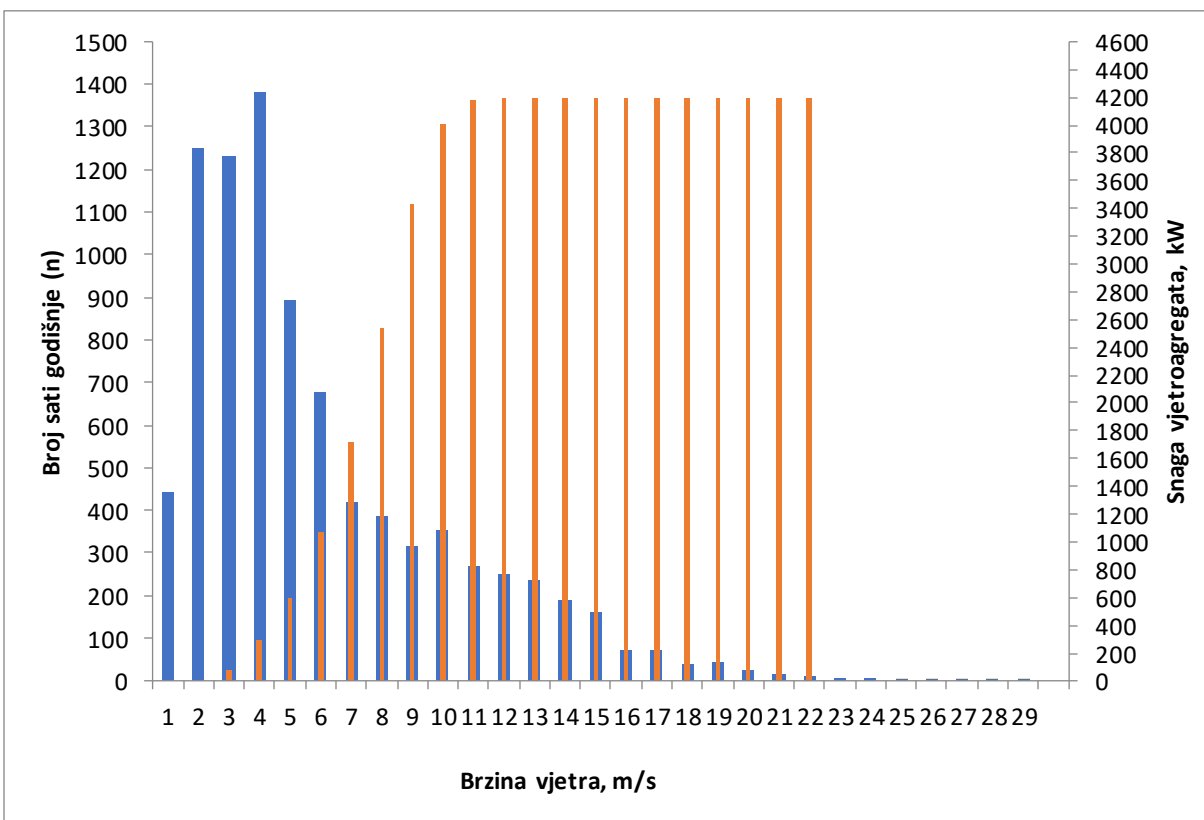


Slika 16. Osnovni dijelovi vjetroagregata, [22].

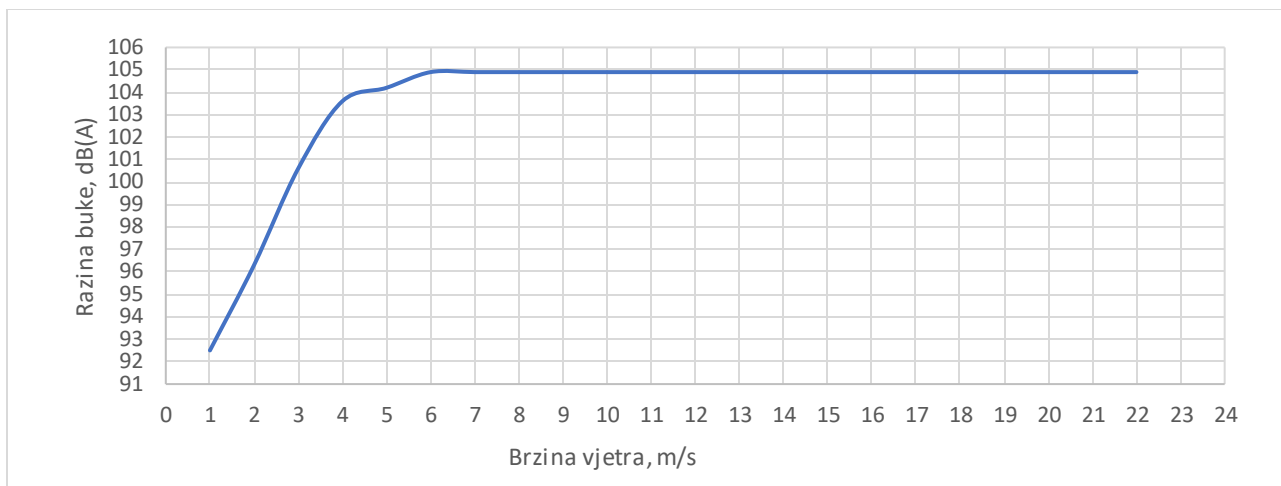
Iz kataloga proizvođača za odabrani tip vjetroagregata mogu se očitati podaci o ovisnosti brzine vjetra i snage koju taj vjetroagregat može dati. Na temelju tih podataka može se konstruirati krivulja snage vjetroagregata [21]. Dobivena energija za svaku brzinu vjetra (E_x) može se izračunati prema izrazu (5.3), a jednaka je umnošku n broja sati godišnje tijekom kojih se javlja vjetar određene brzine i snage vjetroagregata pri toj brzini vjetra P_x , [23].

$$E_x = nP_x \quad (5.3)$$

Na slici 17 prikazana je krivulja snage odabranog vjetroagregata u ovisnosti o brzini vjetra i broju sati godišnje tijekom kojih vjetar puše tom brzinom (brzine vjetra za 105 m visine). Kao što je navedeno u tehničkim karakteristikama modela vjetroagregata, on se uključuje kada vjetar premaši određenu brzinu i generira električnu energiju sve dok vjetar ne premaši gornju graničnu brzinu, kada se rotor radi zaštite automatski stavlja u mod zaštite promjenom kuta lopatica sve dok vjetar ponovno ne uspori. Temperature zraka pri kojima navedeni modeli mogu raditi variraju od -20 do +45 °C. Maksimalna razina buke jednog od odabranih modela je 104,9 dB(A), a razina buke prikazana je u dijagramu na slici 18, prema [21].



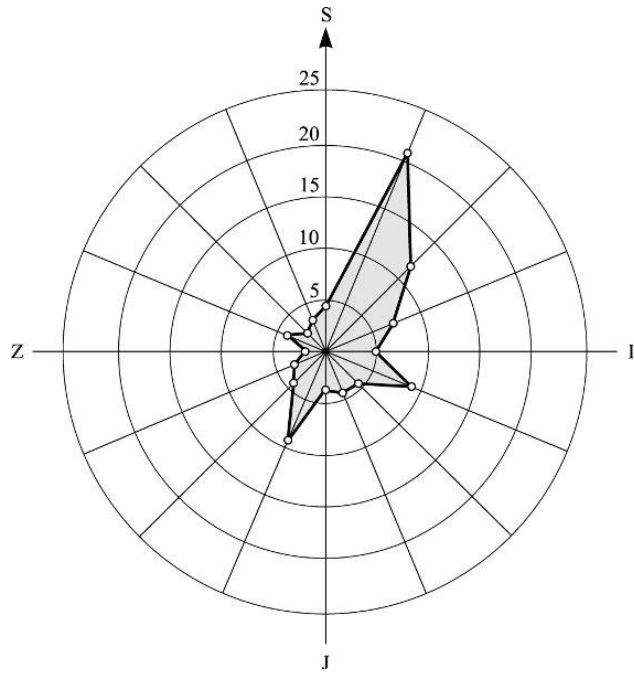
Slika 17. Krivulja snage (narančasto) u ovisnosti o brzini vjetra i broju sati godišnje (plavo)-visina 105 m, za jedan Vestas V150-4200 vjetroagregat.



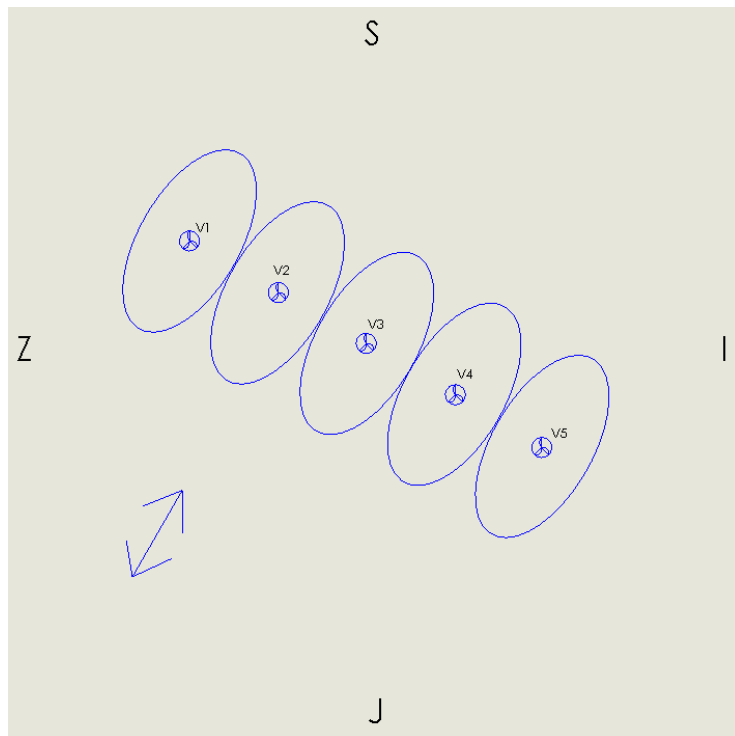
Slika 18. Razina buke za model Vestas V150-4200.

5.1.3. Smještaj vjetroagregata u prostoru

Budući da se proračun radi za područje veliko poput otoka Brača te uzimajući u obzir prosječnu snagu sličnih instaliranih vjetroelektrana Prijenosnog područja Split, odabrani broj instaliranih vjetroagregata s obzirom na lokalnu godišnju potrošnju energije jest pet. Vjetroagregati se najčešće pozicioniraju na način da se analizom lokacije utvrdi najpovoljniji položaj njihova smještaja, uz što manje zavjetrinske gubitke gledano iz dominantnog smjera vjetra. Vjetroagregati se postavljaju međusobno povezani u redovima. Redovi vjetroagregata moraju biti postavljeni okomito na dominantni smjer vjetra. Važno je paziti na to da međusobna udaljenost redova vjetroagregata bude barem 10 puta veća od promjera njihova rotora. Međusobni razmak dva susjedna vjetroagregata unutar reda trebao bi biti barem 5 puta veći od promjera rotora. Računalne simulacije pokazale su da takav razmak omogućuje minimalne zavjetrinske gubitke. Razmak između dva susjedna vjetroagregata unutar reda u ovom slučaju bio bi 5 x 150 m ili 750 m, odnosno 5 x 136 m ili 680 m. Na slici 19 prikazana je godišnja ruža vjetrova za područje Split-Marjan gdje se vidi da prevladavaju vjetrovi smjera SSI (sjever-sjeveroistok), [24]. Vjetroagregati se postavljaju tako da maksimalno koriste dominantan smjer vjetra na lokaciji.



Slika 19. Godišnja ruža vjetrova za Split-Marjan (%), [24].

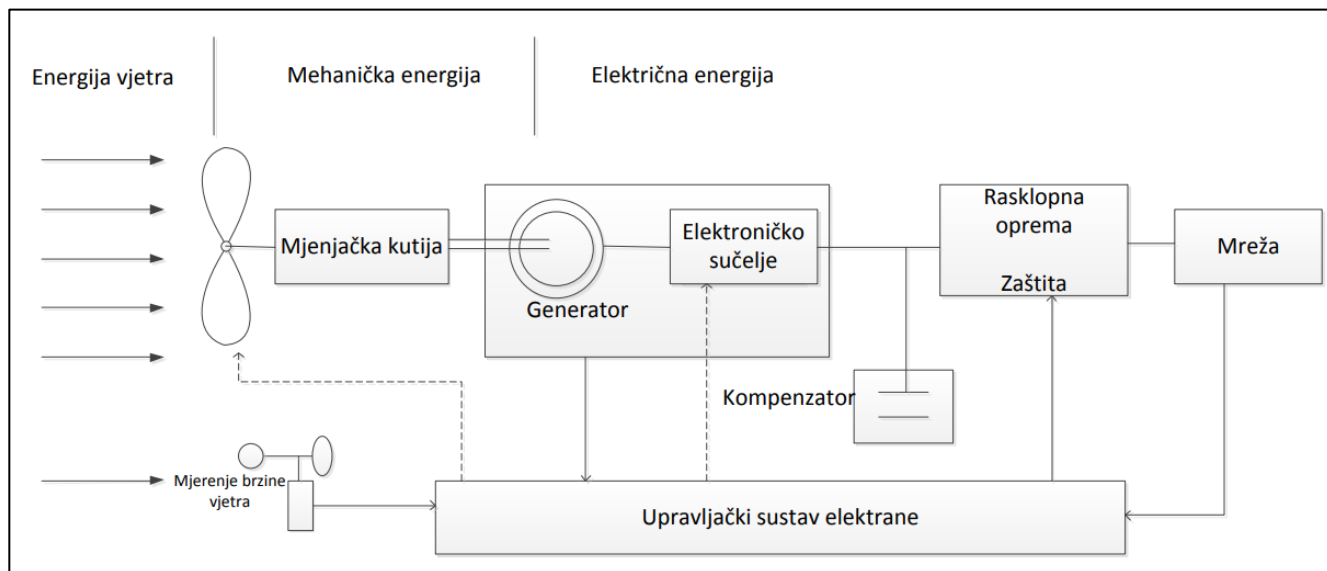


Slika 20. Nacrt mogućeg prostornog razmještaja vjetroagregata.

Na slici 20 prikazan je jedan mogući razmještaj vjetroagregata u prostoru, gdje je sa strelicom označen dominantan smjer vjetra (SSI), a elipse predstavljaju minimalnu međusobnu udaljenost vjetroagregata (5, odnosno 10 puta promjer rotora). Ukupna potrebna površina za smještaj vjetroelektrane s 5 vjetroagregata s maksimalno zbijenim rasporedom iznosila bi 4,6 do 5,6 km², ovisno o promjeru rotora (136 m ili 150 m). Naravno, ovo je idealizirani prikaz i predstavlja samo jedan od mogućih razmještaja vjetroagregata. Potrebne su mnoge računalne simulacije i scenariji pozicioniranja bi se ustanovilo koji od scenarija je najpovoljniji s aspekta zavjetrine i geografije terena. Jedna od takvih simulacija i konačan odabir mogla bi se provesti, primjerice, u nekom softverskom paketu poput *WindPRO* i sl.

5.1.4. Shema spajanja vjetroagregata na elektrodistribucijsku mrežu

Spajanje vjetroelektrane na mrežu provodi se prema dogovoru s Hrvatskim operatorom prijenosnog sustava i potrebno je izraditi detaljan Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja (EOTRP). On obuhvaća planirano i postojeće stanje elektrodistribucijske mreže, planirane i postojeće korisnike mreže (kupce i proizvođače) te analizira neke ekstremne scenarije u kojima se mreža može naći vezano uz proizvodnju i potrošnju. Kao rezultat EOTRP daje optimalno rješenje priključka i troškova spajanja na mrežu i onda se dalje shodno tome donosi odluka o tome na koji dalekovod/trafostanicu je najbolje spojiti vjetroelektranu. Na slici 21 prikazana je generalna shema pretvorbe energije na vjetroagregatima i shema spajanja na elektrodistribucijsku mrežu. Budući da je brzina vjetra promjenjiva, potrebno je brzinu vrtnje generatora održavati konstantnom da bi frekvencija izlazne struje bila konstantna. U odabranim tipovima vjetroagregata nalaze se sinkroni generatori s permanentnim magnetima zato što oni omogućuju traženu izlaznu frekvenciju unatoč nižim brzinama vrtnje (sinkroni generatori mogu imati velik broj polova). Oni su jednostavniji za održavanje i jeftiniji su od asinkronih generatora.

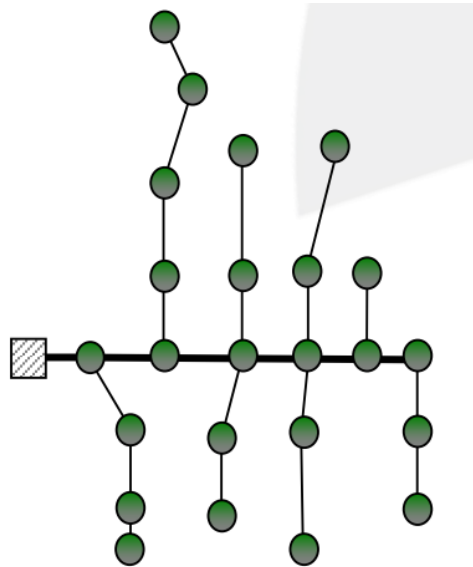


Slika 21. Proces pretvorbe energije i shema spajanja na mrežu, [25].

Vjetroelektranu čini 5 blisko smještenih vjetroagregata koji su priključeni kroz zajednički rasklopni uređaj na električnu mrežu. Proces se može podijeliti u dvije faze: na razini turbine kinetička energija vjetra se pretvara u mehaničku, a u drugoj fazi na generatoru se mehanička energija pretvara u električnu energiju koja se potom dalje vodi u mrežu. Spoj između vjetroturbine i generatora ostvaren je pomoću mehaničke spojke koja uključuje mehaničku kutiju s prijenosnikom. Taj prijenosnik brzine služi kako bi se niža brzina vrtnje rotora prilagodila višoj brzini vrtnje generatora električne energije. U sklopu opreme ovog *Vestas* modela vjetroagregata nalazi se i sustav za upravljanje zakreta lopatica.

Vjetroagregati su povezani na mrežu na radijalni način (slično kao sekundarne transformatorske stanice u razdjelnoj mreži). Na slici 22 prikazan je općeniti primjer izgleda radijalno razgranate mreže. Poželjno je da krakovi budu što kraći kako bi kvar izazvao čim manji zastoje u proizvodnji električne energije. Kabelska mreža prenosi električnu energiju proizvedenu u vjetroagregatima u prihvatnu transformatorsku stanicu. Kablovi moraju biti dimenzionirani na punu struju ukupne proizvodnje svih vjetroagregata. Način polaganja kabela je prema Tehničkim uvjetima HEP-a. U kabelski rov će se uz energetske kabele položiti i PEHD cijev za polaganje optičkih kabela za informatičke veze među vjetroagregatima. Iznad energetskih kabela se polaže bakreno užice za formiranje zajedničkog uzemljivačkog sustava [25].

U sklopu ovog rada mogli bi se uzeti u obzir i određeni gubici energije prilikom rada vjetroelektrane. Međutim, oni nisu značajni s obzirom na ukupnu dobivenu energiju pa se zbog jednostavnosti ovdje neće uzimati u obzir.



Slika 22. *Primjer radijalno razgranate mreže (zelene točke na krakovima su čvorišta)*, [25].

5.2. **Proizvodnja vodika**

Vodik će se proizvoditi uporabom PEM elektrolizatora, budući da tome tipu elektrolizatora odgovara rad u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije. Za potrebe ovog proračuna pretpostavit će se da vrijedi krivulja iskoristivosti elektrolizatora prikazana već ranije na slici 7. Prema toj krivulji, iskoristivost tipičnog PEM elektrolizatora raste sve do razine opterećenja od otprilike 20 %, gdje iskoristivost iznosi blizu 70 %. Na razinama opterećenja većim od 20 % iskoristivost elektrolizatora polako opada, da bi na razini opterećenja od 100 % iskoristivost iznosila oko 57 %. Iskoristivost se računa u odnosu na maksimalnu elektrolizatoru dostupnu energiju koja se može pojaviti u nekom satu (u ovom radu ona iznosi 17,215 MWh).

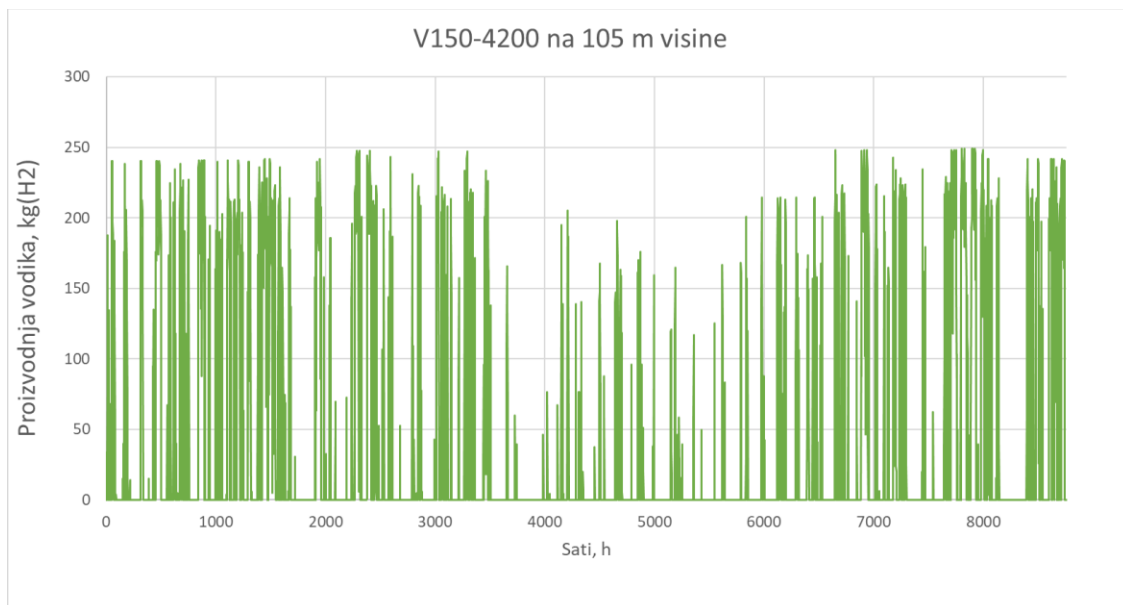
Tijek proračuna sustava za proizvodnju vodika je slijedeći. Za svaki sat u godini računa se razlika između proizvedene električne energije i potrošene električne energije. U onim satima u kojima je proizvodnja električne energije veća od potrošnje električne energije, višak električne energije koristi se za proizvodnju vodika. Taj višak električne energije jednak je E_{sat} . Količina proizvedenog vodika M_{H_2} (kg) u svakom satu tijekom godine računa se prema izrazu (5.4), prema [26]. Kao primjer, na slici 23 prikazana je godišnja proizvodnja vodika za 5 x V150-4200 na 105 m.

$$M_{H_2} = \frac{\eta_{el} E_{sat}}{H_{g,H_2}} \quad (5.4)$$

gdje je: η_{el} - iskoristivost elektrolizatora

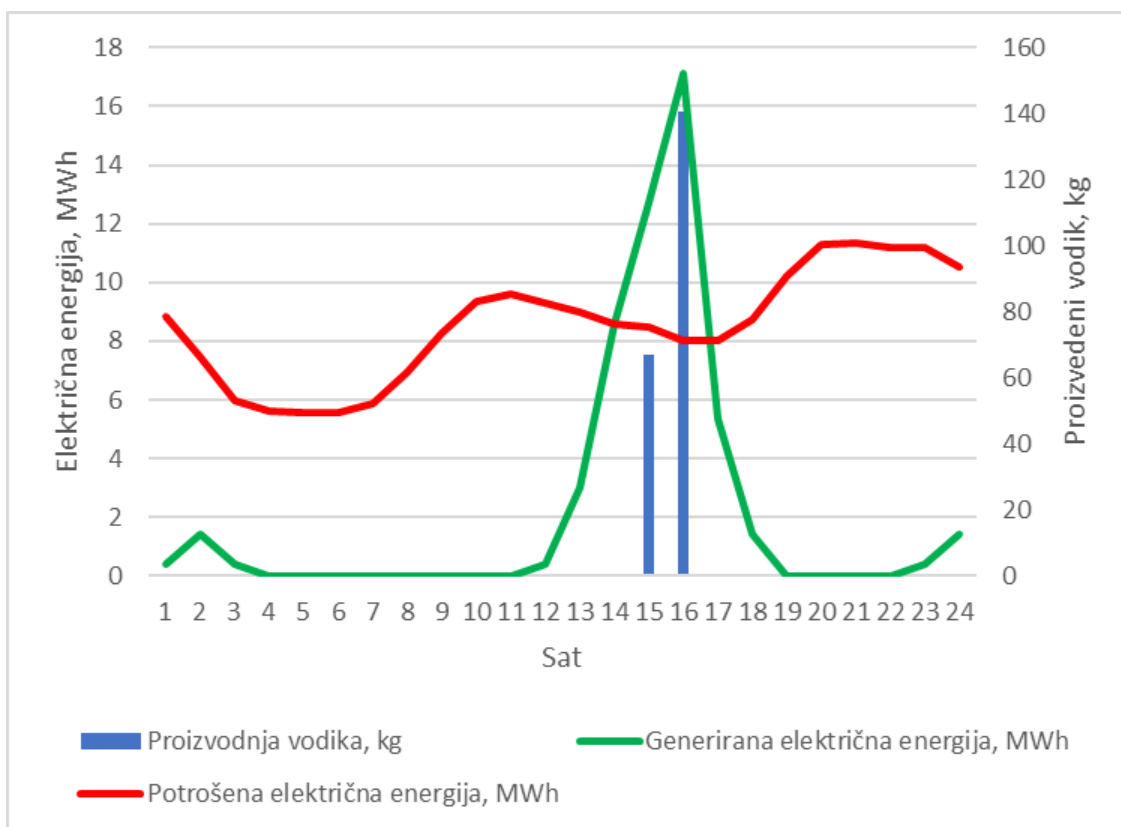
E_{sat} - dostupna električna energija u određenom satu, MWh

H_{g,H_2} - gornja ogrjevna moć vodika ($H_{g,H_2} = 0,0394$ MWh/kg)



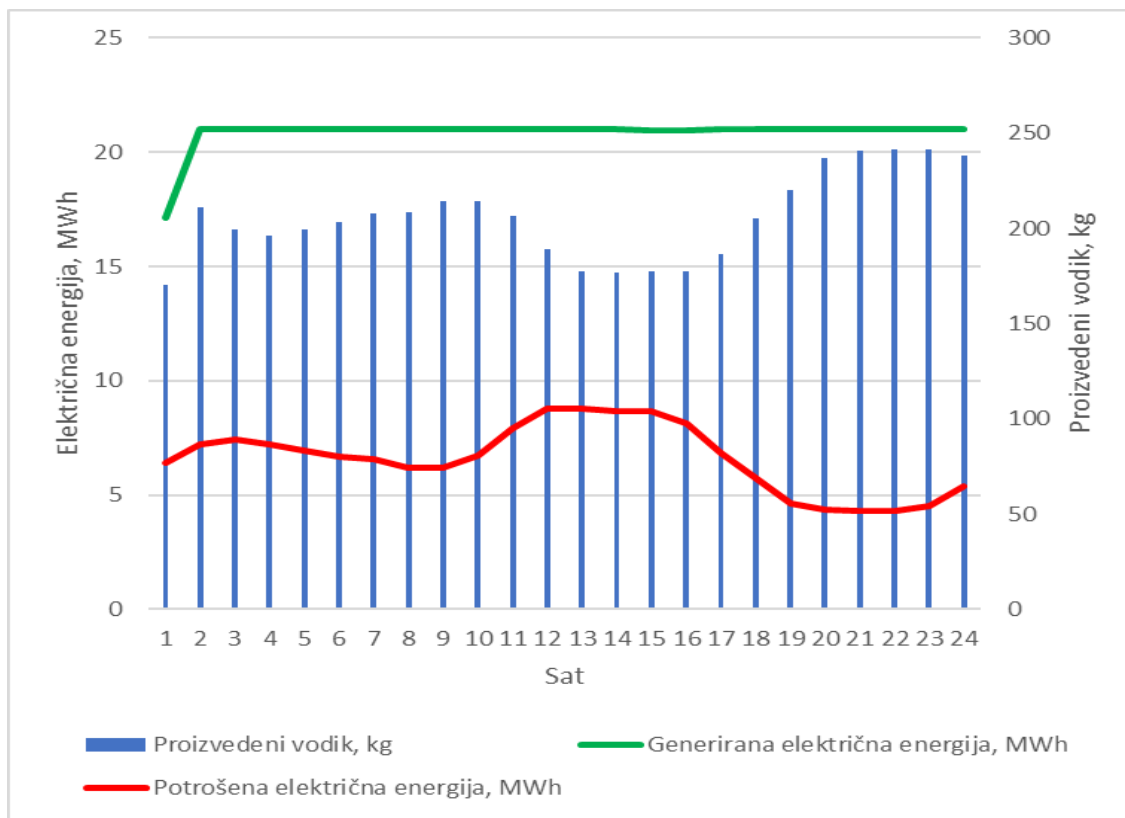
Slika 23. Godišnja proizvodnja vodika za 5 x V150-4200 s visinom rotora na 105 m.

Slike 24, 25 i 26 odnose se na scenarij s promjerom rotora 150 m i visinom postavljanja rotora 105 m. Na slici 24 prikazana je dnevna satna raspodjela generirane električne energije (zelena linija), potrošene električne energije (crvena linija) i proizvedenog vodika (plavi stupci) za jedan tipičan dan s malo vjetra.



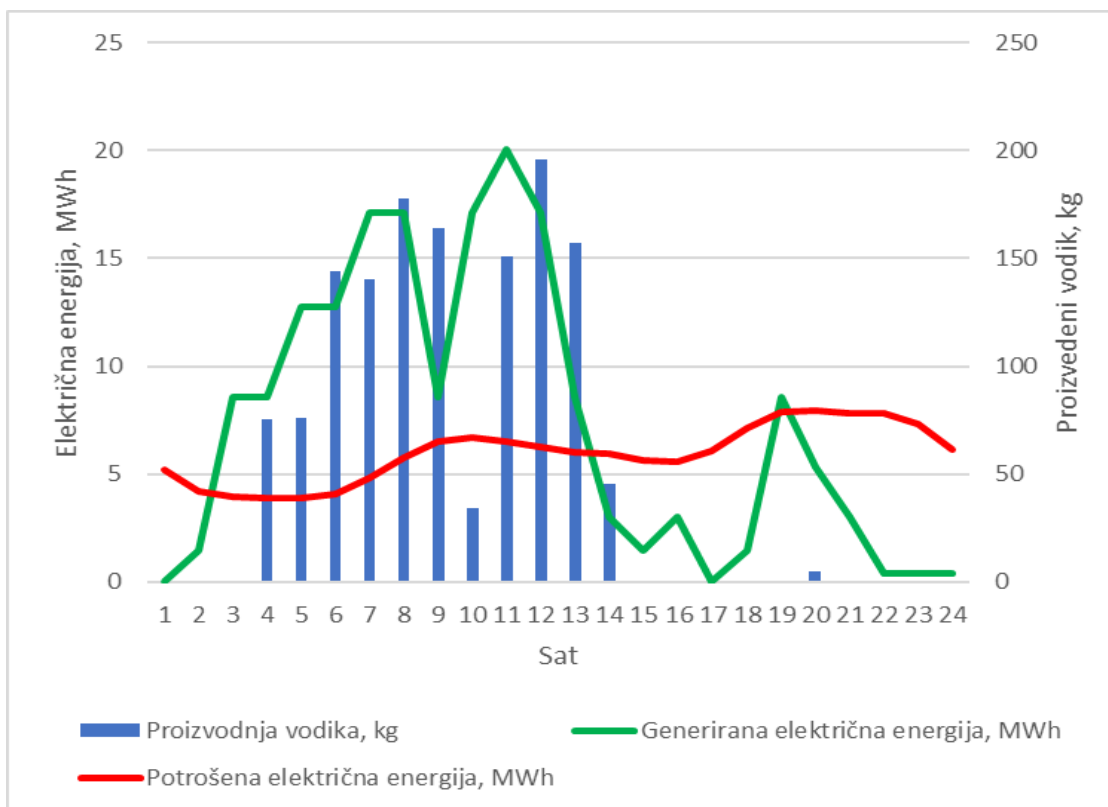
Slika 24. Satna raspodjela za dan s malo vjetra (lipanj) - 5 x V150-4200, visina rotora na 105 m.

Na slici 25 prikazana je dnevna satna raspodjela generirane električne energije (zelena linija), potrošene električne energije (crvena linija) i proizvedenog vodika (plavi stupci) za jedan tipičan dan s mnogo vjetra.



Slika 25. Satna raspodjela za dan s mnogo vjetra (prosinač) - 5 x V150-4200, visina rotora na **105 m**.

Na slici 26 prikazana je dnevna satna raspodjela generirane električne energije (zeleno linija), potrošene električne energije (crvena linija) i proizvedenog vodika (plavi stupci) za jedan tipičan dan s prosječnim brzinama vjetra.



Slika 26. Satna raspodjela za dan s prosječnim brzinama vjetra (travanj) 5 x V150-4200, visina rotora na 105 m.

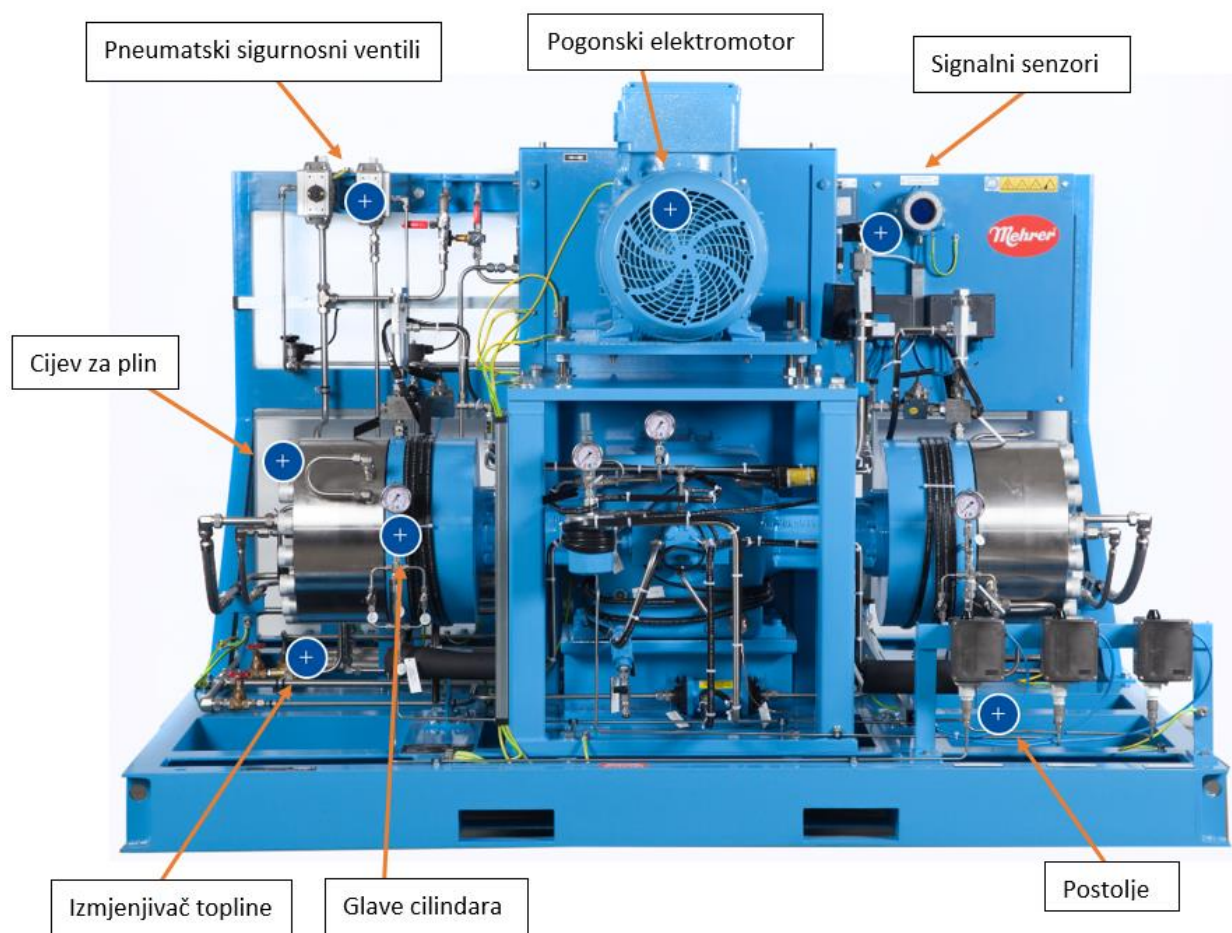
U tablici 4 prikazana je masa proizvedenog vodika za svaki od 4 scenarija u jednoj godini. Vidi se da proizvodnja premašuje 300 tona vodika godišnje, ovisno o scenariju.

Tablica 4. Godišnja proizvodnja vodika za 4 različita scenarija vjetroelektrana.

Vjetroelektrana	Godišnje proizvedeni vodik, kg
5 x V136-4200, visina rotora na 105 m	326.568,0
5 x V136-4200, visina rotora na 166 m	354.755,6
5 x V150-4200, visina rotora na 105 m	366.669,5
5 x V150-4200, visina rotora na 166 m	394.124,0

5.3. Kompresija i spremnici za pohranu vodika

Vodik se u velikim količinama najčešće pohranjuje u komprimiranom obliku. Za kompresiju vodika koriste se kompresori, a vodik se pohranjuje u odgovarajuće spremnike. Na slici 27 prikazan je jedan kompresor vodika proizvođača *Mehrer* sa pripadajućim dijelovima (mogućnost tlačenja vodika do tlaka 1000 bar, pri protocima većim od 500 Nm³/h).



Slika 27. *Mehrer* kompresor za vodik [27].

U ovom slučaju vodik će biti pohranjen u metalne spremnike tipa 1 (nehrđajući čelik), koji su relativno jeftini za održavanje i prilično sigurni. Budući da su godišnje količine proizvedenog

vodika relativno velike, odabrani spremnici bit će cilindričnog oblika i imati će volumen od 50 m³ svaki, što je tipična veličina spremnika u ovakvim primjenama [28]. Prema [28], energija za kompresiju 1 kilograma vodika na 350 bara iznosi 17 MJ/kg (4,722 kWh/kg), dok za 700 bara ona iznosi 22 MJ/kg (6,111 kWh/kg). Za 1. scenarij (5 x V136-4200, visina rotora na 105 m) godišnja energija potrebna za kompresiju svog vodika iznosi **1.542,05 MWh** (350 bar), odnosno **1.995,66 MWh** (700 bar).

Za 2. scenarij (5 x V136-4200, visina rotora na 166 m) godišnja energija potrebna za kompresiju svog vodika iznosi **1.675,16 MWh** (350 bar), odnosno **2.167,91 MWh** (700 bar).

Za 3. scenarij (5 x V150-4200, visina rotora na 105 m) godišnja energija potrebna za kompresiju svog vodika iznosi **1.731,41 MWh** (350 bar), odnosno **2.240,72 MWh** (700 bar).

Za 4. scenarij (5 x V150-4200, visina rotora na 166 m) godišnja energija potrebna za kompresiju svog vodika iznosi **1.861,05 MWh** (350 bar), odnosno **2.408,49 MWh** (700 bar).

Za dva odabrana tlaka (350/700 bar) ukupna potrebna instalirana snaga svih kompresora za 1. scenarij iznosi **176 kW/228 kW**, za 2. scenarij iznosi **191 kW/247 kW**, za 3. scenarij iznosi **198 kW/256 kW** te za 4. scenarij iznosi **212 kW/275 kW**. Cijena energije potrebne za kompresiju vodika uzeta je u obzir u ekonomskoj analizi u kasnijim poglavljima ovog rada u obliku troškova upravljanja i održavanja sustava.

Volumen koji će zauzeti komprimirani vodik jednostavno se može izračunati korištenjem jednadžbe stanja idealnog plina uz korekciju faktora kompresibilnosti Z . Na slici 28 prikazana je ovisnost faktora kompresibilnosti u ovisnosti o tlaku i temperaturi vodika. Izraz (5.5) prikazuje jednadžbu stanja realnog plina.

$$p \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T \quad (5.5)$$

gdje je: p - tlak, Pa

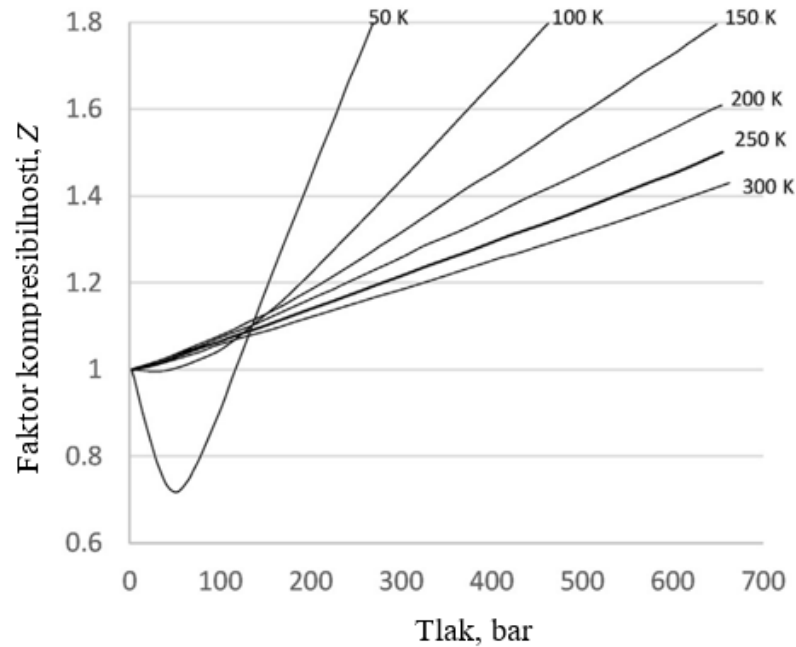
V - volumen, m³

Z - faktor kompresibilnosti

n - množina tvari, mol, $n = (\text{masa plina, g}) / (\text{molarna masa plina, g/mol})$

R - univerzalna plinska konstanta, $R = 8,314472 \text{ J}/(\text{molK})$

T - temperatura, K.



Slika 28. Faktor kompresibilnosti Z u ovisnosti o tlaku i temperaturi vodika, [28].

Primjerice, pri okolnoj temperaturi od 25°C i tlaku 300 bara faktor kompresibilnosti iznosi $Z = 1,2$ što znači da će vodik u spremniku imati 20% manju masu od idealnog plina jednakog volumena. Koristeći izraz (5.4) i faktore kompresibilnosti sa slike 17, pri okolnoj temperaturi od 25°C , dobivene su mase vodika koje stanu u 1 spremnik od 50 m^3 pri 350 i 700 bara (tablica 5).

Tablica 5. Masa vodika u jednom spremniku od 50 m^3 .

Tlak pohrane, bar	Masa pohranjenog vodika po spremniku, kg
350	1016,93
700	2033,86

Budući da ovakav sustav godišnje proizvodi skoro 400 tona vodika, u najopterećenijem slučaju (4. scenarij) bilo bi potrebno instalirati **388**, odnosno **194** takvih spremnika od **50 m³** pri 350 bar, odnosno 700 bar. Ovo vrijedi uz pretpostavku da se tijekom godine sav vodik isprazni iz spremnika. Pošto se ovdje radi o velikom volumenu, praktičnije rješenje bilo bi pohraniti proizvedeni vodik u velike podzemne spremnike ili ispražnjena nalazišta plina.

5.4. Smanjenje emisija

Kada se razmišlja o gradnji hibridnog sustava, smanjenje štetnih emisija u atmosferu jedan je od ključnih pojmova koji treba razmotriti. Procjena smanjenja štetnih emisija bit će provedena usporedbom ovakvog hibridnog sustava vjetroelektrana/vodik, koji je praktički bez emisija, s konvencionalnim načinom proizvodnje električne energije u termoelektranama na ugljen. Razmotrit će se smanjenje emisija CO₂ (uglikovog dioksida), SO₂ (sumporovog dioksida) i NO (dušikovog oksida).

Prema istraživanju [29], emisije CO₂ u modernim termoelektranama na ugljen kreću se od 0,82 do 1 kg/kWh (svedeno na jedinicu proizvedene električne energije). Ako se uzme prosječna vrijednost od 0,91 kg/kWh, godišnji rezultati smanjenja emisija CO₂ su sljedeći:

- 1. scenarij: **8.011.040,4 kg_{CO2}** ili **8.011,04 t_{CO2}**
- 2. scenarij: **8.650.493,7 kg_{CO2}** ili **8.650,49 t_{CO2}**
- 3. scenarij: **8.805.077,2 kg_{CO2}** ili **8.805,08 t_{CO2}**
- 4. scenarij: **9.442.997,2 kg_{CO2}** ili **9.443,00 t_{CO2}**

Prema istraživanju [29], prosječne emisije SO₂ u modernim termoelektranama na ugljen kreću se oko vrijednosti 8 g/kWh (svedeno na jedinicu proizvedene električne energije). Godišnji rezultati smanjenja emisija SO₂ su sljedeći:

- 1. scenarij: **70.434,7 kg_{SO2}** ili **70,43 t_{SO2}**
- 2. scenarij: **76.048,3 kg_{SO2}** ili **76,05 t_{SO2}**
- 3. scenarij: **77.407,3 kg_{SO2}** ili **77,41 t_{SO2}**
- 4. scenarij: **83.015,4 kg_{SO2}** ili **83,02 t_{SO2}**

Prema istraživanju [29], prosječne emisije **NO** u modernim termoelektranama na ugljen kreću se oko vrijednosti 4,3 g/kWh (svedeno na jedinicu proizvedene električne energije). Godišnji rezultati smanjenja emisija NO su sljedeći:

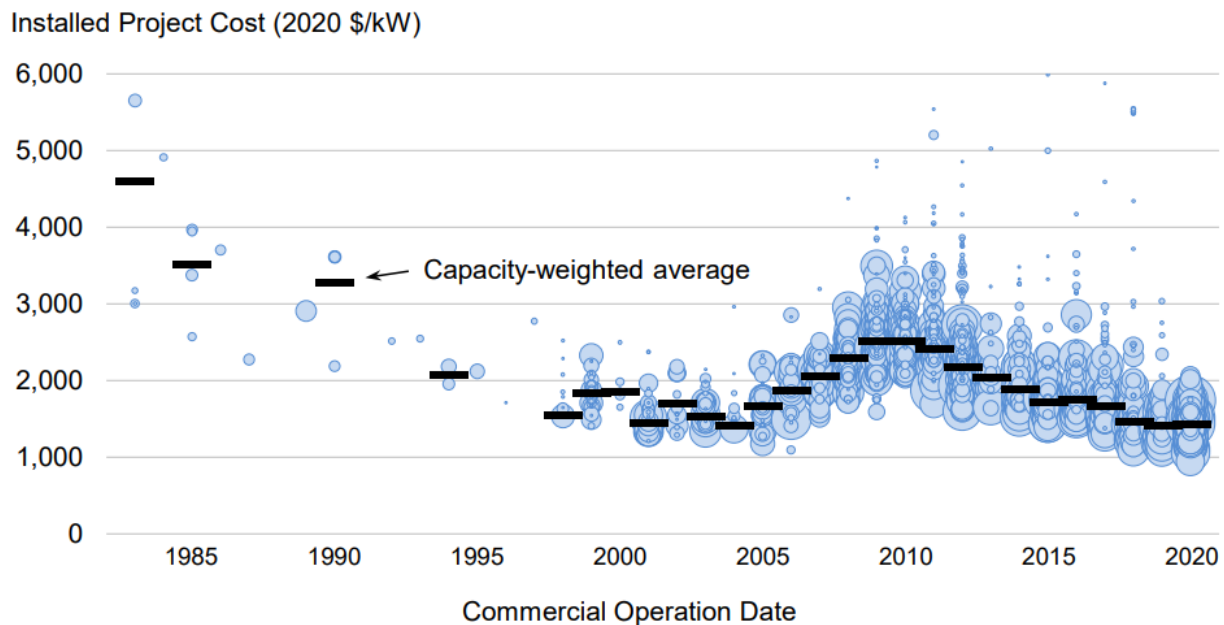
- 1. scenarij: **37.858,7 kg_{NO}** ili **37,86 t_{NO}**
- 2. scenarij: **40.876,0 kg_{NO}** ili **40,88 t_{NO}**
- 3. scenarij: **41.606,4 kg_{NO}** ili **41,61 t_{NO}**
- 4. scenarij: **44.620,8 kg_{NO}** ili **44,62 t_{NO}**

5.5. Ekonomska analiza

5.5.1. Investicijski troškovi

Sljedeće vrijednosti su važeće uz pretpostavku da na cijenu vjetroelektrane najveći utjecaj ima njena snaga. Ukupna cijena izgradnje jedne prosječne kopnene vjetroelektrane, prema podacima *Berkley Lab-a* (Sveučilište u Kaliforniji) za 2020. godinu [30], iznosila je oko 1 280 USD/kW. Kada se ovaj iznos preračuna u eure po današnjem tečaju, on iznosi **1 248 EUR/kW**. Taj iznos je za oko 40 % manji nego 2010. godine, ali je približno jednak investicijskim troškovima iz 2001. godine. U periodu od 2010. do 2018. godine prosječni investicijski troškovi su padali, a od 2018. godine do 2020. godine prosječni investicijski troškovi su stagnerali. Na temelju te stagnacije pretpostavljeni su ukupni investicijski troškovi. Na slici 29 prikazani su ukupni prosječni investicijski troškovi za vjetroelektrane kroz povijest. Stoga, za vjetroelektranu ukupne instalirane snage **21 MW** (5 vjetroagregata snage po 4,2 MW) ukupan trošak investicije u samu vjetroelektranu iznosi **26.208.000 EUR**.

Prema analizi slovenskih znanstvenika [31], prosječna nabavna cijena ukupne opreme za pretvorbu električne energije u komprimirani vodik (elektrolizator sa spremnicima za vodik, komponente separatora vode, kompresori i finalna pohrana vodika pod visokim tlakom) svedena na količinu utrošene električne energije sustava iznosi **27,20 EUR/MWh** (s obzirom na stanje tržišta 2020. godine). U tablici 6 prikazani su ukupni investicijski troškovi za svaki od 4 promatrana scenarija.



Slika 29. Ukupni investicijski troškovi (engl. *Installed Project Cost*) u odnosu na godinu puštanja u rad (engl. *Commercial Operation Date*), [30].

Tablica 6. *Ukupni investicijski troškovi za 4 scenarija.*

Scenarij	Ukupni investicijski troškovi (vjetroelektrana + sustav proizvodnje i pohrane vodika), EUR
5 x V136-4200, visina rotora na 105 m	26.805.135,67
5 x V136-4200, visina rotora na 166 m	26.858.328,75
5 x V150-4200, visina rotora na 105 m	26.882.139,10
5 x V150-4200, visina rotora na 166 m	26.933.203,23

5.5.2. Troškovi upravljanja i održavanja

Prema IRENA-i [16], troškovi upravljanja i održavanja (*O&M - Operation and Maintenance*) europskih vjetroelektrana u 2020. godini kretali su se od 40 do 50 USD/kW/god, ovisno o promatranoj zemlji. Stoga, pretpostavljeni troškovi održavanja ove vjetroelektrane bit će 45 USD/kW/god, odnosno preračunato u eure prema današnjem tečaju **42,63 EUR/kW/god**.

Dakle, za vjetroelektranu ukupne instalirane snage od **21 MW** (5 vjetroagregata snage po 4,2 MW) ukupni godišnji troškovi upravljanja i održavanja imat će fiksni iznos i iznositi će **895.230 EUR/god**. Ova vrijednost troškova upravljanja i održavanja odgovara otprilike 3% ukupnog iznosa investicijskih troškova.

Prema [31] i stanju tržišta 2020. godine, troškovi upravljanja i održavanja sustava za elektrolizu i pohranu vodika prosječno iznose 5 % investicijskih troškova sustava elektrolize i pohrane godišnje.

Uz pretpostavku da su troškovi upravljanja i održavanja jednaki svake godine, u tablici 7 prikazani su ukupni godišnji troškovi upravljanja i održavanja za 4 scenarija.

Tablica 7. *Ukupni godišnji troškovi upravljanja i održavanja.*

Scenarij	Ukupni godišnji troškovi upravljanja i održavanja (vjetroelektrana + sustav proizvodnje i pohrane vodika), EUR
5 x V136-4200 , visina rotora na 105 m	925.086,78
5 x V136-4200 , visina rotora na 166 m	927.746,44
5 x V150-4200 , visina rotora na 105 m	928.936,96
5 x V150-4200 , visina rotora na 166 m	931.490,16

5.5.3. Prihodi od prodaje vodika

U ovom radu analizirat će se ekonomska isplativost hibridnog sustava vjetroelektrane uz proizvodnju i prodaju vodika na tržištu. Prema [31], prosječna tržišna prodajna cijena plinovitog vodika za 2020. godinu iznosila je **6 EUR/kg_{H2}**. U tablici 8 prikazani su ukupni godišnji prihodi od prodaje vodika na tržištu za 4 scenarija, uz pretpostavku da su oni jednaki svake godine. Za sustav s proizvodnjom vodika nije predviđeno korištenje državnih premijskih poticaja.

Tablica 8. *Godišnji prihodi od prodaje vodika, bez poticaja.*

Scenarij	Godišnji prihodi od prodaje vodika, EUR
5 x V136-4200 , visina rotora na 105 m	1.959.408,01
5 x V136-4200 , visina rotora na 166 m	2.128.533,32
5 x V150-4200 , visina rotora na 105 m	2.200.016,72
5 x V150-4200 , visina rotora na 166 m	2.364.743,95

5.5.4. Prihodi od prodaje električne energije

Moguće je razmotriti i alternativnu opciju rada sustava. U tablici 9 prikazani su godišnji prihodi od prodaje električne energije za slučaj da se višak električne energije ne koristi za proizvodnju vodika, već se prodaje na tržištu električne energije. Budući da su današnje cijene energije iznimno nestabilne zbog globalne ekonomske krize, odabrana je prosječna godišnja satna cijena električne energije iz 2020. godine s „Dan unaprijed“ tržišta Hrvatske burze električne energije (CROPEX). Prosječna prodajna cijena el. energije za 2020. godinu iznosi **38,03 EUR/MWh**, [32]. Pretpostavlja se da bi se u ovom slučaju sustav sastojao samo od vjetroelektrane, bez dijela koji se odnosi na proizvodnju i pohranu vodika. U trenutku pisanja ovog rada na snagu su stupile privremene mjere vlade RH kojima se cijena električne energije ograničava na 59 EUR/MWh, odnosno 88 EUR/MWh, ovisno o potrošnji.

Tablica 9. Godišnji prihodi od prodaje električne energije (38,03 EUR/MWh).

Scenarij	Godišnji prihodi od prodaje električne energije, EUR
5 x V136-4200 , visina rotora na 105 m	334.829,05
5 x V136-4200 , visina rotora na 166 m	361.514,59
5 x V150-4200 , visina rotora na 105 m	367.974,82
5 x V150-4200 , visina rotora na 166 m	394.634,16

Kada se usporede godišnji prihodi od prodaje električne energije (po cijeni od 38,03 EUR/MWh) i ukupni godišnji troškovi, može se vidjeti da će vjetroelektrana svake godine raditi s negativnom novčanom bilancom (za sva 4 scenarija). Dakle, sustav bez prodaje vodika uz ovakvu cijenu električne energije nije ekonomski isplativ ni nakon 30 godina. Primjer proračuna za prvi scenarij (5 x **V136-4200**, visina rotora na **105 m**) tijekom 30 godina rada prikazan je u tablici 10.

Tablica 10. Kumulativni povrat investicije, 1. scenarij (5 x VI36-4200, visina rotora na 105 m).

Godina	Godišnji troškovi, EUR	Prihod od prodaje el. energije, EUR	Razlika, EUR	Kumulativni povrat investicije, EUR
1	26.805.135,67	334.829,05	-26.470.306,62	-26.470.306,62
2	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-27.060.564,35
3	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-27.650.822,09
4	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-28.241.079,82
5	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-28.831.337,55
6	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-29.421.595,28
7	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-30.011.853,02
8	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-30.602.110,75
9	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-31.192.368,48
10	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-31.782.626,22
11	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-32.372.883,95
12	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-32.963.141,68
13	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-33.553.399,42
14	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-34.143.657,15
15	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-34.733.914,88
16	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-35.324.172,62
17	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-35.914.430,35
18	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-36.504.688,08
19	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-37.094.945,82
20	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-37.685.203,55
21	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-38.275.461,28
22	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-38.865.719,02
23	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-39.455.976,75
24	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-40.046.234,48
25	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-40.636.492,22
26	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-41.226.749,95
27	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-41.817.007,68
28	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-42.407.265,42
29	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-42.997.523,15
30	925.086,78	334.829,05	-590.257,73	-43.587.780,88

5.5.5. Potrebna prodajna cijena električne energije

Za slučaj prodaje proizvedene električne energije na tržištu bilo bi potrebno sagledati feed-in premijske poticaje, koji su zasnovani na referentnim cijenama kao maksimalnim vrijednostima. Tada investitori preko natječaja nude otkupne cijene koje bi trebale pokriti razliku između stvarno postignute prodajne cijene električne energije na tržištu i prodajne cijene koja bi jamčila pozitivno poslovanje (isplativost gradnje sustava). Ukoliko bi se situacija promatrala na suprotan način, trebalo bi se zapitati kolika bi morala biti prodajna cijena električne energije kako bi poslovanje bilo isplativo tijekom određenog vremenskog perioda (npr. **20 godina**). U tablici 11 prikazane su potrebne prodajne cijene električne energije za svaki od 4 scenarija za isplativo poslovanje kroz 20 godina rada. Može se uočiti da bi cijene morale biti gotovo šest puta veće od prosječne tržišne prodajne cijene električne energije (38,03 EUR/MWh) kako bi poslovanje bilo pozitivno kroz tih 20 godina. Najniža potrebna prodajna cijena električne energije je u 4. scenariju i iznosi 215,06 EUR/MWh.

Tablica 11. *Potrebna prodajna cijena električne energije za svaki od 4 scenarija.*

Scenarij	Potrebna prodajna cijena električne energije, EUR/MWh
5 x V136-4200, visina rotora na 105 m	252,05
5 x V136-4200, visina rotora na 166 m	233,99
5 x V150-4200, visina rotora na 105 m	230,12
5 x V150-4200, visina rotora na 166 m	215,06

5.5.6. Analiza profitabilnosti uz prodaju vodika

Ocjena profitabilnosti sustava vrši se korištenjem sljedećih indikatora: jednostavni period povrata investicije, indeks profitabilnosti, neto sadašnja vrijednost te interna stopa povrata [33], [34]. Analizom će biti obuhvaćena odabrana 4 scenarija postrojenja. Rezultati su prikazani u tablici 12.

Jednostavni period povrata (JPP) - vrijeme potrebno da se budućim novčanim primicima pokrije početna investicija:

$$JPP = \frac{I_{uk}}{Z_{god,neto}}, \quad \text{god} \quad (5.6)$$

gdje su: I_{uk} - ukupni investicijski troškovi, EUR

$Z_{god,neto}$ - godišnja neto zarada, EUR/god

- projekt se usvaja ako je JPP manji od određenog maksimalnog perioda povrata investicije

Indeks profitabilnosti (IP) - omjer diskontiranih čistih novčanih tokova projekta tijekom cjelokupnog vijeka efektuiranja i njegovih investicijskih troškova:

$$IP = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{Z_{god,neto}}{(1+k)^t}}{I_{uk}} \quad (5.7)$$

gdje je: k - obračunska kamatna stopa, $k = 0,1\%$ (za otočna područja), [29]

T - ekonomski životni vijek projekta, $T = 20$ god

- projekt se usvaja ako je $IP > 1$

Neto sadašnja vrijednost (NSV) - razlika sadašnje vrijednosti novčanih primitaka i sadašnje vrijednosti novčanih izdataka:

$$NSV = \sum_{t=1}^T \frac{Z_{god,neto}}{(1+k)^t} - I_{uk}, \quad \text{EUR} \quad (5.8)$$

- projekt je isplativ ako je NSV veći ili jednak nuli

Interna stopa povrata (IRR) - ona kamatna stopa kod koje je neto vrijednost nula, odnosno, diskontna stopa kojom se izjednačava sadašnja vrijednost investicijskih troškova sa sadašnjom vrijednosti očekivanih novčanih primitaka od investicije:

$$\sum_{t=1}^T \frac{Z_{god,neto}}{(1+R)^t} = I_{uk}, \quad \% \quad (5.9)$$

- projekt se usvaja ako je $IRR > k$ (obračunska kamatna stopa)

gdje su: T - ekonomski životni vijek projekta, $T = 20$ god

R - interna stopa povrata izračunata interpolacijom, %

Tablica 12. Pokazatelji isplativosti svakog od 4 scenarija.

Scenarij	JPP , god	IP	NSV , EUR	IRR , %
5 x V136 -4200, visina rotora na 105 m	13,68	1,45	11.974.549,10	3,90
5 x V136 -4200, visina rotora na 166 m	12,62	1,57	15.268.604,78	4,85
5 x V150 -4200, visina rotora na 105 m	12,22	1,62	16.659.560,42	5,23
5 x V150 -4200, visina rotora na 166 m	11,39	1,74	19.868.700,50	6,09

Nakon provedenog proračuna vidljivo je da su za ekonomski životni vijek projekta od **20** godina svi scenariji proizvodnje i prodaje vodika ekonomski isplativi. Teoretski najisplativiji je 4. scenarij (5 x V150-4200, visina rotora na 166 m), budući da je tada indeks profitabilnosti (IP) najveći. Jedinstveni period povrata investicije (JPP) je relativno kratak za sve scenarije.

6. REZULTATI

U tablicama 13, 14, 15 i 16 prikazan je kumulativni povrat investicije za hipotetsko razdoblje od 30 godina rada hibridnog sustava (prihodi **samo od prodaje vodika**), uz pretpostavku da će svake godine vladati tržišni uvjeti slični današnjima. Pretpostavka je uvedena budući da je teško napraviti preciznu prognozu stanja cijena na tržištu budućnosti.

Tablica 13. *Kumulativni povrat investicije, 1. scenarij (5 x VI36-4200, visina rotora na 105 m).*

Godina	Ukupni troškovi, EUR	Prihod od prodaje vodika, EUR	Razlika, EUR	Kumulativni povrat investicije, EUR
1	27.730.222,45	1.959.408,01	-25.770.814,44	-25.770.814,44
2	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-24.736.493,21
3	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-23.702.171,99
4	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-22.667.850,76
5	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-21.633.529,53
6	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-20.599.208,30
7	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-19.564.887,07
8	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-18.530.565,85
9	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-17.496.244,62
10	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-16.461.923,39
11	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-15.427.602,16
12	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-14.393.280,93
13	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-13.358.959,71
14	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-12.324.638,48
15	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-11.290.317,25
16	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-10.255.996,02
17	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-9.221.674,79
18	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-8.187.353,57
19	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-7.153.032,34
20	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-6.118.711,11
21	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-5.084.389,88
22	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-4.050.068,65
23	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-3.015.747,43
24	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-1.981.426,20
25	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	-947.104,97
26	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	87.216,26
27	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	1.121.537,49
28	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	2.155.858,71
29	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	3.190.179,94
30	925.086,78	1.959.408,01	1.034.321,23	4.224.501,17

Tablica 14. Kumulativni povrat investicije, 2. scenarij (5 x VI36-4200, visina rotora na 166 m).

Godina	Ukupni troškovi, EUR	Prihod od prodaje vodika, EUR	Razlika, EUR	Kumulativni povrat investicije, EUR
1	27.786.075,19	2.128.533,32	-25657541,87	-25.657.541,87
2	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-24.456.754,99
3	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-23.255.968,11
4	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-22.055.181,23
5	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-20.854.394,35
6	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-19.653.607,47
7	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-18.452.820,59
8	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-17.252.033,71
9	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-16.051.246,83
10	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-14.850.459,95
11	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-13.649.673,07
12	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-12.448.886,19
13	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-11.248.099,31
14	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-10.047.312,44
15	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-8.846.525,56
16	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-7.645.738,68
17	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-6.444.951,80
18	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-5.244.164,92
19	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-4.043.378,04
20	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-2.842.591,16
21	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-1.641.804,28
22	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	-441.017,40
23	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	759.769,48
24	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	1.960.556,36
25	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	3.161.343,24
26	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	4.362.130,12
27	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	5.562.917,00
28	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	6.763.703,88
29	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	7.964.490,76
30	927.746,44	2.128.533,32	1.200.786,88	9.165.277,64

Tablica 15. Kumulativni povrat investicije, 3. scenarij (5 x V150-4200, visina rotora na 105 m).

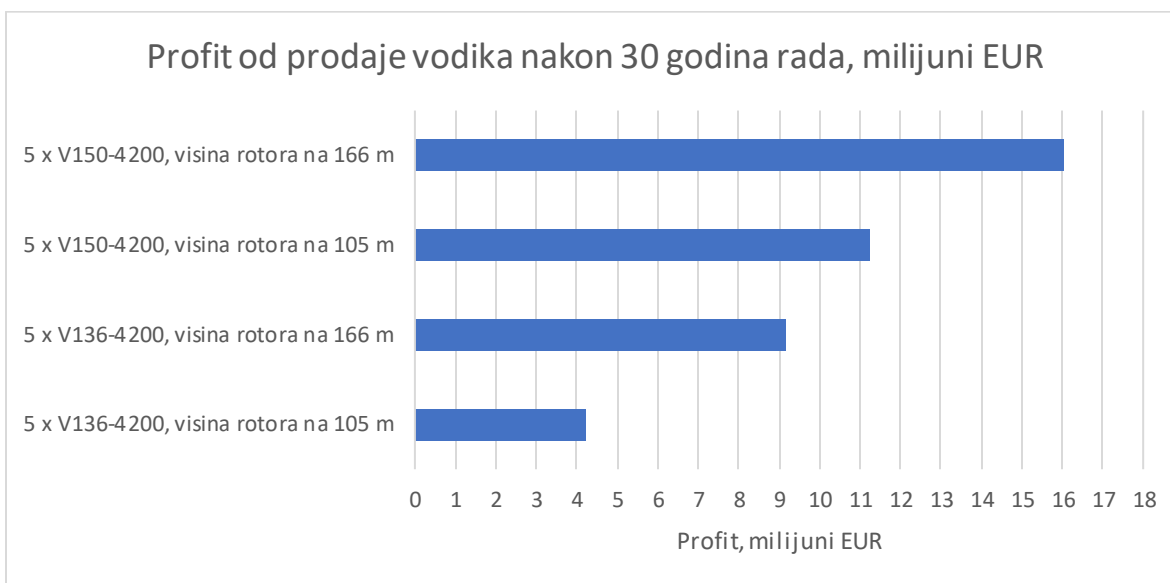
Godina	Ukupni troškovi, EUR	Prihod od prodaje vodika, EUR	Razlika, EUR	Kumulativni povrat investicije, EUR
1	27.811.076,06	2.200.016,72	-25.611.059,34	-25.611.059,34
2	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-24.339.979,57
3	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-23.068.899,81
4	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-21.797.820,04
5	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-20.526.740,28
6	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-19.255.660,51
7	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-17.984.580,75
8	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-16.713.500,98
9	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-15.442.421,22
10	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-14.171.341,45
11	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-12.900.261,69
12	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-11.629.181,92
13	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-10.358.102,16
14	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-9.087.022,39
15	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-7.815.942,63
16	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-6.544.862,86
17	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-5.273.783,10
18	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-4.002.703,33
19	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-2.731.623,57
20	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-1.460.543,80
21	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	-189.464,04
22	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	1.081.615,72
23	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	2.352.695,49
24	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	3.623.775,25
25	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	4.894.855,02
26	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	6.165.934,78
27	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	7.437.014,55
28	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	8.708.094,31
29	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	9.979.174,08
30	928.936,96	2.200.016,72	1.271.079,76	11.250.253,84

Tablica 16. Kumulativni povrat investicije, 4. scenarij (5 x V150-4200, visina rotora na 166 m).

Godina	Ukupni troškovi, EUR	Prihod od prodaje vodika, EUR	Razlika, EUR	Kumulativni povrat investicije, EUR
1	27.864.693,39	2.364.743,95	-25.499.949,43	-25.499.949,43
2	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-24.066.695,64
3	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-22.633.441,85
4	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-21.200.188,06
5	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-19.766.934,26
6	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-18.333.680,47
7	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-16.900.426,68
8	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-15.467.172,88
9	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-14.033.919,09
10	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-12.600.665,30
11	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-11.167.411,50
12	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-9.734.157,71
13	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-8.300.903,92
14	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-6.867.650,13
15	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-5.434.396,33
16	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-4.001.142,54
17	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-2.567.888,75
18	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	-1.134.634,95
19	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	298.618,84
20	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	1.731.872,63
21	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	3.165.126,43
22	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	4.598.380,22
23	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	6.031.634,01
24	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	7.464.887,80
25	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	8.898.141,60
26	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	10.331.395,39
27	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	11.764.649,18
28	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	13.197.902,98
29	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	14.631.156,77
30	931.490,16	2.364.743,95	1.433.253,79	16.064.410,56

Osim prve godine, kada se u ukupne troškove ubrajaju i investicijske troškove, u ostalim godinama ukupne troškove sustava čine samo troškovi upravljanja i održavanja, a razlika je pozitivna. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se s povećanjem promjera rotora vjetroagregata i povećanjem visine rotora skraćuje vrijeme povrata investicije i profit je veći. Analizom se može utvrditi što više utječe na profit: promjer rotora vjetroagregata ili visina na koju se postavlja rotor. Na slici 30 prikazan je grafički prikaz u kojem je uspoređen profit za 4 scenarija nakon 30 godina rada

hibridnog sustava proizvodnje i prodaje vodika. Profit je najveći u 4. scenariju (promjer rotora 150 m, visina rotora 166 m). Vrijeme povrata investicije dodatno bi se skratilo ukoliko bi se vodik prodavao po skupljoj cijeni, uz dodatne poticaje ili uslijed pada troškova održavanja cijelog postrojenja.



Slika 30. Usporedba profita od prodaje vodika nakon 30 godina rada za 4 scenarija.

Nakon ekonomske analize razdoblja od 30 godina vidljivo je:

Kod promjera rotora od 136 m profit je porastao za **117,0 %** prelaskom na veću visinu postavljanja rotora (sa 105 m na 166 m). Kod promjera rotora od 150 m, profit je porastao samo za **42,8 %** prelaskom na veću visinu postavljanja rotora (sa 105 m na 166 m). Dakle, kod manjeg promjera rotora povećanje visine postavljanja rotora ima veći utjecaj na rast profita nego kod većeg promjera rotora. Analizira li se utjecaj promjera rotora na povećanje profita može se uočiti da kod visine rotora od 105 m profit raste za **166,3 %** prelaskom s rotora manjeg promjera na rotor s većim promjerom (136 m na 150 m). Kod visine rotora od 166 m, profit je porastao samo za **75,3 %** prelaskom s rotora manjeg promjera na rotor s većim promjerom. Dakle, kod manje visine postavljanja rotora, povećanje promjera rotora ima veću ulogu u povećanju profita nego kod veće visine postavljanja rotora.

7. ZAKLJUČAK

U ovome radu analizirana su 4 različita scenarija u kojima su promjenjivi parametri promjer rotora i visina na koju se rotor postavlja. Iz rezultata se može zaključiti da, ukoliko se proizvedeni vodik odluči prodavati na tržištu bez poticaja, sustav postaje isplativ najranije za 19 godina rada (4. scenarij). Ekonomskom analizom sva 4 scenarija utvrđeno je da je ulaganje u takve sustave pri danim tržišnim uvjetima isplativo u razumnom vremenskom periodu. Ukoliko bi se umjesto proizvodnje vodika električna energija sama prodavala na tržištu, njena potrebna prodajna cijena morala bi biti oko 6 puta veća za povrat investicije u razumnom vremenskom periodu (20 godina). Također, vidi se da kod manje visine postavljanja rotora, povećanje promjera rotora ima veći utjecaj na povećanje profita nego kod veće visine postavljanja rotora. Kada se sažmu svi dobiveni rezultati može se zaključiti da se implementacijom hibridnog sustava vjetroelektrane i elektrolizatora uvelike smanjuju štetne emisije koje bi bile neizbježne ukoliko bi se koristio konvencionalni način proizvodnje električne energije.

Budući da je teško prognozirati kako će se u budućnosti kretati cijene na tržištu, istraživanje bi moglo dati preciznije rezultate ukoliko bi se u navedene scenarije uključila promjena cijena električne energije i vodika. Tada bi bilo potrebno provjeriti osjetljivost rezultata analize na vrijednosti ulaznih podataka. Prema nekim nagađanjima, cijene energije će samo rasti u budućnosti što bi zatim dodatno utjecalo na isplativost ovakvog projekta.

„Zajedničko poduzeće EU-a za čisti vodik“ osnovano je 2021. godine i ono podupire aktivnosti inovacija i istraživanja u području tehnologija vodika u Europi. Glavni cilj ovog partnerstva je pridonijeti zelenom planu EU-a i strategiji za vodik financiranjem aktivnosti istraživanja i inovacija [35]. Postoji mogućnost prijave na takve natječaje, čime bi se dodatno skratilo vrijeme povrata investicije ovisno o ponudi modela financiranja.

Zanimljivo bi bilo istražiti opciju postrojenja sa svežnjevima gorivnih članaka, u kojem bi se pohranjeni vodik mogao koristiti za generiranje električne energije u periodima bez vjetra. Istraživanje bi se moglo dodatno proširiti uvođenjem scenarija vjetroelektrane s nešto manjom instaliranom snagom, uz postojanje viškova električne energije za proizvodnju vodika i gorivne članke koji bi pokrivali vršna opterećenja.

8. LITERATURA

- [1] Jha, A. R.: “Wind turbine technology”, CRC Press by Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, SAD, 2011.
- [2] Douak M., Settou N.: “Estimation of hydrogen production using wind energy in Algeria”, Energy Procedia 74, Univ. Kasdi Merbah-Ouargla Alžir, 2015.
- [3] Shah R., Gan J., Ladella K.: „Using Wind Energy for Hydrogen Production : An Innovative Concept“, Koehler Instrument Company, New York, 2021.
- [4] IEA: “Energy storage report”, s interneta, <https://www.iea.org/reports/energy-storage>, 14.9.2022.
- [5] Brka S., Adel Z.: “Optimisation of stand-alone hydrogen-based renewable energy systems using intelligent techniques.”, Research online, Edith Cowan University, 2015.
- [6] Yilmaz F. et al.: “Design and thermodynamic modeling of a renewable energy based plant for hydrogen production and compression”, International Journal of Hydrogen Energy, Turska, 2019.
- [7] Ayodele T.R., Munda J.L.: “Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa”, International Journal of Hydrogen Energy, Južna Afrika, 2019.
- [8] EU - Zajedničko poduzeće za čisti vodik: „Clean hydrogen partnership - Funding“, s interneta, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/apply-funding_en, 15.9.2022.
- [9] Tong W.: “Wind power generation and Wind turbine design”, WIT Press, Southampton, Boston, SAD, 2010.
- [10] Mihet-Popa L., Groza V.: „Dynamic modeling, simulation and control strategies for 2 MW wind generating systems“, IREMOS vol. 4, 2010.

- [11] Nnabuife G. et al.: „Present and Projected Developments in Hydrogen Production: A Technological Review“, Carbon Capture Science & Technology (Volume 3), Ujedinjeno Kraljevstvo, 2022.
- [12] Čevdek A.: „Elektroliza“, s interneta, <https://si.openprof.com/wb/elektroliza?ch=653>, 15.9.2022.
- [13] Kumar S. S., Himabindu V.: „Hydrogen production by PEM water electrolysis - A review“, Materials Science for Energy Technologies 2 (2019) 442 - 454, 2019.
- [14] Michele A.: “Hydrogen-based wind-energy storage“ , s interneta, <https://www.windsystemsmag.com/hydrogen-based-wind-energy-storage/>, 10.5.2022.
- [15] Đukić A., Firak M.: „Hydrogen production using alkaline electrolyzer and photovoltaic (PV) module“, International Journal of Hydrogen Energy 36, 2011.
- [16] IRENA (2018): „Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition“, s interneta, <https://irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>, 24.5.2022.
- [17] Office of energy efficiency & renewable energy: „Hydrogen storage“, s interneta, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>, 22.5.2022.
- [18] Kovač A., Paranos M.: „Design of a solar hydrogen refuelling station following the development of the first Croatian fuel cell powered bicycle to boost hydrogen urban mobility“, International Journal of Hydrogen Energy 44, 2019.
- [19] HOPS: „Godišnje izvješće 2020.“, s interneta, <https://www.hops.hr/page-file/WAVZXYJGgaU0agrr0C3XF0/godisnji-izvjestaji/HOPS%20GI%202020%20-%202029-7-2020.pdf>, 22.5.2022.
- [20] Yiannis A. et al: „Effect of Wind Turbine Classes on the Electricity Production of Wind Farms in Cyprus Island“, *Conference Papers in Science*, 2013.
- [21] TheWindPower: „Manufacturers files for Vestas V150-4200 windturbine“, s interneta, https://www.thewindpower.net/turbine_en_1490_vestas_v150-4000-4200.php, 23.5.2022.
- [22] Wikipedia.hr: „Dijelovi vjetroagregata“, s interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijelovi_vjetroagregata, 23.5.2022.

- [23] Kolhe M. et al: „Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen“, Pergamon, 2002.
- [24] Hrvatska enciklopedija (mrežno izdanje): „Ruža vjetrova“, s interneta, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=53812>, 2.6.2022.
- [25] John Wiley & Sons: „Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control.“, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013.
- [26] Oldenbroek V. et al.: „Fuel cell electric vehicles and hydrogen balancing 100 percent renewable and integrated national transportation and energy systems“, Delft University of Technology, Nizozemska, 2021.
- [27] Mehrer compressors: „Hydrogen compressors“, s interneta, <https://www.mehrer.de/en/applications/hydrogen>, 15.9.2022.
- [28] Elberry A. M. et al.: "Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems“, International journal of hydrogen energy 46, Finska, 2021.
- [29] Mittal M. L.: „Estimates of Emissions from Coal Fired Thermal Power Plants in India“, Department of Environmental and Occupational Health, University of South Florida, SAD, 2012.
- [30] Wind Energy Technology Office: „Land-Based Wind Market Report: 2021 Edition“, s interneta, <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/land-based-wind-market-report-2021-edition-released>, 22.8.2022.
- [31] Jovan D.J., Dolanc G.: „Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions“, Department of Systems and Control, Jožef Stefan Institute, Slovenija, 2020.
- [32] CROPEX: „Tržište Dan unaprijed“, s interneta, <https://www.cropex.hr/hr/trgovanja/dan-unaprijed-trziste/rezultati-dan-unaprijed-trzista.html>, 3.7.2022.
- [33] Dragija M.: „Metode izrade kapitalnog proračuna“, EFZG, Zagreb, 2009.
- [34] Poslovni.hr: „Metode za ocjenu financijske efikasnosti“, s interneta, <http://www.poslovni.hr/media/PostAttachments/549733/METODE%20ZA%20OCJENU%20FINANCIJSKE%20EFIKASNOSTI.doc>, 22.8.2022.

POPIS OZNAKA I KRATICA

Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina
c	m/s	Weibullov parametar skaliranja
C_p	-	Koeficijent snage
E_k	J	Kinetička energija
E_{rev}	V	Reverzibilni napon
E_{sat}	MWh	Energija dostupna u određenom satu
E_x	J	Energija dobivena za danu brzinu vjetra
F	C/mol	Faraday-eva konstanta
ΔG	J	Gibbsova slobodna energija
ΔH	J/mol	Promjena entalpije
H_{g,H_2}	MWh/kg	Gornja ogrjevna moć vodika
IP	-	Indeks profitabilnosti
IRR	%	Interna stopa povrata
I_{uk}	EUR	Ukupni investicijski troškovi
JPP	god	Jedinstveni period povrata
k	%	Obračunska kamatna stopa
m	kg	Masa
M_{H_2}	kg	Masa proizvedenog vodika
n	-	Broj elektrona

n	-	Broj sati godišnje
n	mol	Množina tvari
NSV	EUR	Neto sadašnja vrijednost
p	Pa	Tlak
P	W	Snaga
P_v	W	Snaga vjetra
P_x	W	Snaga dobivena za danu brzinu vjetra
R	%	Interpolirana interna stopa povrata
ΔS	J/K	Promjena entropije
t	s	Vrijeme
T	K	Temperatura
T	god	Ekonomski vijek projekta
\bar{u}	m/s	Srednja brzina vjetra
v	m/s	Brzina zraka
V	m ³	Volumen
V_c	V	Napon ćelije
v_r	m/s	Brzina vjetra na referentnoj visini
V_{TN}	V	Minimalni potrebni napon elektrolize
WPD	W/m ²	Gustoća snage vjetra
z	m	Visina
Z	-	Faktor kompresibilnosti
$Z_{god,neto}$	EUR/god	Godišnja neto zarada
z_0	m	Visina hrapavosti

z_r

m

Referentna visina

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
α	-	Koeficijent hrapavosti površine
η	-	Učinkovitost elektrolize
η_{el}	-	Iskoristivost elektrolizatora
ρ	kg/m ³	Gustoća

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada opisan je značaj implementacije hibridnih sustava obnovljivih izvora energije u elektroenergetsku mrežu. Objasneni su matematički modeli energije vjetra i termodinamika procesa elektrolize. Dan je pregled elektroenergetskog stanja u RH i Prijenosnom području Split. U glavnom dijelu rada koncipiran je hibridni sustav vjetroelektrane koja bi se nalazila u Splitsko-dalmatinskoj županiji, pomoću čije energije se elektrolizom proizvodi vodik i pohranjuje u spremnike. Modelirana su 4 različita scenarija vjetroelektrana jednake instalirane snage, ovisno o promjeru i visini postavljanja rotora vjetroagregata. Analizirano je i potencijalno smanjenje štetnih emisija koje bi se javilo implementacijom sustava. Napravljena je ekonomska analiza isplativosti sustava sa i bez prodaje proizvedenog vodika, odnosno električne energije na tržištu. Rezultati analize su prikazani dijagramima i tablično.

Ključne riječi: vjetroelektrana, zeleni vodik, hibridni energetska sustav, elektroliza

SUMMARY

The significance of implementing hybrid renewable energy systems is described in the introductory part of this paper. Wind energy mathematical model and thermodynamics of electrolysis is explained. An overview of current grid state in Croatia and transmission area of Split is given. In the main part of this paper, the concept of a hybrid wind power plant system situated in the county Splitsko-dalmatinska, which would produce and store hydrogen, is given. Four different system scenarios are modelled depending on rotor diameter and hub height, where each wind power plant is of the same nominal power. Moreover, potential reduction of gas emissions, which would occur with the implementation of such system, is analyzed. Economic analysis of system profitability with/without selling hydrogen or electricity on the market is made. Results of the analysis are shown graphically and in tables.

Keywords: wind power plant, green hydrogen, hybrid energy system, electrolysis