

# ANALIZA VODIKOVE EKONOMIJE U ZGRADAMA

---

**Pavić, Martin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:001173>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MARTIN PAVIĆ

# **Analiza vodikove ekonomije u zgradama**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2022.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MARTIN PAVIĆ

# **Analiza vodikove ekonomije u zgradama**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc.Vladimir Tudić, prof.v.š.

KARLOVAC, 2022.



## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU STROJARSKI ODJEL**

Specijalistički stručni studij strojarstva

Usmjerenje: Konstrukcijsko strojarstvo

Karlovac, 10.09.2021.

### **ZADATAK DIPLOMSKOG RADA**

Student: **Martin Pavić**                      Matični broj: 0035153259

Naslov:

**Analiza vodikove ekonomije u zgradama**

Opis zadatka:

Radom je potrebno analizirati proizvodnju električne energije na kućnoj solarnoj elektrani, akumulaciju energije te korištenje akumulirane energije. S obzirom na veliki problem skladištenja viška energije, a najviše nade polaže se u vodikovu ekonomiju potrebno je proučiti potencijal proizvodnje vodika za vlastite potrebe u zgradama.

Zadatak izraditi i opremiti sukladno Pravilniku o diplomskom ispitu VUK-a.

Zadatak zadan:  
27.10.2021.

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

Mentor:

Predsjednik Ispitnog  
povjerenstva:

dr. sc. Vladimir Tudić, prof.v.š.

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom studija, te koristeći navedenu literaturu.

## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentoru, gospodinu dr. sc. Vladimir Tudić, prof.v.š. na savjetima, konzultacijama i pomoći pri izradi ovog rada.

Posebno bih se želio zahvaliti svojoj supruzi Vinki na velikoj podršci, razumijevanju i strpljenju tijekom cijelog studija, te joj zbog toga posvećujem ovaj rad.

## Sažetak

U suvremenom svijetu koji se odlikuje iznimnim gospodarskim i tehnološkim napretkom, sve je više očita i negativna strana nekontroliranog napretka koja se najočitije manifestira na okolišu. Suočeni smo s izazovom potrebe za napretkom ali i održavanjem već postignutog napretka. Potrebno je pronaći najbolji način da tehnologija kojom se služimo bude „čista“, odnosno da ne ostavlja trag u okolišu [1]. To se najviše odnosi na proizvodnju tehnologije, njenu uporabu i u konačnici reciklažu. Kada je riječ o energiji, jedan od najboljih odgovora na takva nastojanja nalazi se upravo u vodik, plinu bez boje i mirisa koji je najzastupljeniji element u svemiru. Postoje planovi prema kojima bi vodik mogao postati vodeći energent u budućnosti do 2050. godine. Danas se vodik primjenjuje u puno segmenata, no njegova proizvodnja još uvijek nije klimatski neutralna niti ekonomski prihvatljiva. Cilj je da proizvodnja vodika postane klimatski neutralna te da vodik zamijeni druge ugljikovodike na tržištu energenata.

Primjena vodika još uvijek nije ekonomski prihvatljiva iz više razloga. Glavni razlozi tome su da je cijela infrastruktura u procesu nastajanja, od proizvodnje tehnologija za dobivanje vodika, proizvodnje vodika i transporta do korištenja vodika. Kako bi to ubrzali, znanstvenici se udružuju, dijele informacije te zajedničkim snagama nastoje doći do najboljeg rješenja.

Da bi se izbjegli svi problemi globalne infrastrukture razmotrena je lokalna infrastruktura u kućanstvu, odnosno u zgradama. Na temelju jednog realnog ureda provjeren je potencijal proizvodnje vodika iz viška sunčeve energije te mogućnosti njegove primjene. Nije analiziran cjelokupan proračun koji bi obuhvatio sve čimbenike korištenja vlastite električne energije i vodika nego je naglasak na određivanju potencijalno ekonomski najprihvatljivijeg načina proizvodnje i primjene vodika za vlastite potrebe u kućanstvu.

Dakle, može se reći da je ovim radom analizirana vodikova ekonomija u zgradama s ciljem potrage za tehnologijama kojima se može postići najučinkovitija, čista i ekonomski prihvatljiva prijeko potrebna energija u zgradama.

Ključne riječi:

Vodik, održiva energija, ekonomija vodika, obnovljivi izvori energije, akumulacija energije

## Summary

In the modern world, which is characterized by exceptional economic and technological progress, there is an increasingly obvious and negative side of uncontrolled progress, which is most clearly manifested in the environment. We are faced with the challenge of the need for progress but also the maintenance of the progress already made. It is necessary to find the best way for the technology we use to be "clean", ie not to leave a trace in the environment [1]. This mostly refers to the production of technology, its use and ultimately recycling. When it comes to energy, one of the best answers to such an endeavor is in hydrogen, a colorless and odorless gas that is the most abundant element in the universe. There are plans according to which the guide could become the leading energy source in the future by 2050. Today, it is applied climatically in many segments, but its production is still not neutral or economically acceptable. The goal is to make hydrogen production climate-neutral and to replace other hydrocarbons in the energy market.

The use of hydrogen is still not economically acceptable for several reasons. The main reasons for this are that the entire infrastructure is in the process of being created, from the production of hydrogen production technology, hydrogen production and transport to the use of hydrogen. To speed it up, scientists are coming together, sharing information and working together to find the best solution.

In order to avoid all the problems of global infrastructure, the local infrastructure in the household, ie in the buildings, was considered. Based on one real office, the potential for hydrogen production from more solar energy and the possibilities of its application were tested. The entire budget, which would include all factors of using own electricity and conductors, has not been analyzed, but the emphasis is on determining the potentially most economically acceptable way of producing and applying conductors for own needs in the household.

Thus, it can be said that this paper analyzes the hydrogen economy in buildings with the aim of searching for technologies that can achieve the most efficient, clean and economically acceptable much-needed energy in buildings.

Keywords:

Hydrogen, sustainable energy, hydrogen economy, renewable energy sources, energy accumulation

# SADRŽAJ

<b>ZADATAK DIPLOMSKOG RADA</b> .....	<b>3</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ekonomija vodika .....	1
1.2 Problem ekonomije vodika .....	2
1.3 Predmet ovog rada .....	3
<b>2 TEORIJSKE OSNOVE</b> .....	<b>4</b>
2.1 Vodikova ekonomija u zgradama .....	4
2.2 Obnovljivi izvori energije – energija sunca .....	6
2.3 Pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju fotonaponskim ćelijama .....	11
2.3.1 Fotonaponski moduli (FN paneli) .....	13
2.3.2 Fotonaponske ćelije .....	13
2.3.3 Nosiva konstrukcija .....	14
2.3.4 DC/AC izmjenjivači – Inverteri.....	14
2.3.5 Priključak na mrežu.....	14
2.3.6 Baterije (u slučaju off-grid sustava).....	15
2.4 Proizvodnja vodika iz sunčeve energije .....	16
2.4.1 Elektroliza vode.....	18
2.4.2 Pohrana vodika .....	19
2.4.3 Primjena vodika kao goriva .....	20
<b>3 PRORAČUN PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE FOTONAPONSKOM ELEKTRANOM</b> ....	<b>22</b>
3.1 Solarni potencijal lokacije .....	23
3.2 Opis objekta za postavljanje FN elektrane .....	24
3.3 Modeliranje fotonaponske elektrane .....	25
3.3.1 Fotonaponski moduli.....	25
3.3.2 Izmjenjivači – Inverteri.....	26
3.3.3 Dispozicija fotonaponskih modula na krovu objekta.....	27
3.3.4 Provjera stupnja zasjenjenja .....	28
3.3.5 Proračun godišnje proizvodnje električne energije.....	30
3.3.6 Korištenje električne energije iz FN elektrane .....	33
<b>4 PRORAČUN PROIZVODNJE VODIKA</b> .....	<b>35</b>
4.1 Princip proizvodnje vodika.....	35
4.2 Potrošnja električne energije u tvrtki .....	37
4.2.1 Korištenje električne energije iz mreže .....	37
4.3 Raspoloživa električna energija za proizvodnju vodika.....	40
4.4 Elementi vodikovog sustava.....	42
4.5 Oprema za proizvodnju, skladištenje i korištenje vodika .....	43
4.6 Odabir elektrolizatora i analiza proizvodnje vodika .....	45
4.7 Odabir gorivnih članaka i analiza proizvodnje električne energije .....	47



4.8	Akumulacija vodika.....	48
4.9	TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA .....	49
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>51</b>
5.1	Literatura .....	52

## SLIKE

Slika 1	Ilustracija tranzicije energije dobivene iz fosilnih goriva u energiju dobivenu iz obnovljivih izvora energije [6]..	6
Slika 2	Prosječna dnevna ozračenost na ravnu plohu kWh/m2 .....	9
Slika 3	Dnevni prosjek sunčanih sati, po mjesecima, za pojedine gradove u Hrvatskoj.....	10
Slika 4	Principijelna shema fotonaponske elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu.....	12
Slika 5	Princip rada fotonaponske ćelije [10] .....	13
Slika 6	Kružna raspodjela vodika i dobivanje topline [11] .....	16
Slika 7	Toplinske značajke vodika [12] .....	17
Slika 8	Shematski prikaz elektrolize vode na jednostavnom elektrolitičkom članku [13] .....	18
Slika 9	Princip proizvodnje energije gorivnim člancima [15].....	20
Slika 10	Raspoloživost sunčevog za Hrvatsku (Izvor: <a href="https://globalsolaratlas.info/download/croatia">https://globalsolaratlas.info/download/croatia</a> ) .....	23
Slika 11	Mikrolokacija ugradnje fotonaponske elektrane .....	24
Slika 12	– Nacrti krova s zonama ugradnje fotopanela na kosom krovu i zidu .....	27
Slika 13	– Raslinje uz krov.....	28
Slika 14	– 3d model zgrade .....	28
Slika 15	– Stupanj zasjenjenja FN modula na kosom krovu .....	29
Slika 16	Prikaz proizvodnje električne energije fotopanelima na kosom krovu .....	30
Slika 17	Prikaz proizvodnje električne energije fotopanelima na vertikalnom zidu.....	31
Slika 18	– Prikaz potrošnje, proizvodnje i razmjene električne energije.....	33
Slika 19	Usporedba proizvodnje i potrošnje električne energije.....	34
Slika 20	Preuzeta i predana električna energija.....	34
Slika 21	Troškovi prije i nakon instalacije fotonaponske elektrane .....	34
Slika 22	Graf (ilustracija) proizvodnje vodika .....	35
Slika 23	– Izvod iz računa s pregledom potrošnje električne energije.....	37
Slika 24	– Prikaz korištenja električne energije u uredu u jednom danu .....	38
Slika 25	Vodikova ekonomija u zgradama .....	42
Slika 26	Graf vodikove ekonomije u zgradi na bazi jedne godine .....	49

## TABLICE

Tablica 1 Tipovi gorivnih članaka i njihove osobine [14] .....	21
Tablica 2 Tehnički podaci fotonaponski modul SOLVIS SV120-375 E HC9B.....	25
Tablica 3 Konfiguracija fotonaponske elektrane prema položaju fotonaponskih modula .....	31
Tablica 4 Proizvodnja fotonaponske elektrane prema položaju fotonaponskih modula .....	32
Tablica 5 Potrošnja električne energije iz mreže.....	38
Tablica 6 Električna energija – modeliranje angažirane snage .....	39
Tablica 7 Prikaz potrošnje, proizvodnje i razmjene električne energije .....	40
Tablica 8 Konfiguracije dostupnih elektrolizatora .....	43
Tablica 9 Konfiguracije dostupnih kompresora vodika .....	43
Tablica 10 Konfiguracije dostupnih spremnika vodika .....	43
Tablica 11 Konfiguracije dostupnih gorivnih članaka .....	44
Tablica 12 Algoritam satne proizvodnje električne energije .....	45
Tablica 13 Algoritam satnog rada elektrolizatora .....	46
Tablica 14 Proizvodnja vodika odabranim elektrolizatorom .....	47
Tablica 15 Proizvodnja električne energije odabranim gorivnim člancima .....	47
Tablica 16 Spremanje vodika.....	48
Tablica 17 Kompresija vodika .....	48

# 1 UVOD

Rastom broja stanovništva, te njihovom aktivnošću život na Zemlji se u posljednjih 50-tak godina uvelike promijenio. Vodeće načelo za život u modernom svijetu u kojem se zadovoljavaju ljudske potrebe uz održavanje ravnoteže s prirodom postao je koncept održivog razvoja. Izazovi održivosti zahtijevaju dugoročnu perspektivu i integraciju mnogih elemenata. Energija je jedna od njih. Uvođenje održivog globalnog energetskeg sustava postupni je dugotrajan proces koji će zahtijevati duboku promjenu njegove sadašnje strukture. Sve češće se u medijskom diskursu mogu čuti izjave vezane uz nužnost smanjenja emisije stakleničkih plinova, prelazak na održive izvore energije, klimatske promjene... apeli koje mediji, političari i različiti aktivisti upućuju javnosti utemeljeni su na trenutno vrlo lošem stanju u iskoristivosti obnovljivih izvora energije kao i na neprestanom neodrživom razvoju koji se događa posljednjih nekoliko stoljeća. Iako se mogu pojaviti mnogi alternativni putevi održive energije, takozvana „vodikova ekonomija“ dobila je posebnu pozornost [1].

## 1.1 Ekonomija vodika

Vodikova energija je naziv za električnu energiju koja se dobiva korištenjem vodika kao goriva u gorivnim člancima. Vodikova ekonomija se zasniva na vodikom kao ekološkom gorivu za razliku od fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin) koja su ekološki neprihvatljiva. Izgaranjem vodika dobiva se energija i voda te je vodik 100% siguran za prirodu. [2] Vodikova tehnologija uključuje primjenu sljedećih uređaja i postupaka:

- elektrolizator kao uređaj za proizvodnju vodika elektrolizom vode
- skladištenje i transport vodika
- gorivni članak (goriva ćelija, fuel cell) kao uređaj za proizvodnju električne energije korištenjem vodika iz odgovarajućeg spremnika i kisika iz zraka, gdje se dodatno dobiva samo voda

Energetski sustav na bazi vodika smatra se održivom i povoljnom opcijom za pružanje visokokvalitetnih energetskeg usluga u širokom rasponu primjena na učinkovit, čist i siguran način uz ispunjavanje ciljeva održivosti. Vodik također idealno nadopunjuje električnu energiju. Obje su prijenosnici energije vrhunske kvalitete, ne sadrže ugljik i stvaraju male ili nikakve zagađujuće emisije na mjestu uporabe. Električna energija je, međutim, u nepovoljnom položaju kada je potrebno skladištenje, dok bi vodik mogao biti prikladan za te primjene [3]. Svestranost vodikove ekonomije

pojačana je činjenicom da se može proizvesti iz raznih fosilnih i nefosilnih primarnih resursa. Stoga se opskrba infrastruktura može razvijati prema sirovinama dostupnim u različitim regijama. To može donijeti konkretne prednosti energetske sigurnosti i olakšati prijelaz na održivi energetski sustav. U početnoj fazi „vodikove ekonomije“ vodik bi se mogao proizvoditi iz sadašnjih konkurentnih fosilnih goriva. U kasnijoj fazi, proizvodni sustav mogao bi se razviti prema obnovljivim izvorima. [4] Na taj način vodik bi postao idealno sredstvo za „dodavanje vrijednosti“ obnovljivim izvorima i njihovom prilagođavanju za pružanje visokokvalitetnih energetske usluga. Istodobno, stvaranje vodika iz obnovljivih izvora dugoročno će dovesti njegov proizvodni sustav prema održivoj putanji.

Vodik bi trebao postati važna energetska roba na globalnoj razini. Za postizanje toga cilja zahtijevat će značajne kombinacije istraživanja i razvoja, komercijalne implementacije i tehnološka poboljšanja. To bi u konačnici trebalo dovesti do smanjenja troškova u proizvodnji, skladištenju, pretvorbi, transportu i tehnologijama krajnje uporabe. Intenzivni naponi na istraživanju i razvoju i dalje su potrebni u brojnim područjima. Osim toga, isplativa komercijalizacija vodikovih tehnologija zahtijevat će tržišne strategije koje potiču koordinaciju različitih tržišnih segmenata. [1] Pozitivan korak prema tome cilju je donošenje hrvatske strategije za vodik 2021.-2050. koja je trenutno u izradi.

## 1.2 Problem ekonomije vodika

Brojna su istraživanja analizirala perspektive i moguće strategije za prijelaz na energetski sustav na bazi vodika, takozvanu vodikovu ekonomiju. Međutim, strukturne promjene energetske sustava traju dugo. Prijelaz s malih tržišnih segmenata na potpuno razvijenu ekonomiju vodika trajao bi kroz mnogo desetljeća. Dakle, kako bi ekonomija vodika postala šira praksa, a ne samo teorija bit će potrebna brojna istraživanja koja će dokazivati superiornost upotrebe vodika nad drugim izvorima energije. U prvom redu radi se o eksperimentalnim istraživanjima prirodnih znanosti, no čak i ukoliko istraživanja i eksperimenti pokažu iznimnu učinkovitost i održivost upotrebe vodika, potrebno je i na tržišnoj razini dokazati isplativost upotrebe vodika kao primarnog izvora energije. Ideje o tome kako bi vodik mogao postati, ako ne primarni, onda barem iznimno korišteni izvor energije postoje već preko dvadeset godina, a ostaje na znanosti da dokaže i njegovu učinkovitost. [1]

### 1.3 Predmet ovog rada

Trenutno je aktualna tema fotonaponskih sustava za proizvodnju električne energije za vlastite potrebe. Predmet ovog rada jest istraživanje uloge vodika u službi akumulacije energije dobivene iz fotonaponske elektrane i pretvorbe ponovno u električnu ili toplinsku energiju za potrebe zgrada. Potrebno je istražiti potencijal pojedinog načina primjene tehnologije kako bi se dokazalo da u budućnosti ekonomija vodika može biti isplativa lokalno za vlastite potrebe.

Potrebno je analizirati kvantitativna istraživanja s energetske i ekonomske strane kako bi se mogla steći cjelokupna slika o isplativosti korištenja vodika kao jednog od primarnih izvora energije. Analiza je napravljena na temelju stvarne potrošnje energenata u uredu odabrane zgrade.

#### SADRŽAJ RADA

Ovaj rad se sastoji od pet glavnih poglavlja.

Prvo poglavlje je uvodno poglavlje u kojemu je prikazan uvod u rad, ekonomija vodika, problemi oko ekonomije vodika te predmet sa sadržajem rada.

U drugom poglavlju postavljene su teorijske osnove proizvodnje zelenog vodika iz obnovljivih izvora energije (u nastavku OIE). Ovaj rad nije cjelokupan prikaz svih tehnologija dobivanja vodika iz OIE niti svih načina primjene vodika nego je naglasak na autonomni kućni sustav proizvodnje vodika za vlastite potrebe iz viškova električne energije iz vlastite fotonaponske elektrane te je tako prikazana i osnovna teorija.

U trećem poglavlju analizirana je moguća proizvodnja električne energije potencijalne fotonaponske elektrane na krovu odabrane zgrade.

U četvrtom poglavlju napravljen je proračun vodikove ekonomije u odabranoj zgradi. Potrebno je analizirati energetski potencijal i isplativost ulaganja u vodikove tehnologije u kućanstvu.

Peto poglavlje je zaključak rada u kojemu će se donijeti zaključno vrednovanje o ranije napisanom kao i preporuka za daljnja istraživanja.

## **2 TEORIJSKE OSNOVE**

### **2.1 Vodikova ekonomija u zgradama**

#### **ODRŽIVA ENERGIJA**

Održiva energija ili zelena energija je energetske učinkovit način proizvodnje i korištenja energije koji ima što manje štetnog utjecaja na okoliš. Održivi razvoj je onaj razvoj koji zadovoljava današnje potrebe, bez ugrožavanja mogućnosti da i buduće generacije ostvare svoje potrebe.

Održiva gradnja je svakako jedan od značajnijih dijelova održivog razvoja, a uključuje upotrebu građevinskih materijala koji nisu štetni po okoliš, energetske učinkovitost zgrada i gospodarenje otpadom koji je nastao pri gradnji i rušenju građevina. U vezi s održivim razvojem, održiva gradnja mora osigurati trajnost, kvalitetu oblikovanja i konstrukciju uz financijsku, ekonomsku i ekološku prihvatljivost.

Održiva energija obuhvaća korištenje obnovljive energije (hidroenergija, energija vjetra, sunčeva energija, energija valova, geotermalna energija, energija biomase, energija plime i oseke, te vodikova ekonomija) i energetske učinkovitost kod njenog korištenja. [5]

#### **FOTONAPONSKA ELEKTRANA ZA VLASTITU POTROŠNJU**

Trenutna aktualna tema u Hrvatskoj je proizvodnja električne energije fotonaponskom elektranom za vlastitu potrošnju. Osnovni uobičajeni princip takvog sustava je da fotonaponska elektrana (u nastavku FN elektrana) kapacitetom proizvodnje električne energije ne smije biti jača od stvarne potrebe objekta za električnom energijom, odnosno obračun s operatorom distribucijskog sustava na kraju godine mora biti u minusu kako ne bi prešli u kategoriju proizvođača električne energije te ODS-u prodavali struju po nezavidnoj cijeni. U ljetnim danima se proizvodi više struje nego što se potroši te se višak predaje u električnu mrežu (u nastavku mreža), dok se po noći kada nema sunca vraća iz mreže. U zimskim danima nije dovoljna proizvodnja električne iz FN elektrane pa dodatna potrebna električna energija dolazi iz mreže. Dakle, može se reći da je i dalje kućni sustav korištenja OIE, u ovom slučaju FN elektrane vrlo zavisna o mreži.

## POHRANA ENERGIJE

Varijabilan izvor sunčeve energije zahtijeva dodatni izvor koji djelomično može biti snaga vjetra ili lokalnu akumulaciju koja se obično postiže baterijama. Elektroenergetska mreža za akumulaciju energije upotrebljava reverzibilne hidroelektrane (npr. RHE Velebit).

Ukoliko bismo htjeli skladištiti te ponovno koristiti energiju kako bismo minimizirali izmjenu električne energije s javnom mrežom potrebno je uključiti baterije u sustav. Trenutna situacija je takva da su baterije znatno skupe i kratki im je vijek trajanja pa nisu pogodne za dugoročnu investiciju. Iako se ulažu znatni napor u proizvodnju ekološki i ekonomski prihvatljivijih baterija nećemo ih analizirati u ovom radu kao glavnu pohranu energije već samo kao eventualnu pomoć optimizaciji vodikovog sustava.

U svrhu zajedničkih napora učinkovite zelene energetske tranzicije analizirati ćemo kako bi funkcionirao kućni sustav s pohranom energije u vodik u na jednom realnom primjeru.

Za početak razmatranja ovakvog sustava potrebno je provjeriti dva različita načina funkcioniranja sustava:

Prvi način je da u svrhu energetske tranzicije razmotrimo trenutni princip rada fotonaponske elektrane uz akumulaciju vodika ljeti za potrošnju zimi kako bismo na obračunu operatora distribucijskog sustava bili na „nuli“ te da u slučaju ispada elektroenergetske mreže nema utjecaja na postojanost kućne električne energije.

Drugi način je potpuni „off grid sustav“ kod kojeg se pretpostavlja da kuća nije spojena na elektroenergetsku mrežu te u potpunosti zadovoljava svoje potrebe za električnom energijom.

## 2.2 Obnovljivi izvori energije – energija sunca

Obnovljivi izvori energije su izvori energije koji su neprestano varijabilni te se stalno iznova obnavljaju pa se mogu iskorištavati bez iscrpljivanja. To su biomasa, posebno drvo, te biljne kulture, preradom kojih se dobivaju prehrambene ili energetske sirovine. Obnovljivi su (neiscrpivi) izvori energije i Sunce, vjetar, morske mijene, hidroenergija i hidrotermalna voda. Korištenjem obnovljivih izvora čuva se okoliš, jer su to izvori čiste energije koja ga ne zagađuje. Veliki broj država u okviru svojih energetske politike potiče izgradnju postrojenja obnovljivih izvora energije jer "primjenjuju različite poticajne mjere kako bi osigurale rast udjela obnovljivih izvora energije u energetske miksu".

Nakon stoljeća korištenja energije fosilnih goriva, danas se globalna slika mijenja, a obnovljivi se izvori sve više smatraju jednim od ključnih čimbenika budućeg razvoja Zemlje.



***Slika 1 Ilustracija tranzicije energije dobivene iz fosilnih goriva u energiju dobivenu iz obnovljivih izvora energije [6]***

Glavni izvor energije još uvijek su fosilna goriva koja daju 85-90% energije. Nafta je najznačajnija s 35%, a ugljen i prirodni plin su podjednako zastupljeni. Gotovo 8% energije dobiva se iz nuklearnih elektrana, a tek 3.3% energije dolazi od obnovljivih izvora.

Taj udio u budućnosti treba znatno povećati jer neobnovljivih izvora energije ima sve manje, a i njihov štetni utjecaj sve je izraženiji u zadnjih nekoliko desetljeća. Sunce isporučuje Zemlji 15 tisuća puta više energije nego što čovječanstvo u sadašnjoj fazi uspijeva potrošiti. Iz toga se vidi da se obnovljivi izvori mogu i moraju početi bolje iskorištavati. Iako se obnovljivi izvori energije troše oni se ne iscrpljuju već se obnavljaju u određenom ritmu.



Nekoliko tehnologija, osobito energija vjetra, male hidrocentrale, energija iz biomase i sunčeva energija su ekonomski konkurentne. Ostale tehnologije su ovisne o potražnji na tržištu da bi postale ekonomski isplative u odnosu na klasične izvore energije.

Toplina koja zračenjem od Sunca dolazi na zemlju najveći je izvor energije i njezin je godišnji potencijal  $5,6 \cdot 10^6$  EJ, pri čemu čovjek putem fosilnih goriva raspolaže vrlo malim djelom te energije. Od Sunčeve energije potječe većina drugih izvora primjerice energija fosilnih goriva, vodenih tokova, vjetra i dr.

### **SUNČEVA ENERGIJA**

Najveći izvor obnovljive energije je Sunce, užarena plinovita kugla, čije zračenje dolazi na Zemlju i tamo se pretvara u druge oblike obnovljive energije poput energije vjetra, hidroenergije, biomase, energije valova i dr. Sunčevo zračenje predstavlja daleko najveći izvor energije na Zemlji, pri čemu je godišnje dozračena energija veća 15 000 puta od ukupnih svjetskih potreba. Energija Sunca se danas direktno iskorištava uz pomoć sunčevih kolektora za zagrijavanje PTV-a i grijanje prostora, fotonaponskim ćelijama za proizvodnju električne energije ili pak pasivno u građevinama pomoću arhitektonskih mjera u svrhu grijanja i osvjetljavanja prostora. Sunčeva energija je sigurna, neprekidna i najmanje štetna za okoliš.

Potencijalno najveći izvor obnovljive energije je Sunce, užarena plinovita kugla čije zračenje dolazi na Zemlju. Sunčeva energija je sigurna, neprekidna i najmanje štetna za okoliš. Temelj je života na Zemlji i stalni pratilac razvoja ljudskog roda.

Sunčeva energija je zračenje svjetlosti i topline sa Sunca koju ljudi koriste od drevne povijesti upotrebom raznih neprestano napredujućih tehnologija. Sunčevo zračenje skupa sa sekundarnim sunčevim izvorima kao što su energija vjetra i energija valova, hidroenergija i biomasa zajedno čine većinu raspoložive obnovljive energije na Zemlji. Upotrebljava se samo neznatan dio raspoložive sunčeve energije. [7]

### **SUNČEVO ZRAČENJE I EKSTRATERESTIČKO ZRAČENJE**

Sunce, golema užarena plinovita kugla polumjera  $6,96 \cdot 10^5$  kilometara, mase  $1,99 \cdot 10^{27}$  t, koja se sastoji uglavnom od vodika i helija, nama najbliža zvijezda te, neposredno i posredno, izvor gotovo sve raspoložive energije na Zemlji od koje je prosječno udaljena  $1,49 \cdot 10^8$  km. Sunčeva energija potječe od nuklearnih reakcija u njegovom središtu, gdje temperatura doseže 15 milijuna °C, tlak 108 MPa, dok je na

površini temperatura oko 5490 °C. Radi se o fuziji, kod koje spajanjem vodikovih atoma nastaje helij, uz oslobađanje velike količine energije. Svake sekunde na ovaj način u helij prelazi oko 600 milijuna tona vodika, pri čemu se masa od nekih 4 milijuna tona vodika pretvori u energiju, koja se u vidu svjetlosti i topline širi u svemir pa tako jedan njezin mali dio dolazi i do Zemlje. Sunčeva se površina sastoji od sloja fotosfere, kromosfere i korone.

Snaga zračenja koje Sunce emitira u čitav prostor je  $3,8 \cdot 10^{26}$  W, od toga na zemlju dolazi oko  $1,7 \cdot 10^{17}$  W, a energija koju Zemlja prima od Sunca jest oko  $5,4 \cdot 10^{24}$  J, međutim od te upadne Sunčeve energije oko 30 % se reflektira u svemir, 47 % pretvara se u toplinu i emitira kao infracrveno zračenje, 23 % troši na isparavanje vode i oborinski ciklus u troposferi a samo mali dio troši se na fotosintezu, pretvara u energiju vjetra i sl.

Sunčevo zračenje koje dopire do vanjskog ruba Zemljine atmosfere naziva se ekstraterestičko zračenje i važno je za proračun Sunčevog zračenja a njegova se srednja vrijednost naziva solarna konstanta i iznosi  $E_0 = 1353 \pm 21$  W/m<sup>2</sup>.

Solarna konstanta definirana je kao tok Sunčeva zračenja kroz jediničnu površinu okomitu na smjer Sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca, ali izvan Zemljine atmosfere tako da nema slabljenja zbog apsorpcije i raspršenja u atmosferi.

Ekstraterestičko zračenje mijenja se tokom godine zbog promjene udaljenosti Zemlje od Sunca. U našem se području vrijednost ekstraterestičkog zračenja mijenja tokom godine i najveće je zimi (  $1399$  W/m<sup>2</sup> ), a najmanje ljeti (  $1307$  W/m<sup>2</sup> ).

## **PRIZEMNO ZRAČENJE**

Na putu kroz Zemljinu atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se apsorbira zbog interakcije s plinovima i vodenom parom te se raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine, te tako dopijeva do površine Zemlje kao izravno i raspršeno zračenje. Prolaskom kroz atmosferu gubi se od 25 % do 50 % energije zbog raspršivanja i apsorpcije. Izravno (direktno) zračenje dolazi izravno sa Sunca, a raspršeno (difuzno), koje nastaje raspršenjem izravnog zračenja u atmosferi, iz svih smjerova neba. Prema tome ukupno (globalno) zračenje na površini Zemlje sastoji se od izravnog i raspršenog zračenja.

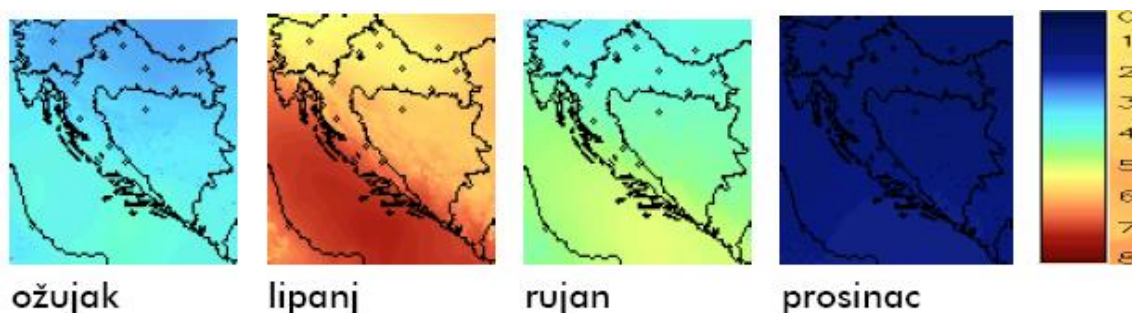
Direktno sunčevo zračenje kratkovalnog je karaktera, za sunčanog dana očituje se kao kombinacija žučkastog svjetlosnog snopa i topline, a difuzno raspršivanje zračenja ili refleksija sadrži više kratkovalne nego dugovalne energije sunčevog zračenja.

Čestice primljenu energiju raspršuju nejednako u svim smjerovima pa tako dio reflektiraju nazad u svemir a dio se raspršuje na površinu Zemlje. Zračenje koje dolazi do površine Zemlje većim djelom Zemlja upija a manji se dio odbija od njene površine, ta se karakteristika može iskazati koeficijentom refleksije ili albedom koji iznosi za potpuno bijelo tijelo 1.0 (odbija zrake), a za potpuno crno tijelo vrijednost nula.

Za mjerenje sunčeva zračenja koriste se piranometri koji se obično postavljaju tako da im je prijemna površina horizontalna. Njihovom registracijom ukupnog zračenja dobivaju se podaci o energiji zračenja u svakom satu u danu, te se, ako je intenzitet zračenja u datom satu konstantan, može promatrati kao snaga, te se zbrajanjem energije dozračene u svim satima dana, dobiva dnevna energija zračenja a ta vrijednost, pomnožena sa brojem dana u godini, daje godišnju dozračnu energiju.

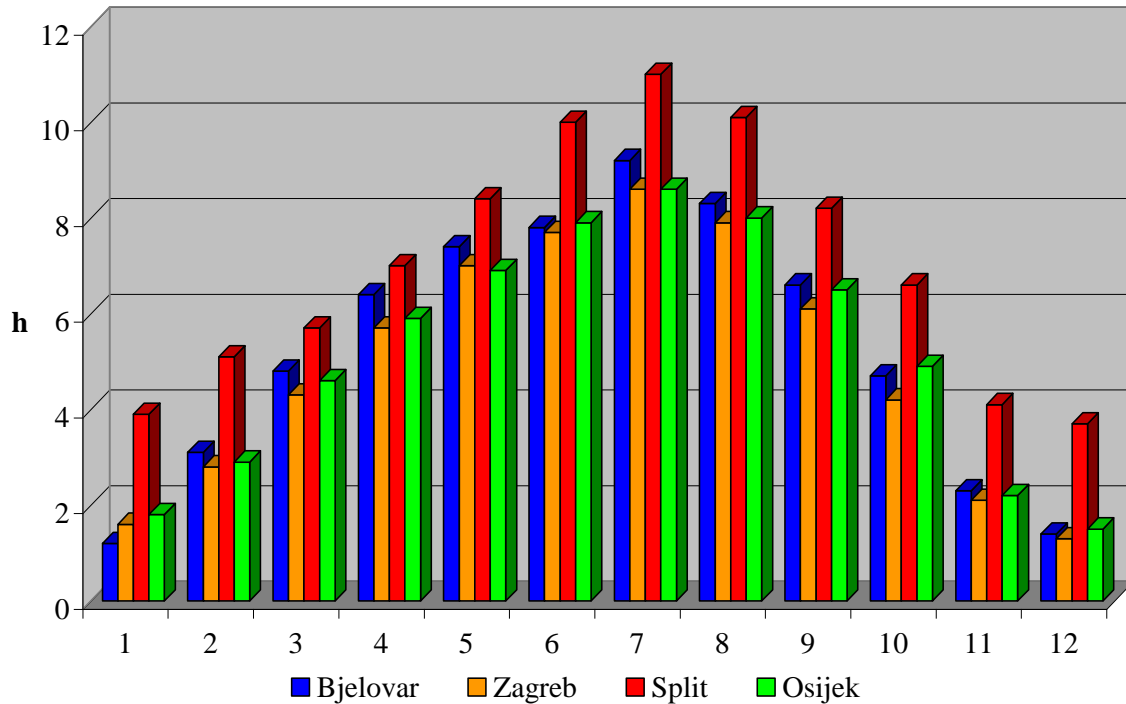
Važan pojam je ovdje i insolacija, tj. vrijeme kad izravno Sunčevo zračenje dopire do zemlje, odnosno do horizontalne plohe mjernog uređaja odnosno heliografa koji daje samo podatke o postojanju Sunčeva zračenja, a ne daje podatke o energiji zračenja, ali se, ako nema drugih podataka, može na temelju insolacije procijeniti energija zračenja. Trajanje insolacije zavisi o zemljopisnoj širini i o godišnjem dobu. Ukupna količina prosječne dozračne energije koja dolazi na Zemlju je oko  $230 \text{ W/m}^2$ , odnosno  $5.52 \text{ kWh/m}^2$  po danu, stvarne vrijednosti ovise o raznim faktorima kao što su vremenski uvjeti, zagađenost zraka, zemljopisne širine i sl. [8]

U Hrvatskoj je prosječna vrijednost insolacije na horizontalnu plohu između 3 i  $4.5 \text{ kWh/m}^2$  dnevno slika 2.2., odnosno između 1.2 i  $1.6 \text{ MWh/m}^2$  godišnje. [9]



**Slika 2 Prosječna dnevna ozračenost na ravnu plohu kWh/m<sup>2</sup>**

Trajanje insolacije, odnosno prosječni broj sunčanih sati godišnje je između 2000 i 2800 sati. Dnevni prosjek sunčanih sati, po mjesecima, za pojedine gradove u Hrvatskoj prikazuje slika 3.



**Slika 3 Dnevni prosjek sunčanih sati, po mjesecima, za pojedine gradove u Hrvatskoj**

## 2.3 Pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju fotonaponskim ćelijama

Sunčeva svjetlost može se u električnu energiju pretvoriti upotrebom fotonaponskih ćelija. Namjena kućne fotonaponske elektrane (FN elektrane) je proizvodnja električne energije čija je prvenstvena namjena proizvodnja električne energije za vlastite potrebe, a samo višak energije predaje se u elektroenergetsku mrežu.

Fotonaponski sustavi ne proizvode buku, nemaju pokretnih dijelova i ne ispuštaju onečišćujuće tvari u atmosferu. Uzimajući u obzir i energiju utrošenu u proizvodnju fotonaponskih modula, oni proizvode znatno manje ugljičnog dioksida po jedinici proizvedene energije od tehnologija fosilnih goriva. FN modul ima životni vijek do trideset godina. FN sustavima je potrebno minimalno održavanje. Na kraju životnog vijeka moduli se mogu gotovo u potpunosti reciklirati, a sastavne sirovine mogu se ponovno koristiti.

Prednosti solarnih fotonaponskih sustava su:

- visoka pouzdanost
- niski troškovi rada
- minimalna potreba za održavanjem i bez potrebe nadolijevanja goriva
- najbolji urbani obnovljiv izvor energije
- jednostavna mehanika, nema pokretnih dijelova koji su potrebni za rad sustava
- primjenjivost sustava praktički bilo gdje na Zemlji
- ne buče i ne zagađuju okoliš
- pružaju mogućnost uvođenja električne energije na mjestima gdje bi to inače bilo preskupo ili neizvodivo

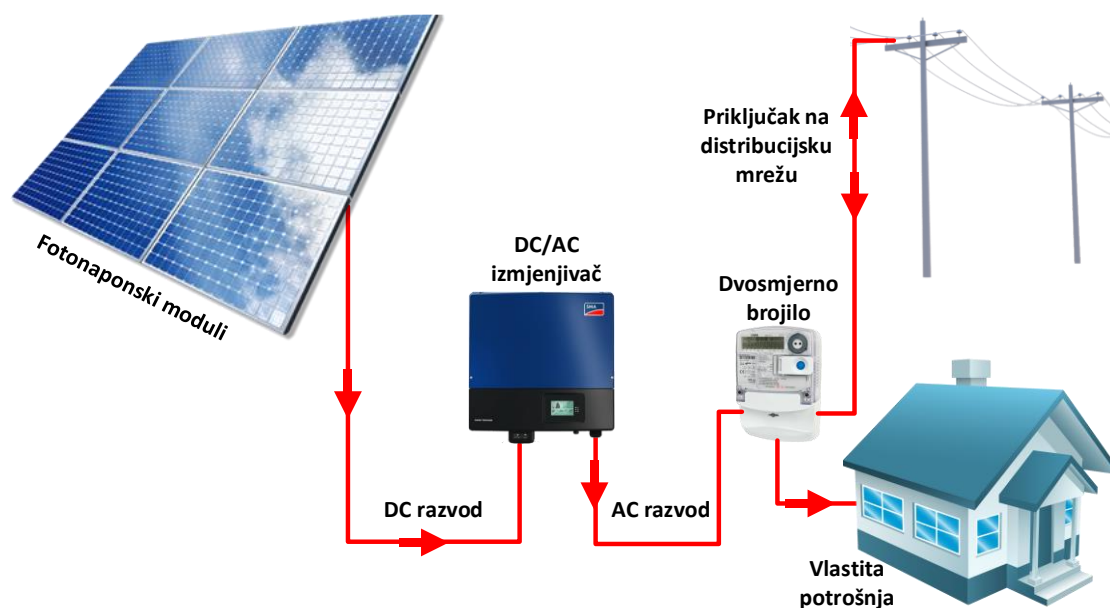
Vijek uporabe FN elektrane:

Ukoliko se fotonaponska elektrana redovito održava i nadzire prema preporukama proizvođača opreme procijenjeni vijek uporabe je do 30 godina. Prema podacima proizvođača fotonaponskih panela učinkovitost elektrane nakon 25 godina rada pada na 80% projektirane učinkovitosti.

### Osnovne komponente fotonaponske elektrane su:

- Fotonaponski moduli (FN modul)
- Noseća konstrukcija
- DC/AC izmjenjivač – Inverter
- Razvodni ormari istosmjerne i izmjenične struje
- Ostala oprema

Glavni dijelovi fotonaponske elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu su fotonaponsko polje (sastoji se od FN panela povezanih u stringove), noseća podkonstrukcija na koju se direktno instaliraju paneli, DC/AC izmjenjivači, spojni kabeli, niskonaponska sklopna oprema i pripadni ormari. Principijelna shema fotonaponske elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu prikazana je na slici u nastavku.



**Slika 4 Principijelna shema fotonaponske elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu**

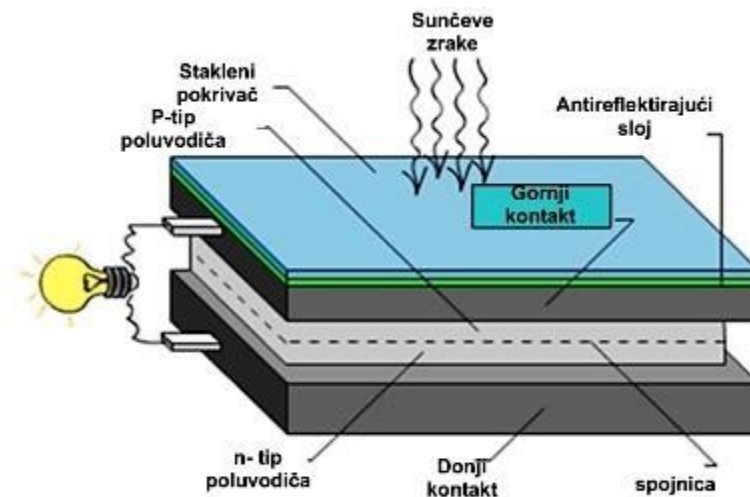
Fotonaponski moduli međusobno su serijski ili paralelno spojeni u nizove (stringove). Apsorbirana sunčeva svjetlost u fotonaponskim ćelijama generira istosmjerni napon. Istosmjerni napon se preko DC/AC pretvarača (Invertera) pretvara u izmjenični napon i sinkronizira se napon i frekvencija sa mrežom elektroenergetskog sustava.

### 2.3.1 Fotonaponski moduli (FN paneli)

Postoje monokristalni FN moduli i polikristalni FN moduli. FN moduli spajaju se serijski u nizove (stringove) tipično 10 do 20 modula po stringu. Sunčeva energija se u FN ćelijama direktno pretvara u istosmjernu električnu energiju.

### 2.3.2 Fotonaponske ćelije

Fotonaponske ćelije su poluvodički elementi koji direktno pretvaraju energiju Sunčeva zračenja u električnu energiju. Zatvorimo li strujni krug između solarnog kolektora i nekog potrošača, npr. hladnjaka, struja će poteći i potrošač će biti opskrbljen električnom energijom, odnosno naš hladnjak će raditi.



**Slika 5 Princip rada fotonaponske ćelije [10]**

Napravljene su od poluvodičkog materijala (najčešći silicija (Si)) u obliku tankih pločica povezanih u module. Dodavanjem malih količina primjesa (poput fosfora) osnovnom materijalu, nastaju pozitivno i negativno nabijene poluvodičke pločice koje spojene zajedno, kada ih se osvijetli, generiraju istosmjernu električnu struju u vanjskom krugu. Jakost struje je proporcionalna intenzitetu Sunčevog zračenja. Tipična monokristalna Si fotoćelija proizvodi napon od oko **0.5 V i struju manju od 3 A**, tako da je potrebno spojiti više takvih ćelija u seriju da bi se dobio napon veći od 12 V jer je to nominalni napon većine baterija koje se pune uz pomoć fotonaponskih ćelija. Tako spojene ćelije formiraju fotonaponske module koji imaju maksimalnu snagu oko 73 W ( insolacija od 1000 W/m<sup>2</sup>) i površinu oko 0,5 m<sup>2</sup> (1 x 0,5 m). Prema tome,

efikasnost ovakvih monokristalnih fotonaponskih ćelija je oko **14.5%**. Ovdje je potrebno naglasiti da **snaga (time i efikasnost) pada s povišenjem temperature ćelije** tako da prethodne vrijednosti mogu biti niže u realnim uvjetima eksploatacije. Pored monokristalnih Si ćelija postoje i jeftinije polikristalne ćelije čija je kristalna struktura manje pravilna, a efikasnost 10%, te ćelije od amornog silicija koje su daleko najjeftinije, ali imaju malu efikasnost od samo 4%. [10]

### 2.3.3 Nosiva konstrukcija

Fotonaponski moduli postavljaju se na nosivu konstrukciju zgrade preko tipske noseće podkonstrukcije za prihvat FN modula ovisno o mjestu postavljanja (kosi ili ravni krov). Nosiva konstrukcija uglavnom je od aluminija i čelika i mora biti proračunata i odabrana s obzirom na opterećenja i utjecaje atmosferilija.

### 2.3.4 DC/AC izmjenjivači – Inverteri

Sunčeva energija se u FN ćelijama direktno pretvara u istosmjernu električnu energiju. Tako dobiveni napon potrebno je pretvoriti u izmjenični, sinusoidni, odgovarajućeg napona i frekvencije (400V/230V,50Hz) te ga sinkronizirati s mrežnim naponom.

Pretvorbu napona iz FN polja odrađuje odgovarajući DC/AC inverter. Glavni dio invertera je poluvodički most sastavljen od upravljivih poluvodičkih sklopki koje visokom frekvencijom prekidaju istosmjerni napon i pretvara ga u izmjenični napon jednak mrežnom naponu. Takav napon se filtrira, sinkronizira i predaje elektroenergetskoj mreži.

Izmjenjivač treba biti projektiran tako da svojim ulaznim naponskim i strujnim ograničenjima pokriva radno područje fotonaponske elektrane u svim uvjetima.

### 2.3.5 Priključak na mrežu

Električna energija proizvedena u elektrani uglavnom nije namijenjena za predaju ili prodaju u elektro - distribucijsku mrežu, već za vlastitu potrošnju. Priključna snaga fotonaponske elektrane projektira se tako da uglavnom ne prelazi priključnu snagu koju investitor ima u smjeru preuzimanja električne energije iz mreže. Uvjeti i način priključenja na mrežu propisani su elektro energetsom suglasnošću.

PV elektrana se priključuje na NN mrežu prema uvjetima područnog distributera.



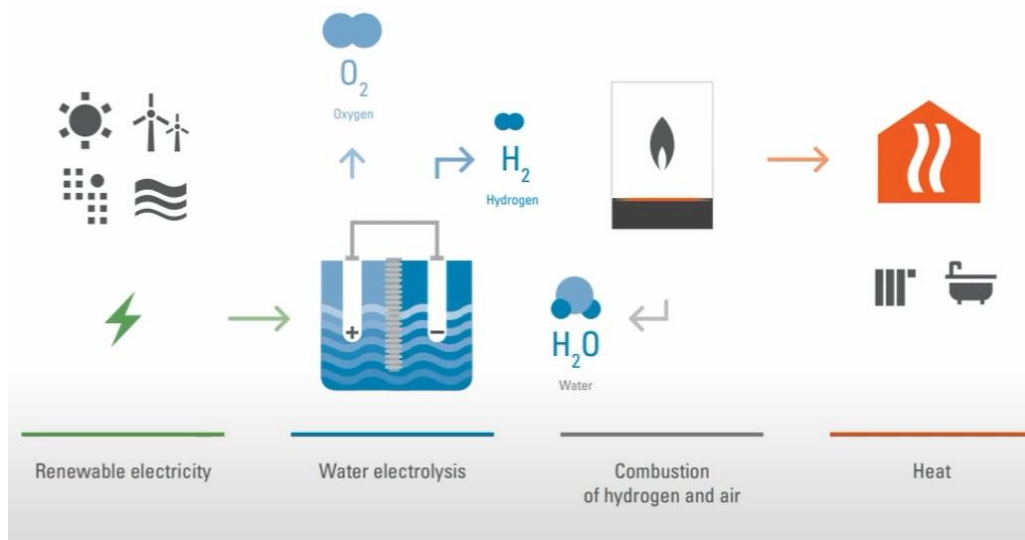
### 2.3.6 Baterije (u slučaju off-grid sustava)

Električna energija proizvedena fotonaponskim ćelijama se uskladištava u baterijama sličnim onima kakve se koriste kao akumulatori u automobilima. Punjenje/praznjenje se regulira posebnim regulatorom, a obično se ugrađuje i pretvarač istosmjerne struje u izmjeničnu, prikladnu za pogon uređaja u kućanstvu.

Pretvorba kemijske energije baterije natrag u električnu energiju (**gubici 20%**) te ostali gubici u navedenim regulatorima i pretvaračima, dodatno smanjuju efikasnost pretvorbe sunčeve u korisnu električnu energiju.

## 2.4 Proizvodnja vodika iz sunčeve energije

Vodik kao spremnik energije može služiti za pohranu električne energije kada imamo manjak potrošnje, odnosno za proizvodnju električne energije u slučaju velike potražnje. Može se koristiti za pokretanje bilo kojeg prijevoznog sredstva, ali i bilo kojeg uređaja na električnu energiju. Vodika nema slobodnog u prirodi, ali se jednostavno može dobiti razlaganjem spojeva u kojima je zastupljen.



**Slika 6 Kružna raspodjela vodika i dobivanje topline [11]**

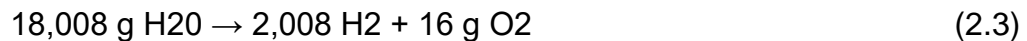
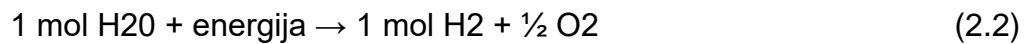
### OSNOVNE KARAKTERISTIKE VODIKA

- Pri standardnom tlaku i temperaturi vodik je plin bez boje, mirisa i okusa, 14.4 puta lakši od zraka, neotrovan
- Ohlađen na temperaturu vrelišta kondenzira se u bezbojnu tekućinu koja je najlakša od svih tekućina
- Zapaljen na zraku pri 560°C izgara gotovo nevidljivim plamenom prema reakciji:



- Ima najveću energetska gustoću po kilogramu u odnosu na prirodni plin i loživo ulje (vodik 33,3 kWh/kg, zemni plin 13,9 kWh/kg, loživo ulje 11,4 kWh/kg)

Michael Faraday prvi je formulirao princip elektrolize 1820. godine. Elektroliza je elektrokemijski proces razlaganja vode na vodik i kisik dovođenjem vanjskog istosmjernog napona na dvije elektrode (anoda i katoda) koje su u kontaktu s radnim medijem, odnosno elektrolitom. Da bi došlo do procesa elektrolize, istosmjerni napon mora biti jednak ili veći od reverzibilnog napona ( $U_{rev}$ ) koji iznosi 1,23 V. Prije tog napona ne započinje proces elektrolize.



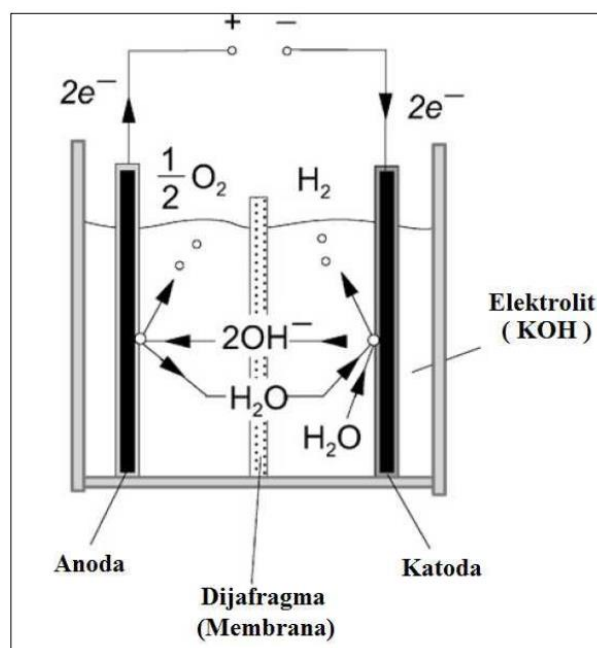
gdje je  $\text{H}_2\text{O}$  oznaka za jednu molekulu vode,  $\text{H}_2$  oznaka za jednu molekulu vodika,  $\text{O}_2$  oznaka za jednu molekulu kisika. [12]

Toplinske značajke vodika	
(Kemijska formula - $\text{H}_2$ , valencija, $z = 1$ )	Vrijednost
Molekularna masa, $M$	2,016 kg kmol <sup>-1</sup>
Molarni volumen (0 °C), $v_m$	22,43 m <sub>n</sub> <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup>
Gustoća u plinovitom stanju, $\rho$	0,08988 kg m <sup>-3</sup>
Gustoća u tekućem stanju, $\rho$	70,8 kg m <sup>-3</sup>
Temperatura tališta, $T$	13,95 K
Temperatura vrelišta, $T$	20,37 K
Kritična temperatura, $T$	33,25 K
Kritični tlak, $p$	12,94 bar
Kritična gustoća, $\rho$	31 kg m <sup>-3</sup>
Gornja ogrijevna vrijednost, $H_g$	12770 kJ m <sup>-3</sup>
Donja ogrijevna vrijednost, $H_d$	10760 kJ m <sup>-3</sup>
Specifična toplina kod 0 °C, $c_p$	14,235 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

**Slika 7 Toplinske značajke vodika [12]**

### 2.4.1 Elektroliza vode

Elektroliza vode je elektrokemijski postupak kojim se voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ) razlaže na vodik ( $\text{H}_2$ ) i kisik ( $\text{O}_2$ ) uslijed djelovanja vanjskog izvora istosmjerne električne energije. Za razlaganje vode pomoću elektrolize potreban je takozvani elektrolitički članak koji se sastoji od dvije elektrode koje su spojene na vanjski strujni krug i uronjene u elektrolitsku otopinu. Po potrebi se može koristiti membrana koja ima ulogu razdvajanja nastalih plinova. Za bolje razumijevanje tematike ovog rada, kemijsku teoriju elektrolize je najbolje objasniti na jednostavnom shematskom prikazu koji prikazuje jednostavni elektrolitički članak. [13]

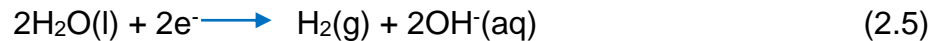


**Slika 8 Shematski prikaz elektrolize vode na jednostavnom elektrolitičkom članku [13]**

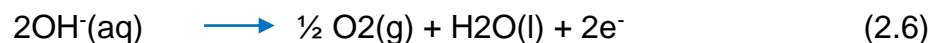
Na katodi odnosno negativnoj anodi se odvija redoks reakcija koja se naziva redukcija. Katoda oslobađa elektron kojeg prima vodikov kation iz molekule vode, pritom dolazi do razlaganja molekule vode te nastaje atom vodika. Preostali hidroksidni ion, koji je negativno nabijen, putuje kroz elektrolit prema pozitivno nabijenoj elektrodi - anodi. Na anodi se odvija redoks reakcija pod nazivom oksidacija. Pritom hidroksidni ion otpušta elektron, te se oslobađa atom kisika i atom vodika. Budući da su atomi nemetala visoko reaktivni, oni se automatski vežu za druge slobodne atome. Zato je za ovu analizu najtočnije promatrati kemijsku reakciju četiri hidroksidna iona, gdje se oslobađanjem 4 elektrona stvara jedna stabilna molekula kisika te dvije molekule vode

(molekule vode nastaju od preostala dva atoma kisika i četiri atoma vodika). Kemijske reakcije elektrolize, odnosno polureakcije koje se odvijaju na elektrodama prikazane su u slijedećim jednadžbama. [13]

Na katodi se odvija redukcija i nastaje vodik (u plinovitom stanju):



Na anodi se odvija oksidacija i nastaje kisik (u plinovitom stanju):



Ukupna reakcija procesa elektrolize:

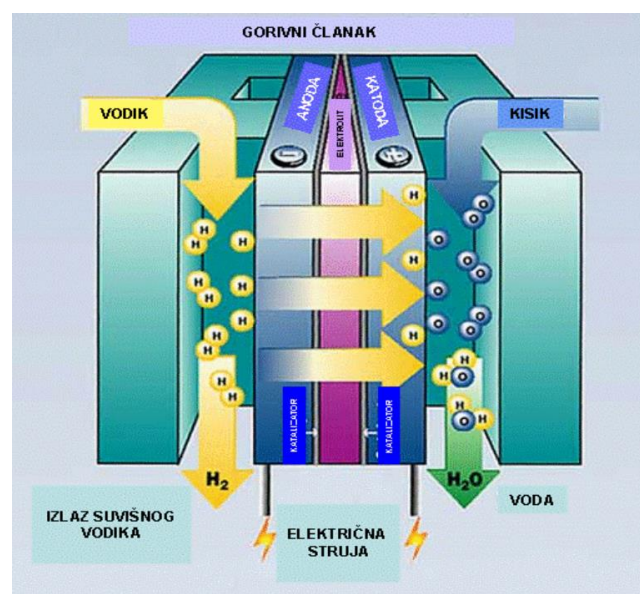


#### 2.4.2 Pohrana vodika

Kako je vodik najlakši element i uz to ima vrlo male molekule, puno lakše “bježi” iz spremnika i cijevi nego ostala konvencionalna goriva. Da bi se vodik mogao koristiti kao gorivo u transportu ili za proizvodnju električne energije, potrebno je razviti ekonomičan način uskladištenja i tehnologiju transporta od mjesta proizvodnje do mjesta korištenja. Spremnici za uskladištenje vodika u vozilima po težini i veličini moraju biti kompetitivni sa spremnicima konvencionalnih goriva, uz istovremenu visoku energetska iskoristivost, sigurnost i mogućnost ponovnog punjenja. Danas postojeće metode uskladištenja vodika uključuju visokotlačne spremnike plinovitog vodika i niskotemperaturne (kriogene) spremnike tekućeg vodika. Tehnologije za stacionarno uskladištenje i transport u tim agregatnim stanjima komercijalno su dostupne i već u uporabi. Istraživanja na ovom polju provode se i dalje, s težištem na povećanju količine energije koja se može uskladištiti po jedinici volumena ili jedinici težine vodikovih spremnika. Još jedan način uskladištenja vodika, čiji je razvoj u tijeku, fizikalno je ili kemijsko vezivanje molekula vodika u krutu tvar. [14]

### 2.4.3 Primjena vodika kao goriva

Za ispunjenje zahtjeva smanjenja štetnih emisija i proizvodnje čiste električne energije, trenutno najviše izgleda ima rješenje gorivnim člancima s vodikom kao gorivom. Visoke cijene gorivnih članaka te skupe tehnologije proizvodnje i uskladištenja vodika razlog su njihove ograničene primjene. Do konačnog uvođenja gorivnih članaka i vodika na energetska tržišta, kao pogonski strojevi koristit će se unaprijeđeni motori s unutarnjim izgaranjem, a za proizvodnju električne energije u gorivim ćelijama konvencionalna goriva (prirodni plin, metanol).



**Slika 9 Princip proizvodnje energije gorivnim člancima [15]**

Gorivni članci su uređaji za pretvorbu kemijske energije goriva u električnu energiju i toplinu. Gorivo ne izgara, nego dolazi do njegove elektrokemijske oksidacije. To je razlog da iskoristivost gorivih ćelija nije ograničena osnovnim zakonom po kojemu se vladaju toplinski strojevi (Carnotovim procesom), prema kojemu je gornja teoretska granica iskoristivosti toplinskih strojeva oko 30%. Stupanj iskoristivosti gorivih ćelija obično je između 35 i 60%. U dosad razvijenim gorivim ćelijama primjenjuje se nekoliko tipova elektrolita različitih osobina, te u skladu s time razlikuje nekoliko vrsta gorivih ćelija: gorive ćelije s krutim oksidom, gorive ćelije s fosfornom kiselinom, gorive ćelije s tekućim karbonatom, gorive ćelije s polimernom membranom, alkalne gorive ćelije. Glavne osobine navedenih gorivih ćelija prikazane su u sljedećoj tablici. [14]

**Tablica 1 Tipovi gorivnih članaka i njihove osobine [14]**

Tip gorivnog članka	Elektrolit	Gorivo	Stupanj iskoristivosti	Radna temperatura	Način korištenja
S krutim oksidom, <i>SOFC</i>	Kruti oksidi ZrO <sub>2</sub> /YO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , CO	45 - 65%	900 - 1000°C	Velike elektrane (samo el. energija) i mali kogeneracijski sustavi
S tekućim karbonatima, <i>MCFC</i>	Tekući karbonati, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	prirodni i generatorski plin, H <sub>2</sub>	45-60%	650 - 700°C	Velike elektrane (samo el. energija)
S fosfornom kiselinom, <i>PAFC</i>	Fosforna kiselina H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , prirodni plin, metanol	35-42%	190 - 210°C	Male elektrane (s kogeneracijom)
Alkalne, <i>AFC</i>	Kalijev hidroksid, KOH	H <sub>2</sub> , prirodni plin, metanol	45-60%	60 - 130°C	Specijalistički (svemirska tehnologija, uporaba u transportu)
S polimernom membranom, <i>PEFC</i>	Kruta polimerna membrana	H <sub>2</sub> , metanol, prirodni plin	30-40%	70 - 90°C	Transport, prenosive aplikacije, male stacionarne aplikacije (s kogeneracijom)

### **3 PRORAČUN PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE FOTONAPONSKOM ELEKTRANOM**

Namjena fotonaponske (FN) elektrane je proizvodnja električne energije čija je prvenstvena namjena proizvodnja električne energije za vlastite potrebe, a samo višak energije se predaje u elektroenergetsku mrežu. Priključak predmetne elektrane na elektroenergetsku mrežu predviđen je kao trofazni na niskonaponskoj strani prema uvjetima HEP - ODS Elektra Zagreb.

Tehnički proračuni fotonaponske elektrane obuhvaćaju modeliranje izvedbe FN elektrane, proračun godišnje proizvodnje električne energije na bazi referentnih karakteristika FN modula, smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, odabir/proračun DC/AC izmjenjivača – invertera, proračun pada napona, proračun zaštite od strujnog preopterećenja, zaštite od opasnog napona pri indirektnom dodiru i kratkog spoja. Proračun je odrađen za najopterećenije elemente istog tipa u sustavu.

Elektrana se priključuje na postojeću instalaciju objekta te se smatra da je ista ispravna. Energija iz foto-naponskih modula će se koristiti direktno uz spremanje u obliku vodika za potrebe klima uređaja ili neka druga „dnevna“ trošila.

Proračunom je obuhvaćeno:

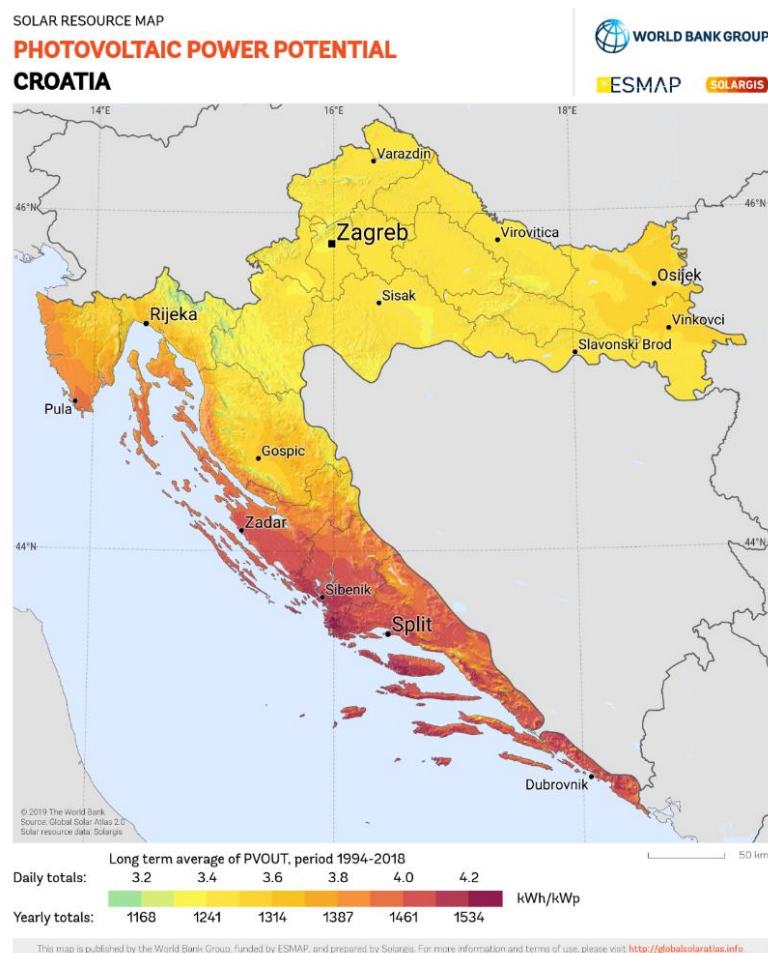
- Proračun moguće proizvodnje električne energije
- Naponskog raspona na DC strani izmjenjivača
- Presjeka kabela s obzirom na zagrijavanje vodiča, padove napona i prijenosne gubitke
- Odabira nazivnih vrijednosti sklopnih naprava

Tehnički proračuni proizvodnje vodika obuhvaćaju modeliranje snage i vrste elektrolizatora, kompresora, spremnika, gorivnih članaka.



### 3.1 Solarni potencijal lokacije

Hrvatska zahvaljujući svojem geografskom položaju ima vrlo povoljne uvjete za iskorištavanje Sunčeve energije. U južnom dijelu Hrvatske godišnja proizvodnja klasičnog fotonaponskog sustava iznosi od 1100 do 1330 kWh po instaliranom kWp snage dok u kontinentalnom dijelu Hrvatske ona iznosi od 1000 do 1100 kWh po instaliranom kWp snage. Fotonaponski modul daje najviše snage kad je usmjeren tako da sunčevo zračenje upada okomito na njegovu plohu. Optimalni kut nagiba fiksno postavljenih fotonaponskih modula za područje Zagreba je  $36^\circ$  s azimutom  $0^\circ$  (usmjerenje prema jugu). Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske prikazana je na slici.



**Slika 10** Raspoloživost sunčevog za Hrvatsku (Izvor: <https://globalsolaratlas.info/download/croatia>)

Za ilustrativnu usporedbu, najbolji „sunčani“ dan u Njemačkoj predstavlja u Hrvatskoj najgori dan. Unatoč tome, Njemačka je povijesno gledano jedna od pionirskih zemlji na području tehnologije fotonapona, a danas vodeća Europska sila s obzirom na broj instaliranih kapaciteta fotonaponskih sustava.

Hrvatska, unatoč svom ogromnom potencijalu, danas još uvijek ima relativno mali broj instaliranih kapaciteta fotonaponskih sustava. Faktori koji su doveli do današnje situacije su brojni i variraju od političke situacije i rata u kojem se Hrvatska našla u 1990-ima, nedostacima strateškog planiranja, pa sve do odsustva relevantnog zakonodavstva za obnovljive izvore do 2007. godine, te njegovim netransparentnim i zamršenim provođenjem u kasnijim godinama.

### 3.2 Opis objekta za postavljanje FN elektrane

Predviđena je fotonaponska elektrana smještena na krovu jedne tvrtke smještene na sjevernom dijelu Zagreba. Mikrolokacija zgrade bez geografskih koordinata prikazana je u nastavku. Objekt je izveden s dva kata. U prizemlju je privatni prostora, a na katu tvrtka s prilazom s ceste.



*Slika 11 Mikrolokacija ugradnje fotonaponske elektrane*

Objekt je orijentiran s većom krovnom plohom prema sjeveroistoku te sa manjom krovnom plohom prema jugo zapadu s kutom azimuta  $20^\circ$  i kutom nagiba krovne plohe  $20^\circ$ . Fotonaponska elektrana predviđena je na jugo zapadnu krovnu plohu te na zid između prozora.

### 3.3 Modeliranje fotonaponske elektrane

Ulazni parametri za proračun uzeti su za lokaciju objekta a proračun je izrađen za dio fotopanela smještenih na kosom krovu te za drugi dio panela smješten na zidu između prozora.

Ovim radom nisu obuhvaćeni razvodni ormari istosmjerne i izmjenične struje DC, razvod kabela, uzemljenje i izjednačenje potencijala, sustav zaštite od munje, nosive konstrukcije niti analiza utjecaja vjetra i potrebnih balasta.

#### 3.3.1 Fotonaponski moduli

Fotonaponska elektrana je projektirana na krovu objekta s više nizova s različitim brojem fotonaponskih modula po nizu. Dio elektrane postavljen na kosi krov prati nagib krovišta, a dio elektrane postavljen na ravni zid biti će izveden s nagibom fotonaponskih modula od 90° prema s kutom azimuta 20°. Dispozicija modula prikazana je u nastavku. Fotonaponski moduli postavljeni su tako da NE reflektiraju sunčevu svjetlost prema prometnicama te NE ugrožavaju sigurno odvijanje prometa.

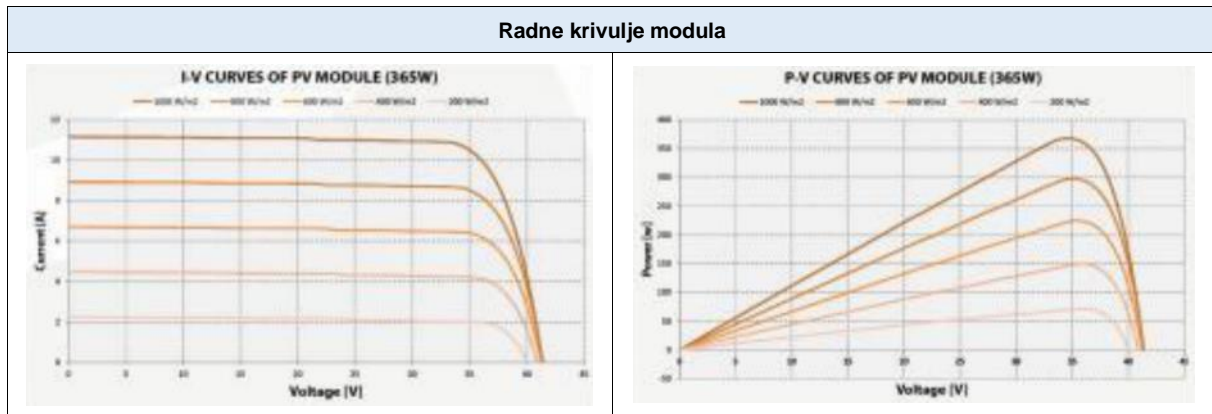
Za fotonaponsku elektranu odabrani su FN moduli kao tip SOLVIS SV120-375 E HC9B, a tehnički podaci su prikazani u nastavku.

**Tablica 2 Tehnički podaci fotonaponski modul SOLVIS SV120-375 E HC9B**

OPIS	Parametri pri standardnim testnim uvjetima SCT	Parametri u točki NOCT
Vršna snaga, $P_{MPP}$ [W]	375	278,4
Struja kratkog spoja, $I_{SC}$ [A]	11,36	9,18
Napon praznog hoda, $U_{OC}$ [V]	40,90	37,4
Nazivna struja, $I_{MPP}$ [A]	10,91	8,81
Nazivni napon, $U_{MPP}$ [V]	34,54	31,6
Učinkovitost modula, $\eta$ [%]	20,44	20,44
Dimenzije (V×Š×D) [mm]	1764×1040×35	
Masa [kg]	20	
Vrsta ćelija	monokristalni Si	
Okvir	Anodizirani aluminij	
Priključna kutija	IP 67 s 3 Bypass diode	
Priključni kablovi	4 mm <sup>2</sup> dužine 350 mm, MC compatible connections	
Maksimalni napon sustava, U [V]	1.000	
Najveća dopuštena prekidna struja, I [A]	15 A	

SCT: ozračenje = 1.000 W/m<sup>2</sup>; temperatura ćelije 25 °C.

NOCT: ozračenje = 800 W/m<sup>2</sup>; temperatura ćelije 20 °C.



Fotonaponska elektrana je projektirana s 20 modula podijeljena u 3 niza (stringa) i ukupne vršne snage 7,4 kWp. U jednom nizu nalazi se po 8 serijski spojenih fotonaponskih modula na kosom krovu i po 4 serijski spojenih modula na vertikalnom zidu. Primijenjeni kabeli su tipa PV1-F 4 mm<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Izmjenjivači – Inverteri

Projektirani izmjenjivač svojim ulaznim naponskim i strujnim ograničenjima pokriva radno područje fotonaponske elektrane u svim uvjetima.

Predviđena je ugradnja izmjenjivača njemačkog proizvođača SMA, tipa Sunny TriPower nazivne snage 15 kW i najveće učinkovitosti 98,1%, ima ugrađene vrlo napredne sigurnosne sustave zaštite kako od otočnog pogona, tako i nadstrujne i prenaponske zaštite. Izmjenjivač ima ugrađeni sustav za praćenje točke maksimalne snage (MPPT) fotonaponskog polja. Svi izmjenjivači tipa TriPower ne mogu propustiti zaostale DC struje u mrežu zbog njihovog dizajna. TriPower time zadovoljava zahtjeve norme DIN VDE 0100-712 (IEC60364-7-712: 2002).

Rule 1: inverter nominal AC output / total panel wattage  $\geq 75\%$

Rule 2: inverter DC maximum input power  $\geq$  total panel wattage

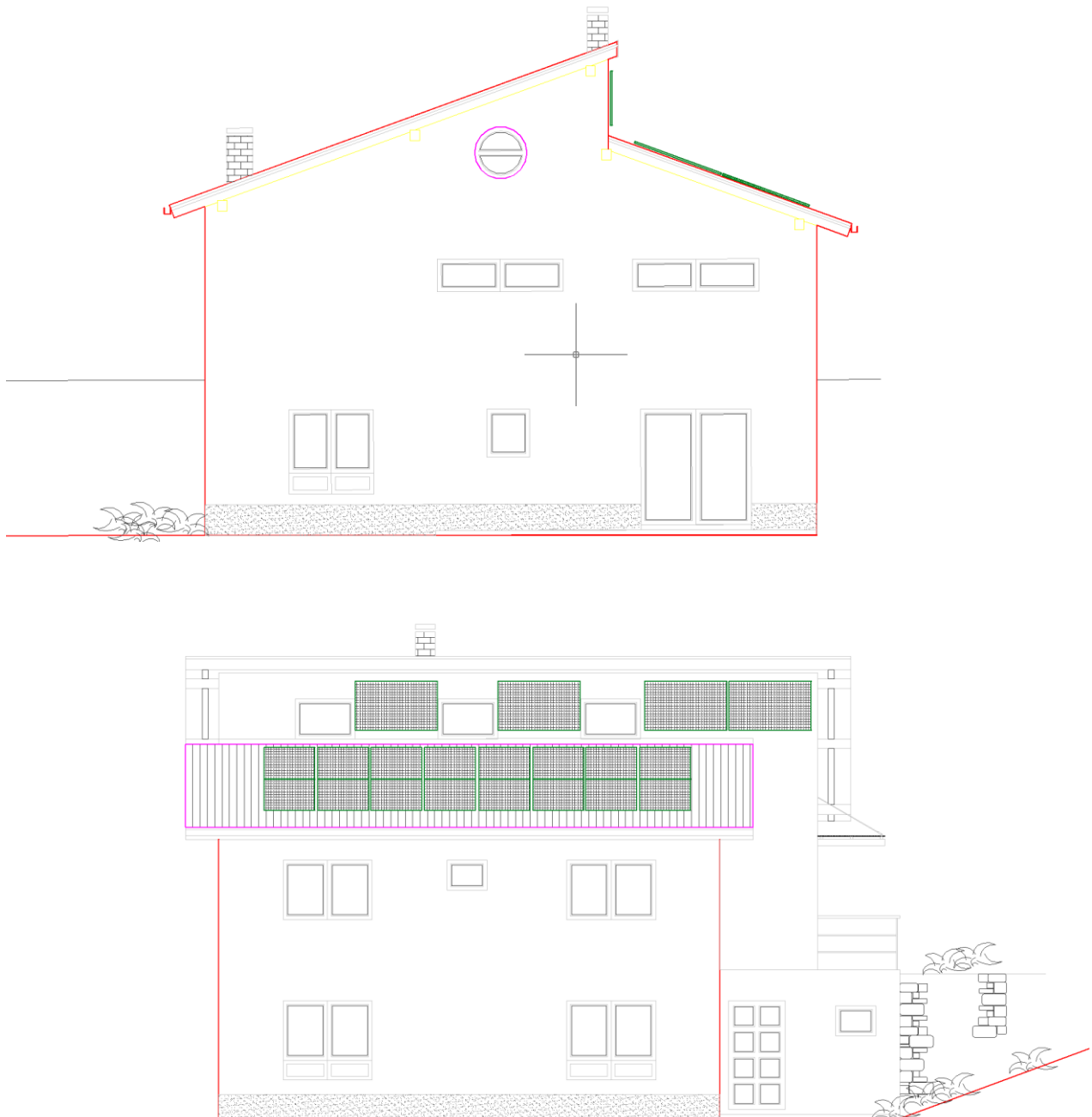
For instance, if inverter nominal AC output = 5000w and there are 24 x 270w panels.

24 x 270w = 6480w

5000w / 6480w = 77.16% > 75%

### 3.3.3 Dispozicija fotonaponskih modula na krovu objekta

Predviđena je ugradnja 16 fotonaponskih modula na kosom krovu pod kutom  $20^\circ$  i azimuta  $20^\circ$ . Na zid je predviđena ugradnja 4 fotonaponska modula pod kutom od  $90^\circ$  s orijentacijom prema jugozapadu, azimuta  $20^\circ$ .



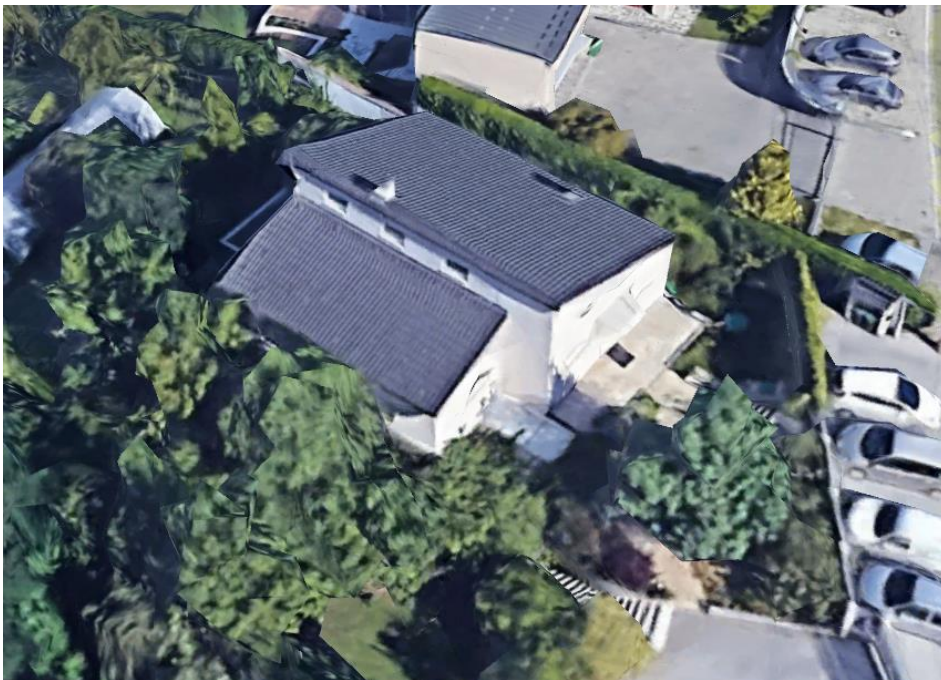
**Slika 12 – Nacrti krova s zonama ugradnje fotopanela na kosom krovu i zidu**

### 3.3.4 Provjera stupnja zasjenjenja

Raslinje oko objekta je preraslo krov te je upitna učinkovitost buduće fotonaponske elektrane te u konačnici i isplativost.

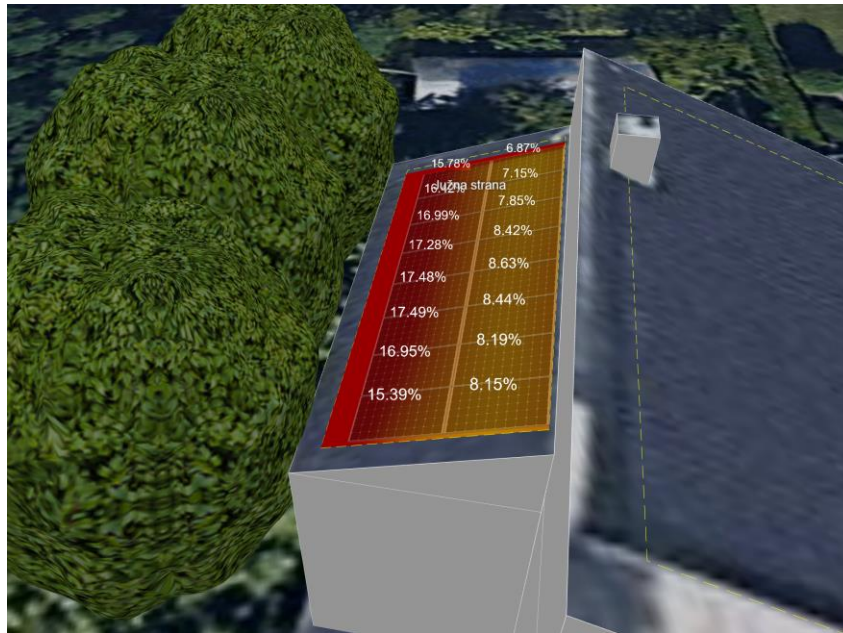


*Slika 13 – Raslinje uz krov*



*Slika 14 – 3d model zgrade*

Izrađen je 3D model objekta u sustavu Sunny design – SMA Energy s ciljem provjere stupnja zasjenjenja fotonaponskih modula koji bi se postavili na kosi krov.



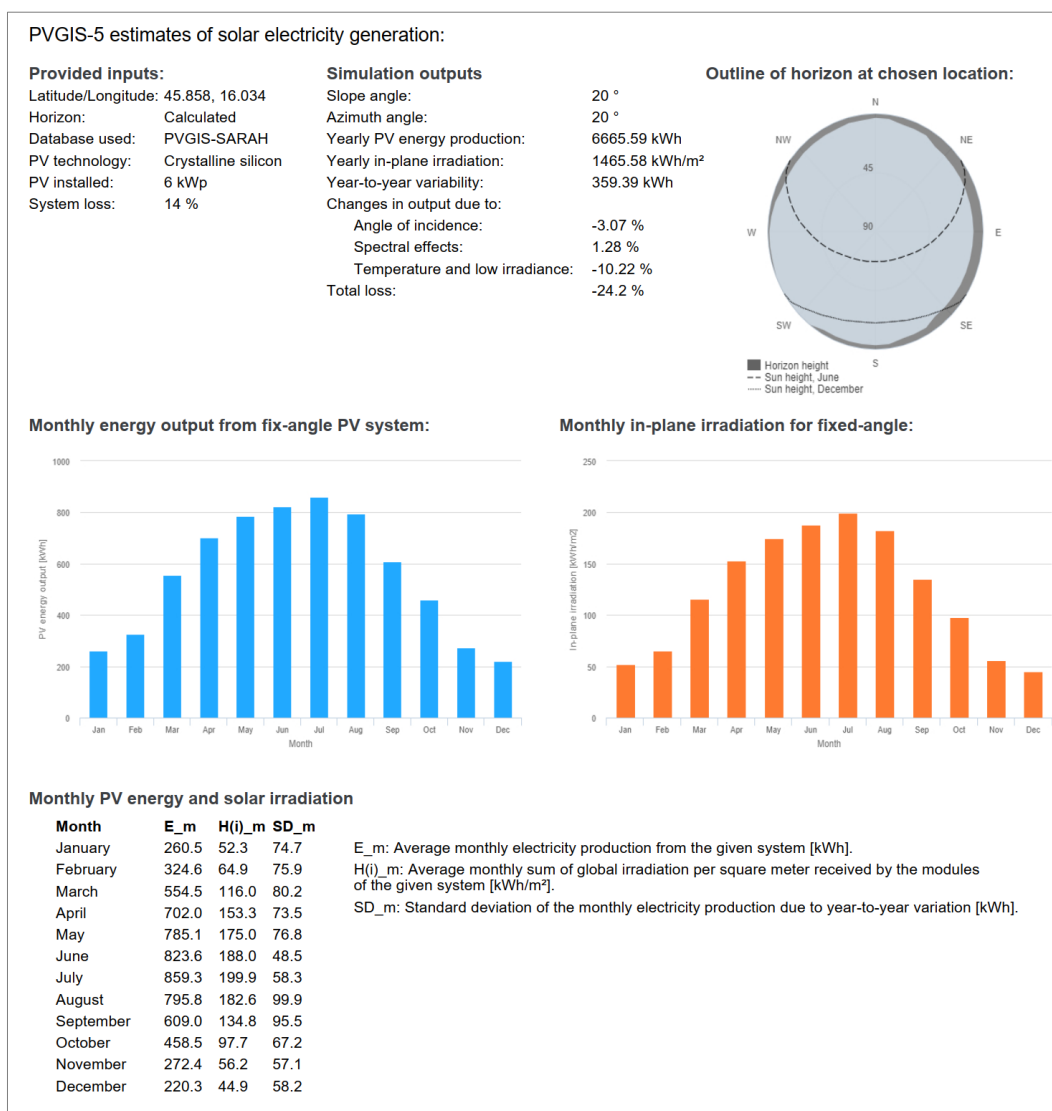
**Slika 15 – Stupanj zasjenjenja FN modula na kosom krovu**

Procjena očekivane godišnje proizvodnje energije sunčane elektrane dobivena je računalnom simulacijom putem Web aplikacije Sunny design. U slučaju da se raslinje uz krov ukloni elektrana na kosom krovu bi proizvela 6.666 kWh, a u slučaju da raslinje ostane ista elektrana bi proizvela 5.826 kWh što je za cca 15% manje. S ciljem maksimalne energetske učinkovitosti raslinje se treba ukloniti kako bi elektrana radila punim kapacitetom.

### 3.3.5 Proračun godišnje proizvodnje električne energije

Parametri za proračun solarnog potencijala i mogućnosti proizvodnje električne energije na projektiranoj lokaciji su prikazani tablično. Pri proračunu je korištena baza podataka PVGIS-SARAH, a predviđena proizvodnja električne energije je putem monokristalnih silicijskih članaka.

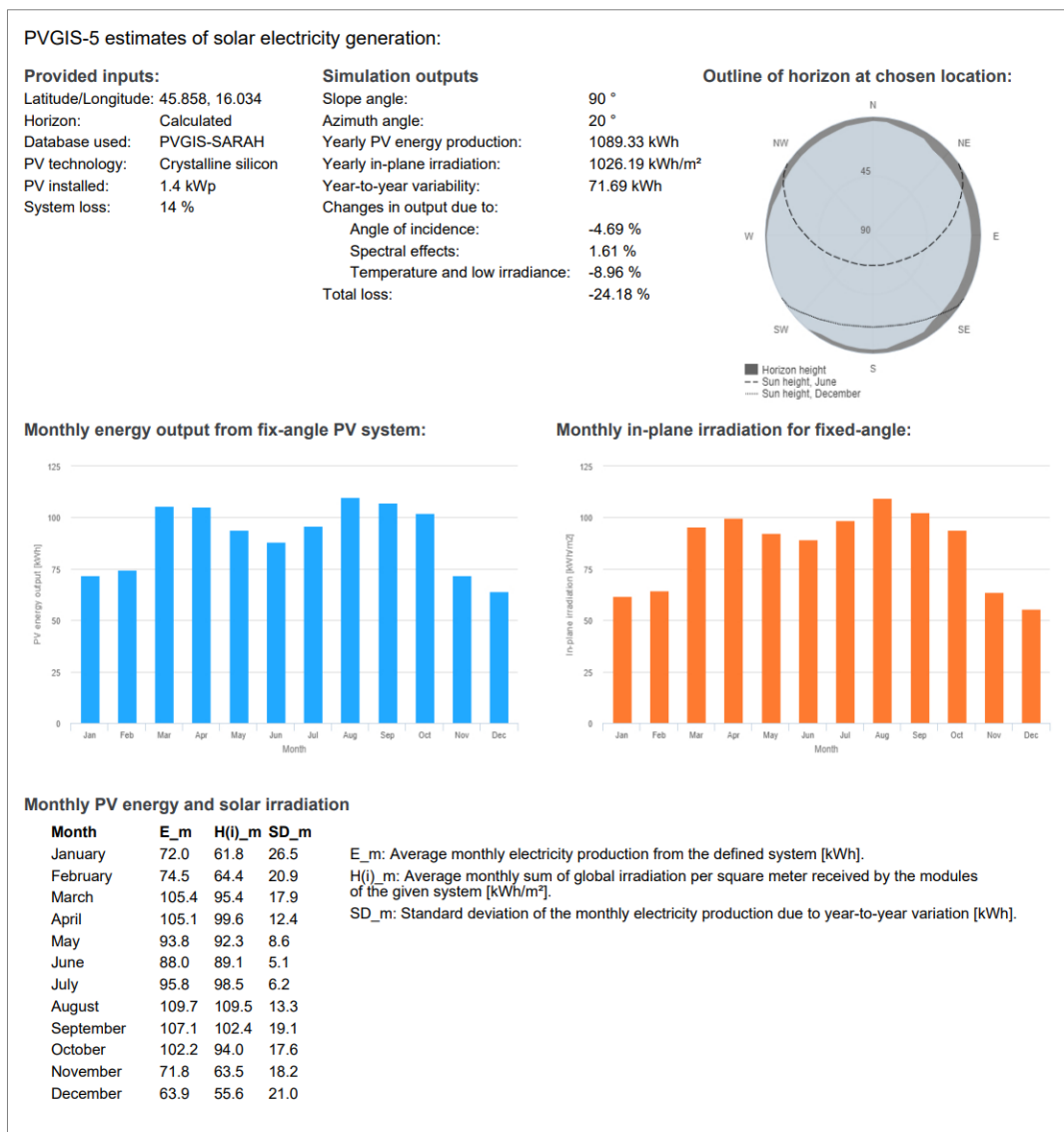
Modeliranje mogućnosti proizvodnje električne energije izrađeno je putem Web aplikacije Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Modeliranje je izrađeno uz pretpostavku da je gubitak sustava 14%<sup>1</sup>.



**Slika 16 Prikaz proizvodnje električne energije fotopanelima na kosom krovu**

<sup>1</sup> Procijenjeni gubici sustava su svi gubici u sustavu, koji uzrokuju da je snaga koja se stvarno isporučuje u električnu mrežu manja od snage koju proizvode fotonaponski moduli. Postoji nekoliko uzroka za ovaj gubitak, kao što su gubici u kablovima, pretvarači struje, prljavština (ponekad snijeg) na modulima i tako dalje.





**Slika 17** Prikaz proizvodnje električne energije fotopanelima na vertikalnom zidu

**Tablica 3** Konfiguracija fotonaponske elektrane prema položaju fotonaponskih modula

Opis	Kosi krov	Vertikalni zid	SVEUKUPNO
Broj FN modula [kom]	16	4	20
Broj stringova – nizova [kom]	2	1	3
Broj DC/AC izmjenjivača – invertera	1	1	1
Peak power [kWp]	6,0	1,4	7,4
Kut nagiba [°]	20°	90°	20° i 90°
Azimut [°]	20°	20°	20°
Proizvodnja električne energije [kWh] (PVGIS ©European Union, 2001-2021)	6.666 kWh	1.089 kWh	7.755 kWh

Procjena očekivane godišnje proizvodnje energije sunčane elektrane dobivena je računalnom simulacijom putem Web aplikacije PVGIS i iznosi 7.755 kWh. Stvarna proizvodnja elektrane može odstupati zbog meteoroloških odstupanja i načina održavanja.

Tablično su prikazane proizvodnja električne energije fotonaponskih elektrana na južnom kosom krovu i vertikalnom zidu uz prozore, potrošnja električne energije u tvrtki te višak, odnosno manjak energije po mjesecima u godini.

**Tablica 4 Proizvodnja fotonaponske elektrane prema položaju fotonaponskih modula**

Mjesec	PROIZVODNJA - krov [kWh]	PROIZVODNJA - zid [kWh]	PROIZVODNJA – ukupno [kWh]
1	260,5	72	333
2	324,6	74,5	399
3	554,5	105,4	660
4	702,0	105,1	807
5	785,1	93,8	879
6	823,6	88	912
7	859,3	95,8	955
8	795,8	109,7	906
9	609	107,1	716
10	458,5	102,2	561
11	272,4	71,8	344
12	220,3	63,9	284
UKUPNO	6.652	1.089	7.755

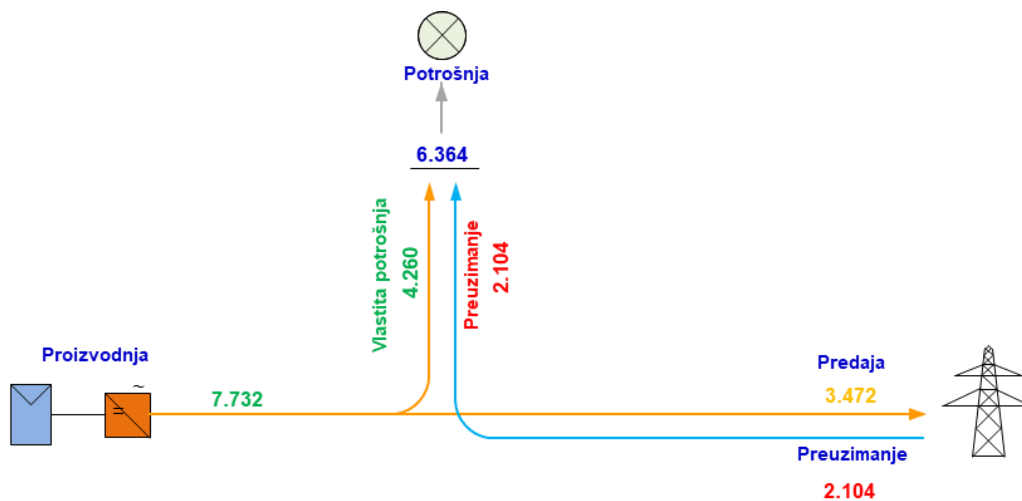
Najveća mjesečna proizvodnja očekuje se u srpnju i iznosi 955 kWh, dok se najmanja mjesečna proizvodnja očekuje u prosincu i iznosi 284 kWh.

### 3.3.6 Korištenje električne energije iz FN elektrane

Fotonaponska elektrana proizvodi električnu energiju samo preko dana kada do nje dopire dovoljna insolacija od sunca. Dakle FN elektrana proizvodi električnu energiju samo za vrijeme VT tarife.

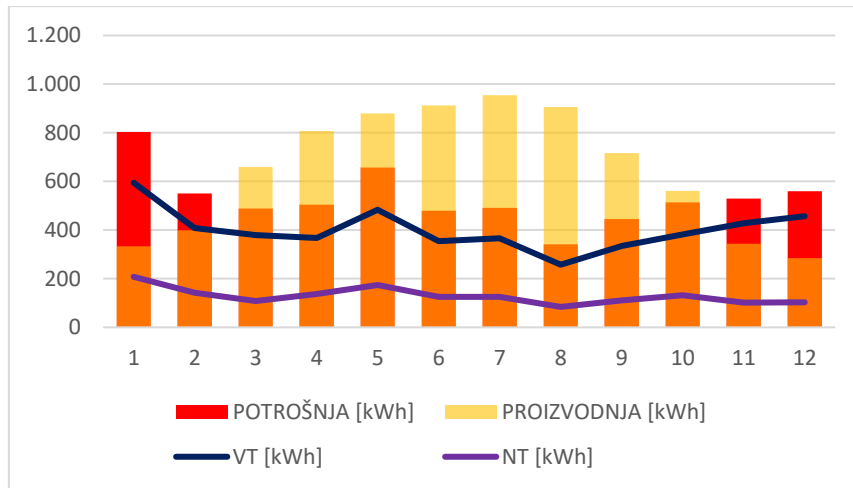
Tijekom ljetnog dana sunce će prolaziti visoko na obzoru te će zrake sunca biti više okomite na fotonaponske module nego preko zime. Također, ljetni dani su duži pa će cjelokupna proizvodnja električne energije biti veća nego zimi. Kada se ostvaruje povećana proizvodnja električne energije iz FN elektrane, zadovoljena je cjelokupna potreba za električnom energijom, a višak se predaje u mrežu. Preko noći sva potrebna energija uzima se iz mreže.

U kratkim zimskim danima kada je sunce na obzoru nisko, cjelokupna električna energija proizvedena iz FN elektrane biti će utrošena u kućanstvu. S obzirom da električna energija iz FN elektrane neće biti dovoljna za kućne potrebe, višak će se nadomjestiti iz mreže.

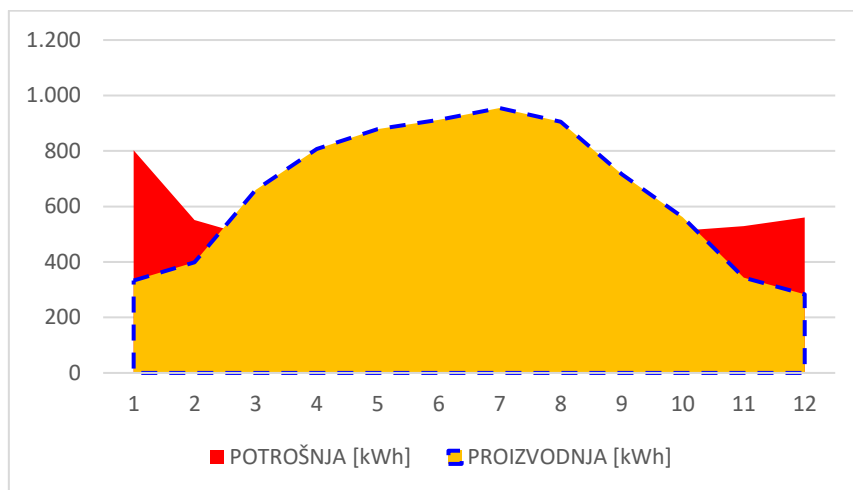


Slika 18 – Prikaz potrošnje, proizvodnje i razmjene električne energije

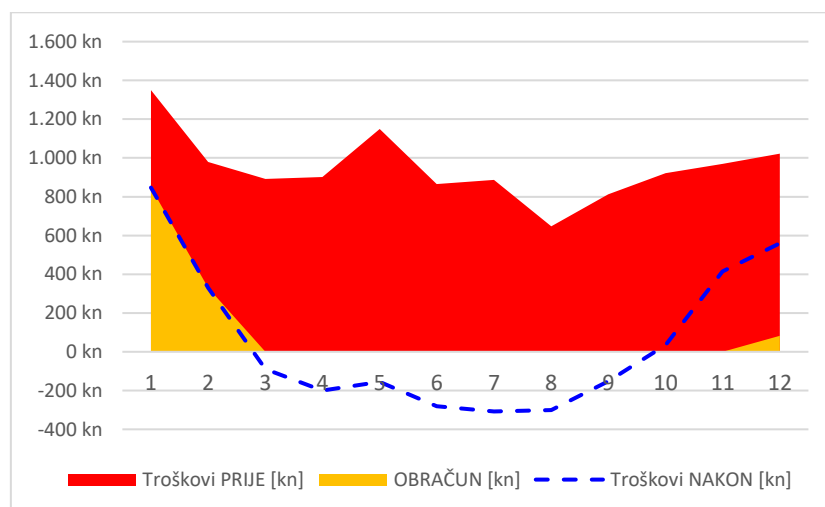
S obzirom da, uz osnovnu potrošnju EE, iz viškova želimo proizvoditi vodik za kasniju upotrebu modelirana je veća elektrana nego što je inače potrebno. Na godišnjoj razini, proizvedeno je 1.392 kWh električne energije viška. Ukoliko bi se radilo samo o instalaciji fotonaponske elektrane za vlastitu potrošnju višak električne energije bio bi nepotreban. Međutim, s obzirom da želimo proizvoditi vodik za kasniju upotrebu biti će potreban višak električne energije.



**Slika 19 Usporedba proizvodnje i potrošnje električne energije**



**Slika 20 Preuzeta i predana električna energija**



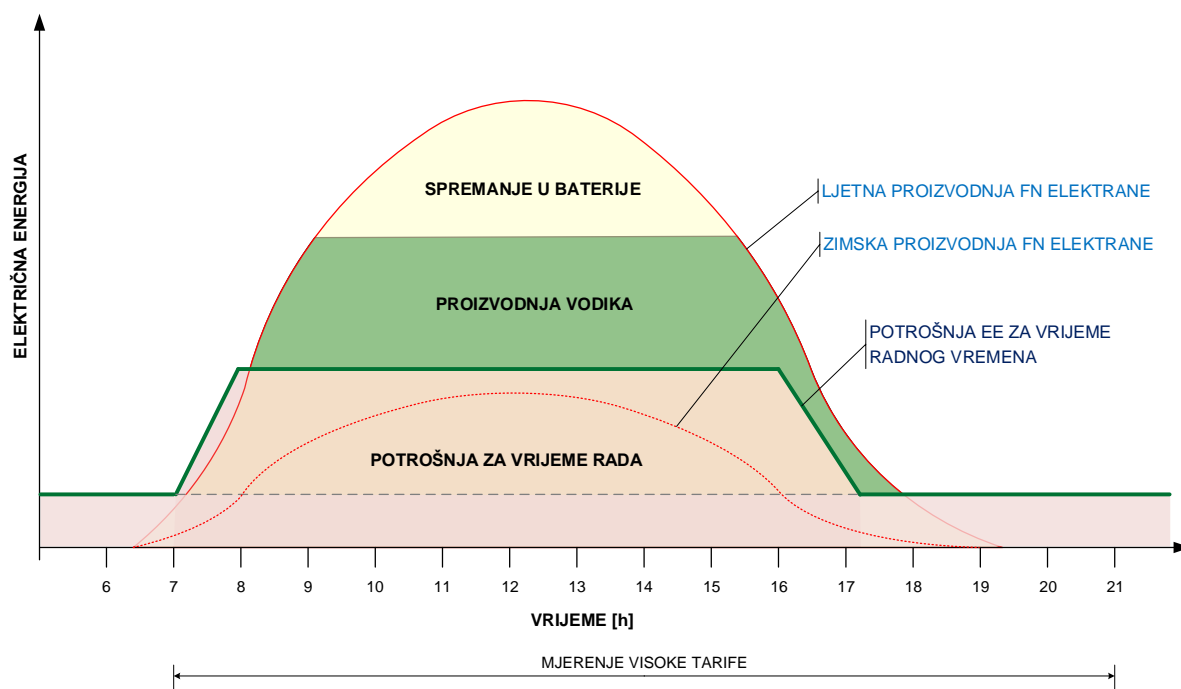
**Slika 21 Troškovi prije i nakon instalacije fotonaponske elektrane**

## 4 PRORAČUN PROIZVODNJE VODIKA

### 4.1 Princip proizvodnje vodika

Proizvodnja ZELENOG vodika podrazumijeva korištenje ZELENOG izvora električne energije. U ovome slučaju taj izvor zelene električne energije je fotonaponska elektrana.

Kako bismo bolje razumjeli na koji način bi izgledala proizvodnja zelenog vodika u nekoj tvrtki, analizirajmo graf na slici 22 koji ilustrativno predstavlja odnos potrošnje električne energije u uredu i proizvodnje električne energije u jednome danu. S obzirom da proizvodnja i potrošnja električne energije kroz dan variraju, bitno je razumjeti gdje je prostor za proizvodnju vodika, odnosno raspoloživa električna energija za proizvodnju vodika.



Slika 22 Graf (ilustracija) proizvodnje vodika

### POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U TVRTKI

Za vrijeme kada tvrtka ne radi, uređaji u „stand by-u“ troše određenu količinu električne energije. To ćemo zvati osnovna satna potrošnja, odnosno angažirana snaga za vrijeme kada tvrtka ne radi. Za vrijeme radnog vremena tvrtka će imati veću angažiranu snagu.

## **PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U FOTONAPONSKOJ ELEKTRANI**

Proizvodnja električne energije u fotonaponskoj elektrani ovisi o nizu faktora kao što su zemljopisna širina, azimut i kut postavljanja modula, vremenske prilike, doba godine, doba dana, itd. U sredini ljetnog sunčanog dana proizvodnja će biti najveća, a u zimskim danima najmanja.

## **SPREMANJE ENERGIJE**

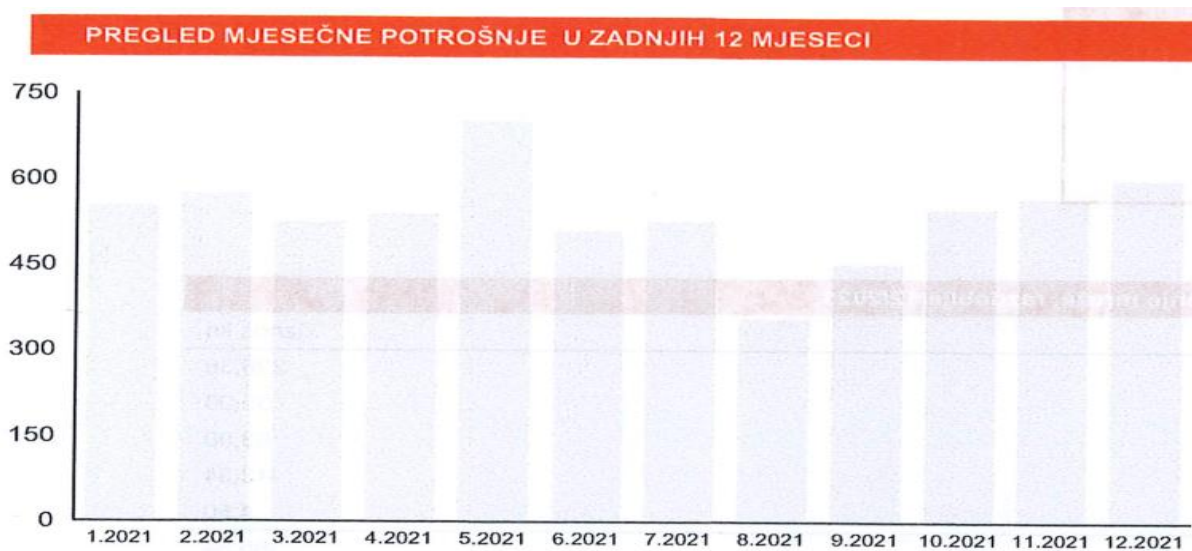
S obzirom da želimo napraviti „off grid“ sustav bitno je spremiti višak proizvedene energije da bismo ga koristili kada imamo manjak proizvodnje. Manjak proizvodnje se uglavnom događa noću i u zimskim danima. Pretvorbom električne energije u vodik te ponovnom pretvorbom u električnu energiju dolazi do velikog gubitka energije. Iz tog razloga efikasnije je spremati električnu energiju u baterije za korištenje iste noću kako bismo imali što manje gubitaka. Dakle iz viška proizvedene električne energije potrebno je prvo napuniti baterije te zatim proizvoditi vodik za dugoročnu pohranu energije. Spremanje energije u ova dva spremnika se može odvijati paralelno ili jedno za drugim.

## 4.2 Potrošnja električne energije u tvrtki

Prvo je potrebno sagledati koliko je uopće električne energije raspoloživo za proizvodnju vodika. Važno je razumjeti na koji način se koristi električna energija dobivena iz FN elektrane, električna energija iz mreže te kako djeluje izmjena električne energije iz fotonaponske elektrane i mreže.

### 4.2.1 Korištenje električne energije iz mreže

Potrebna električna energija za opskrbu objekta provjerena je u dostupnim računima s pregledom godišnje potrošnje 2021. godine.



*Slika 23 – Izvod iz računa s pregledom potrošnje električne energije*

Utvrđeno je da je prosječna godišnja potrošnja objekta 6.364 kWh. U grafu potrošnje možemo vidjeti naprimjer pad potrošnje u kolovozu kada je većina zaposlenika na godišnjem odmoru.

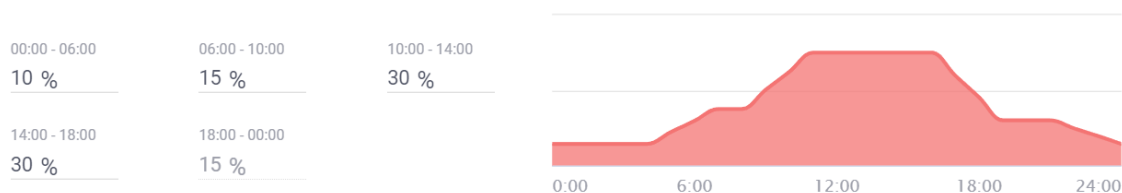
Prema dostupnim računima, u tablici 5 je prikazana potrošnja električne energije u višoj tarifi i nižoj tarifi.

**Tablica 5 Potrošnja električne energije iz mreže**

Mjesec	Dani	VT [kWh]	NT [kWh]	POTROŠNJA [kWh]
Siječanj	31	594,8	207,8	803
Veljača	28	407,6	143,0	551
Ožujak	31	379,9	108,2	488
Travanj	30	366,9	137,2	504
Svibanj	31	483,6	173,9	658
Lipanj	30	353,9	125,6	480
Srpanj	31	366,0	125,6	492
Kolovoz	31	257,6	84,1	342
Rujan	30	334,5	111,1	446
Listopad	31	381,7	131,4	513
Studeni	30	428,0	101,5	529
Prosinac	31	456,8	103,4	560
Godina	365	4.811	1.553	6.364

Za proračun potrebne količine vodika, biti će potrebno znati koliko električne energije ured troši u jednom satu u stanju mirovanja te srednja vrijednost angažirane snage za vrijeme radnog vremena.

S obzirom da se radi o tvrtki, odnosno o uredu, električna energija se koristi uglavnom 5 dana u tjednu po 9 radnih sati otprilike kao na slici 20.



**Slika 24 – Prikaz korištenja električne energije u uredu u jednom danu**

Prema tome, u tablici 6 je izrađen algoritam za izračun angažirane snage u jednom satu. Proračuni u nastavku izrađeni su računalnim programima tvrtke Energonova d.o.o.



**Tablica 6 Električna energija – modeliranje angažirane snage**

Referentna godina	Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	UKUPNO
<b>2022. god.</b>	Dani	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	<b>365</b>
<b>Dani rada</b>	<b>5 d</b>	22	20	22	21	22	21	22	22	21	22	21	22	258
<b>Sati rada</b>	<b>9 h</b>	198	180	198	189	198	189	198	198	189	198	189	198	2.322
<b>14 h</b>	VT [kWh]	595	408	380	367	484	354	366	258	334	382	428	457	4.811
10 h	NT [kWh]	208	143	108	137	174	126	126	84	111	131	101	103	1.553
Obračunata snaga HEP-a i srednje angažirana snaga VT i NT	P <sub>VT</sub> [kW]	1,4	1,0	0,9	0,9	1,1	0,8	0,8	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	0,9
	P <sub>NT</sub> [kW]	0,7	0,5	0,3	0,5	0,6	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4
	P <sub>Rad</sub> [kW]	2,6	2,0	1,7	1,7	2,1	1,6	1,6	1,1	1,6	1,7	2,1	2,1	<b>1,83</b>

Algoritam je izrađen na način da se unesu radni dani u tjednu te se prema tome računa ukupan broj radnih dana u mjesecu. Zatim se unesu radni sati u jednom danu te prema tome dobijemo broj radnih sati u mjesecu. Unosi se vrijeme mjerenja više i niže tarife i vrijednosti izmjerene potrošnje u višoj i nižoj tarifi.

Prema unesenim podacima, algoritam računa osnovnu angažiranu snagu električne energije kada se ured ne koristi, dodatnu angažiranu snagu za vrijeme radnog vremena i ukupnu snagu za vrijeme radnog vremena. Uzete su srednje vrijednosti svih 12 mjeseci te će se prema tome računati u nastavku.

### 4.3 Raspoloživa električna energija za proizvodnju vodika

U tablici 7 je prikazana cjelokupna situacija proizvodnje i potrošnje električne energije.

*Tablica 7 Prikaz potrošnje, proizvodnje i razmjene električne energije*

Mjesec	Dani	POTROŠNJA UREDA [kWh]	PROIZVODNJA FN ELEKTRANE [kWh]	RAZLIKA [kWh]	VT nova potrošnja [kWh]	Preuzeto [kWh]	Predano [kWh]
Siječanj	31	803	333	470	262	470	0
Veljača	28	551	399	152	9	152	0
Ožujak	31	488	660	-172	0	108	-280
Travanj	30	504	807	-303	0	137	-440
Svibanj	31	658	879	-221	0	174	-395
Lipanj	30	480	912	-432	0	126	-558
Srpanj	31	492	955	-463	0	126	-589
Kolovoz	31	342	906	-564	0	84	-648
Rujan	30	446	716	-270	0	111	-382
Listopad	31	513	561	-48	0	131	-179
Studeni	30	529	344	185	84	185	0
Prosinac	31	560	284	276	173	276	0
Godina	365	6.364	7.756	-1.392	527	2.080	-3.472

**Prema dosadašnjim saznanjima i prema tablici 7 možemo donijeti slijedeće zaključke:**

1. Ukupna proizvodnja električne energije fotonaponske elektrane je veća od ukupne potrebe za električnom energijom za 1.392 kWh.
2. Predimenzionirana elektrana ne znači energetska neovisnost zbog učestale razmjene električne energije s mrežom.
3. U ljetnim mjesecima proizvodnja je povećana, višak se predaje u mrežu.
4. U zimskim mjesecima proizvodnja ne može nadoknaditi potrošnju te se potrebna električna energija nadomješta iz mreže.
5. Tokom cijele godine potrošnja električne energije u nižoj tarifi će uvijek biti ista.
6. Ukoliko želimo izvesti „off grid“ sustav moramo pokušati vodikovom tehnologijom (gorivnim člancima) opskrbiti ured električnom energijom u vrijednosti 2.080 kWh koliko bi prema tablici 6 preuzeli iz mreže.
7. Sav potreban vodik moramo proizvesti elektrolizom u ljetnim mjesecima kada imamo višak električne energije. Na raspolaganju imamo 3.472 kWh koliko bi bilo predano u mrežu.
8. Prema točki 7, vodik ne možemo konstantno proizvoditi tokom cijele godine. Također, vodik ne možemo proizvoditi u noćnim satima. Dakle, snaga

elektrolizatora mora biti dovoljno velika kako bismo iskoristili višak električne energije u dnevnim satima.

9. Prema tablici 6, osnovna srednja satna angažirana snaga (kada se ured ne koristi) iznosi 200 W, dodatna srednja angažirana snaga (kada se ured koristi) iznosi 900 W, a ukupna srednja angažirana snaga (kada se ured koristi iznosi 1830 W.
10. Prema tablici 7, u mjesecima siječanj, veljača, studeni i prosinac, potrebna električna energija potpuno ovisi o akumuliranoj energiji u vodik i iznosi 1.083 kWh. Dakle to je količina električne energije koju mora zadovoljiti akumulacija vodika.

## 4.4 Elementi vodikovog sustava

Glavni dijelovi sustava dostojnog zvanja „vodikova ekonomija u zgradama“ bili bi slijedeći:

### 1. FOTONAPONSKA ELEKTRANA

Kao glavni izvor energije opskrbljuje kućne potrošače električne energije (u nastavku EE). Višak predaje u mrežu dok se iz mreže vraća kada je proizvedeno premalo EE.

### 2. BATERIJE

Služe za kratkoročno spremanje el. energije.

### 3. ELEKTROLIZATOR

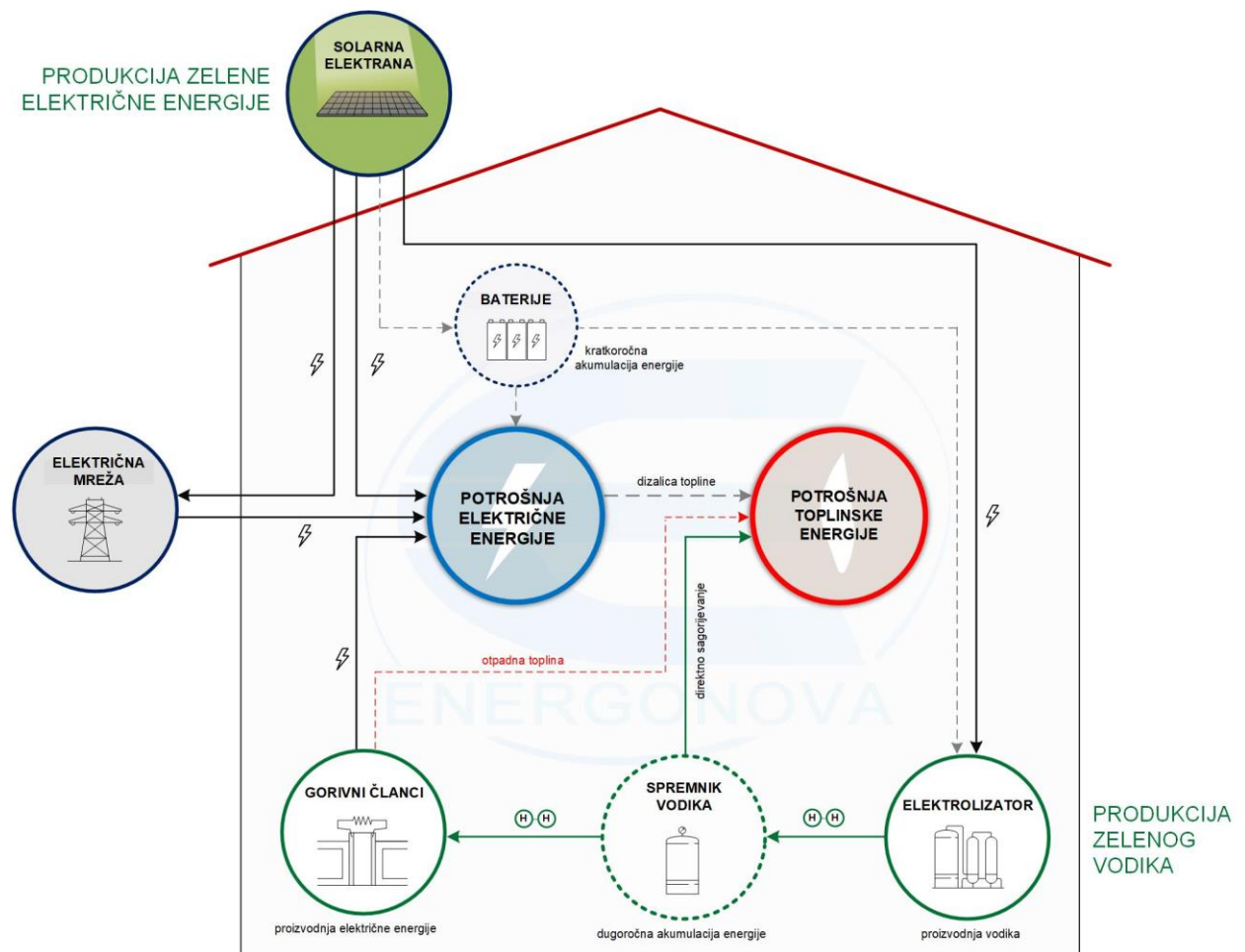
Metodom elektrolize vode proizvodi čisti vodik i kisik.

### 4. SPREMNICI VODIKA

Služe za dugoročnu pohranu vodika / energije.

### 5. GORIVNI ČLANCI

Proizvode električnu energiju za potrebu kućnih potrošača EE. Nusprodukt je otpadna toplina koja se može koristiti za grijanje kuće.



Slika 25 Vodikova ekonomija u zgradama

## 4.5 Oprema za proizvodnju, skladištenje i korištenje vodika

Razmatrana je proizvodnja i korištenje vodika pomoću dostupne opreme na internetu. Odabrana je oprema talijanske tvrtke H2Planet [16], trenutno dostupna na tržištu.

**Tablica 8 Konfiguracije dostupnih elektrolizatora**

TYPE/ FEATURES	HyPEM XP 480 (rack)	HyPEM XP 1000 (rack)	HyPEM XP 2000 (rack)	HyPEM XP 3300 (rack)
Hydrogen production	480 cc/min.	1000 cc/min.	2000 cc/min.	3300 cc/min.
H2 purity	6.0 (99.9999%)	6.0 (99.9999%)	6.0 (99.9999%)	6.0 (99.9999%)
Weight	20 kg	22 kg	25 kg	29 kg
Size	41x17,78x43,5cm	41x17,78x43,5cm	41x17,78x43,5cm	41x22,23x43,5cm
Release pressure	0-16 bar	0-16 bar	0-16 bar	0-16 bar
Power	224 W AC 190 W DC	360 W AC 306 W DC	448 W AC 381 W DC	960 W AC 816 W DC

**Tablica 9 Konfiguracije dostupnih kompresora vodika**

TYPE/ FEATURES	HP Version	LP Version
H2 flow rate input	0 - 2000 NI/hour	0 - 2000 NI/hour
H2 input pressure range	8-11 bar	1-5 bar
H2 output max. pressure	Adjustable up to 210 bar	Adjustable up to 30 bar
Skid weight	130 kg	130kg
Skid size	110x48x91 cm	110x48x91cm
Control box weight	20 kg	20kg
Control box size	42x25x51 cm	42x25x51cm

**Tablica 10 Konfiguracije dostupnih spremnika vodika**

TYPE/FEATURES	MyH2® 300	MyH2® 600	MyH2® 900	MyH2® 2000	MyH2® 3000	MyH2® 7000
Storage capability	300 liters	600 liters	900 liters	2000 liters	3000 liters	7000 liters
External volume	0,55 liters	1,4liters	1,7 liters	3,3 liters	5,8 liters	16,7 liters
Weight	2,4 kg	5 kg	6,9 kg	14 kg	22 kg	47 kg
Size	A: 31,5 cm D: 7 cm	A: 31,5 cm D: 10 cm	A: 38 cm D: 10 cm	A: 56 cm D: 11cm	A: 53 cm D: 15 cm	A: 108,5 cm D: 14 cm
Refilling pressure	5-12bar	5-12bar	5-12bar	5-12bar	5-12bar	5-12bar
Max pressure	30bar	30bar	30bar	30bar	30bar	30bar

**Tablica 11 Konfiguracije dostupnih gorivnih članaka**

TYPE/FEATURES	GreenHub 2 PRO 500	GreenHub 2 PRO 1000	GreenHub 2 PRO 2000	GreenHub 2 PRO 3000	GreenHub 2 PRO 5000
Rated power	400 W (AC) 450 W (DC)	800 W (AC) 900 W (DC)	1600W (AC) 1800W (DC)	2400W (AC) 2700W (DC)	4000W (AC) 4500W (DC)
Output AC	120/230 VAC 50/60Hz	120/230VAC 50/60Hz	120/230VAC 50/60Hz	120/230VAC 50/60Hz	120/230VAC 50/60Hz
Output DC	48 VDC	48 VDC	48 VDC	48 VDC	48 VDC
Output DC	12 VDC	12 VDC	12 VDC	12 VDC	24 VDC
H2 purity	99,995% (grade4.5)	99,995% (grade4.5)	99,995% (grade4.5)	99,995% (grade4.5)	99,995% (grade4.5)
Fuel pressure	6-25 bar	6-25 bar	6-25 bar	6-25 bar	6-25 bar
Fuel consumption	7 l/min.	14 l/min.	28 l/min.	42 l/min.	70 l/min.
Size	40x60x25 cm	40x60x25 cm	86x64x22 cm	86x64x22 cm	100x80x21 cm
Weight	23 kg (AC) 21 kg (DC)	43 kg (AC) 40 kg (DC)	58 kg (AC) 55 kg (DC)	79 kg (AC) 75kg (DC)	94 kg (AC) 90 kg (DC)

Snaga i kapacitet opreme odabrati će se procjenom te će se s odabranim performansama opreme napravljen proračun i analiza.

## 4.6 Odabir elektrolizatora i analiza proizvodnje vodika

Znamo da je proizvodnju vodika potrebno analizirati satno. U tablici 12 prikazana je približna proizvodnja elektrane po satima u pojedinom mjesecu. Tablica je napravljena prema algoritmu uzevši u obzir insolaciju, orijentaciju i kut postavljanja fotonaponske elektrane. Srednja angažirana snaga za vrijeme rada tvrtke 1.830 W. Polja označena crvenom bojom predstavljaju proizvodnju elektrane veću od angažirane snage tvrtke. To je „prostor“ u kojem imamo višak proizvedene energije koju možemo akumulirati.

**Tablica 12 Algoritam satne proizvodnje električne energije**

Mj.	Dani	Mjesečna proizvodnja [kWh]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	31	298	0	0	0	306	515	905	1.253	1.573	1.622	1.584	1.363	506	0	0	0	0
2	28	410	0	0	0	431	765	1.169	1.625	2.094	2.288	2.247	1.928	1.680	399	0	0	0
3	31	634	0	0	395	770	1.311	1.957	2.684	2.900	3.128	2.680	2.332	1.671	617	0	0	0
4	30	776	0	361	705	1.246	1.968	2.594	3.342	3.698	3.367	3.142	2.181	1.676	1.075	512	0	0
5	31	907	0	603	1.046	1.552	2.335	2.966	3.429	3.480	3.647	2.989	2.621	2.003	1.405	797	398	0
6	30	917	0	675	1.116	1.764	2.518	3.146	3.467	3.642	3.692	3.155	2.620	1.972	1.387	921	478	0
7	31	985	0	613	1.024	1.629	2.439	3.221	3.685	4.214	4.073	3.507	2.608	1.992	1.461	880	426	0
8	31	904	0	412	809	1.420	2.185	2.850	3.472	3.947	3.827	3.391	2.751	2.074	1.320	689	0	0
9	30	773	0	305	552	1.052	1.742	2.631	3.279	3.582	3.676	3.338	2.512	1.727	1.022	338	0	0
10	31	592	0	0	344	740	1.357	1.915	2.620	3.081	2.991	2.595	1.835	1.171	436	0	0	0
11	30	317	0	0	0	406	834	1.261	1.632	1.572	1.798	1.411	1.144	513	0	0	0	0
12	31	225	0	0	0	0	481	788	1.102	1.269	1.231	1.149	852	396	0	0	0	0
		7.737																

Zaključujemo da je bolje uzeti jači elektrolizator kako bismo u kratkom periodu dana proizveli što više vodika.

Procjenom je odabran elektrolizator „HyPEM XP 3300 (rack)“. Odabrani elektrolizator može proizvesti 3300 cc/min ili 0,0000050249 kg/h vodika. Potrošnja elektrolizatora je 816 W istosmjerne struje. Prema ulaznim podacima i tablici 12 napravljen je algoritam (tablica 13) mogućeg satnog rada odabranog elektrolizatora.

Tablica 13 Algoritam satnog rada elektrolizatora

Mjesec	Dani	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	[h/dan]	Mjesečno vrijeme rada [h]	Mjesečna proizvodnja [kg]
1	31																	0,0	0	0,00
2	28									56%	51%							1,0	28	0,46
3	31							105%	131%	159%	104%	62%						4,5	140	2,31
4	30						94%	185%	229%	188%	161%							4,5	135	2,24
5	31					62%	139%	196%	202%	223%	142%	97%						6,0	186	3,08
6	30					84%	161%	201%	222%	228%	162%	97%						6,0	180	2,98
7	31					75%	170%	227%	292%	275%	206%	95%						6,0	186	3,08
8	31						125%	201%	259%	245%	191%	113%						6,0	186	3,08
9	30						98%	178%	215%	226%	185%	84%						5,0	150	2,49
10	31							97%	153%	142%	94%							3,0	93	1,54
11	30																	0,0	0	0,00
12	31																	0,0	0	0,00
																			1.284	21,28

U tablici je prikazan rad elektrolizatora po satima i mjesecima. Rad elektrolizatora je prikazan u postocima koji predstavljaju odnos snage elektrolizatora i satne proizvodnje elektrane umanjene za potrošnju ureda. Vrijednost 100% predstavlja da električna energija taman pokriva snagu elektrolizatora, a vrijednost 200% predstavlja period kada ima viška električne energije za duplo jači elektrolizator, odnosno energija koju ne potroši elektrolizator biti će spremljena u baterije. Prema prikazanim satima rada algoritmom je određeno mjesečno vrijeme rada elektrolizatora u satima. Dobiven je rezultat 1.284 sati rada (direktno proizvodnje) u jednoj godini. Prema tome, procjena godišnje proizvodnje vodika odabranim elektrolizatorom je 21,28 kg direktno proizvodnje. Višak energije spremljene u baterijama, onaj višak koji je više nego dovoljan za dvije noći potrošnje biti će dodatno iskorišten za proizvodnju vodika. Dodatna proizvodnja vodika iz baterija određena je algoritmom, a rezultat je 40,85 kg.



**Tablica 14 Proizvodnja vodika odabranim elektrolizatorom**

<b>GENERATOR VODIKA - Proizvodnja</b>	
Električna snaga	816 W
Max. Proizvodnja [cc/min]	3.300
Generator vodika (PEM tehnologija) - cijena	23.232 €
Godišnja proizvodnja [kg]	40,85
Energetska vrijednost proizvedenog vodika [kWh]	4.911

## 4.7 Odabir gorivnih članaka i analiza proizvodnje električne energije

Procjenom je odabran gorivni članak „GreenHub 2 PRO 2000“. Odabrani gorivni članak može proizvesti 1.600 W izmjenične struje uz potrošnju 28 l/min vodika. Algoritmom je dobiven proračun moguće proizvodnje električne energije prikazan u tablici 14.

**Tablica 15 Proizvodnja električne energije odabranim gorivnim člancima**

<b>GORIVA ČELIJA - nazivne snage AC</b>	
Goriva ćelija GreenHub 2 PRO	1.600 W
Potrošnja vodika [l/min]	28,0 L/min
Goriva ćelija GreenHub 2 PRO - cijena	11.262 €
Potrošnja vodika [kg/h]	0,141 kg/h
<b>Godišnji sati rada</b>	<b>290</b>
<b>Godišnja proizvodnja električne energije gorivnom ćelijom</b>	<b>465 kWh</b>

Dakle, imamo akumulirano ukupno cca 40,85 kg vodika, a gorivni članci troše 0,141 kg/h. Gorivni članci prema tome mogu raditi samo 12 dana i proizvesti samo 465 kWh električne energije.

## 4.8 Akumulacija vodika

Vodik možemo spremati u spremnike posebne tehnologije zvane Metal Hydride. Metal Hydride tehnologija omogućava nam spremanje veće količine vodika na istom tlaku. Međutim takvi spremnici su iznimno skupi. U tablici 16 prikazano je koliko je potrebno navedenih spremnika u usporedbi s klasičnim spremnicima.

**Tablica 16 Spremanje vodika**

<b>Spremanje VODIKA</b>	
Masa vodika [kg]	<b>40,85 kg</b>
Količina vodika, [m <sup>3</sup> ]	487,76 m <sup>3</sup>
<b>Metal Hydride - MyH2 spremnik 1,5 - 30 bar</b>	
Kapacitete spremanja [L]	<b>3.000</b>
Težina [kg]	22 kg
Cijena MyH2 spremnika [€/kom]	5.000 €
Broj spremnika	<b>163</b>
<b>Ukupna cijena [€]</b>	<b>812.935 €</b>
<b>Tlačni spremnik 200 bar</b>	
Kapacitete spremanja [L]	<b>10.000</b>
Volume spremnika, V [L]	58 L
Cijena tlačnog spremnika [€/kom]	750 €
Broj spremnika	<b>49</b>
<b>Ukupna cijena [€]</b>	<b>36.582 €</b>

Usporedbom cijene lako se odlučiti za klasične spremnike. Ukoliko bismo odabrali klasični tlačni spremnik do 200 bar, potreban je kompresor izlaznog tlaka 210 bar. Odabran je kompresor prikazan u tablici 17.

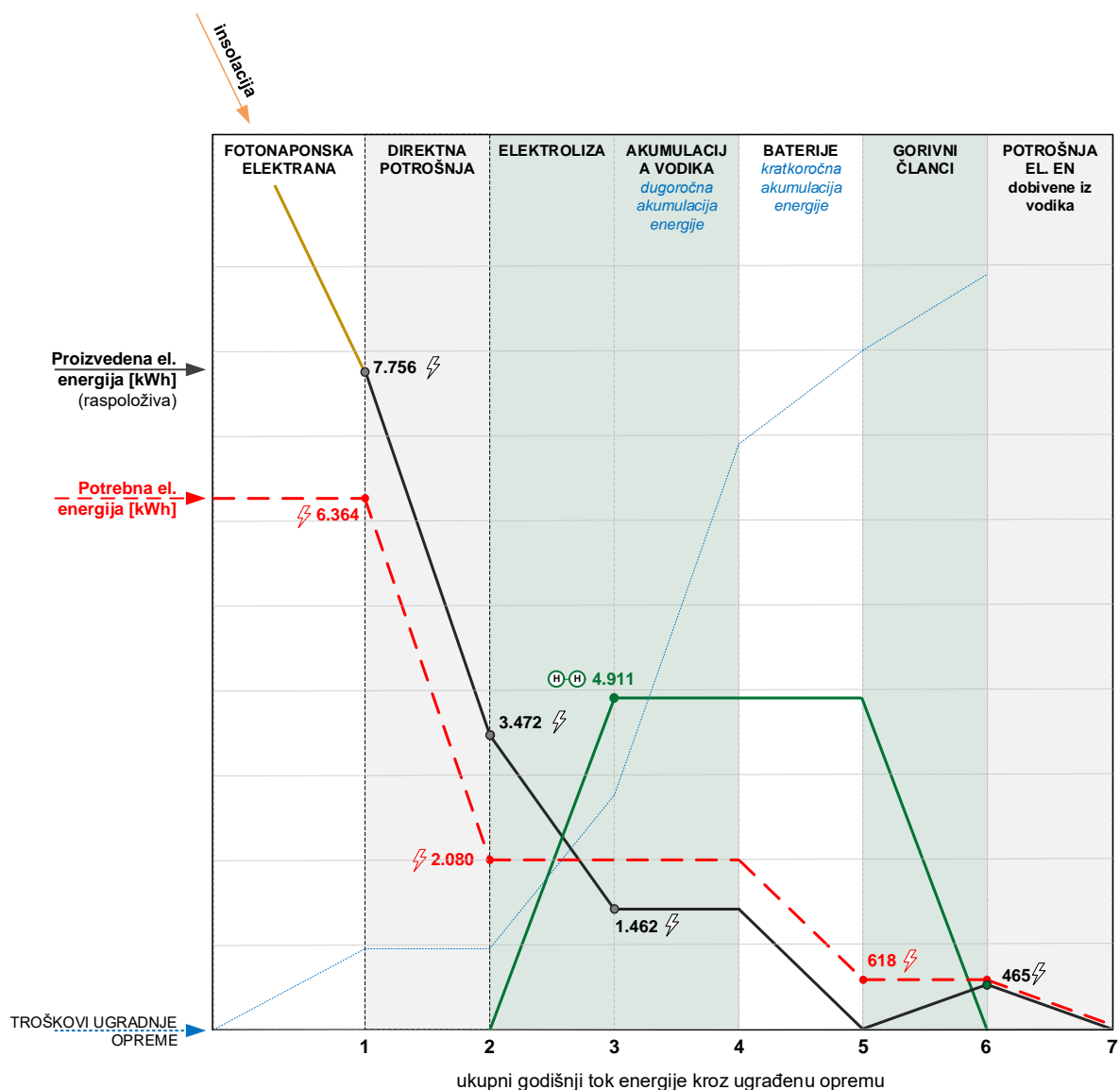
**Tablica 17 Kompresija vodika**

<b>KOMPRESOR</b>	
HyCOMP XT - HP Version - Protok H <sub>2</sub> 0 - 2.000 [L/h]	<b>15.675 €</b>

## 4.9 TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Proračun vodikove ekonomije u zgradi, u ovom radu, proveden je brzom metodom, na bazi trenutne potrošnje, moguće proizvodnje, trenutno dostupnom opremom na tržištu, algoritmom opisanim u ovom radu te ne predstavlja apsolutno točnu situaciju.

Radi lakšeg razumijevanja, rezultati dobiveni u prethodnim točkama prikazani su u grafu na slici 26.



Slika 26 Graf vodikove ekonomije u zgradi na bazi jedne godine

**Analiza grafa:****0 – 1 FOTONAPONSKA ELEKTRANA**

Instalirana fotonaponska elektrana bez spajanja na elektroenergetsku mrežu. Procjena ugradnje elektrane sa svim popratnim sadržajima je 11.333 €. Procjena godišnje proizvodnje električne energije ovom elektranom je 7.756 kWh.

**1 – 2 DIREKTNA POTROŠNJA**

Tijekom proizvodnje električne energije fotonaponskom elektranom direktno se troši energija na kućnim potrošačima.

**2 – 3 ELEKTROLIZA**

Viškovima električne energije iz FN elektrane proizvodi se vodik. Proračunom je dobiveno 4.911 kWh energetske vrijednosti proizvedenog vodika na što se utrošilo 2.010 kWh električne energije. Cijena je 23.232 €.

**3 – 4 AKUMULACIJA VODIKA**

Kompresija i akumulacija vodika u spremnike. Cijena je 52.257 €. *Potrošnja električne energije kompresora nije analizirana.*

**4 – 5 BATERIJE**

Spremanje viška električne energije u baterije za potrebe potrošnje preko noći i regulacije proizvodnje vodika. *Nije analizirana cijena.*

**5 – 6 GORIVNI ČLANCI**

Gorivnim člancima proizvodi se električna energija u vrijednosti 465 kWh. U zaključcima pod točkom 4.3 navedeno je da energija akumulirana u vodik treba zadovoljiti cca 1.083 kWh zimske potrebe za električnom energijom. Dakle u ovom aspektu nije zadovoljena zimska potreba radi koje se ustvari ugrađuje ova tehnologija. Cijena je 11.262 €. *Toplinska energija proizvedena ovim procesom nije analizirana.*

**6 – 7 POTROŠNJA**

Ukupna potreba za električnom energijom je zadovoljena.

Utrošeno je 2.101 kWh električne energije u proizvodnju vodika. Nakon akumulacije, iz toga vodika dobiveno je 465 kWh električne energije. Dakle učinkovitost sustava je cca 22 %. U tehnologiju je uloženo 86.751 € ne računajući baterije. Dakle investicija nije opravdana. S druge strane, mudrije bi bilo potrošiti energiju vodika od 4.911 kWh za grijanje direktnim sagorijevanjem.

## 5 ZAKLJUČAK

Ovim radom dokazano je da decentralizirana proizvodnja vodika, odnosno proizvodnja vodika za vlastite potrebe još uvijek nije isplativa. Cijena ugradnje opreme još uvijek je velika, a masovnom proizvodnjom opreme cijena bi trebala padati. Proračuni su napravljeni algoritmima koji ne predstavljaju točnu situaciju. Cilj simulacije ovog sustava bio je provjeriti da li vodikova ekonomija u zgradama ima potencijala u skorijoj budućnosti.

Ukoliko bi se ugradila samo elektrana za vlastitu proizvodnju sa spajanjem na elektroenergetsku mrežu, procjena povrata investicije bila bi 7 godina te time možemo reći da je elektrana isplativa. Elektrana za „akumulaciju“ energije koristi elektro mrežu.

---

U SVAKOM SLUČAJU, BEZ OBZIRA KOJU ZELENU TEHNOLOGIJU KORISTILI,  
VAŽNO NAUČITI ŠTEDNO KORISTITI ENERGIJU.

---

## 5.1 Literatura

1. Magdalena Bešlić: Vodikova ekonomija, 2021
2. [http://www.vanis.hr/hr/vodik/vodikova\\_energija.htm](http://www.vanis.hr/hr/vodik/vodikova_energija.htm)
3. Ogden, J. (1999). Prospects for building a hydrogen energy infrastructure. Annual Review of Energy and the Environment, str. 227-249.
4. International Energy Agency (2009). Springer Link. Dohvaćeno iz The International Energy Agency after 35 years: Reform needs and institutional adaptability: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11558-009-9063-8>
5. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Odr%C5%BEiva\\_energija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Odr%C5%BEiva_energija)
6. <https://termorad.hr/obnovljivi-izvori-energije-2/>
7. Iva Krenek: *Obnovljivi izvori energije*, Karlovac 2021
8. Ivan Cvrk: *Optimiranje korištenja solarne energije fotonaponskom pretvorbom*, Zagreb 2011
9. <https://eko.zagreb.hr/energija-sunca/85>
10. Miljensko Kokot: *Emulator rada fotonaponskog panela i neizraziti regulator za praćenje točke maksimalne snage na njegovim strujno-naponskim karakteristikama*, Zagreb 2011
11. <https://www.viessmann.hr/>
12. Ankica Kovač: *Proizvodnja vodika elektrolizom vode pomoću Sunčeve energije i fotonaponskog modula*, Zagreb 2013  
<https://scholar.google.hr/citations?user=25xsCJwAAAAJ&hl=en>
13. Ines Vedrina: *Dobivanje elementarno čistog vodika elektrolizom vode*, diplomski rad, Zagreb 2014
14. Bernard Franković, Claudia Jedriško, Kristian Lenić, Anica Trp: *Istraživanja i razvoj tehnologije vodika*, dostupno na: <https://bib.irb.hr>, preuzeto 28.05.2022.
15. Suzana Sopčić, *Gorivni članci s proton izmjenjivačkom membranom*, Zagreb 2011
16. <https://www.h2planet.eu/en>
17. Ankica Kovač: *Solar hydrogen power system for isolated passive house*, 2015.,  
<https://scholar.google.hr/citations?user=25xsCJwAAAAJ&hl=en>
18. Algoritmi tvrtke Energonova d.o.o.