

Planiranje sustava u kućanstvu za prelazak na obnovljive izvore energije

Lančić, Paulina

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:923266>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Paulina Lančić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Studentica:

Paulina Lančić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem mentorici Ankici Kovač na stručnoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Paulina Lančić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Paulina Lančić** Mat. br.: 0035204569

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Planiranje sustava u kućanstvu za prelazak na obnovljive izvore energije**
Naslov rada na engleskom jeziku: **Household system planning for the transition to renewable energy sources**
Opis zadatka:

Najlakši način za smanjenje računa za komunalne usluge je smanjivanje potrošnje energije samodisciplinom i povećanjem učinkovitosti. No, instaliranjem jednog ili više energetskih sustava koji koriste obnovljive izvore energije također se mogu postići veće, dugoročne uštede, čime se doprinosi i zaštiti okoliša. Odabir i kupnja ovakvog sustava veliki je i zahtjevan projekt jer nisu svi sustavi jednako isplativi i kompatibilni. I zato je cilj ovog rada razviti model strategiju za prelazak malih kućanstava na obnovljive izvore energije uzimajući u obzir postojeće važeće zakone i tržišne cijene u Republici Hrvatskoj.

U radu je potrebno:

1. Analizirati postojeće potrebe odabranog kućanstva za energijom.
2. Dimenzionirati sustav sunčane elektrane sukladno analiziranim potrebama.
3. Proračunati ostvarene uštede.
4. Provesti analizu troška instalacije sustava uključujući i povrat investicije.
5. Analizirati važeće zakone za instalaciju sunčane elektrane za potrebe kućanstva.

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

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

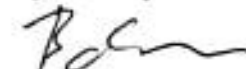
Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. Sunce – izvor energije.....	2
2.1 Održivi razvoj.....	2
2.2 Sunčeva energija	3
2.3 Sunčevo ozračenje.....	4
2.3.1 Utjecaj atmosfere	4
2.4 Iskorištavanje sunčevog potencijala.....	7
2.4.1 Iskorištavanje sunčevog potencijala u Hrvatskoj	9
3. FN članak	11
3.1 Fizikalne osnove.....	11
3.1.1 Kristali	11
3.1.2 Poluvodiči.....	12
3.1.3 Poluvodička dioda (PN-spoj).....	12
3.2 FN efekt.....	13
3.3 Matematički model FN članka	15
3.3.1 Serijski parazitski otpor FN članka	17
3.3.2 Paralelni parazitski otpor	18
3.3.3. Ekvivalentni električni krug	19
3.4 Snaga i učinkovitost FN članka.....	21
3.5 Tipovi FN članaka.....	24
3.6 Povezivanje FN članaka, modula i panela	26
4. FN sustavi	29

4.1 FN sustavi koji nisu priključeni na mrežu.....	29
4.2 FN sustavi koji su priključeni na mrežu.....	31
5. Projekt.....	33
5.1 Analiza potreba kućanstva	34
5.2 Analiza ozračenosti	35
5.3 Vršna snaga panela izračunata PVGIS servisom	36
5.4 Sunčana elektrana.....	39
5.4.1 Dostupna površina	39
5.4.2 FN sustav	39
5.4.3 DC spojna kutija	40
5.4.4 Izmjenjivač	42
5.4.5 Nosači FN modula	44
5.4.6 Naknada za priključenje	45
5.4.7 Montaža	45
5.5 Isplativost projekta	46
5.5.1 Modeli otkupa električne energije	46
5.5.2. Proračun.....	47
5.6 Važeći zakoni za instalaciju sunčane elektrane.....	54
6. Zaključak.....	57
7.Literatura.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Kapaciteti instaliranih FN modula kroz godine [4].....	3
Slika 2. Optička masa zraka [6].....	5
Slika 3. Spektar AM0 i AM1,5 [5].....	6
Slika 4. Srednja godišnja ozračenost svijeta [5].....	7
Slika 5. Novoinstalirani kapaciteti za iskorištavanje različitih obnovljivih izvora energije [9]	8
Slika 6. Godišnja ozračenost Hrvatske na horizontalnu plohu [10].....	10
Slika 7. PN-spoj [13]	13
Slika 8. FN članak [12].....	14
Slika 9. Apsorpcija Si FN članka [18].....	15
Slika 10. Ekvivalentni krug jednog FN članka [15].....	16
Slika 11. UI karakteristika FN članka s i bez osvjetljenja [15].....	17
Slika 12. Ekvivalentni električni krug FN članka sa serijskim parazitskim otporom [15].....	18
Slika 13. UI karakteristika bez i sa serijskim otporom [15].....	18
Slika 14. Ekvivalentni električni krug FN članka s paralelnim parazitskim otporom [15].....	19
Slika 15: UI karakteristika bez i s paralelnim otporom [15].....	19
Slika 16. Ekvivalentni električni krug sa serijskim i paralelnim parazitskim otporima [15].....	20
Slika 17. UI karakteristika idealnog i realnog FN članka [16].....	21
Slika 18. UI karakteristike monokristalnog FN članka pri različitim vrijednostima ozračenja [17]	22
Slika 19. Ovisnost UI karakteristike o temperaturi [17].....	23
Slika 20. Podjela FN članaka.....	24
Slika 21. Monokristalni, polikristalni te “thin film“ članci [6]	26
Slika 22. Serijsko spajanje 36 FN članaka [19].....	26
Slika 23. Serijsko povezivanje FN modula [19].....	27
Slika 24. Paralelno povezivanje FN modula [19].....	28
Slika 25. Podjela FN sustava	29
Slika 26. Hibridni otočni FN sustav [3].....	30
Slika 27. Sustav priključen na mrežu preko kućne instalacije [12].....	31
Slika 28. FN sustavi direktno spojen na mrežu [3]	32

Slika 29. Nacrt promatranog kućanstva.....	33
Slika 30. Vrijednosti ozračenosti različitih ravnina	36
Slika 31. PVGIS servis [30]	37
Slika 32. Povezivanje FN panela s objedinjenim nizovima [22].....	42
Slika 33. Prikaz kumulativnog Cashflow-a	49
Slika 34. Prikaz kumulativnog Cashflow-a – Net-metering.....	52
Slika 35. Prikaz koraka pri priključenju sustava s vlastitom proizvodnjom [21].....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Novoinstalirani i ukupni kapaciteti za iskorištavanje Sunčeve energije u RH	9
Tablica 2. Prikaz potrošnje analiziranog kućanstva.....	34
Tablica 3. Vrijednosti ozračenosti različitih ravnina i srednje temperature	35
Tablica 4. Očekivana dnevna i mjesečna proizvodnja i osunčanje.....	38
Tablica 5. Različiti FN moduli.....	40
Tablica 6. Podatci odabranog panela	41
Tablica 7. Značajke DC kutije	42
Tablica 8. Izmjenjivači.....	43
Tablica 9. Nosači Varista	45
Tablica 10. Troškovi sunčane elektrane.....	47
Tablica 11. Podatci potrebni za analizu isplativosti.....	47
Tablica 12. Izračun prihoda kroz 20 godina	49
Tablica 13. Izračun troškova i kumulativnog cashflow-a	50
Tablica 14. Neto sadašnja vrijednost	51
Tablica 15. Izračun prihoda kroz 20 godina (Net-metering)	52
Tablica 16. Izračun troškova i kumulativnog cashflow-a (Net-metering)	53
Tablica 17: Neto sadašnja vrijednost (Net-metering).....	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	W/m ²	Sunčevo ozračenje
H	J/m ²	Sunčeva ozračenost
m		Optička masa zraka
λ	m	Valna duljina
k	J/K	Boltzmannova konstanta
ϑ	°	Upadni kut sunčevog ozračenja
h	Js	Planckova konstanta
c _o	m/s	Brzina svjetlosti
ν	1/s	Frekvencija elektromagnetskog zračenja
P	W	Snaga FN članka
P _m	W	Maksimalna snaga FN članka
F		Faktor punjenja
η		Učinkovitost FN modula
j _{sc}	A/mm ²	Gustoća struje kratkog spoja
U _{uk}	V	Ukupni napon spojenih FN modula
U _i	V	Napon FN modula
I _{UK}	A	Ukupna struja spojenih FN modula
I _i	A	Struja FN modula

SAŽETAK

U ovom je radu provedena ekonomska analiza integracije fotonaponskog (FN) sustava priključenog na mrežu instaliranoga na obiteljskoj kući u Zagrebu. U prvom dijelu rada prikazan je značaj sunca kao izvora energije i njegov potencijal. Također, opisana je teorijska osnova rada FN članaka i sustava. U drugom dijelu rada prikazana uobičajena godišnja potrošnja analiziranog kućanstva, zatim je u PVGIS servisu analizirana ozračenost na lokaciji kuće, te je izračunata snaga sunčane elektrane potrebna da pokrije godišnju potrošnju električne energije kućanstva. Sukladno potrebnoj snazi sunčane elektrane dimenzionirane su komponente sustava. Odabrani su FN moduli i izmjenjivač te je izračunata ukupna cijena postavljanja sunčane elektrane sa svim komponentama uključujući i nosače, naknadu za priključenje i okvirnu cijenu montaže. Nakon toga provedene su dvije analize isplativosti projekta. U prvoj analizi razmatran je postupak u kojemu se 30% proizvedene električne energije odmah potroši za zadovoljavanje potrošnje kućanstva, dok se višak prodaje u mrežu. U drugoj analizi razmatran je postupak neto mjerenja u kojemu se višak proizvedene električne energije prividno pohranjuje u mrežu te se iskorištava u vrijeme kada FN moduli ne mogu pokriti potrošnju električne energije kućanstva. Na samom kraju prikazan je zakonski postupak koji je potrebno proći kako bi se instalirala sunčana elektrana.

Ključne riječi: fotonaponski članci, fotonaponski sustavi, sunčana elektrana, analiza isplativosti

SUMMARY

In this work it was presented an economic analysis of the installation of the photovoltaic (PV) system installed the roof of the family house in Zagreb. In the first part of the work, the Sun is presented as an energy source and its potential is analyzed. Furthermore, the theoretical basis of PV cells and systems was explained. In the second part it was analyzed the yearly electric consumption of a given household, then in PVGIS service it was calculated solar irradiance as well as the power of the solar power plant needed to meet the yearly demands of a given household. According to the required power of the solar power plant, the components of the system were chosen. The PV modules and inverter have been selected, and the price of the whole system was calculated including parts needed for installation as well as the installation itself. After that, two cost-effectiveness analysis were conducted. In the first analysis, it was taken that 30% of the generated electrical energy is used for self-consumption while the rest is sold to the grid. In the second analysis it was used net metering. Meaning that the surplus of generated energy is stored in the grid and that electricity is used when PV system cannot meet household demands. In the end, there are listed all legal requirements one must meet in order to install a solar power plant.

Key words: photovoltaic cells, photovoltaic systems, solar power plant, cost-effectiveness analysis

1.UVOD

Sunce predstavlja potpuno čist, besplatan i neograničen izvor energije. Ukupna godišnja dozračena sunčeva energija nekoliko je puta veća od ukupne svjetske godišnje potrošnje. No čak i u današnje vrijeme više od 80% energije dobiva se iz fosilnih goriva. Najveći nedostatak fosilnih goriva jest njihova štetna emisija koju nije moguće u potpunosti izbjeći. Ispuštanje stakleničkih plinova prilikom izgaranja goriva predstavlja opasnost kako za biljni i životinjski svijet, tako i za ljude, a u konačnici i za sam planet Zemlju jer su upravo staklenički plinovi jedan od razloga globalnog zagrijavanja. Također, izvori fosilnih goriva se nalaze u svega nekoliko zemalja te mogu dovesti do političkih nesuglasica, kao i do nesigurnosti opskrbe. Upravo zbog toga, danas sve veći broj zemalja potiče prelazak na obnovljive izvore energije (OIE).

2. Sunce – izvor energije

2.1 Održivi razvoj

Održivi razvoj podrazumijeva oblikovanje politika i strategija gospodarskog i socijalnog napretka bez štete za okoliš. Cilj je osigurati da trenutni razvoj ne ugrožava budućnost nadolazećih naraštaja, što podrazumijeva održivo korištenje prirodnih izvora na međunarodnoj i nacionalnoj razini. Podrazumijeva se maksimalna moguća primjena novih tehnologija s ciljem zaštite prirode i očuvanja okoliša.

Tri stupa održivoga razvoja jesu: gospodarska učinkovitost, društvena odgovornost i zaštita okoliša. Upravo ljudi pokušavaju povećati gospodarsku učinkovitost različitim ekonomskim modelima, a istovremeno ovise o zemljinim resursima. Na taj su način stupovi održivog razvoja u interakciji te utječu jedan na drugoga.

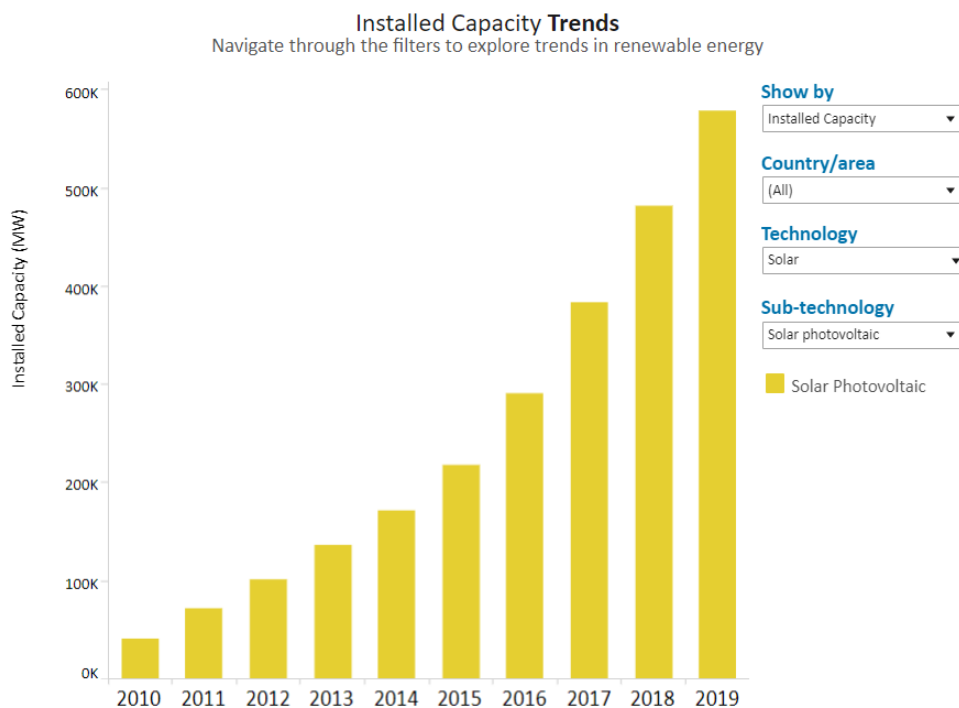
Prema podacima International Energy Agency (IEA), analizom globalne potrošnje energije 2019. godine ustanovljeni su sljedeći rezultati; najčešće korišteni izvori energije jesu ugljen, plin i nafta koji redom zadovoljavaju 26% , 23% i 31% ukupne globalne potrošnje. Slijede ih nuklearna energija i biomasa, dok OIE pokrivaju svega 10% ukupne globalne potrošnje. Trenutno najčešće korišteni izvori energije imaju posljedice poput stvaranja stakleničkih plinova, globalnog zagrijavanja, zagađenja okoliša, te generiranja opasnog otpada. Smanjuju kvaliteta života ljudi, a konačno ih i ugrožavaju. Ograničenih su resursa, te mogu u budućnosti predstavljati geo-politički problem. Stoga je potrebno poticati razvoj tehnologija koje koriste OIE, jer upravo su oni jedina dugoročno održiva opcija za opskrbu energijom [1].

OIE podrazumijevaju: sunčevu energiju, energiju vjetra, energiju vode (energiju valova, energiju morskih struja, toplinsku energiju oceana, energiju plime i oseke), geotermalnu energiju te biomasu.

U nastavku rada, razmatrat će se sunčeva energija. Iako tehnologija koja koristi sunčevu energiju ima nizak stupanj učinkovitosti, treba uzeti u obzir da je godišnja insolacija nekoliko tisuća puta (približno 7500) veća od ukupne svjetske energetske potrošnje [2].

2.2 Sunčeva energija

Danas se sunčeva energija koristi za proizvodnju električne i toplinske energije. Temeljni načini izravnog iskorištavanja Sunčeve energije jesu: fokusiranje Sunčeve energije, Sunčevi kolektori te FN moduli. Prilikom fokusiranja Sunčeve energije, govorimo o Sunčevim elektranama, koje se koriste za pogon velikih generatora struje. Sunčevi kolektori mogu biti ravni ili tanjurasti. Ravni Sunčevi kolektori apsorbiraju Sunčevu energiju, zagrijavaju zrak ili tekućinu koji predaju toplinski tok vodi ili direktno zagrijavaju prostor. Tanjurasti Sunčevi kolektori koncentriraju Sunčevo ozračenje, zagrijavaju radnu tvar koja pogoni Stirlingov toplinski stroj te on proizvodi električnu energiju. FN moduli pretvaraju Sunčevu energiju u električnu. U proteklim se godinama na globalnoj razini pojavljuje pozitivan trend postavljanja FN modula, što uvelike doprinosi iskorištavanju Sunčeve energije [3].



Slika 1. Kapaciteti instaliranih FN modula kroz godine [4]

2.3 Sunčevo ozračenje

Potrebno je razlikovati pojmove Sunčevog ozračenja i ozračenosti. Sunčevo ozračenje (iradijacija ili insolacija) predstavlja gustoću energetskega toka Sunčevog zračenja koje pada na neku površinu, te se označava kao E [W/m^2], dok ozračenost (iradijacija) predstavlja gustoću dozračene energije koja u nekom promatranom vremenskom periodu t upadne na jediničnu površinu plohe. Ona se označava kao H [Wh/m^2 ili J/m^2]. Sunčeva ozračenost može ovisno o vremenskom intervalu biti satna, dnevna, mjesečna ili godišnja [5,6].

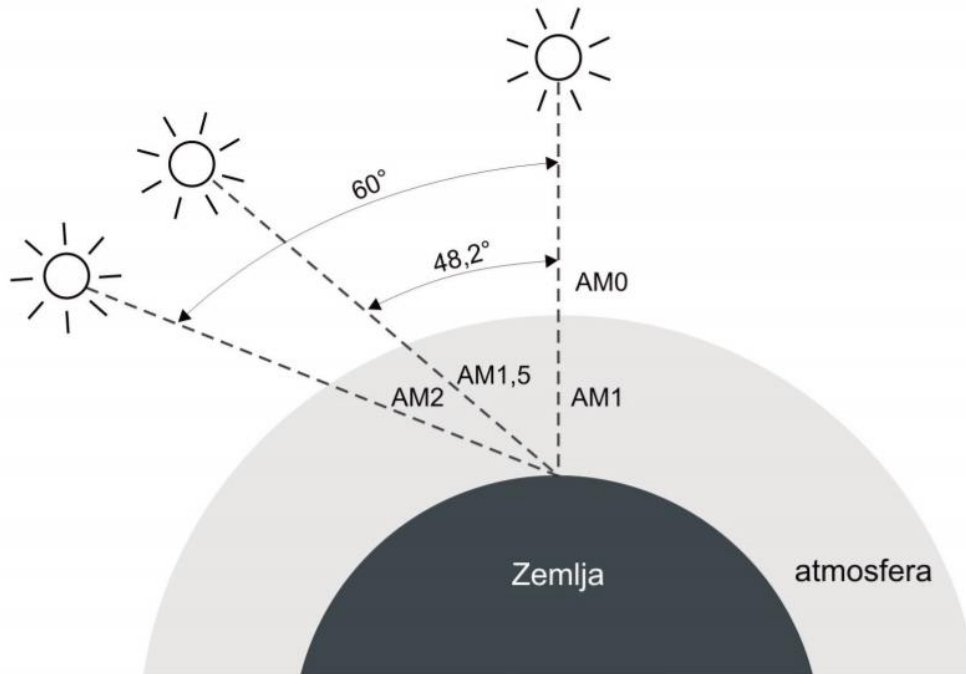
$$H = \int E dt \quad (2.1)$$

2.3.1 Utjecaj atmosfere

Sunčevo ozračenje na putu kroz Zemljinu atmosferu slabi, jer se dijelom raspršuje i na molekulama plinova i česticama prašine i dima, te apsorbira zbog interakcija s plinovima i vodenom parom.

Stupanj slabljenja ovisi o fizikalnim i kemijskim značajkama atmosfere, te o dužini puta sunčevog zračenja kroz atmosferu [7].

Optička masa zraka m izražava se kao omjer duljine puta Sunčevih zraka kroz atmosferu i najkraćeg mogućeg puta kroz atmosferu. Kada se sunce nalazi direktno iznad promatrana točke, optička masa zraka je najmanja.



Slika 2. Optička masa zraka [6]

Za sunčeve zrake koje dolaze okomito na površinu optička masa zraka će biti $m = 1$, a za zrake koje s obzorom zatvaraju kut od 60° optička masa zraka iznosit će $m = 2$ [6,7].

2.3.1.1 Raspršenje ozračenja

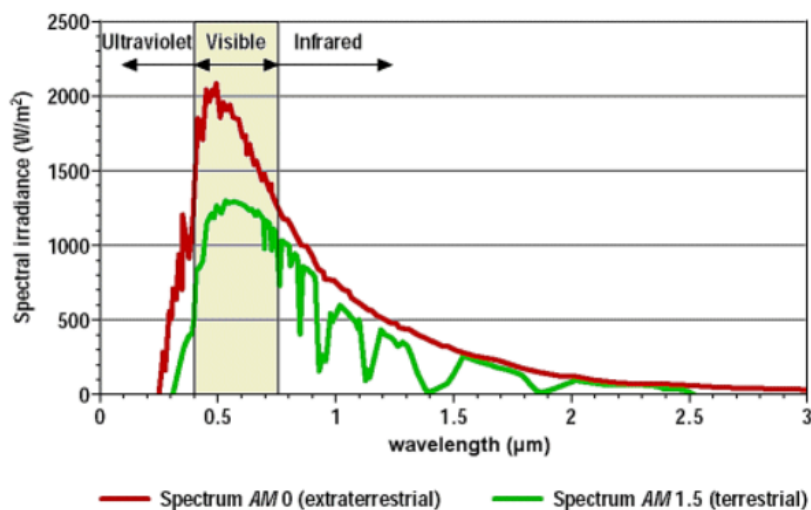
Kada sunčevo ozračenje dođe u doticaj s molekulama plina ili česticama, pobuđuje ih na titranje. Prilikom toga, primljenu energiju čestica zrači u svim smjerovima, dakle energija se više ne širi u samo jednom smjeru već na sve strane. Pobuđena molekula više neće emitirati elektromagnetsku energiju istom spektralnom raspodjelom kakvu je primila, nego će promijeniti udio valnih duljina. Raspršenje elektromagnetskog zračenja na česticama promjera mnogo manjeg od valne duljine naziva se Rayleighovo raspršenje. On je utvrdio zakonitost odnosa valne duljine i intenziteta raspršivanja.

$$D = \frac{k}{\lambda^4} \quad (2.2)$$

Vidljivo je da je raspršivanje proporcionalno s četvrtom potencijom valne duljine, što znači da će se, kada se radi o vidljivom spektru, ljubičaste zrake raspršiti više nego crvene. Sredinom dana put sunčeva ozračenja do tla je kraći nego prilikom izlaska ili zalaska sunca, pa je raspršivanje manje zamjetno. Raspršeno ozračenje tada sadrži više kratkovalnog ozračenja dajući nebu plavu boju. S druge strane, kada se sunce spušta prema obzoru, raspršenje se povećava i udio kratkovalnog ozračenja se smanjuje, zbog toga preostaje žuto i crveno ozračenje [6].

2.3.1.2 Apsorpcija ozračenja

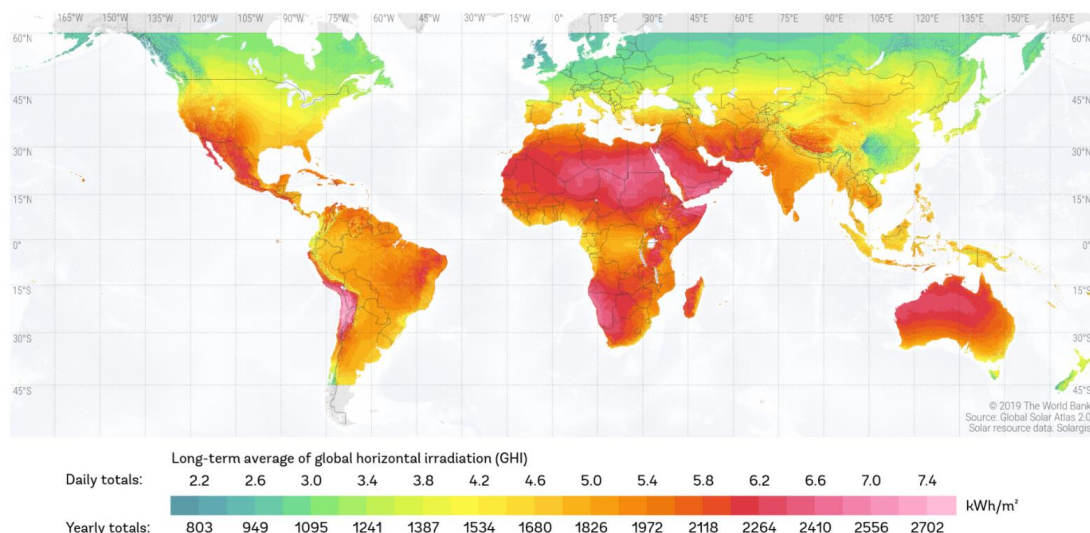
Apsorpcija slabi intenzitet samo pojedinih valnih duljina sunčeva ozračenja. Kisik, ugljični dioksid ozon i dušik značajnije sudjeluju u apsorpciji, dok dušični oksidi, ugljični monoksid i metan sudjeluju zanemarivo. Tako npr. dušik upija samo zračenje s valnom duljinom manjom od $0,2 \mu\text{m}$. Konačno, razlikujemo spektar AM0 i spektar AM1.5 (AM = air mass). Spektar AM0 odnosi se na Sunčevo ozračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu (ekstraterestičko ozračenje), koje se opisuje gustoćom energetskog toka koji upada na određenu površinu okomitu na smjer Sunčevih zraka. Spektar AM0 koristi se kod sunčanih članaka predviđenih za rad u svemiru. Spektar AM1.5 odnosi se na Sunčevo ozračenje koje dolazi do površine mora ako je upadni kut $\vartheta = 48.19^\circ$ [3,5,6].



Slika 3. Spektar AM0 i AM1,5 [5]

2.4 Iskorištavanje sunčevog potencijala

Idealni uvjeti za iskorištavanje Sunčeve energije jesu u ekvatorijalnim i suptropskim područjima, a prema polovima potencijal za iskorištavanje Sunčeve energije pada. Razlog tomu je sve duži put sunčevih zraka kroz atmosferu. Kako je ranije objašnjeno, zbog toga je raspršenje sve veće te do zemlje dolazi manja količina energije. No sunčev potencijal ne ovisi samo o geografskoj širini, nego u obzir treba uzeti i broj sunčanih sati na nekom području. Prema slici 4, područja najvećeg ozračenja prikazana su crvenom bojom, iz čega je vidljivo da Europa, pa tako i Hrvatska nisu idealno pozicionirane. No, stalnim razvojem tehnologija za iskorištavanje Sunčeve energije primjećuje se stalan porast na globalnoj razini.

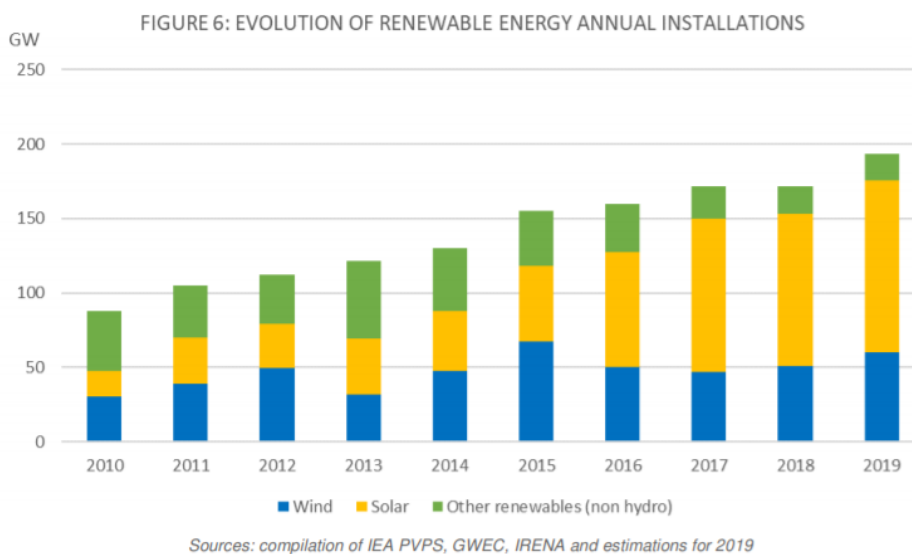


Slika 4. Srednja godišnja ozračenost svijeta [5]

Analizom koju je provela internacionalna agencija za energiju IEA, dobiveni su sljedeći rezultati: kada je riječ o FN sustavima na svjetskoj razini, prema rezultatima prikupljenima 2019. godine, Kina je prva zemlja po ukupnom instaliranom kapacitetu. Nakon nje slijedi Europska Unija (EU) kao cjelina, te Amerika. U Europi, Njemačka prednjači po ukupnom instaliranom kapacitetu koji iznosi 49,2 GW. Zanimljivo je također, da je upravo Njemačka zemlja s najvećim Watt/stanovnik omjerom. Kina i Indija su pak vodeće zemlje u razvojnim projektima Sunčanih elektrana. Trenutno

najveća sunčana elektrana (1547 MW) nalazi se u Kini i poznata je pod nazivom Tengger Desert Solar Park.

Danas se smatra da će upravo Sunčeva energija odigrati ključnu ulogu u energetskej tranziciji, zbog brzog razvoja tehnologije te sve pristupačnijih cijena. Kada se pogleda slika Slika 5, jasno je vidljivo da je u proteklih devet godina najviše novoinstaliranih kapaciteta elektrana koje koriste sunčevu energiju, čineći čak 59%. Utjecaj iskorištavanja Sunčeve energije na smanjenje emisije ugljikovog dioksida (CO₂) prilikom proizvodnje struje je značajan. Ako se uzme u obzir ukupan kapacitet svih instaliranih FN sustava, izračunato je da se izbjeglo 720 Mt CO₂, što predstavlja 5,5% emisija čitavog sektora za proizvodnju struje [9].



Slika 5. Novoinstalirani kapaciteti za iskorištavanje različitih obnovljivih izvora energije [9]

2.4.1 Iskorištavanje sunčevog potencijala u Hrvatskoj

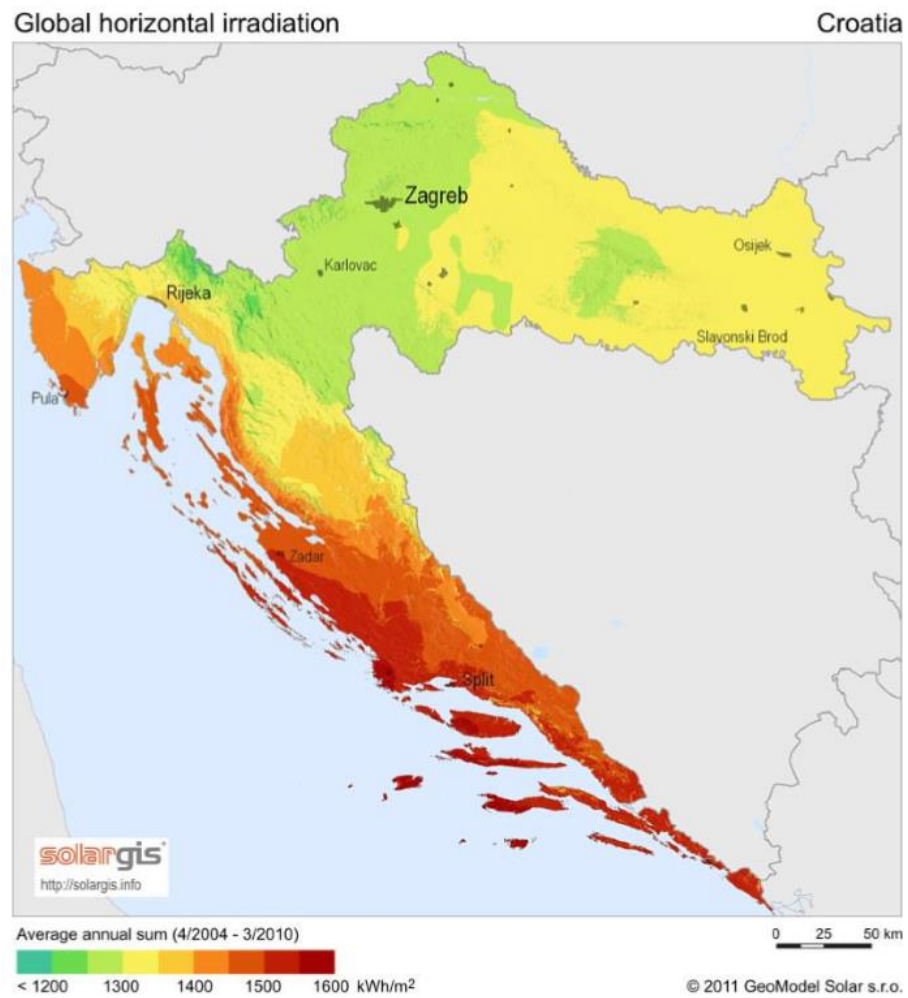
Hrvatska se obvezala, kao članica EU, na prihvaćanje europskog klimatskog-energetskog plana, a time i direktivu 2009/28/EZ. Prema njoj, u ovoj godini (2020.) udio energije OIE treba dostići 20% u konačnoj bruto potrošnji energije. Prema posljednjim objavljenim podacima EUROSTAT-a, za 2018. godinu čitava EU je dostigla je 18%, a Hrvatska 28%. Kada se analizira električna energija, udio OIE u ukupnoj bruto potrošnji električne energije u Hrvatskoj iznosi 48%.

U tablici 1, sumirani su podaci tvrtke EurObservER. U stupcima su redom prikazani podaci o novoinstaliranim kapacitetima za iskorištavanje sunčeve energije u toj godini te ukupnim instaliranim kapacitetima izraženi u MWh. Usporedbe radi, prema procjenama potencijala Sunčeve energije objavljenih u Solarnom priručniku iz 2007. godine, potencijal proizvodnje energije iz FN sustava i sunčanih elektrana iznosi 33 TWh/god. Iz ovoga je jasno da Hrvatska iskorištava gotovo zanemariv postotak svog punog potencijala.

Tablica 1. Novoinstalirani i ukupni kapaciteti za iskorištavanje Sunčeve energije u RH

	Novoinstalirani kapaciteti (MWh)	Ukupni kapaciteti (MWh)
2015	15	132
2016	15.1	143
2017	15.1	158
2018	15.9	175
2019	13.6	185.9

Iz slike 6, može se iščitati da Hrvatska ima veliki potencijal za razvoj projekata vezanih na Sunčevu energiju. Kao najpogodnije županije pokazale su se Splitsko-dalmatinska sa ozračenosti između 1,60 - 1,35 MWh/m², Šibensko-kninska sa srednjom dnevnom ozračenošću od 1,54 MWh/m² te Dubrovačko-neretvanska s ozračenošću 1,60-1,50 MWh/m².



Slika 6. Godišnja ozračenost Hrvatske na horizontalnu plohu [10]

3. FN članak

3.1 Fizikalne osnove

Da bi se uspješno projektirala sunčana elektrana, potrebno je upoznati princip rada FN članka i njihove karakteristike, također je potrebno upoznati matematički model FN članka kako bi se odredio utjecaj sunčeva ozračenja na električnu struju koju članak generira. Potrebno je razumjeti principe povezivanja FN članaka u module kako bi se u konačnici sukladno tomu mogla dimenzionirati sunčana elektrana.

3.1.1 Kristali

Kristali su čvrsta tijela u kojima se ponavlja trodimenzionalni raspored atoma iona ili molekula. Oni imaju pravilnu međusobnu udaljenost te tvore kristalnu rešetku. U stvarnosti potpuno pravilna kristalna rešetka je idealizacija, jer je njena pravilnost narušena različitim utjecajima (toplinskim, klizanjem materijala,...). Materijali od kojih se izrađuju FN članci dolaze u obliku monokristala, polikristala ili kao amorfne tvari.

Razlikuju se prema sljedećem principu: kada se čitav aktivni obujam članka sastoji samo od jednog kristala, takav se članak naziva monokristalnim. Ako se u procesu rasta kristala formira više kristala te se iz tog bloka izreže pločica za izradu FN članka, takav se članak naziva polikristalnim. Pod amorfne tvari podrazumijevaju se one tvari koje ne posjeduju pravilan raspored atoma duljeg doseg. Amorfne tvari nastaju hlađenjem rastaljenog materijala te se molekule ne stignu formirati u pravilnu rešetku.

Valja još spomenuti mikromorfne materijale. O njima se govori kada je veličina kristala vrlo mala (ispod 2 nm). Tada je teško razlikovati radili se o kristalnoj ili amorfnoj fazi s obzirom da i amorfne tvari na malim udaljenostima imaju pravila raspored. U graničnom području između kristalne i amorfne faze govori se o nanokristalnoj fazi. Ona dakle ime amorfnu fazu unutar koje se nalaze kristalna zrnca. Konačno, upravo je nanokristalni silicij materijal koji ima povoljnije značajke od amornog silicija zbog veće pokretljivosti elektrona te povećane apsorpcije fotona u crvenom i infracrvenom području sunčeva spektra. Većina FN članaka izrađena je od poluvodiča poput silicija. Poluvodiči su materijali koji imaju bolju električnu vodljivost od izolatora, a lošiju od vodiča [12].

3.1.2 Poluvodiči

Potrebno je razlikovati čiste poluvodiče te poluvodiče s primjesama. Čisti poluvodiči sastoje se od atoma samo jednog elementa te nemaju nikakve dodatne primjese. Ako pak imaju neke primjese (nečistoće), oni ih sadrže tako malo da ne utječe na njihove značajke.

Ako se čistom poluvodiču (npr. Si) dodaju primjese tada se od čistog silicija može dobiti p-tip ili n-tip poluvodiča.

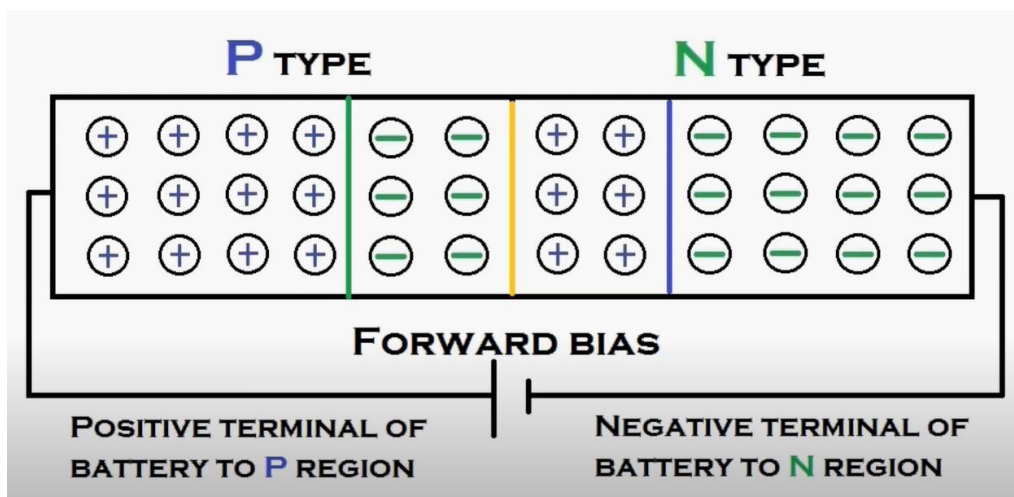
Kada se atom silicija u kristalnoj rešetki zamijeni nekim peterovalentnim atomom (npr. Atomom fosfora), njegova četiri valentna elektrona popune kovalentne veze s ostalim atomima silicija i peti elektron više nije zadržan u kemijskoj vezi, već ga atom fosfora privlači slabom kulonskom vezom. Takva veza se vrlo lako prekida. Tada primjesa fosfora ostaje jednostruko pozitivno nabijena, a atom fosfora naziva se donorom jer daje vodljivi elektron rešetki. Ovakav silicij se naziva n-tip.

Drugi je slučaj kada se atom silicija u kristalnoj rešetki zamijeni nekim trovalentnim atomom (npr. Atomom bora). U tom slučaju njegova tri valentna elektrona popune kovalentne veze s ostalim trima susjednim atomima silicija, dok kod četvrtog atoma nastaje šupljina. Zbog toga se elementi treće skupine nazivaju akceptorima jer imaju sposobnost primanja elektrona. Ovakav silicij se naziva p-tip [12].

3.1.3 Poluvodička dioda (PN-spoj)

Poluvodička dioda nastaje spajanjem p-tipa i n-tipa poluvodiča. Granica ta dva područja je PN-spoj. Upravo je PN spoj osnova za rad FN članka. Na p-tip strani poluvodiča većinski nositelji naboja su šupljine a na n-tip elektroni. Kada se formira PN-spoj, slobodni elektroni n-područja započinju difuziju prema p-području. Tamo se spajaju s šupljinama p-područja. Zbog toga n-područje gubi elektrone te se uz PN-spoj stvara sloj pozitivnog naboja s n-područja. S druge strane kada se slobodni elektroni spoje s šupljinama p-područja stvara se sloj negativnog naboja uz PN-spoj s p-područja. To se područje pozitivnog i negativnog naboja uz PN-spoj naziva prijelazni sloj. U prijelaznom sloju ne postoje slobodni elektroni. Prema Coulombovom zakonu poznato je da postoji sila koja djeluje na pozitivne i negativne naboje u neposrednoj blizini. Upravo te sile između pozitivnog i negativnog naboja u prijelaznom sloju stvaraju električno polje te električni

potencijal koje blokira daljnju difuziju elektrona prema p-području. Ako se na takav PN-spoj priključi izvor vanjskog napona u propusnom smjeru, tako da je pozitivan pol na p-strani, a negativan na n-strani, struja potekne iz n-područja prema p-području [12,13].



Slika 7. PN-spoj [13]

3.2 FN efekt

Sunčevo ozračenje ponaša se kao val i kao čestica (foton). Fotoni posjeduju energiju. Kada se FN članak osvjetli (kada fotoni pogode FN članak), oni mogu biti upijeni, mogu proći kroz članak i mogu se reflektirati. Samo upijeni fotoni, koji sadrže različite količine energije i odgovaraju različitim valnim duljinama Sunčevog spektra, daju energiju za oslobađanje elektrona i proizvodnju struje.

Za nastanak struje važni su slobodni elektroni, no vezani elektroni se također mogu osloboditi veza s atomom ili molekulom, ako prime energiju koja je veća od energije kojom su vezani. Potrebnu energiju za oslobađanje dobivaju od sudara s fotonima. Dakle, foton mora imati energiju veću ili jednaku energiji vezivanja elektrona, kako bi se elektron oslobodio, pri čemu se višak energije

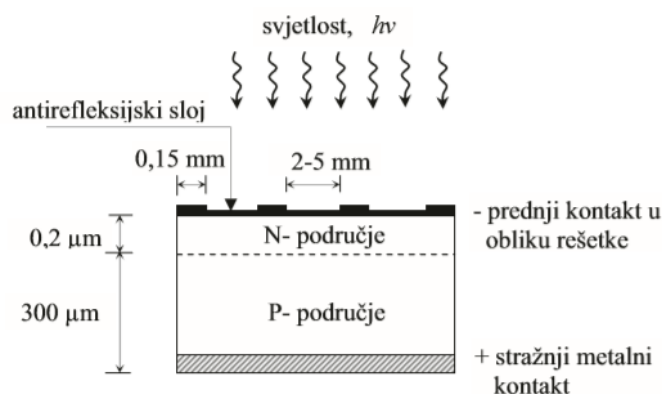
fotona pretvara u kinetičku energiju elektrona. Ako se dogodi da je energija fotona manja od energije vezivanja elektrona, elektron se neće osloboditi.

Energija fotona prikazana je Einsteinovom formulacijom:

$$E = h\nu = h \frac{c0}{\lambda} \quad (3)$$

Gdje je:

h (Js) – Planckova konstanta, ν (1/s) – frekvencija promatranog elektromagnetskog zračenja, c_0 (m/s) – brzina svjetlosti, λ (m) – valna duljina

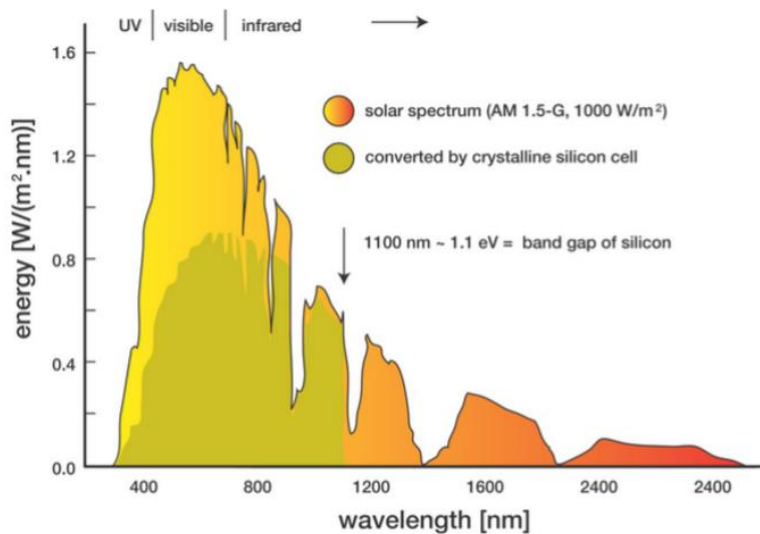


Slika 8. FN članak [12]

Na slici 8, vidi se p-područje i n-područje jednog Si FN članka. Kada se FN članak osvjetli, apsorbirani fotoni pobuđuju elektrone te se proizvode parovi elektron-šupljina. Ako je apsorpcija daleko od PN-spoja, par se brzo rekombinira. Ako je pak apsorpcija u blizini PN-spoja, nastali elektron ili šupljina se odvajaju te se elektron giba prema n-području a šupljina prema p-području. Elektroni i šupljine se sakupljaju, na različitim strana PN-spoja i dolazi do pojave napona. Kontakt na p-području postaje pozitivan, a kontakt na n-području negativan te spajanjem tih kontakata s vanjskim trošilom zatvara se strujni krug. Kao što je vidljivo, na p-području postoji stražnji metalni kontakt, dok na n-području postoji kontakt u obliku rešetke koja ne prekriva više od 5% površine. Također na rešetci se nalazi antirefleksijski sloj koji povećava djelotvornost članka [12].

Kada se govori o pobuđivanju elektrona, važno je naglasiti da energija pobuđivanja varira od materijala do materijala. Stoga, ako se npr. radi o Si člancima potrebna je energija od 1,1 eV da bi elektron mogao 'preskočiti' prijelazni sloj, odnosno prijeći s n-područja na p-područje kako bi struja mogla poteći.

Na slici 9, prikazan je AM1,5 spektar, od kojega se samo zeleno obojan dio apsorbira u monokristalni ili polikristalni Si članak te omogućava oslobađanje elektrona i stvara struju, dok fotoni crveno obojanog dio spektra nemaju dovoljno energije da uzrokuje odvajanje elektrona te prolaze kroz članak. Fotoni žutog djela spektra također mogu stvarati električnu struju, dok se ostatak energije pretvara u toplinu te zagrijava FN članak.

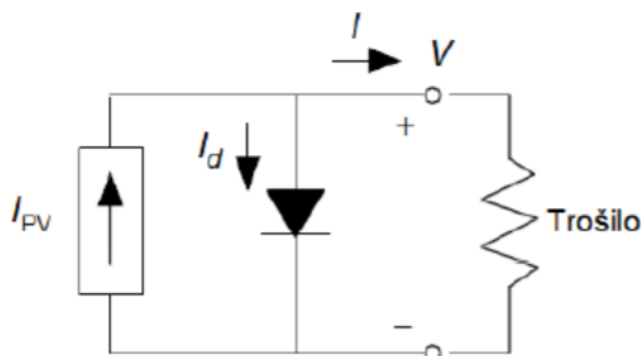


Slika 9. Apsorpcija Si FN članka [18]

3.3 Matematički model FN članka

Cilj matematičkog modeliranja FN članka jest odrediti međusoban utjecaj električne struje i napona pri različitim vrijednostima Sunčevog ozračenja te različitim temperaturama FN modula.

Pojednostavljen krug FN članka prikazuje se kao poluvodička dioda paralelno spojena s idealnim strujnim izvorom koji predstavlja sunčevo ozračenje [14,15].



Slika 10. Ekvivalentni krug jednog FN članka [15]

Struja koja teče kroz trošilo izražava se kao:

$$I = I_{PV} - I_D \quad (3.1)$$

Gdje su:

I (A) - struja koja teče kroz trošilo priključeno na FN modul, I_{PV} (A) - struja FN modula, I_D (A) - struja koje teče kroz diodu

Struja diode izražava se kao:

Gdje su:

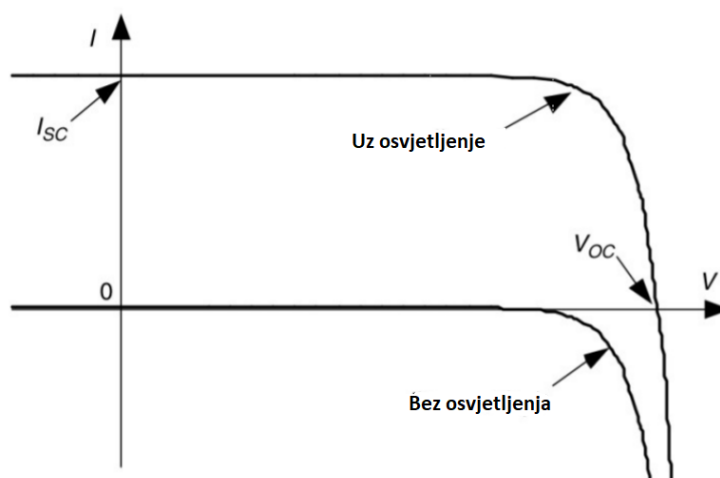
$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU_D}{akT} - 1\right) \right] \quad (3.2)$$

I_0 (A) - rezervna struja zasićenja, U_D (V) - napon na izvodima diode, a -faktor idealnosti diode, k (J/K) - Boltzmannova konstanta, e (C) - elementarni naboj elektrona, T (K) - temperatura FN članka

Uvrštavanjem jednadžbe (3.2) u (3.1) dobiva se izraz:

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU_D}{akT} - 1\right) \right] \quad (3.3)$$

Ovaj izraz predstavlja radnu (UI) karakteristiku FN članka. Najvažniji dio UI karakteristike FN članka nalazi se u četvrtom kvadrantu, jer je to područje u kojem se generira električna energija. Zato se često prikazuje zrcaljeni četvrti kvadrant. Na slici 11, prikazana je UI karakteristika. U slučaju bez osvjetljenja ona ima oblik karakteristike poluvodičke diode, a u slučaju osvjetljenja, UI karakteristika je ista onoj bez osvjetljenja uvećanoj za I_{PV} [15,16].



Slika 11. UI karakteristika FN članka s i bez osvjetljenja [15]

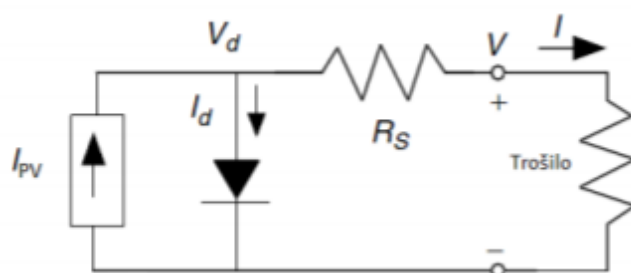
Dvije bitne veličine na UI karakteristikama jesu:

STRUJA KRATKOG SPOJA (I_{sc}) - je struja FN članka uz kratko spojen izlaz

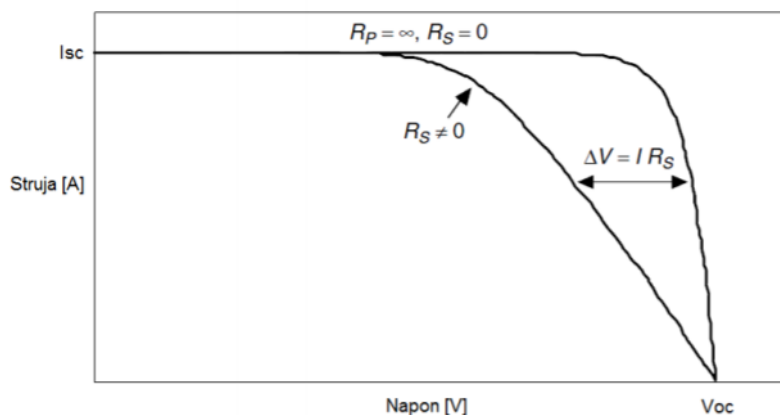
NAPON PRAZNOG HODA (U_{oc}) - napon na stezaljkama FN članka

3.3.1 Serijski parazitski otpor FN članka

U FN članku javljaju se pojave koje utječu na njenu UI karakteristiku. Naime, javljaju se gubici zbog otpora poluvodičkih materijala u PN sloju, javlja se otpor metalne rešetke i otpor metalnih kontakata. Takva vrsta gubitaka naziva se serijskim parazitskim otporom. Poželjno je da R_S otpor bude što manji, a u idealnom FN članku jednak je nuli. Učinkovitost FN članka je osjetljiva na male promjene R_S [15].



Slika 12. Ekvivalentni električni krug FN članka sa serijskim parazitskim otporom [15]

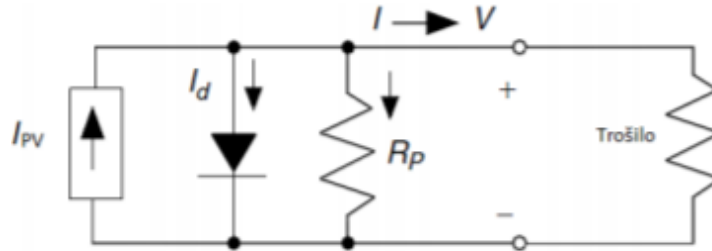


Slika 13. UI karakteristika bez i_s sa serijskim otporom [15]

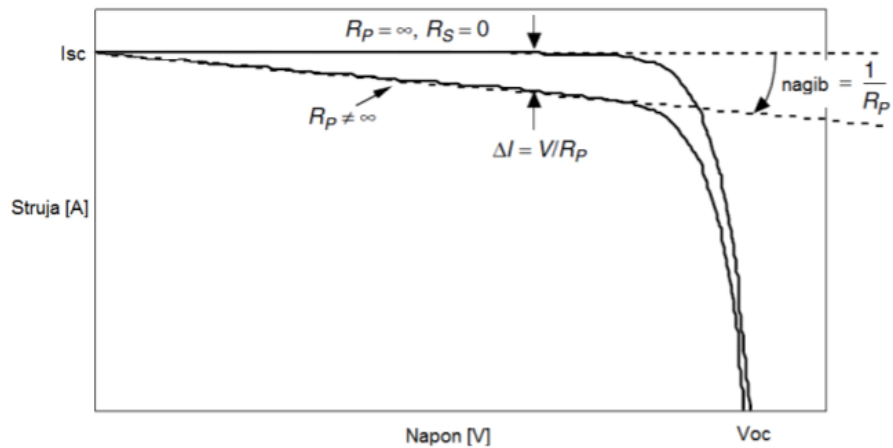
3.3.2 Paralelni parazitski otpor

Paralelni parazitski otpor javlja se kod PN spoja uslijed neidealnosti i nečistoća spoja. Paralelni otpor spojen je paralelno s diodom i izvorom. Paralelni otpor obično je toliko veliki da se može

zanemariti grana na kojoj se nalazi. Prilikom promjene R_P učinkovitost FN članka se ne mijenja tako drastično kao kad se radi o promjeni R_S [15].



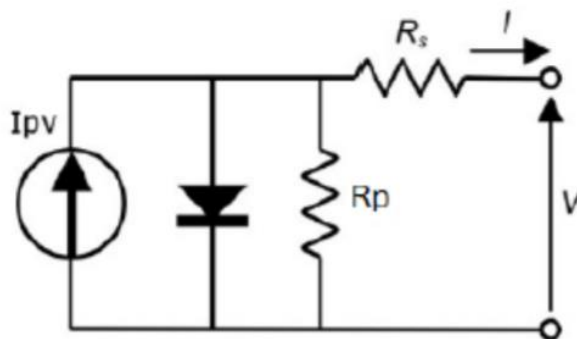
Slika 14. Ekvivalentni električni krug FN članka s paralelnim parazitskim otporom [15]



Slika 15: UI karakteristika bez i s paralelnim otporom [15]

3.3.3. Ekvivalentni električni krug

Konačno, ostaje još prikazati ekvivalentni električni krug sa serijskim i paralelnim parazitskim otporima.



Slika 16. Ekvivalentni električni krug sa serijskim i paralelnim parazitskim otporima [15]

Napon na diodi opisuje se izrazom:

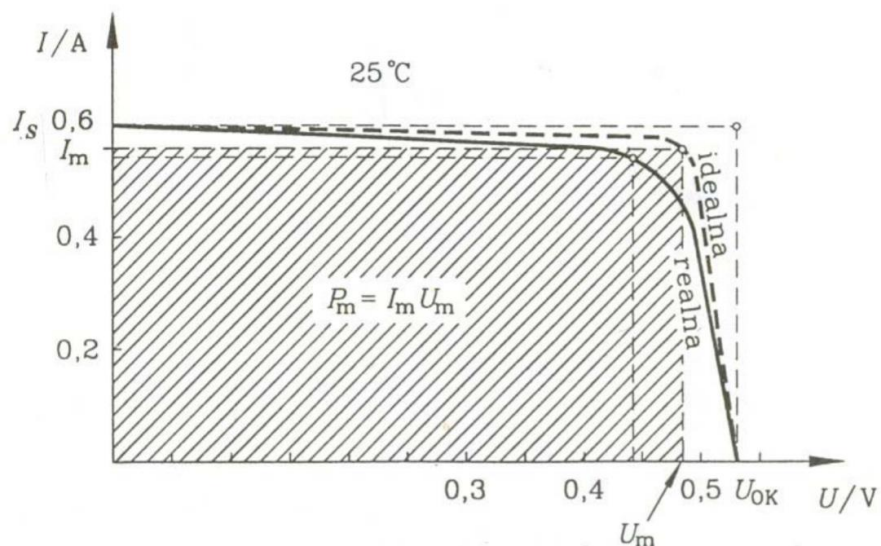
$$U_d = U + I * R_S \quad (3.4)$$

Ako se izraz za napon diode uvrsti u (3.3), dobiva se izraz:

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e(U + I * R_S)}{akT}\right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

Dodavanjem paralelnog otpora u prethodnu jednažbu dobiva se stvarna jednažba FN članka [16]:

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e(U + I * R_S)}{akT}\right) - 1 \right] - \frac{U}{R_P} \quad (3.4)$$



Slika 17. UI karakteristika idealnog i realnog FN članka [16]

3.4 Snaga i učinkovitost FN članka

Snaga FN članka izračunava se kao umnožak struje i napona.

$$P = UI = U \left\{ I_s - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(U + I * R_s)}{akT} \right) \right] \right\} \quad (3.5)$$

Maksimalna snaga FN članka izračunava se kao:

$$P_m = U_m I_m = U_{oc} I_{sc} F \quad (3.6)$$

Gdje je: U_{oc} (V) - napon otvorena strujnog kruga, I_{sc} (A) - struja kratkoga spoja, a F faktor punjena.

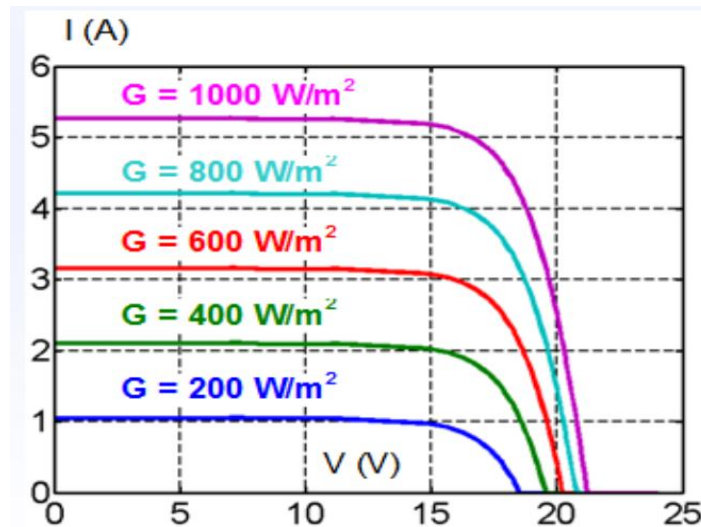
Faktor punjenja je veličina koja govori koliko se UI karakteristika realno FN članka približava idealiziranoj. Obično se vrijednost F kreće u intervalu $0,7 < F < 0,9$.

$$F = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}} \quad (3.7)$$

Učinkovitost se izražava kao omjer maksimalne snage P_m i snage sunčeva ozračenja koje upada na taj članak P_u . Učinkovitost članka kreće se od nekoliko postotaka pa do više od 50% u laboratorijskim uvjetima. Ostatak energije pretvara se u toplinsku energiju. Zbog toga dolazi do zagrijavanja FN članka čime se smanjuje njegova učinkovitost.

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{U_m I_m}{EA} = F \frac{U_{oc} I_{sc}}{E} \quad (3.8)$$

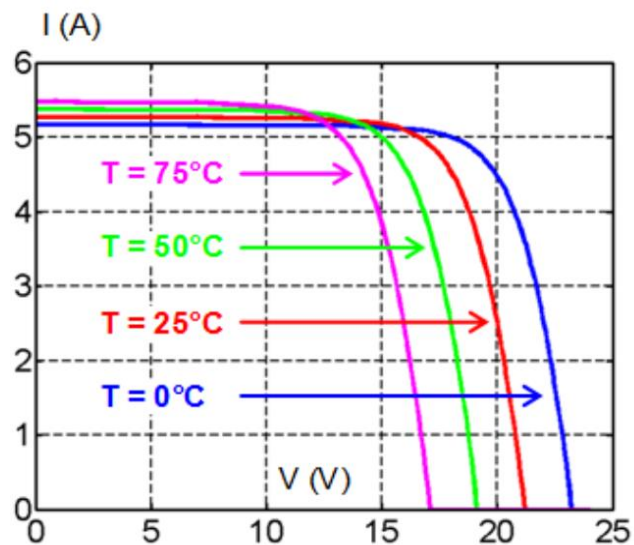
U prethodnoj formuli E označuje označava, a i_{sc} gustoću struje kratkog spoja.



Slika 18. UI karakteristike monokristalnog FN članka pri različitim vrijednostima ozračenja [17]

Kao što je ranije rečeno, učinkovitost također ovisi o temperaturi. Ona se mijenja prema formuli (3.9). Osim promjene učinkovitosti, promjenom temperature mijenjaju se i I_{sc} , I_0 , I , U_{oc} , P_m te F .

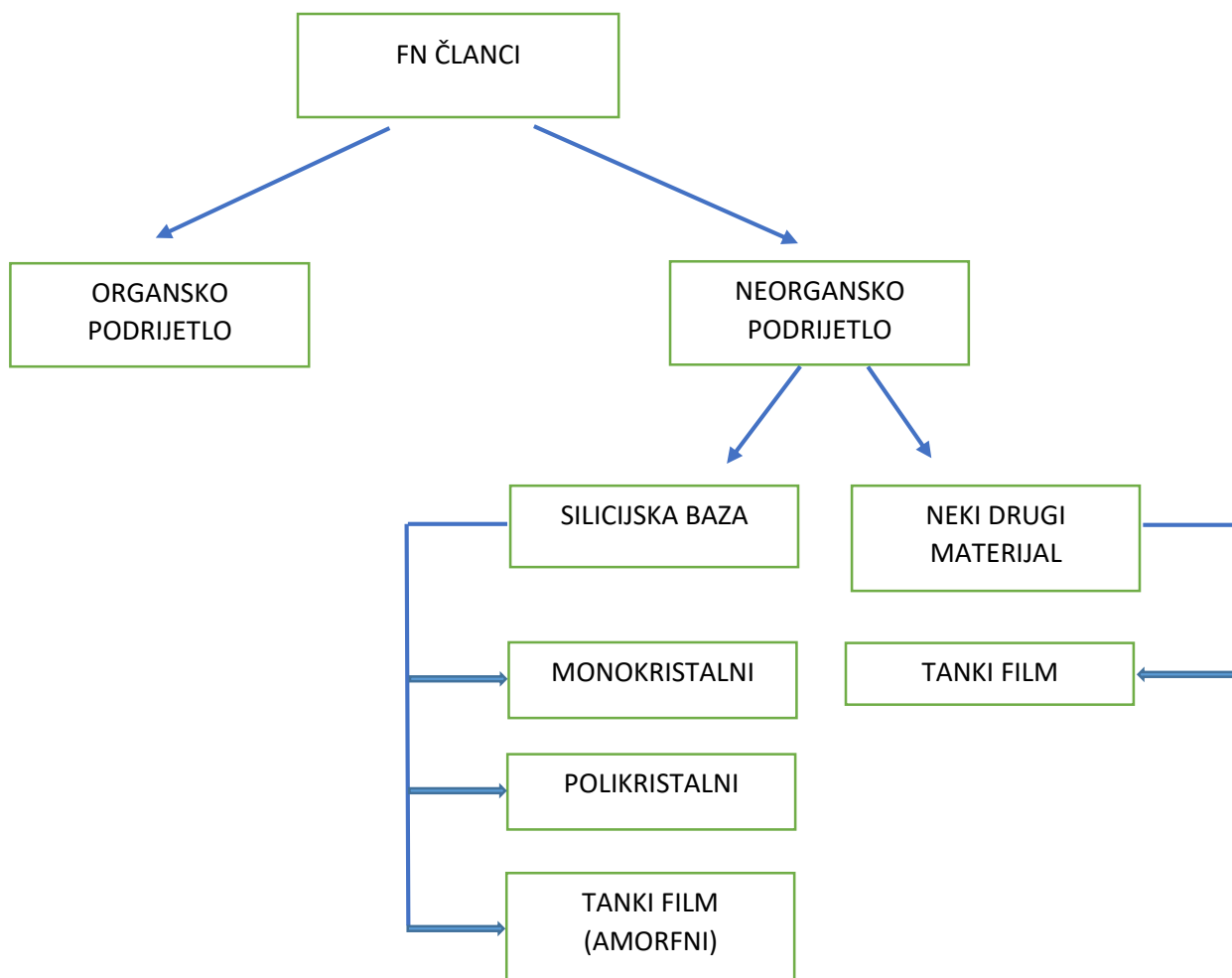
$$\eta(T_2) = \eta(T_1)[1 + \beta(T_2 - T_1)] \quad (3.9)$$



Slika 19. Ovisnost UI karakteristike o temperaturi [17]

Proizvođač FN modula daje informaciju o učinkovitosti modula pri temperaturi od 25 °C. Sa priložene slike vidimo da učinkovitost modula može dodatno padati u ljetnim mjesecima, pri čemu smanjuje iznosi 0,4 – 0,5% za svaki viši stupanj [3,16].

3.5 Tipovi FN članaka



Slika 20. Podjela FN članaka

1. Monokristalni Si članci

Monokristalni Si članci pretvaraju $1000\text{W}/\text{m}^2$ sunčeva ozračenja u 140 W električne energije pri površini članka od 1 m^2 . Kao što im samo ime kaže izrađeni su od jedinstvenog homogenog kristala te im je u konačnici učinkovitost $15 - 18\%$. Dobivaju se iz rastaljenog silicija i režu na tanke pločice. Silicij se u prirodi nalazi kemijski vezan s drugim elementima te je proces njegova dovođenja u stanje pogodno za izradu FN članaka

kompliciran, što povećava njihovu cijenu.

2. Polikristalni Si članci

Polikristalni Si članci pretvaraju 1000 W/m^2 sunčeva ozračenja u 130 W električne energije pri površini članka od 1 m^2 . Manja učinkovitost nastaje kao posljedica činjenice da su izrađeni od većeg broja kristala silicija između kojih postoje nesavršenosti, stoga se prilikom proizvodnje radi na povećavanju veličine pojedinih kristala u strukturi te se na taj način smanjuje mogućnost rekombinacije. Konačna učinkovitost im je između 13-16%. Dobivaju se lijevanjem tekućeg silicija u blokove te se zatim režu u ploče i ekonomski su isplativiji od monokristalnih Si članaka.

3. Amorfni Si članci

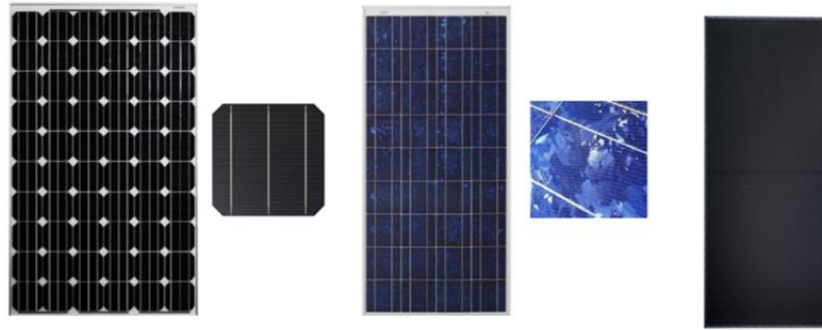
Amorfni Si članci pretvaraju 1000 W/m^2 sunčeva ozračenja u 50 W električne energije pri površini članka od 1 m^2 . Dobivaju se postupkom kemijskog neparavanja plina silana SiH_4 na staklo, na temperaturama $200 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ pri čemu se stvara sloj amornog silicija. Učinkovitost se kreće od 5–7%. Koriste se kod satova, kalkulatora i u sličnoj opremi u kojoj je potrebna mala snaga

4. Galij-arsenidni članci

Galij-arsenidni članci su monokristalni članci iz tehnologije tankog filma, a izrađeni su od spoja poluvodiča galija i arsena. Pretvaraju 1000 W/m^2 Sunčevog ozračenja u 300 W električne energije pri površini članka od 1 m^2 . Imaju najvišu učinkovitost od čak 28,8%, no cijena im je vrlo visoka zbog rijetkosti galija. Nisu osjetljivi na izloženost toplini te se zbog toga koriste na koncentracijskim FN sustavima.

5. Kadmij-telurijevi članci

Kadmij nastaje kao nusprodukt obrade cinka te je vrlo štetan za okoliš. Zbog toga ga se nastoji neutralizirati, iskoristiti i dovesti u ekološki prihvatljivo stanje pomoću telurija. Ovakvi članci pretvaraju 1000 W/m^2 sunčeva ozračenja u 160 W električne energije pri površini članka od 1 m^2 . U prosjeku postižu učinkovitost od 14,7%, ali još uvijek nisu u širokoj primjeni zbog sumnje na otrovnost i kancerogenost [3].

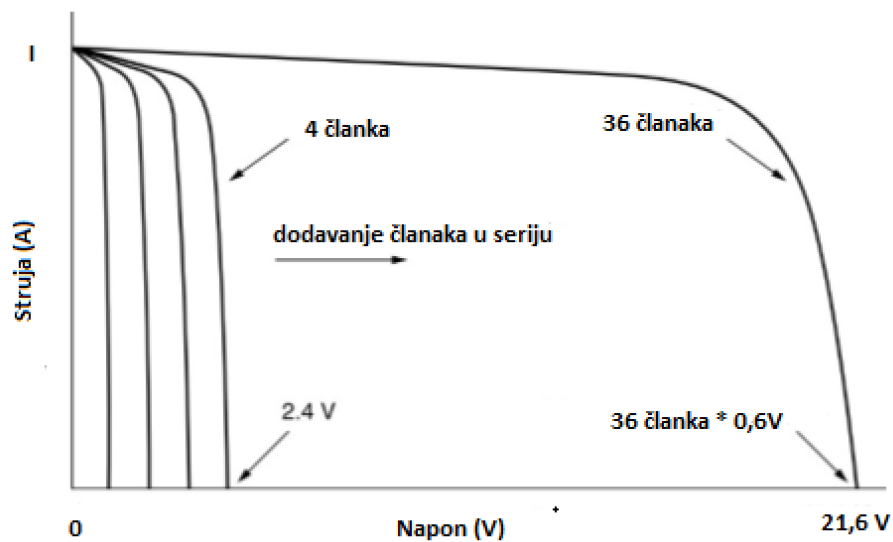


Slika 21. Monokristalni, polikristalni te "thin film" članci [6]

3.6 Povezivanje FN članaka, modula i panela

FN članci (jedan članak daje otprilike 0.6V) povezuju se u FN module, koji se dalje povezuju u FN panele te konačno FN polja. FN članci mogu se spajati serijski ili paralelno. Serijskim spajanjem članaka raste napon niza članaka, uz zadržavanje struje, a paralelnim raste struja članaka uz zadržavanje napona.

FN moduli dobivaju se serijskim povezivanjem FN članaka. Najčešće se serijski povezuje 36 članaka, a nerijetko je povezivanje 60 ili 72 članka.



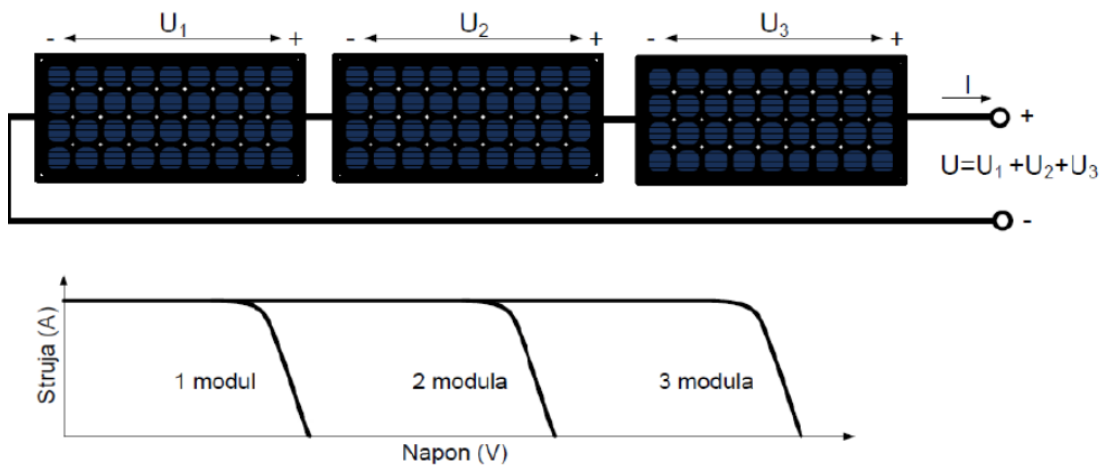
Slika 22. Serijsko spajanje 36 FN članaka [19]

Ukoliko se želi dodatno povećavati napon ili struju moduli se spajaju serijski ili paralelno, te se na taj način dobivaju FN paneli, koji se dalje spajaju serijski ili paralelno te se dobivaju FN polja.

Ako se želi povećati napon FN panela, moduli će se spajati u serije. Dakle, naizmjenično će se spajati (+) i (-) polovi modula. Ako se definira da je napon jednoga modula U_i , a broj modula n , ukupni napon serijski vezanih modula izračunava se prema:

$$U_{uk} = \sum_{i=1}^n U_i \quad (3.9)$$

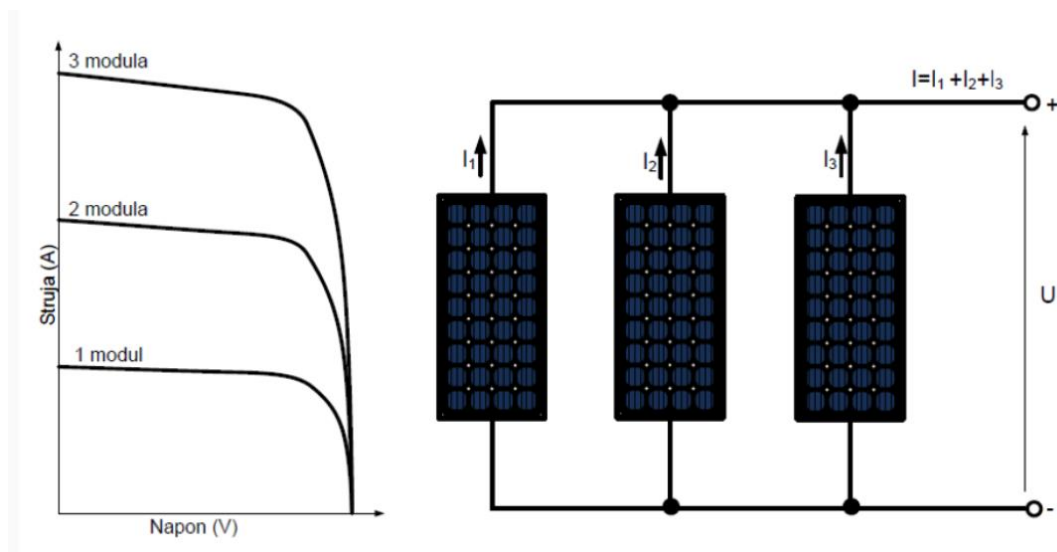
Time se dobiva isti efekt kao onaj prikazan na slici 22.



Slika 23. Serijsko povezivanje FN modula [19]

S druge strane paralelno povezivanje izvodi se tako da se svi (+) polovi spoje na jedan vodič, a svi (-) polovi na drugi vodič. Pri tome se dobiva najveća moguća struja. Ako je struja jednog modula I_i , a broj paralelno vezanih modula n , struju paralelno vezanih modula u idealnom slučaju dobiva se sljedećom formulom:

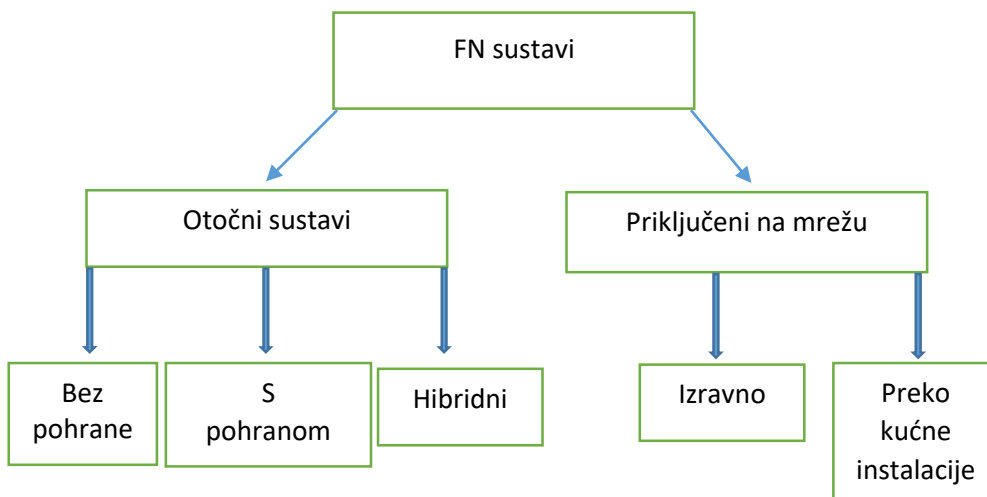
$$I_{UK} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (3.10)$$



Slika 24. Paralelno povezivanje FN modula [19]

Potpuno ista analogija vrijedi prilikom povezivanja FN panela u FN polja.

4. FN sustavi

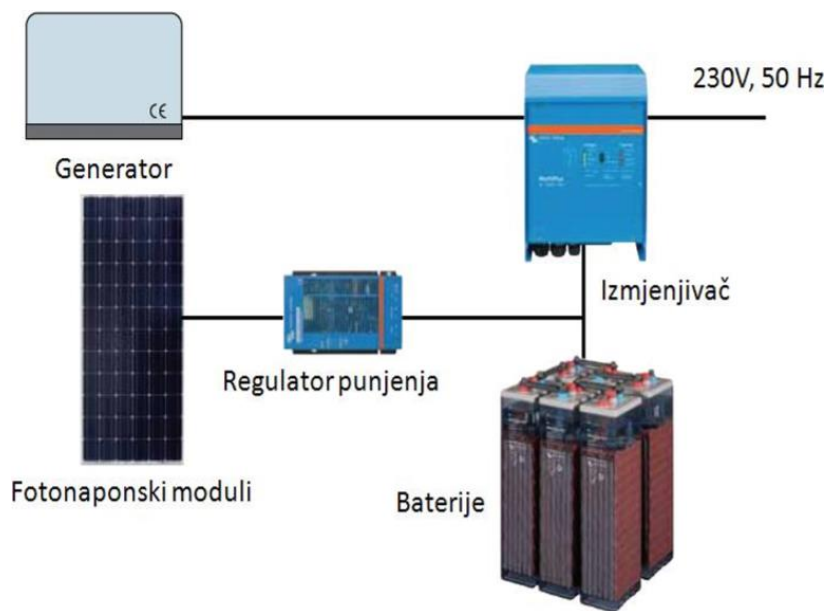


Slika 25. Podjela FN sustava

4.1 FN sustavi koji nisu priključeni na mrežu

FN sustavi koji nisu priključeni na mrežu često se još nazivaju otočnim ili samostalnim sustavima. Kao što je prikazano na slici 25, oni mogu biti sa sustavom pohrane ili bez njega te hibridni sustavi. Otočni sustavi s pohranom mogu biti sustavi male primjene, sustavi s istosmjernom (DC) strujom ili izmjeničnom (AC) strujom. Također, tu su i hibridni sustavi koji mogu biti povezani s vjetoagregatom, s gorivnim člancima, dizel generatorom ili kogeneracijom.

Samostalni sustavi od velike su važnosti u područjima u kojima nema izgrađene električne mreže. Takvi sustavi u potpunosti su energetske neovisni (ovise o promjenama vremena, godišnjem dobu osunčanosti te kapacitetu spremnika energije). S obzirom da nemaju doticaja s mrežom, ne moraju zadovoljiti posebne zahtjeve povezivanja na nju. Najčešće imaju spremnike energije (npr. akumulatorske baterije) [3,12].



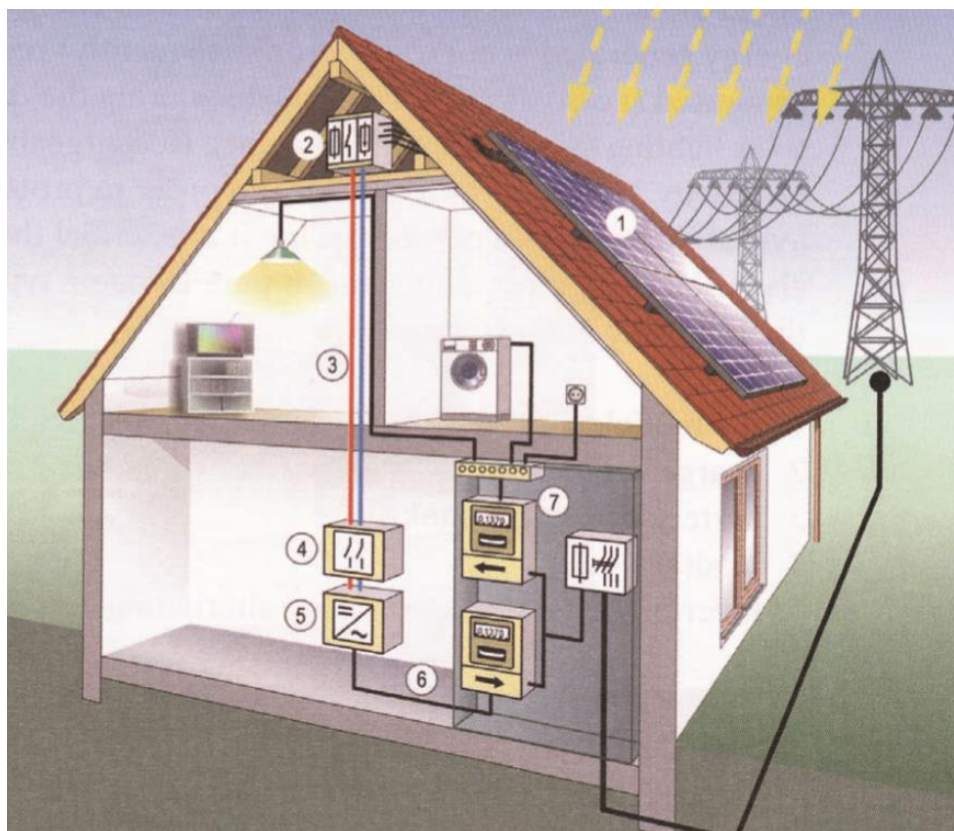
Slika 26. Hibridni otočni FN sustav [3]

Na slici 26, prikazan je hibridni otočni sustav kod kojega FN modul generira električnu struju, koja zatim dolazi do regulatora punjenja. Regulator punjenja ima ulogu kontroliranja punjenja baterija. Njegova osnovna funkcija je da zaštiti bateriju od prepunjavanja ili predubokog pražnjenja. U slučaju da ne postoje uvjeti za proizvodnju električne energije FN modulima, izvor za napajanje postaju baterije. Ako se dogodi da ni baterije nemaju više energije, izvor napajanja postaje generator. U sustavu se još nalazi i izmjenjivač koji je nužan za trošila koja rade na AC struju. S obzirom da u ovakvom sustavu generator stvara AC struju, još je dodatno potreban ispravljač, koji će generator učiniti pogodnim izvorom energije za DC trošila u kućanstvu [3,12].

4.2 FN sustavi koji su priključeni na mrežu

Kada se govori o FN sustavima priključenima na mrežu, razlikuju se sustavi priključeni preko kućne instalacije i sustavi direktno spojeni na mrežu.

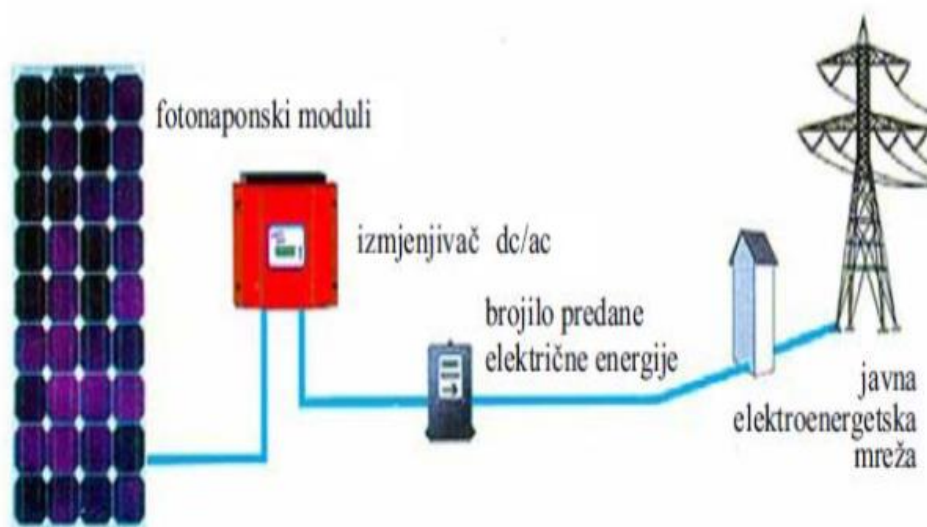
Sustavi priključeni na mrežu preko kućne instalacije imaju primaran cilj opskrbe električnom energijom trošila tog objekta. Ako pak postoji višak proizvedene električne energije, ona se šalje u mrežu. U slučaju nepovoljnih uvjeta za generaciju električne energije (lošeg vremena, noći) taj objekt preuzima energiju iz mreže. Da bi se objekt na ovaj način povezao potrebno je sklopiti ugovor o otkupu električne struje te dobiti odobrenje za izgradnju i izvršiti upis postrojenja. Ovakvi su sustavi s obzirom na instalirani kapacitet dijele na sustave do 30 kW, od 30 do 100 kW i veće od 100 kW.



Slika 27. Sustav priključen na mrežu preko kućne instalacije [12]

Na slici 27, prikazan je sustav priključen na prežu preko kućne instalacije. Takav sustav se sastoji od FN modula (1) koji proizvode DC struju i međusobno su povezani kablovima. Svi ti kablovi vode do spojne kutije (2). Od tamo se dovode kablovima DC razvoda (3) preko glavne sklopke za odvajanje (4) do izmjenjivača (5). U izmjenjivaču se DC struja pretvara u AC, u oblik u kojem se može predati u elektroenergetsku mrežu te se koristiti u kućanstvima. Zatim se kablovima AC razvoda (6) dovodi do brojila predane i preuzete električne energije (7), tamo se distribuira prema trošilima ili se suvišak predaje javnoj elektroenergetskoj mreži [3,12].

FN sustavi direktno spojeni na mrežu jesu postrojenja s najvećim instaliranim snagama unutar FN tehnologije. Oni svu generiranu električnu energiju šalju direktno u distribucijsku mrežu. Sukladno najvećim instaliranim snagama također imaju najveće površine i često imaju ugrađene sustave praćenja sunca. Takvi sustavi predstavljaju prave sunčane elektrane [3,12].

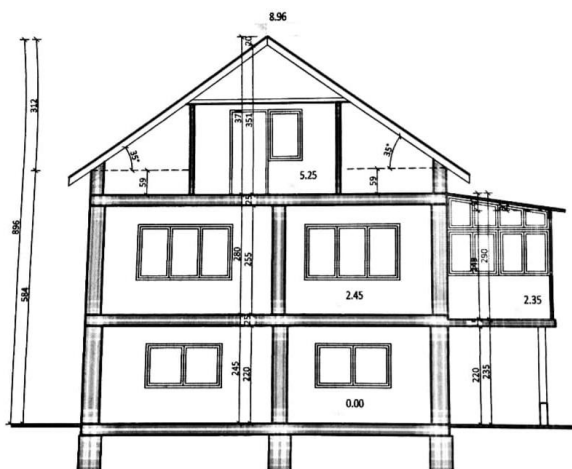


Slika 28. FN sustavi direktno spojeni na mrežu [3]

5. Projekt

U nastavku rada slijedi planiranje sunčane elektrane za obiteljsku kuću u Zagrebu. Potrebno je projektirati sunčanu elektranu sukladno potrebama kućanstva te provesti ekonomsku analizu i odrediti konačnu isplativost projekta. Iako postoji zemljište na kojem bi instalacija FN modula bila moguća, zbog eventualnih osjenjenja, odlučeno je da će se u konačnici FN moduli instalirati na krov kuće. Iz priloženih slika vidljivo je da je orijentacija kuće povoljna te će se FN moduli instalirati na južnu stranu krova pod kutom od 35°. Koristeći javno dostupan servis PVGIS analizirat će se mogućnosti proizvodnje električne energije ovom sunčanom elektranom. Kako bi se uspješno koristio PVGIS servis, potrebno je poznavati lokaciju, nagib i orijentaciju krova te snagu elektrane koja će se procijeniti sukladno analiziranim potrebama kućanstva.

PRESJEK M 1:100



Slika 29. Nacrt promatranog kućanstva

5.1 Analiza potreba kućanstva

Da bi se uspješno projektirala sunčana elektrana nužno je analizirati potrebe kućanstva. Kako se u ovom projektu izračunava potrebna snaga sunčane elektrane, jasno je da je potrebno analizirati samo potrošnju električne energije. Olakšavajuća okolnost promatranog kućanstva jest činjenica da se električna energija ne troši na grijanje (grijanje se provodi na plin) te u promatranom kućanstvu nema klima uređaja. Stoga se tijekom godine dobiva približno konstantna potrošnja iz mjeseca u mjesec.

U tablici 2, prikazana je potrošnja tročlanog kućanstva u kWh u protekle dvije godine. Kako se vidi iz priloženog, usluga očitavanja brojila je standardna, što podrazumijeva očitavanje brojila električne energije svakih šest mjeseci (180 +/-15 dana) od strane ovlaštenih radnika. Kako se kućanstvo koristi bijelim tarifnim modelom u tablici su također razdvojene niža i viša dnevna tarifa. Kao što je ranije rečeno, vidimo da je mjesečna potrošnja uistinu približno konstantna.

Tablica 2. Prikaz potrošnje analiziranog kućanstva

Razdoblje	Tarifa 1 (kWh)	Tarifa 2 (kWh)	Σ (ukupna godišnja potrošnja)
			(kWh)
31.01.2018-03.07.2018.	1257	456	3092
3.07.2018.-31.01.2019.	1141	238	
31.01.2019. - 31.07.2019.	1443	418	3326
31.07.2019.-13.01.2020.	1224	241	

Za potrebu proračuna za projektiranje sunčane elektrane uzet će se srednja vrijednost potrošnje u protekle dvije godine te će se odrediti godišnja potrošnja u iznosu od 3200 kWh. Projektirat će se sustav priključen na mrežu preko kućne instalacije, čime će se izbjeći instalacija skupih baterija. Ideja ovog projekta jest ljeti generirati višak struje, koji će zatim otkupljivati HEP. Zimi struja generirana FN modulima neće biti dovoljna da bi se pokrile potrebe kućanstva, stoga će se uzimati

struja iz mreže, a troškovi će biti pokriveni ljetnim suviškom. U konačnici se dolazi približno na nulu.

5.2 Analiza ozračenosti

U nastavku su prikazani podatci o ozračenosti horizontalne plohe, plohe pod optimalnim nagibom, plohe pod nagibom od 35° (nagib krova kuće), vertikalne plohe, te srednje dnevne temperature po mjesecima. Navedena sunčana elektrana nalazit će se na 45.856° sjeverne geografske širine i 15.986° istočne geografske širine. Ti su podatci dobiveni PVGIS servisom, nakon unošenja geografske pozicije te nagiba krova kuće u program.

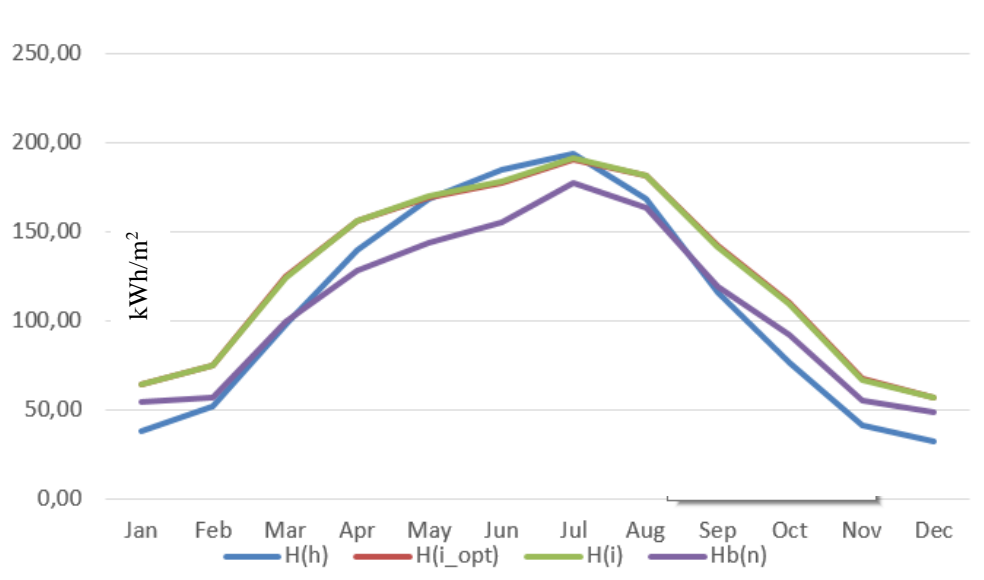
Tablica 3. Vrijednosti ozračenosti različitih ravnina i srednje temperature

	H_h (kWh/m ²)	H_{opt} (kWh/m ²)	H_i (kWh/m ²)	H_{b_n} (kWh/m ²)	T (°C)
Siječanj	37,89	64,42	64,02	54,39	0,58
Veljača	57,69	74,61	74,32	57,01	1,51
Ožujak	97,84	124,52	124,30	99,42	5,85
Travanj	139,73	155,78	155,87	127,67	11,51
Svibanj	168,26	169,15	169,58	143,90	15,57
Lipanj	184,7	177,31	177,97	155,29	19,62
Srpanj	193,95	190,83	191,46	177,54	21,90
Kolovoz	168,41	181,30	181,56	163,52	20,58
Rujan	115,73	141,62	141,48	119,39	16,00
Listopad	76,76	109,98	109,59	91,64	10,63
Studeni	41,39	67,15	66,78	54,76	6,18
Prosinac	31,79	57,01	56,62	48,73	1,32

U tablici 3, prikazane se srednje vrijednosti podataka PVGIS-SARAH servisa u razdoblju od 2005. do 2016. godine. Podatci za navedene godine preuzeti su sa PGVIS servisa, nakon čega su obrađeni u Excelu u kako bi dobili srednje vrijednosti za pojedine mjesece. U tablici su redom;

H_h (kWh/m²) – ozračenost na horizontalnoj ravnini, H_{opt} (kWh/m²) – ozračenost na optimalnoj ravnini, H_i (kWh/m²) – ozračenost pri 35°, H_{b_n} (kWh/m²) – direktna normalna ozračenost, T (°C) – prosječna temperatura u mjesecu

Primjećuje se da je u tablici 3, osunčanost na optimalnoj ravnini gotovo jednakog iznosa kao osunčanost pri 35°. Naime, prilikom postavljanja fiksnih FN modula postoji optimalan kut kod kojega će se tijekom godine generirati najviše električne energije. PGVIS servis također ima mogućnost izračunavanja tog kuta. Kako je krov nagiba 35° iz tablice 3, vidljivo je da se dobivaju gotovo optimalne vrijednosti ozračenosti. Isto potvrđuje i slika 30, na kojoj se primjećuje gotovo potpuno preklapanje dviju linija.



Slika 30. Vrijednosti ozračenosti različitih ravnina

5.3 Vršna snaga panela izračunata PVGIS servisom

Za nastavak proračuna također se koristio PVGIS servis. Pomoću njega je moguće dobiti precizne podatke za dnevnu mjesечnu i godišnju proizvodnju energije. Ovdje PVGIS servis uzima u obzir

lokaciju objekta, ozračenje za tu lokaciju, vršnu snagu FN sustava, orijentaciju krova u odnosu na jug i nagib FN modula, temperaturnu sliku kroz godinu te gubitke.

U ovom slučaju, vršna snaga FN sustava je nepoznanica, odnosno varijabla koja se nastoji izračunati. S druge strane poznato je koliko se kWh energije u konačnici želi dobiti iz projektiranog sustava. S obzirom da su sve druge vrijednosti poznate, može se relativno jednostavno, uvrštavanjem različitih vršnih vrijednosti doći do željene vrijednosti proizvodnje električne energije, koja odgovara željenoj potrošnji.

PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV

Solar radiation database* PVGIS-SARAH

PV technology* Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]* 2.8

System loss [%]* 14

Fixed mounting options

Mounting position* Building integrated

Slope [°]* 35

Azimuth [°]* 0

PV electricity price

PV system cost (your currency)

Interest [%/year]

Lifetime [years]

Slika 31. PVGIS servis [30]

Na slici 31, prikazano je sučelje PVGIS sustava. Za proračun je odabrana PVGIS – SARAH baza podataka čiji su podatci o ozračenosti objedinjeni i prikazani u tablici 3.

Kao FN tehnologija odabire se kristalni silicij. Iako PGVIS servis ne radi preciznu razliku između monokristalne i polikristalne tehnologije u proračun uvrštava gubitke zbog refleksije površina koji iznose 2,8% i gubitke zbog temperature okoline 8,7%. Instalirana vršna snaga je varijabla koju će se mijenjati dok se ne postigne željena vrijednost. Gubitci sustava procijenjeni su na 14%, a obuhvaćaju gubitke u kablovima, spojnica, inverterima. Konačno se dolazi do vrijednosti od 23,6% za ukupne gubitke.

S obzirom da je krov orijentiran južno preostalo je jedino unijeti vrijednost nagiba krova. Također, odabrani su integrirani moduli koji su nepovoljniji od samostojećih zbog toga što nemaju protok zraka sa stražnje strane, što uzrokuje dodatno zagrijavanje i time opadanje učinkovitosti. U realnom slučaju moduli neće biti u potpunosti integrirani u krov te će ostati prostor u kojem će strujati zrak. Stoga je ovaj gubitak uzet u proračun kako bi se prikazao najnepovoljniji slučaj.

U opisanom slučaju potrebna je sunčana elektrana vršne snage približno 2,8 kW. Uz sve ranije navedene parametre, dobiveni su sljedeći rezultati.

Tablica 4. Očekivana dnevna i mjesečna proizvodnja i osunčanje

Mjesec	E_d (kWh)	E_m (kWh)	H_d (kWh/m ²)	H_m (kWh/m ²)
Siječanj	4,85	150,22	2,07	64,03
Veljača	6,21	173,98	2,65	74,32
Ožujak	8,92	276,67	4,01	124,3
Travanj	11,09	332,72	5,2	155,87
Svibanj	11,46	355,18	5,47	169,58
Lipanj	12,15	364,35	5,93	177,97
Srpanj	12,39	384,17	6,18	191,46
Kolovoz	11,9	368,75	5,84	181,56
Rujan	9,91	297,22	4,72	141,47
Listopad	7,73	239,76	3,54	109,59
Studeni	5,07	152,04	2,23	66,78
Prosinac	4,24	131,42	1,83	56,62
Godišnji prosjek	8,84	268,87	4,15	126,13

Ovdje E_d označava očekivanu dnevnu proizvodnju (kWh), E_m očekivanu mjesečnu proizvodnju, H_d prosječnu dnevnu ozračenost sustava primljenu po kvadratnom metru modula (kWh/m²), a H_m prosječnu mjesečnu ozračenost po kvadratnom metru modula (kWh/m²).

U konačnici se dobiva godišnja proizvodnja energije 3226 kWh s eventualnim odstupanjem od 189 kWh godišnje, što je približno jednako procijenjenoj potrošnji od 3200 kWh.

5.4 Sunčana elektrana

Prilikom projektiranja sunčane elektrane potrebno je odabrati vrstu modula koji će se ugraditi, pretvarač (izmjenjivač, ispravljač), komponente za smještaj i montažu modula, DC spojnu kutiju . Postoji različitih vrsta panela koji imaju različite vršne snage. Prilikom projektiranja važnu ulogu ima površina namijenjena njihovoj ugradnji. Naime, što se manjom površinom raspolaže, to je potrebno odabrati module više vršne snage što će automatski povisiti cijenu investicije.

5.4.1 Dostupna površina

U ovom se slučaju raspoloživa površina vrlo jednostavno računa kao površina krova. Raspoloživa površina iznosi 40 m². Prema prijašnjem proračunu potrebno je instalirati sunčanu elektranu vršne snage 2,8 kW. Za instalaciju 2,8 kW snage površina od 40 m² je dovoljno velika te u obzir dolazi i jeftinija opcija poput polikristalnih silicijskih modula. U sljedećem koraku potrebno je odrediti koje je module najpovoljnije kupiti.

5.4.2 FN sustav

Životni vijek FN sustava je podatak naveden u specifikacijama, a prosječan životni vijek FN modula je između 20 i 25 godina. Učinkovitost modula pada kroz godine te je to još jedna varijabla koju je potrebno uzeti u obzir prilikom izračuna isplativosti.

U tablici 5, prikazani su monokristalni i polikristalni paneli tvrtki Trinasolar, Luxor i Sole. Tvrtka Trinasolar jedan je od najvećih proizvođača FN modula u Kini dok su Luxor i Sole njemački proizvođači. Module tvrtke Sole moguće je nabaviti na hrvatskom tržištu, dok se preostali moduli nabavljaju kod europskog dobavljača EUROPE – SOLAR STORE. Uz svaki od navedenih modula izražena je cijena s PDV-om i dostavom u kunama. Uz svaku vrstu modula izračunata je površina koju zauzimaju. Paneli većih snaga imaju veće cijene, no samim time je u sustavu potreban manji broj modula. Vidljivo je da su cijene modula koji zadovoljavaju potrebe ovdje projektirane sunčane elektrane približno iste.

Tablica 5. Različiti FN moduli

Tip modula	Naziv	Vršna snaga (W)	Potreban broj panela	Dimenzije (mm)	Površina (m²)	Cijena (kn)	Konačna cijena (kn)
Monokristalni	Trina Honey M+ TSM – 310DD05	310	9	1650 x 992	14,73	1341	12069
	Luxor ECO LINE M60/300W	300	9	1640 x 992	14,64	1270	11430
	Sole MONO 210W	210	13	1580 x 810	16,43	890	11570
Polikristalni	Trina Honey TSM- 280PD05	280	10	1650 x 992	16,37	1143	11430
	Luxor ECO LINE P60/275W	275	10	1640 x 992	16,27	1225	12250
	Sole POLY 120	120	23	1470 x 669	22,62	550	12650

5.4.3 DC spojna kutija

Odabrani sustav FN modula spaja se preko priključnih vodova na DC spojnu kutiju. DC spojna kutija ima više uloga, ali osnovna je da objedini nekoliko nizova i prosljedi ukupnu struju prema izmjenjivaču. Takva spojna kutija sastoji se od prenaponske zaštite, osigurača i sklopke. Svrha DC sklopke jest da odvoji FN module od ostatka instalacije. Svrha DC osigurača je da po neispravnosti jednog niza, neispravni niz isključi iz paralele, dok ostatak nesmetano radi. Konačno, sklop prenaponske zaštite ima zadatak da štetne prenapone ne provede u ostatak sustava. Štetni

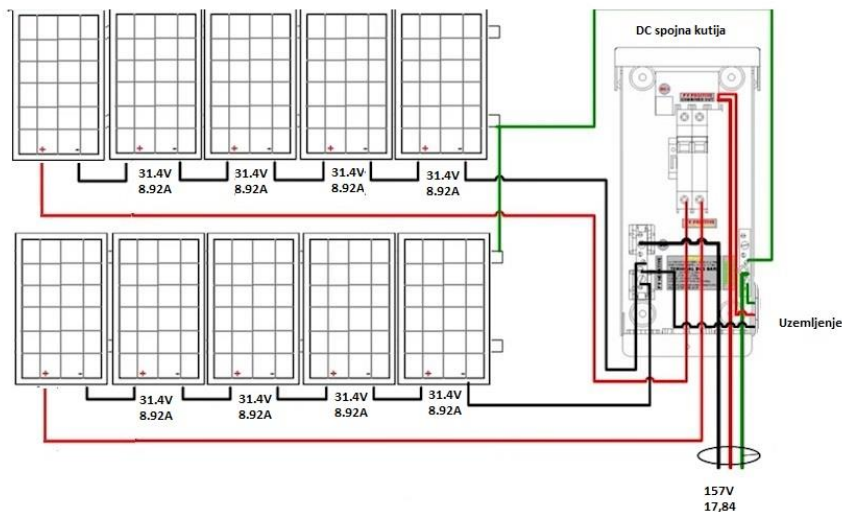
preanponi mogu se pojaviti kao posljedica udara groma u objekt, fazni vodič dalekovoda, atmosferskih izbijanja ili induciranog napona. DC spojna kutija mora biti spojena sa zajedničkim uzemljenjem objekta, također potrebno je uzemljiti metalnu konstrukciju modula na zajedničku sabirnicu. Spojnu kutiju treba smjestiti što bliže modulima da bi eventualna oštećenja sustava bila što manja. U ovom projektu DC spojna kutija biti će smještena kući u potkrovlju [3,22].

Za pokrivanje potrošnje ovog objekta potrebno je deset FN modula. Odlučeno je da će se povezati u dvije paralele, dok će svaka paralela imati niz od pet modula. Podatci odabranih modula navedeni su u tablici 6. Vrijednosti u tablici prikazane su pri ozračenosti od 1000 W/m^2 , temperaturi od 25°C i AM1.5.

Tablica 6. Podatci odabranog panela

Vršna snaga (W)	280
Napon (V)	31,4
Struja (A)	8,92
Napon otvorenog kruga (V)	38,2
Struja kratkog spoja (A)	9,4

Na shemi ispod prikazano je povezivanje modula s DC spojnom kutijom u slučaju da se odluči na objedinjavanje nizova. S obzirom da se u ovom slučaju radi o svega dva niza, spojne kutije su izvedene tako da se svaki od dva niza priključi vlastitim vodovima na ulaz DC kutije, prolaze svaki preko svoje prenaponske zaštite te odlaze prema ulazu u izmjenjivač. Takva DC spojna kutija imat će 2+/- ulaza i 2+/- izlaza i izlaz za uzemljenje objekta. Stoga će u konačnici svaki niz imati struju jačine 8,92 A i napon jačine 157 V. Iako predstavljaju dodatan trošak i nisu nužne u sustavima manje snage i sustavima s manje od četiri niza, poželjno ih je instalirati jer osiguravaju ostatak sustava.



Slika 32. Povezivanje FN panela s objedinjenim nizovima [22]

Dvije DC kutije (koje u ovom slučaju imaju samo funkciju zaštite, a ne objedinjavanja nizova) zajedno sa cijenama prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 7. Značajke DC kutije

Naziv	Maksimalan napon (V)	Cijena (kn)
Schrank FN Zaštita od munje 1000VDC	1000	2200
ABB Stringbox 2 IN-2 OUT 1000VDC	1000	3000

5.4.4 Izmjenjivač

Izmjenjivač je uređaj koji istosmjerni napon i struju FN modula pretvara u izmjenične, kako bi se omogućio priključak na distribucijsku mrežu. Prilikom uparivanja izmjenjivača potrebno je paziti da napon praznog hoda pri najnižoj temperaturi i maksimalnom osunčanju ne prijeđe dozvoljeni ulazni napon izmjenjivača. Isto vrijedi i za struju, koja mora biti manja od maksimalno dozvoljene struje na DC ulazu izmjenjivača.

Izmjenjivači se dijele u dvije skupine. Izmjenjivače sustava ovisnih o mreži i sustava neovisnih o mreži. Izmjenjivači neovisnih sustava su vezani na bateriju koja predstavlja izvor istosmjernog napona. Tada izmjenjivač pretvara baterijski napon u izmjenični napon. Ulazni istosmjerni naponi jesu naponi baterije (od 12 do 48 V) a izlazni napon jest 230 V [3,6].

U ovom projektu radi se o sustavu ovisnom o mreži te će se takvi izmjenjivači u nastavku i promatrati. Ovakvi izmjenjivači povezani su ulazom izravno na FN module ili DC spojne kutije, a izlazom na dvosmjerno brojilo te električnu mrežu. Istosmjerni napon se pretvara u izmjenični, koji se sinkronizira s mrežnim naponom. Izmjenjivači mogu biti monofazni ili trofazni. S obzirom da su u Hrvatskoj kućanstva većim djelom spojena na monofazni priključak, koji bez problema opskrbljuje sustave do 5 kW, u nastavku će se promatrati monofazne izmjenjivače. Također, pozitivno je što su takvi izmjenjivači cjenovno prihvatljiviji što će u konačnici smanjiti ukupan trošak solarne elektrane. Današnji izmjenjivači imaju dodane sposobnosti poput priključka na kućnu mrežu, zbog toga možemo jednostavno pristupiti podatcima o generaciji energije te brzo detektirati eventualne kvarove.

Tablica 8. Izmjenjivači

Naziv	Maksimalna snaga (W)	Raspon napona (V)	Maksimalna struja po priključku (A)	Broj DC priključaka	Broj MMPT	Cijena (kn)
Huawei - Sun 2000L-2KTL	3000	90-600 (max.600)	11	2	2	7400
SolarX Power X1 3.0T BOOST	3000	125 – 580 (max.600)	12	2	1	5150
Fronius Galvo 1.5-1	3000	120-335 (max.420)	13.3	3	1	7800

5.4.5 Nosači FN modula

Cijena nosača FN modula ovisi o vrsti nosača. U slučaju da se postavljaju fiksni nosači oni će biti jeftiniji od jednoosnih ili dvoosnih, tzv. "tracking" nosača koji prate položaj sunca. U ovom se projektu radi o fiksnim nosačima smještenima na krov. Takva se konstrukcija relativno jednostavno izvodi.

U ovome projektu predviđeno je 5 modula u 2 niza.

Ukupna duljina nosača ugrubo se izračunava kao:

$(\text{širina} + 0,02) \times \text{broj modula u nizu} + 0,04) \times 2 \times \text{broj nizova}$

$$((0,992 + 0,02) * 5 + 0,04) * 2 * 2 = 20,4$$

Broj nosača (zaokruženo na više) izračunava se kao:

$(\text{duljina reda} / 4,15) \times 2 \times \text{broj redova} = 24 \text{ nosača}$

$$\frac{5,1}{4,15} * 2 * 2 = 4,9 = 5$$

Broj spojnice se izračunava kao:

3 po redu \times 2 \times broj redova

$$3 * 2 * 2 = 12$$

Broj kuka se izračunava kao:

$(\text{duljina reda} / \text{dozvoljeni razmak}) \times 2 \times \text{broj redova}$

$$5,1 * 2 * 2 = 20,4$$

Broj pričvrsnica među modulima se izračunava kao:

$(\text{broj modula u redu} - 1) \times 2 \times \text{broj redova}$

$$4 * 2 * 2 = 16$$

Broj završnih pričvrsnica se izračunava kao:

broj redova \times 4

$$2 * 4 = 8$$

Broj završnih kapica nosača se izračunava kao:

broj redova \times 4

$$4 * 2 = 8$$

U tablici 9, prikazane su cijene tvrtke Schrank technik, montažnog sustava Varista. Cijene opreme navedene su na njihovim stranicama [23]. Prilikom odabira komponenti vodilo se računa o tome da je debljina panela 35 mm. U proračunu nisu uračunate cijene vijaka.

Tablica 9. Nosači Varista

Naziv komponente	Cijena/kom (kn)	Broj komada (kn)	Ukupno+pdv (kn)
Pričvrsnica krajnja	37,42	8	399,15
Pričvrsnica između	19,06	16	406,61
Spojnica	25,41	12	406,56
Nosač	337,00	5	2246,67
Kuka za kosi krov	112,00	21	3136,00
			6594,99

5.4.6 Naknada za priključenje

Mjesto priključenja ovisi o vršnoj snazi, a FN sustavi do 30 kW priključuju se na niskonaponski vod. Vrsta priključka u ovom slučaju je monofazna. Kako bi se sunčana elektrana mogla priključiti na mrežu potrebno je platiti naknadu za priključenje. Ona obuhvaća troškove priključka na mreži, troškove stvaranja tehničkih uvjeta u mreži za preuzimanje proizvedene električne energije i pokusni rad elektrane. Prema podacima HEP-a iznos naknade za priključenje jest 1700 kn/kW. U ovom slučaju radi se o sustavu od 2,8 kW stoga naknada za priključenje iznosi 4760 kn.

$$1700 * 2.8 = 4760$$

5.4.7 Montaža

Montaža FN modula je još jedan faktor koji treba uračunati u ukupnu cijenu sunčane elektrane. U prosjeku se računa da se na montažu sunčanih elektrana veličine 2 – 3 kW potroši dodatnih 5500 [24].

5.5 Isplativost projekta

5.5.1 Modeli otkupa električne energije

Sustavi sunčanih elektrana u ljetnim mjesecima generiraju više struje nego što je mjesečna potrošnja kućanstva, a zimi manje. Električna energija koju u nekom trenutku proizvode FN moduli prvenstveno se troši za pokrivanje trenutne potrošnje tog kućanstva, a višak se prodaje u električnu mrežu. S druge strane u noćnim satima nema proizvodnje električne energije te se ista uzima iz mreže. Naknada za električnu energiju prodanu u mrežu, obračunava na jedan od sljedeća dva načina:

$$C_i = 0,9C * PKC_i \quad (5.1)$$

$$C_i = 0,9C * PKC_i \frac{E_{pi}}{E_i} \quad (5.2)$$

Gdje je: PKC_i (kn) – prosječna jedinična cijena energije koju kupac plaća, E_i (kWh) - je ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane kupca unutar proračunskog razdoblja, a E_{pi} (kWh) - je ukupna električna energija preuzeta iz mreže unutar obračunskog razdoblja. Prvi način obračuna koristi se kada je ukupna električna energija preuzeta iz mreže veća od električne energije isporučene, a drugi kada je obratno [25].

Drugi način obračuna koji je povoljniji za korisnike i u mnogim državama se koristi za poticanje prelaska na OIE jest neto mjerenje. Neto mjerenje podrazumijeva da se višak električne energije proizveden iz FN modula fiktivno pohranjuje u mreži. Na taj način višak struje se ne prodaje, već se prilikom predaje energije u mrežu brojilo okreće u nazad. U trenutku kada korisnik uzima energiju iz mreže brojilo se ponovno okreće u naprijed te se na taj način omogući da se u vrijeme preuzimanja energije iz mreže fiktivno troše isti kW koji su se ranije predali u mrežu. Na kraju obračunskog razdoblja, koje može biti mjesec ili godina naplaćuje se samo onaj broj kW koji su se preuzeli iz mreže [26].

5.5.2. Proračun

U tablici 10, prikazani su svi ranije navedeni troškovi.

Tablica 10. Troškovi sunčane elektrane

Komponenta	Cijena (kn)
FN moduli	11430
Inverter	7800
Nosači modula	7000
Naknada za priključenje	4760
Montaža	5500
Ukupna cijena	36490

Potrebno je primijetiti da u konačnom računu nije navedena cijena DC kutije. Razlog tomu je što je u ovom slučaju odabran inverter Fronius Galvo. Ovaj inverter u sebi već sadrži zaštitu od prenapona te nije potrebno instalirati dodatnu. Cijena nosača modula izračunata je ugrubo ranije prikazanim načinom te je ostavljeno prostora za eventualne pogreške. Cijena montaže je također okvirna cijena jedne od tvrtki koje nude instalaciju solarnih panela [24]. Ovaj sustav projektiran je s idejom da pokrije 100% potrošnje kućanstva.

Tablica 11. Podatci potrebni za analizu isplativosti

Pretpostavljeni rast cijene električne energije	2%
Naknada za poticanje proizvodnje iz OIE (kn)	$0,1050 * 2800 = 294$
Pad proizvedene električne energije	0,5% zbog pada učinkovitosti modula
Cijena električne energije 2020.god (kn/kWh)	0,95 VT, 0,46 NT
Naknada za OIE (kn/kWh)	0,105
Osnovna cijena otkupa (kn)	0,86
Cijena proračunatog sustava (kn)	37000
Cijena invertera (kn)	7800
Čišćenje i održavanje modula (kn)	300

Fiksno godišnje plaćanje za opskrbu i mjerno mjesto jest dodatak koji se plaća no ovdje je uračunat u cijenu električne energije. Učinkovitost sustava informacija je preuzeta od proizvođača panela te će se smatrati da pada linearno kroz godine [28]. Cijena invertera mora se dodatno uračunati u analizu s obzirom da je inverter dio koji će se zamijeniti nakon desetak godina. Također je potrebno uračunati troškove održavanja modula, koji podrazumijevaju godišnji pregled elektrane. Takvi pregledi obuhvaćaju vizualan i termalan pregled elektrane u svrhu otkrivanja eventualnih nedostataka.

5.5.2.1 Prodaja proizvedenog viška električne energije

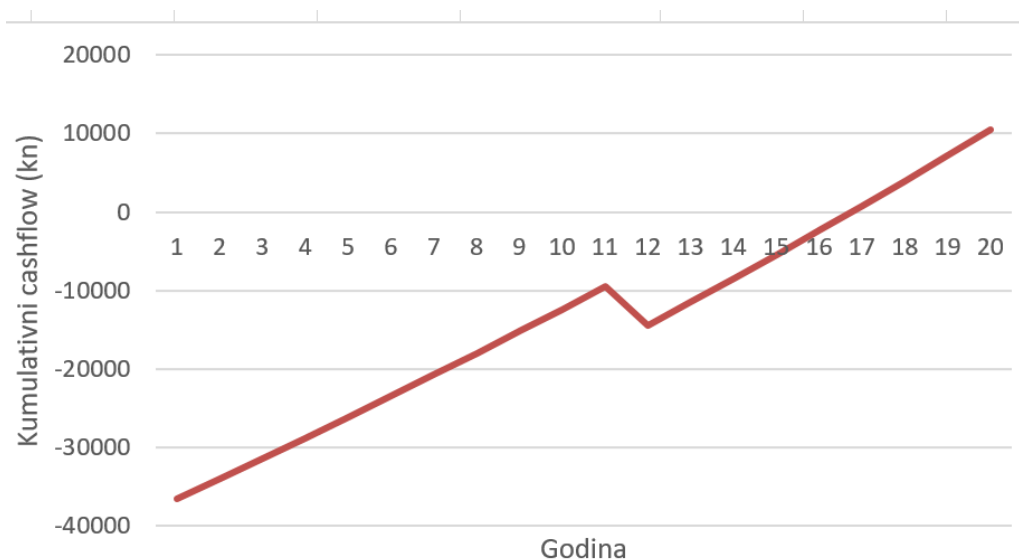
Cijene električne energije preuzeta je sa službene stranice HEP-a te predstavlja cijenu s uračunatom naknadom za korištenje mreže. Na tu cijenu potrebno je nadodati još 0,105 kWh kao naknadu za poticanje proizvodnje iz OIE te 13% PDV-a, što u konačnici iznosi 1,192 kn/kWh za višu tarifu. Osnovna cijena otkupa jest prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza. Ovu je cijenu potrebno korigirati ovisno o formulama (5.1) i (5.2) [27].

U slučaju kada se više energije predaje mreži nego što se preuzima iz nje, za cijenu kWh koristi se formula (5.2) koja zapravo smanjuje naknadu koja se dobiva za prodanu električnu energiju. Zbog toga sunčanu elektranu treba dimenzionirati tako da se u konačnici ne predaje mnogo više energije nego što se iz nje uzima, upravo zato što će prodajna cijena kWh padati, a ukupna cijena investicije u sunčanu elektranu će rasti.

Prilikom izračunavanja isplativosti projekta kao prihodom se smatra sva električna energija koja je iskorištena u trenutku kada su ju FN moduli proizveli, te sva električna energija koja je prodana mreži. Ono što je važno zamijetiti je da će energija koja se koristi u isto vrijeme kada je proizvedena (energija vlastite potrošnje) zapravo imati veću vrijednost od energije koja će se prodati u mrežu, upravo zato što je cijena visoke tarife 1,192 kn/kWh, a što je ušteda zbog samopotrošnje. Energija prodana u mrežu se prodaje po drugoj tarifi (cijena otkupa) koja u početnoj godini iznosi 0.86 kn te se dodatno množi s korekcijskim faktorima prema formulama (5.1) i (5.2). Zbog toga je potrebno imati što veći udio samopotrošnje. Prema provedenim

Europskim istraživanjima udio samopotrošnje kreće se u prosjeku oko 30%. Udio samopotrošnje može se povećati instalacijom baterija na 70%.

U nastavku je prikazan proračun u Excel-u i konačan izgled grafa koji prikazuje cashflow kroz godine.



Slika 33. Prikaz kumulativnog Cashflow-a

Kao što je vidljivo sustav postaje isplativ u šesnaestoj godini.

Odnos proizvodnje, potrošnje i samo opskrbe prikazan je u tablici 12, za sve godine, s obzirom da proizvodnja električne energije kroz godine pada, da se cijena električne energije povećava mijenjaju se vrijednosti a time i ukupni prihodi.

Tablica 12. Izračun prihoda kroz 20 godina

Godina	Investicija	PODATCI		POTROŠNJE I PROIZVODNJE					PRIHOD		
		Cijena struje (kn)	Cijena otkupa (kn)	Proizvodnja sustava panela (kWh)	Potrošnja kućanstva (kWh)	Vlastita potrošnja (kWh)	Preuzeto iz mreže (kWh)	Isporučeno u mrežu (kWh)	Prihod zbog prodaje u mrežu (kn)	Prihod zbog vlastite potrošnje (kn)	Ukupni prihodi (kn)
1	36500	1,19	0,86	3220,00	3200,00	805,00	2395,00	2415,00	1869,21	959,56	2828,77
2	0	1,22	0,88	3203,90	3200,00	800,98	2399,03	2402,93	1897,06	973,86	2870,92
3	0	1,24	0,89	3187,88	3200,00	796,97	2403,03	2390,91	1925,33	988,37	2913,70
4	0	1,26	0,91	3171,94	3200,00	792,99	2407,01	2378,96	1954,01	1003,09	2957,11
5	0	1,29	0,93	3156,08	3200,00	789,02	2410,98	2367,06	1983,13	1018,04	3001,17
6	0	1,32	0,95	3140,30	3200,00	785,08	2414,92	2355,23	2012,68	1033,21	3045,89
7	0	1,34	0,97	3124,60	3200,00	781,15	2418,85	2343,45	2042,67	1048,60	3091,27
8	0	1,37	0,99	3108,98	3200,00	777,24	2422,76	2331,73	2073,10	1064,23	3137,33
9	0	1,40	1,01	3093,43	3200,00	773,36	2426,64	2320,07	2103,99	1080,09	3184,08
10	0	1,42	1,03	3077,96	3200,00	769,49	2430,51	2308,47	2135,34	1096,18	3231,52
11	0	1,45	1,05	3062,57	3200,00	765,64	2434,36	2296,93	2167,16	1112,51	3279,67
12	-7800	1,48	1,07	3047,26	3200,00	761,82	2438,18	2285,45	2199,45	1129,09	3328,54
13	0	1,51	1,09	3032,03	3200,00	758,01	2441,99	2274,02	2232,22	1145,91	3378,13
14	0	1,54	1,11	3016,87	3200,00	754,22	2445,78	2262,65	2265,48	1162,99	3428,47
15	0	1,57	1,13	3001,78	3200,00	750,45	2449,55	2251,34	2299,24	1180,31	3479,55
16	0	1,60	1,16	2986,77	3200,00	746,69	2453,31	2240,08	2333,50	1197,90	3531,40
17	0	1,64	1,18	2971,84	3200,00	742,96	2457,04	2228,88	2368,26	1215,75	3584,01
18	0	1,67	1,20	2956,98	3200,00	739,24	2460,76	2217,73	2403,55	1233,86	3637,42
19	0	1,70	1,23	2942,19	3200,00	735,55	2464,45	2206,65	2439,36	1252,25	3691,61
20	0	1,74	1,25	2927,48	3200,00	731,87	2468,13	2195,61	2475,71	1270,91	3746,62

Kada se ovom izračunu pridodaju predviđeni troškovi kroz godine moguće je izračunati kumulativni cashflow.

Tablica 13. Izračun troškova i kumulativnog cashflow-a

Godina	TROŠAK	CASHFLOW	
	Održavanje (kn)	Neto prihodi (kn)	Cashflow
1	300,00	2528,77	-36500
2	306,00	2564,92	-33971,23
3	312,12	2601,58	-31406,31
4	318,36	2638,75	-28804,74
5	324,73	2676,44	-26165,99
6	331,22	2714,66	-23489,55
7	337,85	2753,42	-20774,88
8	344,61	2792,73	-18021,46
9	351,50	2832,58	-15228,74
10	358,53	2872,99	-12396,16
11	365,70	2913,97	-9523,16
12	373,01	2955,52	-14409,19
13	380,47	2997,66	-11453,67
14	388,08	3040,38	-8456,01
15	395,84	3083,71	-5415,62
16	403,76	3127,64	-2331,92
17	411,84	3172,18	795,72
18	420,07	3217,34	3967,90
19	428,47	3263,14	7185,24
20	437,04	3309,57	10448,38

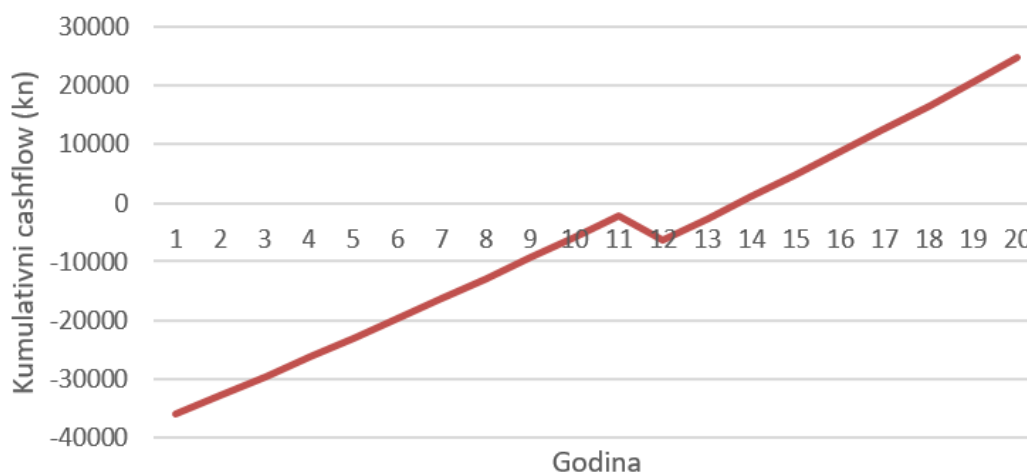
Neto sadašnja vrijednost definira se kao vrijednost godišnjih neto primitaka svedenih na njihovu vrijednost u početnoj godini. Osnova ovakve metode počiva u činjenici da novac dana vrijedi više od novca u budućnosti. Upravo zbog toga budući čisti prihodi umanjuju se za diskontnu stopu (onu kamatnu stopu) koja bi se mogla realizirati kada bi se odgovarajući iznos novca pohranio u banku.

Tablica 14. Neto sadašnja vrijednost

Diskontna	4%
NSV	2.233,65 kn

5.5.2.2 Neto mjerenje

Kao što je ranije objašnjeno neto mjerenje koristi električnu mrežu za pohranu električne energije. Takav sustav bi trebao biti više isplativ što se pokazalo točnim u daljnjem proračunu. Prilikom neto mjerenja sva energija predana mreži kasnije se potroši tijekom godine, što predstavlja uštedu. U obzir je uzeto da se ušteda ostvaruje zbog korištenja energije visoke i niske tarife. Kako je prilikom analize potrošnje kućanstva izračunato da je 21% potrošnje ostvareno po niskoj tarifi, a 79% po visokoj, sukladno tome prilikom izračuna ušteda proizvedena električna energija razdvojena je te je izračunata ušteda prema višoj i nižoj tarifi. U nastavku je prikazan konačan izgled grafa koji prikazuje cashflow kroz godine u Excel-u.



Slika 34. Prikaz kumulativnog Cashflow-a – Net-metering

Kao što je vidljivo sustav postaje isplativ u trinaestoj godini. U nastavku je prikazan proračun prihoda u Excel-u.

Tablica 15. Izračun prihoda kroz 20 godina (Net-metering)

Godina	Investicija (kn)	POTROSNJE I PROIZVODNJE					UŠTEDE		
		Proizvodnja panela (kWh)	Visoka tarifa (kWh)	Niska tarifa (kWh)	Visoka tarifa (kn)	Niska tarifa (kn)	Ušteda visoke tarife (kn)	Ušteda niske tarife (kn)	Ukupn godišnja ušteda (kn)
1	36500	3220	2543,8	676,2	1,192	0,63845	3032,21	431,71989	3463,92949
2	0,00	3203,90	2531,081	672,819	1,22	0,651219	3077,39	438,15252	3515,542039
3	0,00	3187,88	2518,425595	669,454905	1,24	0,664243	3123,243	444,68099	3567,923616
4	0,00	3171,94	2505,833467	666,1076305	1,26	0,677528	3169,779	451,30674	3621,085678
5	0,00	3156,08	2493,3043	662,7770923	1,29	0,691079	3217,009	458,03121	3675,039854
6	0,00	3140,30	2480,837778	659,4632069	1,32	0,7049	3264,942	464,85587	3729,797948
7	0,00	3124,60	2468,433589	656,1658908	1,34	0,718998	3313,59	471,78222	3785,371938
8	0,00	3108,98	2456,091421	652,8850614	1,37	0,733378	3362,962	478,81178	3841,773979
9	0,00	3093,43	2443,810964	649,6206361	1,40	0,748046	3413,07	485,94607	3899,016412
10	0,00	3077,96	2431,591909	646,3725329	1,42	0,763007	3463,925	493,18667	3957,111756
11	0,00	3062,57	2419,43395	643,1406702	1,45	0,778267	3515,538	500,53515	4016,072721
12	-7800,00	3047,26	2407,33678	639,9249669	1,48	0,793832	3567,919	507,99313	4075,912205
13	0,00	3032,03	2395,300096	636,725342	1,51	0,809709	3621,081	515,56222	4136,643297
14	0,00	3016,87	2383,323596	633,5417153	1,54	0,825903	3675,035	523,2441	4198,279282
15	0,00	3001,78	2371,406978	630,3740067	1,57	0,842421	3729,793	531,04044	4260,833643
16	0,00	2986,77	2359,549943	627,2221367	1,60	0,85927	3785,367	538,95294	4324,320064
17	0,00	2971,84	2347,752193	624,086026	1,64	0,876455	3841,769	546,98334	4388,752433
18	0,00	2956,98	2336,013432	620,9655959	1,67	0,893984	3899,011	555,13339	4454,144845
19	0,00	2942,19	2324,333365	617,8607679	1,70	0,911864	3957,107	563,40488	4520,511603
20	0,00	2927,48	2312,711698	614,7714641	1,74	0,930101	4016,068	571,79961	4587,867226

Ovom proračunu treba pridodati troškovi da dobijemo kumulativni cashflow. Diskontna stopa u ovom slučaju je mnogo veća nego u prošlom.

Tablica 16. Izračun troškova i kumulativnog cashflow-a (Net-metering)

Godina	TROŠAK	CASHFLOW	
	Održavanje (kn)	Neto prihodi (kn)	Cashflow
1	300	3163,9295	-36000
2	306	3209,542	-32836,07
3	312,12	3255,8036	-29626,53
4	318,3624	3302,7233	-26370,72
5	324,729648	3350,3102	-23068
6	331,224241	3398,5737	-19717,69
7	337,8487258	3447,5232	-16319,12
8	344,6057003	3497,1683	-12871,59
9	351,4978143	3547,5186	-9374,426
10	358,5277706	3598,584	-5826,908
11	365,698326	3650,3744	-2228,324
12	373,0122925	3702,8999	-6377,95
13	380,4725384	3756,1708	-2675,05
14	388,0819891	3810,1973	1081,12
15	395,8436289	3864,99	4891,32
16	403,7605015	3920,5596	8756,31
17	411,8357115	3976,9167	12676,87
18	420,0724258	4034,0724	16653,79
19	428,4738743	4092,0377	20687,86
20	437,0433518	4150,8239	24779,90

Tablica 17: Neto sadašnja vrijednost (Net-metering)

Diskontna stopa	4%
NSV	32.716,67 kn

5.6 Važeći zakoni za instalaciju sunčane elektrane

Prilikom instalacije sunčane elektrane na krov kuće, potrebno je pratiti Pravilnik o jednostavnim građevinama i radovima. Nakon toga potrebno je zadovoljiti Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu te u konačnici treba sklopiti Ugovor o priključenju na elektroenergetsku mrežu s HEP-Operatorom kako bi se stekao status povlaštenog proizvođača te pravo na otkup električne energije.

Nositelj projekta treba zatražiti izdavanje Prethodne elektroenergetske suglasnosti uz koji treba priložiti idejni projekt i dokaz o pravu gradnje. Nakon toga HEP-ODS utvrđuje je li postrojenje za proizvodnju električne energije jednostavna građevina.

U pravilniku o jednostavnim i drugim građevinama i radovima (NN 112/17, NN 34/18, NN 36/19, NN 98/19, NN 31/20) stoji kako se bez građevinske dozvole, ali u skladu s glavnim projektom, mogu izvoditi radovi na postojećoj građevini priključenju na elektroenergetsku mrežu na koju se postavlja sustav FN modula u svrhu proizvodnje električne energije s pripadajućim razdjelnim ormarom i sustavom priključenja na javnu mrežu za predaju energije u mrežu (Članak 5, stavak 11.). U pravilniku o jednostavnim i drugim građevinama i radovima stoji još nekoliko stavaka o postavljanju sustava FN modula, no jedino se ovaj odnosi na sustave s priključenjem na javnu mrežu [20].

Paralelno s izdavanjem Prethodne elektroenergetske suglasnosti HEP-ODS provjerava je li moguće sklapanje Ugovora o otkupu ovisno o ograničenju ukupne snage sukladno Tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz OIE i kogeneracije (NN 133/13, 151/13, 20/14, 107/14, 100/15).

Da bi se postrojenje moglo priključiti na distribucijsku mrežu, izgradnju postrojenja treba obaviti ovlašteni instalater s odgovarajućim certifikatom, dakle fizička ili pravna osoba registrirana za obavljanje elektroinstalacijskih radova koja ima zaposlenog najmanje jednog ovlaštenog inženjera elektrotehnike. Paralelno s izgradnjom postrojenja HEP-ODS gradi priključak na elektroenergetsku mrežu [29].

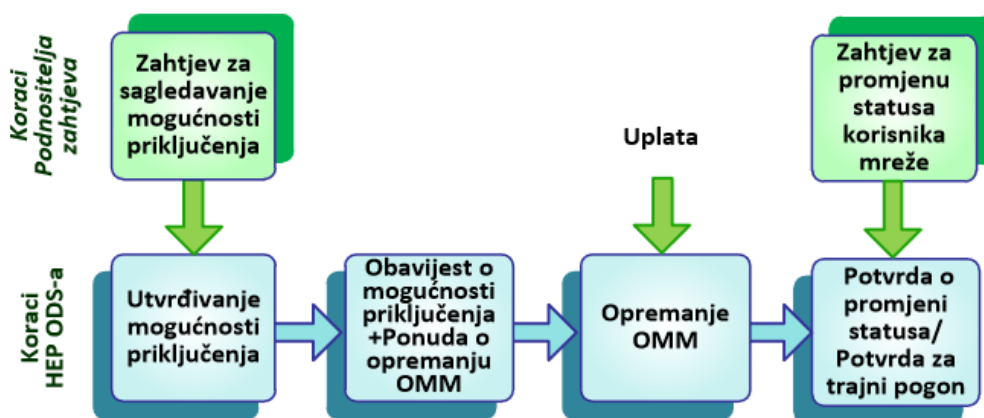
Temeljem članka 68b, stavka 1. Zakona o tržištu električne energije (NN 22/13, 95/15, 102/15, 68/18) te članka 21, stavka 2. Uredbe o izdavanju energetske suglasnosti i utvrđivanju uvjeta i rokova priključenja na elektroenergetsku mrežu (NN 7/2018) uz prethodno odobrenje Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA), HEP-Operator distribucijskog sustava donosi Pravila u priključenju na distribucijsku mrežu [21].

U Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu, opisan je postupak priključenja na električnu mrežu u kojemu su opisani svrha provođenja postupka priključenja, pokretanje postupka priključenja te vrste postupaka priključenja i utvrđivanja složenosti. U članku 5 opisano je pokretanje postupka priključenja koje se podnosi operatoru na propisanim obrascima zajedno s potrebnim priložima, nakon čega se utvrđuje složenost postupka [21].

U ovom se slučaju radi o posebnom postupku priključenja točnije o postupku priključenja kućanstva s vlastitom proizvodnjom. U članku 12 opisan je postupak koji se odnosi na već postojećeg kupca koji traži priključenje elektrane na svoju postojeću instalaciju. Prema tom članku, podnositelj zahtjeva podnosi operatoru distribucijskog sustava zahtjev za provjeru mogućnosti priključenja na postojeću instalaciju te operator u roku od 15 dana izdaje obavijest o mogućnosti priključenja koja sadrži uvijete pod kojima postoji mogućnost priključenja odnosno obrazlaže eventualno nepostojanje uvjeta za priključenje elektrane na postojeću instalaciju. Ako je priključak moguć, podnositelju zahtjeva dostavlja se prijedlog novog ugovora o korištenju mreže, zajedno s zahtjevom i ponudom za opremanje obračunskog mjernog mjesta. Nakon toga podnositelj zahtjeva podmiruje troškove za opremanje mjernog mjesta, potpisuje prijedlog novog ugovora o korištenju mreže i dostavlja zahtjev za promjenu statusa korisnika mreže. Kao prilog zahtjevu za promjenu statusa korisnika mreže dostavlja se tehnička dokumentacija postrojenja i instalacija korisnika mreže koja obuhvaća glavni projekt, zajedno s certifikatom za ugrađenu opremu elektrane koji je izdan od ovlaštenog certifikatora. Prije trajnog priključenja elektrane na mrežu, elektrana se pušta u probni rad te mora zadovoljiti uvjete za paralelan pogon s

elektroenergetskom mrežom. Elektrana se pušta u pogon uz nadzor predstavnika HEP-ODS-a koji dostavlja HEP-ODS-u konačno rješenje u ispravnosti elektrane i njenoj spremnosti za trajni pogon. Nakon toga operator distribucijskog sustava podnosi zahtjeva za promjenu statusa korisnika mreže dostavlja potvrdu o promjeni statusa i potvrdu za trajni pogon u roku od 15 dana od primitka urednog zahtjeva [21].

Nakon što je postrojenje steklo pravo na trajno priključenje na elektroenergetsku mrežu, aktivira se Ugovor za otkup električne energije koji se sklapa s Hrvatskim operatorom tržišta energije d.o.o. (HROTE) kojim je regulirana cijena otkupa električne energije. U svakom mjesecu HEP dostavlja podatke o ukupno proizvedenoj/isporučenoj električnoj energiji HROTE-u i povlaštenom proizvođaču.



Slika 35. Prikaz koraka pri priključenju sustava s vlastitom proizvodnjom [21]

6. Zaključak

U ovom je radu analizirana isplativost projekta ugradnje FN modula na krov obiteljske kuće u Zagrebu. Pomoću PVGIS servisa dobiven je optimalan kut FN modula na danoj lokaciji koji se uz jedan stupanj razlike poklapa s nagibom krova kuće. Upravo zbog toga iskorišten je gotovo potpuni potencijal Sunčeve energije na toj kući. Iz provedene ekonomske vidljivo je da će se projekt s uračunatom izmjenom invertera i godišnjim servisom isplatiti u šesnaestoj godini, što se smatra dobrim rezultatom s obzirom da su takvi projekti osigurani na 20 godina, a ukupno predviđeno vrijeme rada sustava FN modula iznosi oko 25 godina. Također je analizirana isplativost istog tog sustava, u kojoj se umjesto prodaje viška električne energije koristio sustav neto mjerenja i dobivena je isplativost projekta u trinaestoj godini, a što je još povoljniji rezultat. Upravo zbog toga za Hrvatsku bi bilo povoljno preuzeti model neto mjerenja kojim bi se osigurala još veća isplativost projekata vlasnicima malih sunčanih elektrana. Takav bi postupak bio korak u pravom smjeru te bi potaknuo još veći broj ljudi na instalaciju sunčanih elektrana.

7.Literatura

- [1] <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019> , dostupno 14.08.2020.
- [2] <http://marjan.fesb.hr/~fbarbir/PDFs%20Obnovljivi%20izvori/Obnovljivi%20izvori%20i%20odrzivi%20razvoj.pdf> , dostupno 14.08.2020.
- [3] Ankica Kovač, Nove tehnologije u energetici 2019. / 2020.
- [4] <https://www.irena.org/solar>, dostupno 15.08.2020.
- [5] <https://www.volker-quaschnig.de/index.php>, dostupno 15.08.2020.
- [6] Matić, Z: Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske – Priručnik za energetske korištenje Sunčevog zračenja, Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar, 2007
- [7] Umihanić, M., Čehajić, N., Salihović N. : Usporedna analiza proizvodnje električne energije fiksnih fotonaponskih sustava u različitim dijelovima BiH – Stručni članak
- [8] <https://globalsolaratlas.info/download/world>, dostupno 18.08.2020.
- [9] IEA, Snapshot of Global PV Markets, 2020
- [10] <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatia>, dostupno 19.08.2020.
- [11] <https://www.poslovni.hr/hrvatska/hrvatska-je-sesta-u-eu-po-udjelu-oie-u-finalnoj-potrosnji-4214791> , dostupno 19.08.2020.
- [12] Ljubomir Majdandžić, Fotonaponski sustavi, Priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu
- [13] www.ezed.in, dostupno 19.08.2020.
- [14] Ankica Đukić, Proizvodnja vodika elektrolizom vode pomoću Sunčeve energije i fotonaponskoga modula, Doktorska disertacija, 2013.
- [15] Radman M., Simulator fotonaponskih panela, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2010.
- [16] Nodilo K., Usporedba mjerenja i procjene za fotonaponske primjene, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2010.
- [17] <http://www.emrwebsite.org/photovoltaic-system-using-emr-and-simulikt.html> , dostupno 15.09.2020.
- [18] file:///C:/Users/korisnik/Downloads/2011_Limpens_Masterthesis_SpectroscopicalinvestigationsoftheSSQmechanism.pdf
- [19] <http://e-learning.gornjogradska.eu/energijaekologijaengleski-ucenici/2-energija-sunca-i-fotonaponske-celije/>, dostupno 22.08.2020

- [20] PRAVILNIK O JEDNOSTAVNIM I DRUGIM GRAĐEVINAMA I RADOVIMA (NN 112/17, NN 34/18, NN 36/19, NN 98/19, NN 31/20; stupa na snagu 26.3.2020.)
- [21] PRAVILA O PRIKLJUČENJU NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU – HEP-Operator
- [22] <https://www.altestore.com/share/>
- [23] <https://www.schrack.hr/trgovina/fotonapon-pohrana-energije/fotonapon-montazni-sustav/montazni-sustav-varista.html>
- [24] <https://solarno.hr/katalog/proizvod/MONTAZA/cjenik-montaze-solarnih-elektrana>
- [25] <https://www.hep.hr/ods/korisnici/kupac-s-vlastitom-proizvodnjom/29>
- [26] <https://www.amp-solar.com/net-metering>
- [27] <http://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547>
- [28] <https://www.trinasolar.com/eu-en/product/honey>
- [29] <https://www.hrote.hr/sklapanje-ugovora>
- [30] <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>