



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNČKI FAKULTET PODGORICA

Turković Boris

**UTICAJ RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA U IZRADI
FOTONAPONSKIH PANELA NA MOGUĆNOST
ISKORIŠĆENJA SOLARNE ENERGIJE I NJENE
TRANSFORMACIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU**

Magistarski rad

Podgorica, 2022

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

Turković Boris

**UTICAJ RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA U IZRADI
FOTONAPONSKIH PANELA NA MOGUĆNOST
ISKORIŠĆENJA SOLARNE ENERGIJE I NJENE
TRANSFORMACIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU**

Magistarski rad

Podgorica, 2022

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: Boris Turković

Datum i mjesto rođenja: 04.06.1994, Berane.

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:

Elektronika, telekomunikacije i računari, 2017.

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina završetka studija:

Elektronika, 2018.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Uticaj različitih tehnologija u izradi fotonaponskih panela na mogućnost iskorišćenja solarne energije i njene transformacije u električnu energiju

Fakultet na kome je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 10.03.2022

Datum sjednice vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je tema prihvaćena: 16.06.2022.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta:

1. Prof. drVladan Radulović
2. Prof. dr Saša Mujović
3. Docent dr Snežana Vujošević

Mentor:

Prof. dr Saša Mujović

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. drVladan Radulović
2. Prof. dr Saša Mujović
3. Docent dr Snežana Vujošević

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Vladan Radulović
2. Prof. dr Saša Mujović
3. Docent dr Snežana Vujošević

Datum odbrane:07.11.2022

Ime i prezime autora: Boris Turković, Spec. Sci

ETIČKA I Z J A V A

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

**"UTICAJ RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA U IZRADI FOTONAPONSKIH PANELA NA
MOGUĆNOST ISKORIŠĆENJA SOLARNE ENERGIJE I NJENE TRANSFORMACIJE
U ELEKTRIČNU ENERGIJU"**

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Boris Turković, Spec. Sci.



U Podgorici, dana 01.09.2022. godine

Izvod rada

Zbog sve većih potreba za električnom energijom a naročito energijom dobijenom iz obnovljivih izvora, u ovom radu je obrađen potencijal Crne Gore za proizvodnju električne energije iz energije sunčevog zračenja. Sunce predstavlja najveći izvor obnovljive energije. Količina sunčevog zračenja u Crnoj Gori, posebno u priobalnom i centralnom području je među najvećima u Evropi.

Zbog toga je u ovom radu prikazano ponašanje fotonaponskih elektrana baziranih na različitim tehnologijama izrade fotonaponskih panela u cilju utvrđivanja najpovoljnijeg rješenja i sa ekonomskog i sa tehničkog aspekta. Različite tehnologije izrade fotonaponskih panela značajno utiču na stepen konverzije energije Sunčevog zračenja u električnu energiju, kao i na električne, ekološke i ekonomske parametre korišćenja fotonaponskih panela. S tim u vezi, razmatrane su: monokristalna, polikristalna, kao i tankoslojne amorfna, kadmijum-telurid (CdTe), bakar-indijum-selenid (CIS) i HIT tehnologija. U uslovima jednakog nivoa izloženosti Sunčevom zračenju i iz uporedne analize koja je izvršena za svaki od sistema baziranih na različitim tehnologijama izrade fotonaponskih panela su proistekli odgovarajući zaključci o radu, gubicima, prinosima, ekonomskoj analizi sistema, kao i uticaju odnosno doprinosu na smanjenje emisije CO₂ za svaki od sistema. Projektovanje šestofotonaponskih elektrana jednake nazivne snage izvršeno je u softverskom alatu PVsyst.

Ključne riječi: Sunce, obnovljivi izvori, solarni paneli, fotonaponski sistemi, dekarbonizacija.

Abstract

Due to the growing needs for electricity and especially energy obtained from renewable sources, this paper deals with the potential of Montenegro for the production of electricity from solar energy. The sun is the largest source of renewable energy. The amount of solar radiation in Montenegro, especially in the coastal and central area is among the largest in Europe.

Therefore, this paper presents the behavior of photovoltaic power plants based on different technologies of photovoltaic panels in order to determine the most favorable solution from both economic and technical aspects. Different technologies for the production of photovoltaic panels significantly affect the degree of conversion of solar energy into electricity, as well as the electrical, ecological and economic parameters of the use of photovoltaic panels. In this regard, the following were considered: monocrystalline, polycrystalline, as well as thin-film amorphous, cadmium-telluride (CdTe), copper-indium-selenide (CIS) and HIT technology. In cases of the same level of exposure to solar radiation and from the comparative analysis that was carried out for each of the system based on different technologies of electricity production of photovoltaic panels, appropriate conclusions were drawn about the operation, losses, yields, economic analysis, as well as the impact or contribution in reducing CO₂ emissions for each of the system. The design of six photovoltaic power plants of the same rated power was performed in the software tool PVsyst.

Key words: Sun, renewable sources, solar panels, photovoltaics systems, decarbonization.

Sadržaj:

1. Uvod.....	8
2. Pregled literature koja se bavi problematikom obrađeno u radu	10
3. Solarna energija i tehnologije pretvaranja u električnu energiju	13
3.1. Karakteristike solarneenergije u Crnoj Gori	13
3.2. Pregled trenutnog stanja u oblasti proizvodnje električne energije iz energije Sunca i perspektive njenog razvoja	14
3.3. Princip fotonaponske konverzije	15
3.4. Tipovi solarnih ćelija i njihova primjena	17
3.4.1. Karakteristike različitih tipova solarnih ćelija	18
3.4.1.1. Fotonaponske ćelije izgrađene od monokristalnog silicijuma (c-Si)	18
3.4.1.2. Fotonaponske ćelije izgrađene od polikristalnog silicijuma	18
3.4.1.3. Fotonaponske ćelije izgrađene od amorfnog silicijuma (a-Si)	18
3.4.1.4. Polikristalne tankoslojne fotonaponske ćelije	19
3.4.1.5. Monokristalne tankoslojne fotonaponske ćelije	19
3.4.2. Poređenje efikasnosti i primjene različitih tehnologija fotonaponskih ćelija	20
4. Vrste i komponente fotonaponskih sistema	24
4.1. Samostalni (off-grid) fotonaponski sistemi	24
4.2. Mrežni (on-grid) fotonaponski sistemi	25
4.3. Hibridni fotonaponski sistemi	26
4.4. Komponente fotonaponskih sistema	27
4.4.1. Fotonaponski paneli	27
4.4.2. Inverteri	29
4.4.3. Ostale komponente fotonaponskih sistema	31
5. Karakteristični parametri fotonaponske elektrane i rezultati mjerenja	33
6. Finansijska analiza	48
7. Dekarbonizacija	53
8. Zaključak	57
9. Literatura.....	60

1. Uvod

Sve izraženija zagađenja životne sredine, intenzivnije promjene klime, rast cijene fosilnih goriva i predviđanja o njihovom nestanku u bliskoj budućnosti utiču da se stanovnici Zemlje okrenu ka racionalnom korišćenju energije kroz primjenu mjera energetske efikasnosti i korišćenje obnovljivih izvora energije. Ono što je poznato jeste da elektroenergetika predstavlja jednu od grana privrede koja je u proteklih nekoliko decenija, pod uticajem sve glasnijih apela za očuvanje životne sredine, prošla kroz velike promjene, pri čemu je, postepeno, sve veći značaj pridavan obnovljivim izvorima energije, od kojih se očekuje da preuzmu ulogu velikih termoelektrana u elektroenergetskim sistemima. Ukoliko bi se uzeo u obzir trenutni nivo razvoja različitih vrsta obnovljivih izvora, došlo bi se do toga da su vjetroelektrane i solarne elektrane dostigle najveći stepen integracije u generatorski portfolio sistema današnjice.

Najveći izvor obnovljive energije je Sunce [1]. Ova užarena kugla uglavnom se sastoji od vodonika i helijuma. Svake sekunde u njenom centru 600 miliona tona vodonika u procesu fuzije prelazi u helijum, pri čemu dolazi do oslobađanja velikih količina energije. Na ovaj način nastaje više energije nego što čovječanstvo proizvede za jednu godinu. Uslijed pomenutih reakcija temperatura u unutrašnjosti Sunca prelazi 15 miliona °C. Energija dobijena procesom fuzije širi se svemirom u obliku svjetlosne i toplotne energije tako da samo jedan njen mali dio dolazi do Zemlje, gdje se pretvara u druge vidove energije.

Zbog praktično neiscrpne količine energije Sunčevog zračenja, koje predstavlja osnovni izvor života na Zemlji i velikog broja prednosti u odnosu na sve ostale korišćene izvore, danas se sa izuzetnom pažnjom vrše istraživanja u cilju razvoja efikasnih tehnologija korišćenja energije Sunčevog zračenja za zadovoljavanje čovjekovih, svakim danom sve izraženijih, energetskih potreba. Naročito se ulažu veliki naponi da se mnogobrojne tehnologije korišćenja Sunčeve energije, kako tehnologije koje su već razvijene tako i one na kojima se radi u laboratorijama, što prije komercijalizuju i učine kompatibilnim sa postojećim energetskim izvorima, kako bi se sve veći dio energetskih potreba na Zemlji pokrивao Sunčevom energijom neposredno ili njenim prirodno transformisanim oblicima, supstituišući deficitarna i ekološki nepoželjna fosilna goriva, ili zamijenjujući električnu energiju i omogućavajući njenu racionalnu potrošnju.

Sunčevo zračenje na Zemljinu površinu ima snagu od oko 50 milijardi megavata što je 10 hiljada puta više nego što su potrebe naše civilizacije. Ono se može transformisati primjenom različitih tehnologija u toplotnu ili električnu energiju [2].

Direktno pretvaranje Sunčeve energije u druge oblike, naročito u električnu energiju, vrši se relativno lako i jednostavno, znatno lakše nego pretvaranje bilo kog drugog oblika energije. Energija Sunca danas se koristi uz pomoć solarnih kolektora za zagrijavanje vode i prostora, proizvodnju električne energije uz pomoć fotonaponskih ćelija ili pasivno u građevinarstvu pomoću arhitektonskih mjera sa ciljem grijanja i osvjetljavanja prostora.

Primjena solarne energije za konverziju u električnu putem fotonaponskih elektrana predstavlja najsavremeniju tehnologiju korišćenja obnovljivih izvora energije za dijelimičnu substituciju fosilnih goriva i smanjenje emisije štetnih gasova u atmosferu. Kao takve, fotonaponske elektrane predstavljaju adekvatno rešenje koje ima punu podršku kako u zakonima i pratećim

aktima države Crne Gore, tako i u direktivama Evropske Unije. Energija Sunčeve radijacije dovoljna je da proizvede prosječno 1700 kWh električne energije godišnje na svakom kvadratnom metru površine Zemlje, a što je radijacija veća na nekoj lokaciji, veća je i generisana energija.

U ovom magistarskom radu biće analizirano kako različite tehnologije u izradi fotonaponskih panela mogu uticati na stepen konverzije solarne u električnu energiju. S tim u vezi, razmatrane su: monokristalna, polikristalna, kao i tankoslojneamorfna (a-Si), kadmijum-telurid (CdTe), bakar indijum selenid (CIS) i HIT tehnologija. Projektovani su fotonaponski sistemi jednake nazivne snage 7 kW na istoj geografskoj lokaciji (Podgorica, Crna Gora). Iz uporedne analize su proistekli odgovarajući zaključci o radu, gubicima, prinosima, ekonomskoj analizi sistema, kao i uticaju odnosno doprinosu u smanjenju emisije CO₂ za svaki od sistema.

2. Pregled literature koja se bavi problematikom obrađenom u radu

Razvoj solarne energetike i sve veći značaj integrisanja fotonaponskih sistema u distributivne mreže širom svijeta doveli su do toga da se sve veća pažnja okrene istraživanjima u ovoj oblasti i unapređivanju postojećih tehnologija. Veliki je broj stručnjaka i ljudi koje se bave solarnom energetikom kako od tipa sistema, konstrukcije, održavanja, finansijskih analiza, uticaja na životnu sredinu. Značaj solarne energetike iz dana u dan je sve veći a interesovanje za nju je nikad veće. Trenutno je dostupno veliki broj knjiga, naučnih radova i brojnih analiza koje se bave solarnom energetikom kako u svijetu tako i kod nas.

Neke od najznačajnijih publikacija koje se bave datom problematikom i koje mogu poslužiti kako stručnjacima tako i lajcima koji žele da se upoznaju sa značajem solarne energetike kod nas prikazane su u nastavku.

Autor publikacije [3] je prikazao značaj integracije proizvodnje električne energije iz distribuiranih izvora uslijed brzih promjena cijena energenata na tržištu, koji sve više poskupljavaju i značaja smanjenja proizvodnje električne energije iz konvencionalnih izvora. Autor posebno ističe rad sa distribuiranim izvorima, jer su kako Srbija tako i sve zemlje regiona male i siromašne zemlje, ali sa izvanrednim potencijalima za korišćenje obnovljivih izvora.

U [4] autor se bavio proučavanjem značaja energije Sunca kao i načina njenog iskorišćenja. Detaljno je obrađen princip fotonaponske konverzije, kao direktni način pretvaranja energije zračenja Sunca u električnu energiju. Tehnologije izrade fotonaponskih panela su prikazane i njihove karakteristike.

Autori publikacije [5] su se bavili obnovljivim izvorima i njihovim značajem koji je svakim danom sve veći. Najveća pažnja je data energiji Sunca i obrađen je čitav proces od nabavke do održavanja fotonaponskih sistema. Obrađene su sve vrste fotonaponskih sistema kako mrežno povezanih tako i autonomnih, kao i tipovi fotonaponskih materijala koji su dostupni i koji se koriste za izradu fotonaponskih ćelija i modula. Princip fotonaponske konverzije je detaljno obrađen. Autori su istakli značaj ugradnje fotonaponskih sistema u što većem broju. Kako zbog smanjenja fosilnih goriva tako i zbog ekološkog značaja okretanju energiji Sunca kao čistom i nepresušnom izvoru.

U [6] autor se bavio problematikom eksploatacije obnovljivih izvora, iznošenjem pozitivnih i negativnih činjenica, uz obuhvatanje trenutnog stanja i savremenih tehnoloških trendova. Prikazani su načini i kriterijumi koje treba da ispune sistemi da bi se priključili na distributivnu mrežu. Prikazan je uticaj kakav sistemi imaju na praktičnim primjerima prilikom priključenja tih sistema na distributivnu mrežu. Autor je naglasio značaj integracije fotonaponskih sistema uz sve prednosti integracije datih sistema koji su kako sa ekološke tako i ekonomske strane

U publikaciji [7] je obrađena energija Sunca njen značaj kao i načini iskorišćenja. Autor se odlučio za izradu ove knjige zbog značaja obnovljivih izvora i ubrzanog korišćenja raznih vidova obnovljivih izvora u Srbiji. Autor je u ovoj knjizi prikazao potencijal Srbije u iskorišćenju

energije Sunca kao i karakteristikama i vrstama fotonaponskih sistema. Ono o čemu je posebno obrađena pažnja jeste finansijska analiza investicija i njihova ekonomska isplativost. Ova knjiga daje dobru osnovu za upoznavanje sa finansijskom analizom izgradnje fotonaponskih sistem, jer trenutno dostupna literatura se uglavnom bavi tehničko-tehnološkom stranom objašnjenja značaja korišćenja obnovljivih izvora širim društvenim slojevima kao i potencijalnim investitorima. Jasno je da sa trenutnim ulaganjima, kao i trenutnim tehnološkim razvojem kako u Srbiji tako i u regionu, obnovljivi izvori ne mogu zamijeniti konvencionalne izvore ali mogu znatno smanjiti njihovu potrošnju i korišćenje a naročito se to odnosi na privatni sektor. Ono što autor posebno ističe jeste da je potrebno povećati instalisanu snagu kako iz fotonaponskih sistema tako i iz drugih vidova korišćenja obnovljivih izvora. Tako je na primjeru Srbije prikazano da ako bi došlo do drastičnog porasta korišćenja obnovljivih izvora energije u državnom, a naročito u privatnom sektoru to se odnosi na domaćinstva mogle bi se ostvariti značajne novčane uštede.

Autor publikacije [8] je izdao knjigu koja je pristupačna svima onima koji se interesuju za tehnike, planiranje i montažu fotonaponskih sistema, kao i dobit koja se može postići pomoću tih sistema. Ova knjiga je dobra i za početnike jer su svi procesi od planiranja, montaže i održavanja pokrijepljeni slikama, sa razumljivo napisanim tekstovima. Ova knjiga može služiti i kao priručnik koji daje osnovne informacije počev od osnova Sunčevog zračenja i načina dobijanja električne energije, preko naizmjeničnih ispravljača, funkcije i dimenzionisanja provodnika, regulatora punjenja, akumulatora, pa sve do fotonaponskih generatora koji su potrebni za korišćenje u svim sistemima nezavisno jesu li mrežno povezani ili samostalni.

Značaj integracije distribuiranih izvora, a naročito iskorištenje Sunčevog zračenja za proizvodnju električne energije je predmet rada brojnih stručnjaka i kompanija širom svijeta, tako da je trenutno dostupno veliki broj knjiga i radova koji se bave solarnom energijom širom svijeta. A u nastavku su prikazane neke od knjiga stranih autora koji se bave solarnom energetikom.

U [9] autor se bavio proučavanjem čitavog postupka od projektovanja, montaže, rada i održavanja fotonaponskih sistema. Prikazani su principi rada pokrijepljeni slikama kako mrežnih tako i samostalnih fotonaponskih sistemi. Detaljno su opisane sve komponente fotonaponskih sistema od panela, invertora do svih ostalih komponenti. Detaljno je obrađen princip fotonaponske konverzije, kao i princip rada svih komponenti. Autor je prikazao kako sezonalnost odnosno vremenske prilike utiču na proizvodnju fotonaponskih sistema. Odnosno što je i ovom radu prikazano da sa porastom temperature i u periodu kada je Sunčevo zračenje veće veći su gubici a i efikasnost sistema je manja.

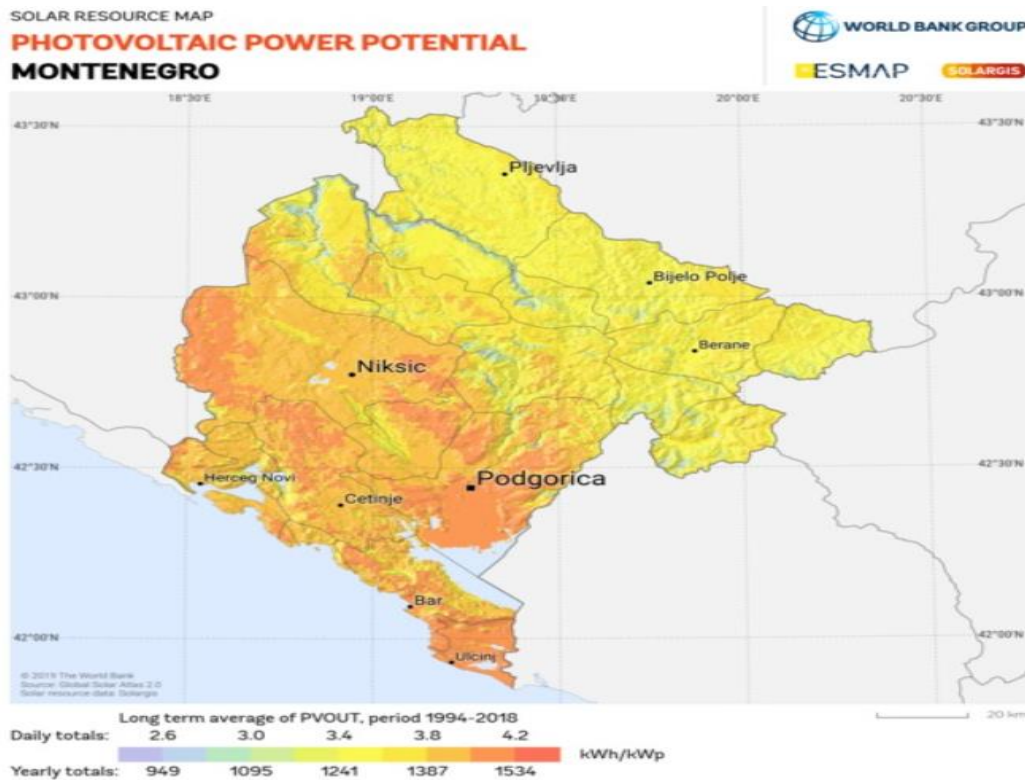
Autori publikacije [10] su detaljno objasnili proces proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela. Sve komponente sistema i vrste panela su prikazane od solarnih ćelija do tipova fotonaponskih sistema. Autori su prikazali značaj invertora koji su uz panela najvažnije komponente sistema oni imaju pored funkcije pretvaranja jednosmjerne u naizmjeničnu električnu energiju i bezbjedonosnu ulogu u smislu da gase sistem kada dođe do nestanka napajanja električne energije iz distributivnog sistema kao i ulogu ponovnog uspostavljanja konekcije kada dođe do ponovnog generisanja električne energije iz distributivnog sistema.

U publikaciji [11] indijskog autora obrađene su i detaljno objašnjene sve komponente fotonaponskog sistema kao i način rada svih vrsta fotonaponskih sistema. Obrađene su sve vrste tehnologija za izradu fotonaponskih sistema: monokristalne, polikristalne i tankoslojne, kao i načini dobijanja svake od tehnologija pojedinačno. Prikazane su i upoređene trenutno dostupne tehnologije, njihova primjena i pretpostavke o daljoj upotrebi. Ono što je prikazano jeste da se očekuje da će u narednom periodu dosta da se ulaže u unapređenje postojećih tehnologija a naročito tankoslojnih (CIS, CdTe i amorfnih). Tankoslojne tehnologije privlače posebnu pažnju zbog načina proizvodnje, fleksibilnosti kao i veće efikasnosti pri radu u odnosu na ostale tehnologije kada su dani uglavnom oblačni. Ove karakteristike tankoslojne tehnologije stvaraju mogućnost da uz unapređenje date tehnologije ona preuzme primat pri izgradnji fotonaponskih sistema u oblastima sa manjim brojem sunčanih dana.

3. Solarna energija i tehnologije pretvaranje u električnu energiju

3.1. Karakteristike solarne energije u Crnoj Gori

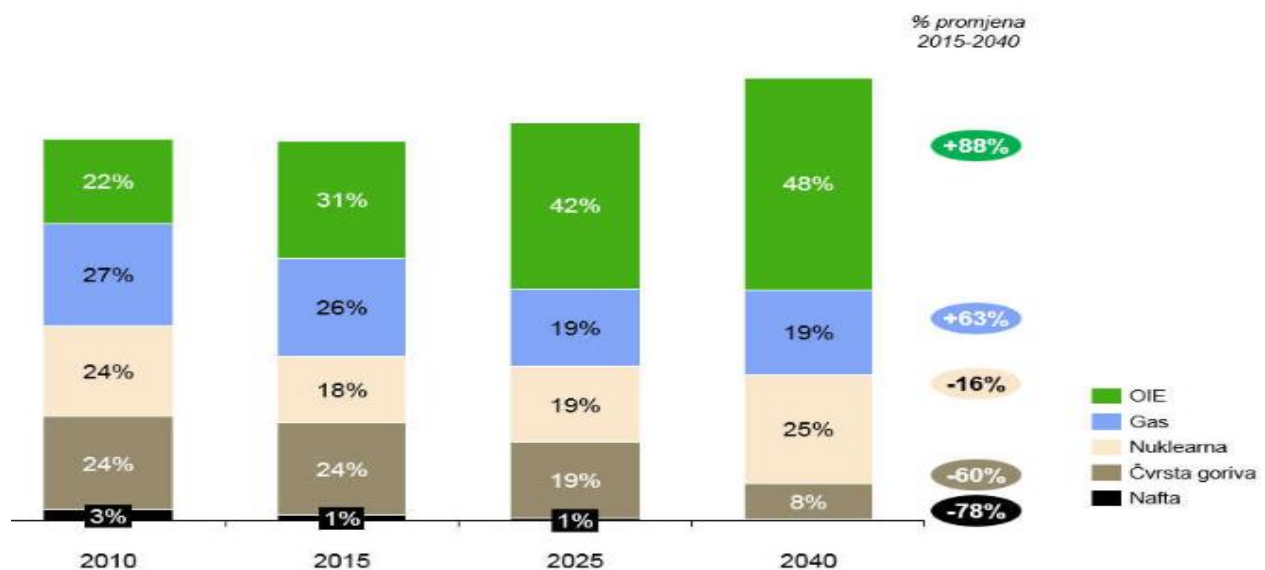
Na insolaciju određenog mjesta na Zemlji najviše utiču geografska širina i lokalne klimatske prilike. Naša zemlja ima dobre uslove za korišćenje solarnih sistema s obzirom na to da na godišnjem nivou broj Sunčanih sati iznosi preko 2 000 časova godišnje za veći dio teritorije Crne Gore i više od 2 500 časova godišnje duž morske obale. Količina Sunčevog zračenja u Crnoj Gori, posebno u priobalnom i centralnom području, može se uporediti sa količinom Sunčevog zračenja u Grčkoj ili južnoj Italiji. Tačnije, Podgorica ima veću godišnju količinu solarne energije ($1\,602\text{ kWh/m}^2$) u odnosu na druge gradove jugoistočne Evrope (kao što su Rim ili Atina) [12]. U priobalnom dijelu broj sunčanih sati premašuje vrijednost od 2 500 sunčanih sati godišnje, pri čemu je najintenzivnije Sunčevo zračenje tokom ljeta, kasnog proljeća i rane jeseni. Veliki broj sunčanih sati karakterističan je i za ravničarske predjele. Veće razlike postoje između priobalnog područja i centralnog u odnosu na planinski dio gdje Sunčeva insolacija može biti nedovoljna.



Slika 1. Mapa potencijala sunčeve energije Crne Gore

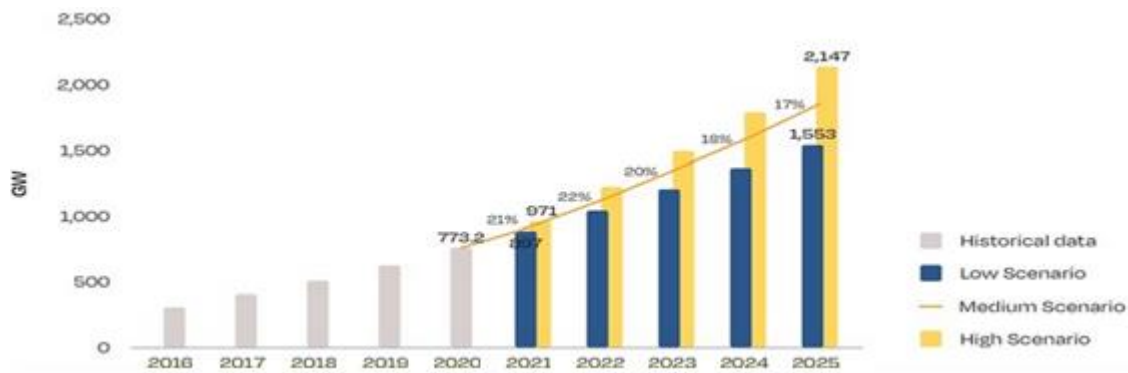
3.2. Pregled trenutnog stanja u oblasti proizvodnje električne energije iz energije Sunca i perspektive njenog razvoja

Sunce kao što je već poznato predstavlja jedan od obnovljivih izvora koji treba da nađe najveću primjenu u proizvodnji električne energije u narednom periodu uslijed značajne tranzicije elektroenergetskih sektora izazvanih intenzivnim promjenama klime i nedostatkom fosilnih goriva koji se predviđa u skorijem periodu. Primjena obnovljivih izvora mora biti sve veća a i na svjetskom nivou mnogo sredstava se ulaže na ispitivanja i istraživanja alternativnih izvora električne energije. U poslednjih petnaest godina došlo je do naglog i brzog razvoja proizvodnje električne energije iz energije Sunca i vjetra kao dva izvora za koja se smatra da će u narednom periodu predstavljati jezgro svih elektroenergetskih sistema. Na slici 2 je prikazana projekcija kretanja proizvodnje električne energije u narednom periodu [13].



Slika 2. Projekcija kretanja proizvodnje električne energije u Evropi, 2010-2040. godine

Ono što se može vidjeti sa slike jeste da proizvodnja iz obnovljivih izvora a naročito se to odnosi na solarne i vjetro elektrane se očekuje da će da pokriva skoro pola svjetske proizvedene električne energije[3]. Solarni fotonaponski sistemi koji rade na direktnom pretvaranju energije Sunca u električnu energiju sve više se integrišu u elektroenergetske sisteme širom svijeta a glavni razlozi su podizanje svijesti o njihovom značaju, proizvodnim kapacitetima koje imaju brojne zemlje koje obiluju sunčanim danima kao što je na primjer i naša Crna Gora, kao i padom cijena komponenti solarnih sistema. Pad cijena ulaganja u gradnju fotonaponskih sistema očekuje se da bude najveći u narednih pet godina u odnosu na druge obnovljive izvore i smatra se da će biti 59% manji u odnosu na 2015 [14]. Na slici 3 je prikazano stanje na svjetskom tržištu fotonaponskih sistema kao i količina instalisanih sistema i projekcije njihovog razvoja u bliskoj budućnosti.

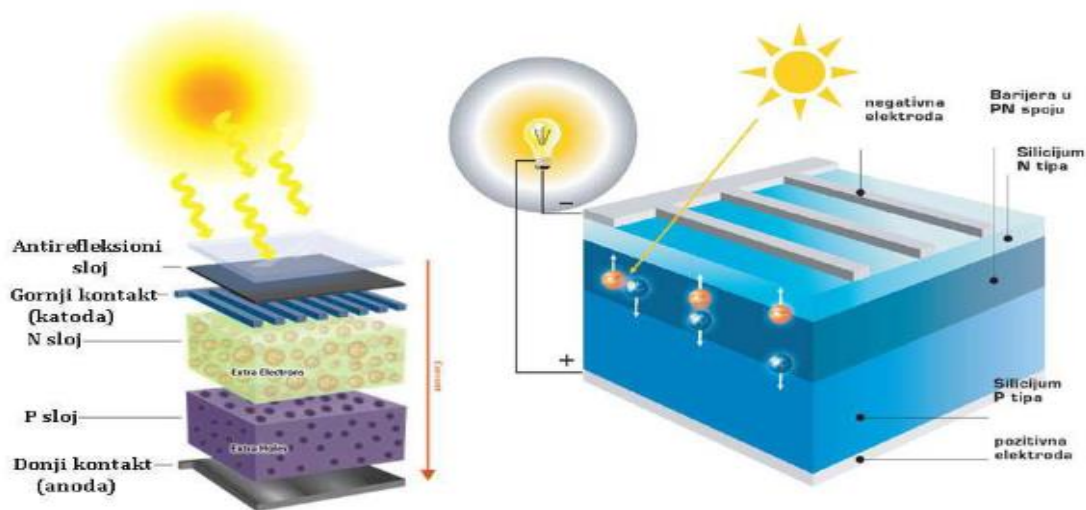


Slika 3. Projekcija instalisanih solarnih fotonaponskih sistema u svijetu, 2021-2025

Ukupna količina instalisanih solarnih kapaciteta krajem 2020 iznosila je 773.2 GW što je za 18% više nego u 2019. Uprkos brojnim negativnim uticajima kao što je epidemija koronavirusa u 2020-oj godini je instalisano 138.2 GW, a udio solarnih elektrana u instalaciji sistema na obnovljive izvore je 39%, čime su solarni sistemi dominantni u odnosu na ostale sisteme proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Ukupna količina instalisanih fotonaponskih sistema se očekuje da će u narednom periodu da raste konstantno sa više od 100 GW instalisanih sistema na godišnjem nivou. Taj rast se očekuje da bude i veći, tako se u najgorem slučaju očekuje da do 2025. godine ukupan instalisani kapacitet solarnih sistema iznosi 1.5 TW.

3.3. Princip fotonaponske konverzija energije Sunca

Fotonaponski efekat je otkrio 1839. godine Aleksandar Edmond Becquerel. Pomoću fotonaponskog efekta može se Sunčeva energija direktno pretvoriti u električnu u solarnim ćelijama. Prvu solarnu ćeliju od silicijuma napravio je 1953.godine Džerald Parson i tada počinje razvoj solarnih ćelija i proizvodnja električne energije od Sunčeve svjetlosti. Kada solarna ćelija apsorbira Sunčevo zračenje, fotonaponskim efektom se na njenim krajevima proizvede elektromotorna sila i tako solarna ćelija postaje izvor električne struje.

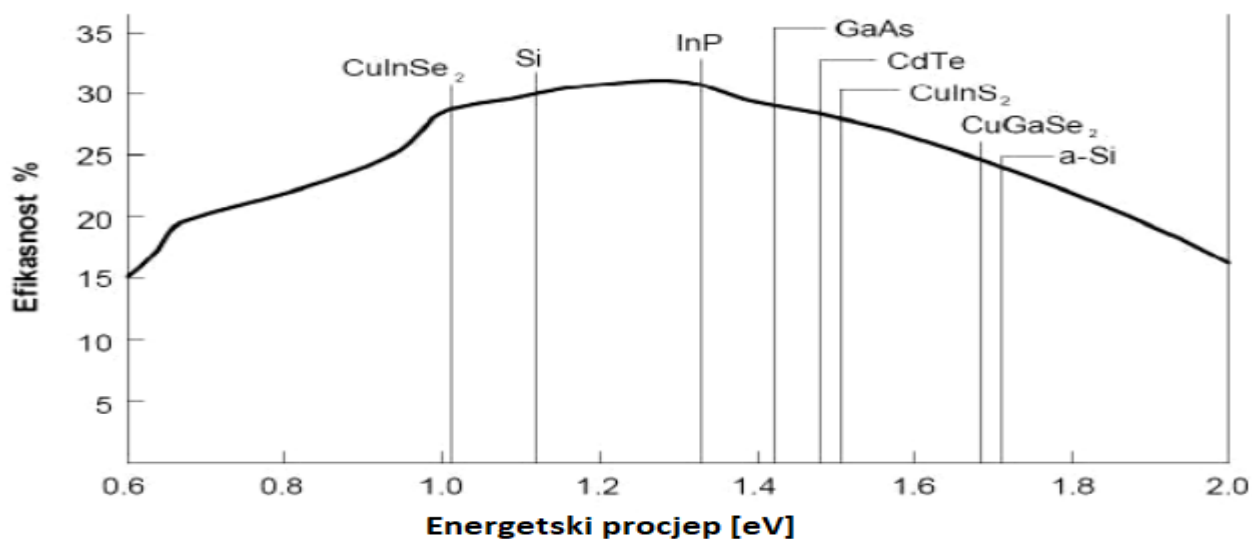


Slika 4. Solarna silicijumska ćelija i princip fotonaponske konvezijske

Da bi dobili električnu energiju fotoelektričnim efektom trebamo imati usmjereno kretanje fotoelektrona, odnosno struju. Sve naelektrisane čestice, a tako i fotoelektroni kreću se usmjereno pod uticajem električnog polja. Električno polje koje je ugrađeno u sam materijal nalazi se u poluprovodnicima i to u osiromašenom području PN spoja (diode). Za poluprovodnike treba naglasiti da uz slobodne elektrone u njima postoje i šupljine kao nosioci naelektrisanja koje su svojevrsan nusprodukt pri nastanku slobodnih elektrona. Šupljina nastaje svaki put kada od valentnog elektrona nastane slobodni elektron i taj proces naziva se generacija, dok se obrnuti proces, kada slobodni elektron popuni prazno mjesto - šupljinu, zove rekombinacija. Ako parovi elektron-šupljina nastanu daleko od osiromašenog područja moguće je da se rekombinuju, prije nego što ih razdvoji električno polje. Parovi koji ostanu uz osiromašeno područje ili u njemu bivaju privučeni, i to šupljine prema P strani poluprovodnika, te elektroni prema N strani poluprovodnika. Zbog toga se fotoelektroni i šupljine u poluprovodniku, nagomilavaju na suprotnim krajevima i na taj način stvaraju elektromotornu silu. Ako na takav sistem spojimo potrošač, poteći će struja i dobiti ćemo električnu energiju [4].

Električno polje osiromašenog područja, osim što služi da razdvoji i usmjeri kretanje slobodnih naelektrisanja u PN spoju, stvara dodatnu energetska barijeru slobodnim nosiocima naelektrisanja. Slobodni nosioci (elektroni i šupljine) nastali iz sudara valentnog elektrona i fotona trebaju imati dovoljno energije da bi savladali i energetska barijeru. S tog stanovišta, energetska barijera bi trebala biti što manja, ali kada je ne bi bilo, ne bi bilo niti električnog polja, niti funkcije koju ono obavlja. Prema ovakvom rezonovanju izračunata je teorijska maksimalna efikasnost za određene energetske barijere. Širina energetske barijere ima različite vrijednosti za PN spojeve izrađene od različitih materijala. Širini energetske barijere električnog polja u PN spoju u fotonaponskoj ćeliji posvećuje se puno pažnje u tehnologiji izrade fotonaponskih ćelija. Vrijednost optimalne energetske barijere za Sunčevu svjetlost se kreće u opsegu od 1.4 do 1.6V. Energetska barijera silicijuma je manja od optimalne, ali pošto je u prirodi prisutan u velikim količinama, silicijum predstavlja trenutno najzastupljeniji materijal od

koga se izgrađuju fotonaponske ćelije. Fotonaponske ćelije izgrađene od galijum arsenida (GaAs), kao i od kadmijum-telurida (CdTe) imaju skoro optimalnu vrijednost energetske barijere, odnosno fotoni Sunčevog zračenja imaju energiju blisku energetske barijeri ovih materijala [5]. Intenzitet svjetlosti i površina ćelije određuju struju, dok energetska barijera materijala određuje napon. Ako je energetska barijera mala, više fotona će stvarati nosioce naelektrisanja, ali će napon biti manji, dok za slučaj velike energetske barijere, manje fotona će imati dovoljnu energiju da stvori nosioce naelektrisanja, odnosno struju, ali će napon biti veći [15]. Na slici 5 su prikazane krive zavisnosti konverzije Sunčeve svjetlosti u zavisnosti od energetske barijere materijala koji se koristi za izradu fotonaponske ćelije [16].



Slika 5. Zavisnost efikasnosti fotonaponske konverzije od veličine energetske barijere materijala

3.4. Tipovi solarnih ćelija i njihova primjena

Danas se na tržištu nalazi veliki broj solarnih ćelija a sa razvojem tehnologije iz dana u dan se poboljšavaju određene tehnologije i dolazi do nekih novih podataka i poboljšanja karakteristika solarnih ćelija. Postoji više kriterijuma prema kojima se mogu razvrstati fotonaponske ćelije, jedan je prema debljini provodnika. Posmatrajući debljinu provodnika imamo da standardne silicijumske fotonaponske ćelije su debljine reda 200-500 um. Dok drugi tip su fotonaponske ćelije napravljene od tankoslojnog materijala, filmova, debljine od svega nekoliko mikrona reda 1-10 um. Za njihovu izradu se najčešće koriste amorfni silicijum, polikristalni materijali, kadmijum-telurid (CdTe) i drugi [17].

Na osnovu načina na koji su atomi povezani u kristalima fotonaponske ćelije se mogu podijeliti na: monokristalne (napravljene od jednog kristala, uglavnom su silicijumske), multikristalne

(napravljene su od većeg broja velikih kristala), polikristalne (napravljene su od velikog broja malih kristalnih zrna, izrađuju se od kadmijum-telurida (CdTe) i tankoslojnog silicijuma), mikrokrystalne (napravljene od veoma sitnih kristalnih zrna) i amorfne [18]. Fotonaponske ćelije se takođe dijele i na osnovu toga da li su p-tip i n-tip poluprovodnika izrađeni od istog materijala ili od različitog, odnosno jesu li homogene ili heterogene. Tako postoje ćelije gdje je n-tip poluprovodnika izrađen od kadmijum-sulfida (CdS) dok je p-tip izgrađen od bakar-indijum-diselenida (CIS) [19].

3.4.1. Karakteristike različitih tipova solarnih ćelija

3.4.1.1. Fotonaponske ćelije izrađene od monokristalnog (c-Si) silicijuma

Fotonaponske ćelije izrađene od monokristalnog silicijuma imaju homojunkšnu strukturu, što znači da se sastoje od istog materijala koji je modifikovan tako da je na jednoj strani ćelije p-spoj, a na drugoj n-spoj silicijumskog poluprovodnika. U unutrašnjosti ćelije, p-n spoj je pozicioniran tako da se maksimum Sunčevog zračenja apsorbuje blizu spoja. Napon takvih ćelija se kreće od 0.55V do 0.70 V. Teorijska efikasnost im je oko 24 %, dok je stvarna efikasnost oko 15%. Jedina mana ćelija izrađenih od monokristalnog silicijuma je visoka proizvodna cijena, zbog komplikovanog procesa proizvodnje.

3.4.1.2. Fotonaponske ćelije izrađene od polikristalnog silicijuma (p-Si)

Identično kao sa ćelijama od monokristalnog silicijuma, fotonaponske ćelije izrađene od polikristalnog silicijuma imaju homojunkšnu strukturu. Suprotno monokristalnom silicijumu, polikristalni silicijum sačinjen je od više malih kristala, zbog čega dolazi do pojave granica. Granice sprječavaju tok elektronima pa ih podstiču na rekombinovanje sa šupljinama što rezultuje smanjenjem izlazne snage takvih ćelija. Proizvodnja solarnih ćelija iz polikristalnog silicijuma je najbrže rastući segment fotonaponske industrije. Polikristalne silicijumske ćelije izrađuju se u različitim oblicima i dimenzijama. Komercijalno dostupne polikristalne silicijumske ćelije imaju efikasnost 15% a laboratorijske 19%.

3.4.1.3. Fotonaponske ćelije izrađene od amornog silicijuma (a-Si)

Atomi unutar amornih materijala nijesu složeni u nikakvu posebnu strukturu, odnosno ne formiraju kristalnu strukturu. Takođe, amorfni materijali sadrže veliki broj strukturnih defekata i lošu povezanost atoma, što znači da atomi nemaju susjeda sa kojima bi se mogli povezati. Zbog navedenog razloga elektroni će se rekombinovati sa šupljinama umjesto da uđu u strujni krug. Budući da defekti limitiraju tok električne struje, ovakve vrste materijala su neprihvatljive u elektronskim uređajima. Defekti se mogu djelimično ukloniti ako se u amorfni silicijum ugradi

mala količina vodonika. Posljedica takvog tretiranja amorfnog silicijuma je kombinovanje atoma vodonika sa atomima amorfnog silicijuma koji nemaju susjeda (nijesu vezani) tako da elektroni mogu putovati kroz materijal nesmetano. Amorfni silicijum upija Sunčevo zračenje 40 puta efikasnije naspram monokristalnog silicijuma, tako da sloj debljine 1m može upiti oko 90% energije Sunčevog zračenja, naravno kada je osvijetljen. Upravo to svojstvo amorfnog silicijuma bi moglo sniziti cijenu fotonaponske tehnologije što je trenutno aktuelno i dalje se radi na unapređenju ovog svojstva amorfnog silicijuma.

Ostale prednosti amorfnog silicijuma takođe su ekonomskog karaktera, na primjer amorfni silicijum je moguće proizvesti na niskim temperaturama i može biti položen na jeftine podloge (plastika, staklo, metal i sl.) što ga čini idealnim za integrisanje fotonaponske tehnologije kao sastavnog dijela objekta.

3.4.1.4. Polikristalne tankoslojne fotonaponske ćelije

Termin tankoslojni, tačnije tanki film odnosi se na tehnologiju polaganja filma, a ne na debljinu filma, pošto se tankoslojne fotonaponske ćelije polažu u izrazito tankim, uzastopnim slojevima atoma, molekula ili jona. Fotonaponske ćelije izrađene tehnologijom tankog filma imaju puno prednosti naspram ćelija izrađenih klasičnim metodama, na primjer:

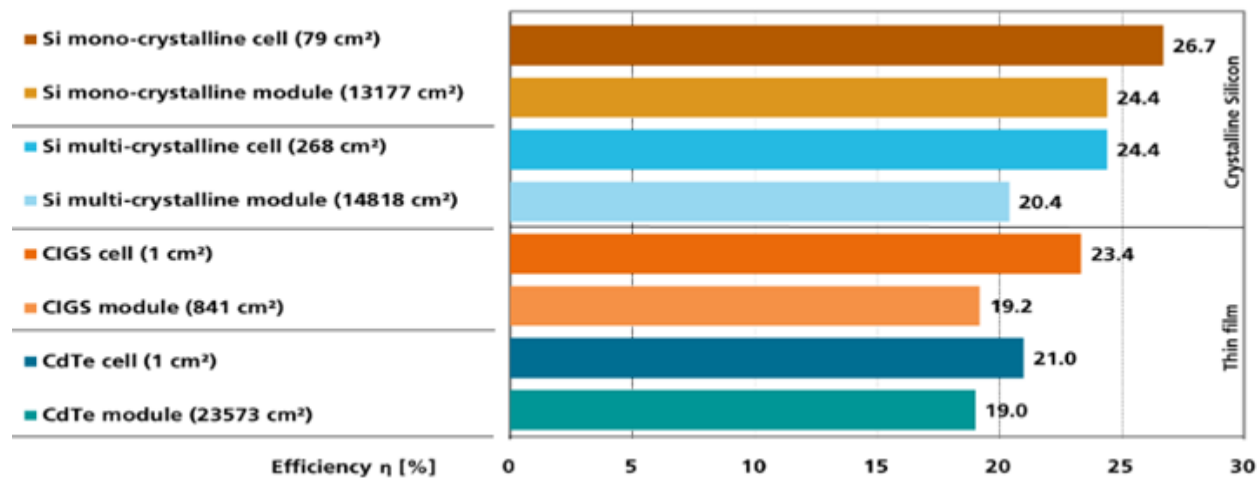
- tankoslojne ćelije proizvode se automatizovanim, besprekidnim procesima mogu se polagati na jeftinije podloge (staklo, nerđajući čelik, plastika).
- ćelijama izrađenim tehnologijom tankog filma nije potrebna metalna mreža za gornji kontakt (kao kod monokristalnih silicijumskih ćelija), već koriste tanki sloj transparentnog vodonik oksida.
- slojevi tankog filma polažu se na odabranu podlogu uključujući antireflektujućii sloj i transparentni sloj vodonik oksida, čime se skraćuje proces proizvodnje.

3.4.1.5. Monokristalne tankoslojne fotonaponske ćelije i multijunkšn strukture ćelija.

Monokristalne tankoslojne fotonaponske ćelije većinom su izrađene od galijum-arsenida. Galijum-arsenid (Ga-As) je poluprovodnik sastavljen od dva elementa: galijuma i arsena. Osim što se koristi u fotonaponskoj tehnologiji, Ga-As se koristi kod LED dioda, lasera i ostalih elektronskih uređaja koji koriste svjetlost. Ćelije napravljene od galijum-arsenida uglavnom imaju multijunkšn strukturu koja se često naziva i kaskadnom strukturom.

3.4.2. Poređenje efikasnosti i primjene različitih tehnologija fotonaponskih ćelija

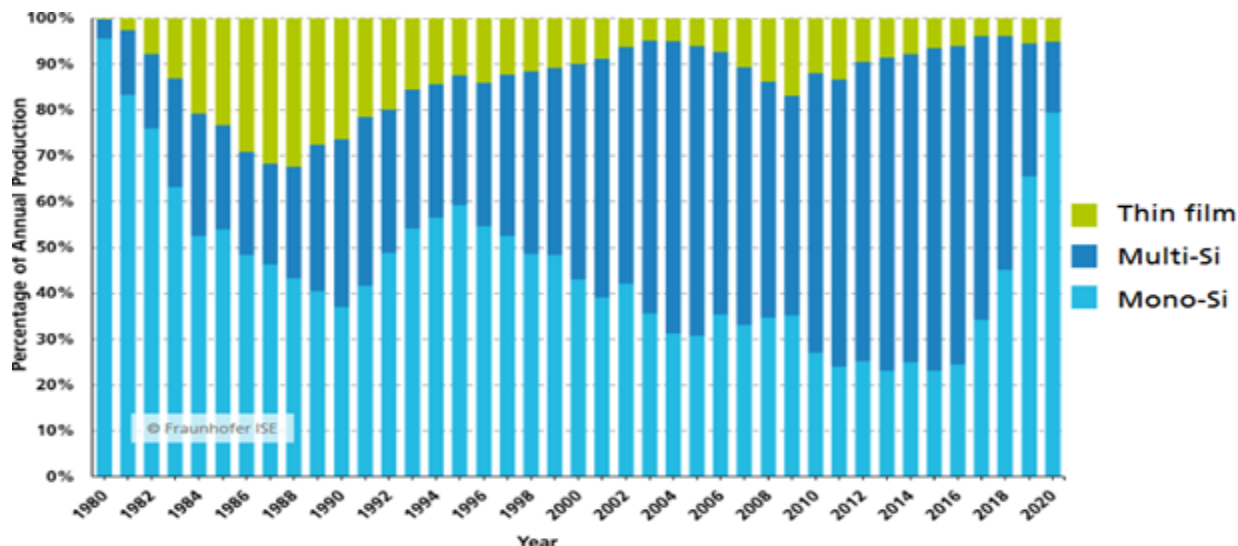
Zbog sve većeg značaja ugradnje fotonaponskih sistema i direktiva koje nalažu da se pređe na zelenu energiju ogromna su istraživanja i brojni naučni centri rade na razvoju fotonaponskih tehnologija. Brojne svjetske kompanije koje se bave proizvodnjom fotonaponskih panela rade na unapređenju karakteristika fotonaponskih panela baziranih na raznim tehnologijama i samim time nastoje postići veću efikasnost proizvedenih komponenti i time zauzeti više prostora na tržištu komponenti fotonaponskih sistema. Trenutno monokristalni fotonaponski sistemi imaju najveću efikasnost jer monokristalne ćelije koje predstavljaju osnovu ovih sistema imaju najveću efikasnost i pokazuju najbolje karakteristike u proizvodnji električne energije. Međutim sistemi koji koriste polikristalne ćelije sa razvojem tehnologije i svoje pristupačnosti u pogledu cijene u odnosu na monokristalne nalaze sve veću primjenu u izgradnji fotonaponskih sistema. Najslabije performanse i efikasnost imaju fotonaponski sistemi bazirani na tankoslojnim tehnologijama ali u razvoj ovih sistema se najviše ulaže i najbrojnija su istraživanja jer se relativno skoro počelo sa primjenom ovih sistema a smatra se da će nekoj skorijoj budućnosti oni preuzeti veći udio u proizvodnji električne energije iz fotonaponskih sistema. Na slici 6 je prikazano poređenje efikasnosti različitih tehnologija solarnih ćelija i modula koje je postignuto sa trenutnim razvojem u raznim laboratorijskim ispitivanjima.



Slika 6. Poređenje efikasnosti različitih tehnologija solarnih ćelija i modula

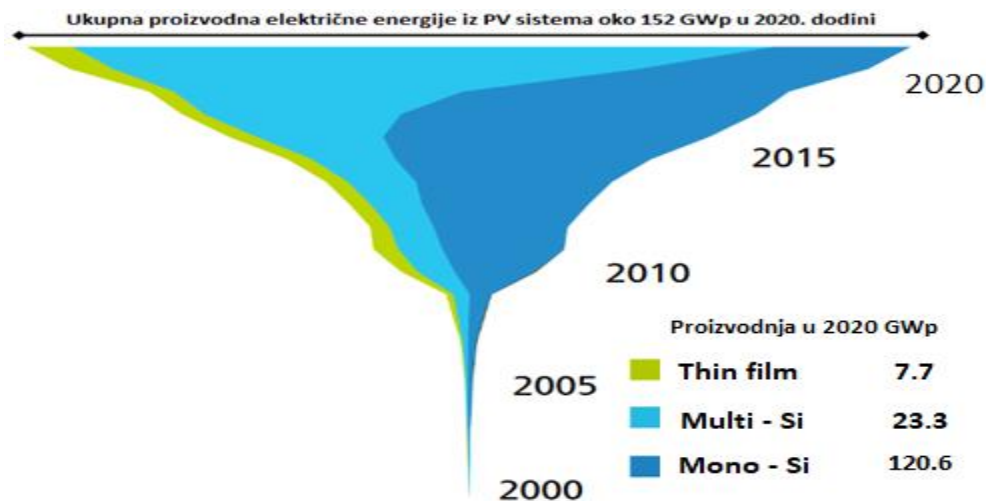
Fotonaponski sistemi trenutno učestvuju u ukupnoj proizvodnji električne energije svakim danom sve više ali ipak ta brojka je i dalje niska u odnosu na očekivanja i značaj. Kao što je poznato trenutno se više od 70 % svjetske proizvedene električne energije dobija iz neobnovljivih izvora i to je jedan ozbiljan problem koji će morati da se u što kraćem roku riješi. U ukupnoj proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora solarni sistemi svakim danom uzimaju sve veći udio i već sada su dominantan proizvođač električne energije iz obnovljivih izvora. U ukupnoj proizvodnji električne energije iz fotonaponskih sistema najviše udjela imaju monokristalni fotonaponski sistemi jer je trenutno ta tehnologija u svim pogledima osim cijene

prikazuje najbolje rezultate. Na slici je prikazano kretanje učešća različitih tehnologija u ukupnoj proizvodnji električne energije iz fotonaponskih sistema [20].



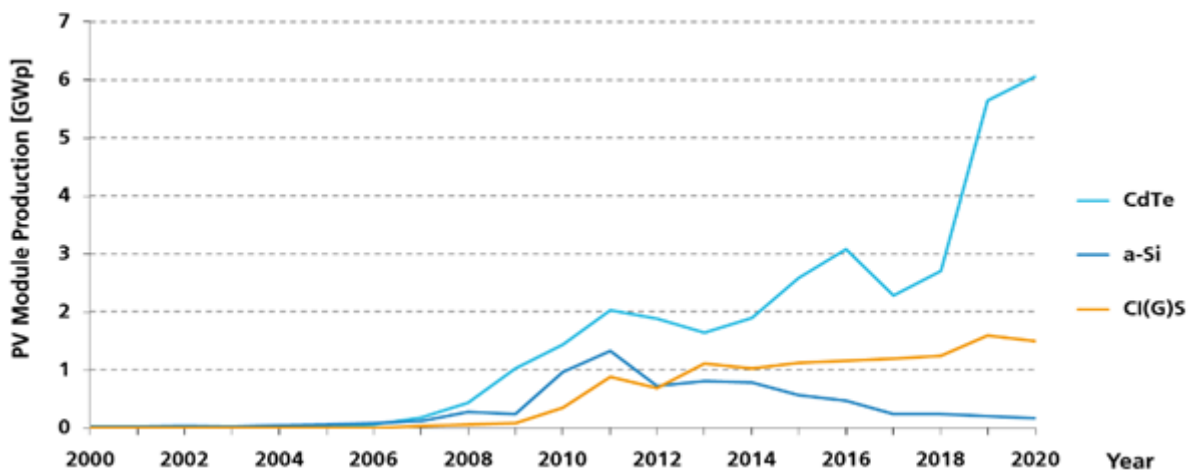
Slika 7. Ukupna proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sistema prema vrsti tehnologije panela

Kao što je već u prethodnom dijelu rečeno monokristalni i polikristalni fotonaponski sistemi predstavljaju dominantne sisteme u ukupnoj proizvodnji u odnosu na tankoslojnu tehnologiju. Monokristalni sistemi zadnjih par godina imaju konstantan rast najviše zbog svoje pouzdanosti i kvaliteta. Polikristalni sistemi su do prije par godina bili dominantna tehnologija ali prema svim projekcijama se smatra da će u narednom periodu zbog svoje niže cijene i unapređenja performansi mnogo veća primjena biti iz polikristalnih sistema nego monokristalnih. Na prethodnoj slici je prikazan udio svih tehnologija u ukupnoj proizvodnji iz fotonaponskih sistema međutim proizvodnja do dvijehiljadite godine je bila izuzetno mala a nagli porast je u zadnjih par godina sa velikom sigurnošću i potrebom da bude još veći u narednom periodu. Tako je na slici 8 prikazan udio svih tehnologija ali i količina instaliranih sistema koja se povećava izuzetno brzo.



Slika 8. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sistema od 2000 godine do danas

Trend rasta primjene fotonaponskih sistema je velik sa pretpostvakom da će za par godina iznositi više od 200 GW instalisanih sistema godišnje. Kao što je na slici prikazano taj rast je izuzetno velik a i primjena tankoslojnih tehnologija se očekuje da bude sve veća. Tako na primjer u 2020. godini ukupan instalisani kapacitet je bio 152 GW sa dominantnim učešćem monokristalnih sistema sa 120.6 GW dok je najmanji udio tankoslojnih sa 7.7 GW. Međutim trend rasta tankoslojnih je vidljiv a sa unapređenjem ovih tehnologija i nekih prednosti u odnosu na druge kao što je veća efikasnost pri radu kada je oblačno vrijeme će biti sve veći. Što se tiče vrsta tankoslojnih tehnologija koje se primjenjuju i koliko je njihovo učešće u proizvodnji to je prikazano na slici 9.



Slika 9. Kretanje raznih vrsta tankoslojnih tehnologija u ukupnoj proizvodnji

Trenutno najveći udio u proizvodnji iz tankoslojne tehnologije imamo kod kadmijum-telurid (CdTe) fotonaponske tehnologije i ona ima najveći udio i najveći rast koji se očekuje da bude i dalje najveći i u narednim godinama. Mada zbog velike toksičnosti telurida i njegove ograničene rezerve umanjuju se perspektive nekog ozbiljnijeg rasta i primjene ovih ćelija u nekoj daljoj budućnosti. Dok se očekuje da u nekom daljem periodu amorfni i neke druge vrste tankoslojnih preuzmu primat u proizvodnji u odnosu na kadmijum-telurid.

4. Vrste i komponente fotonaponskih sistema

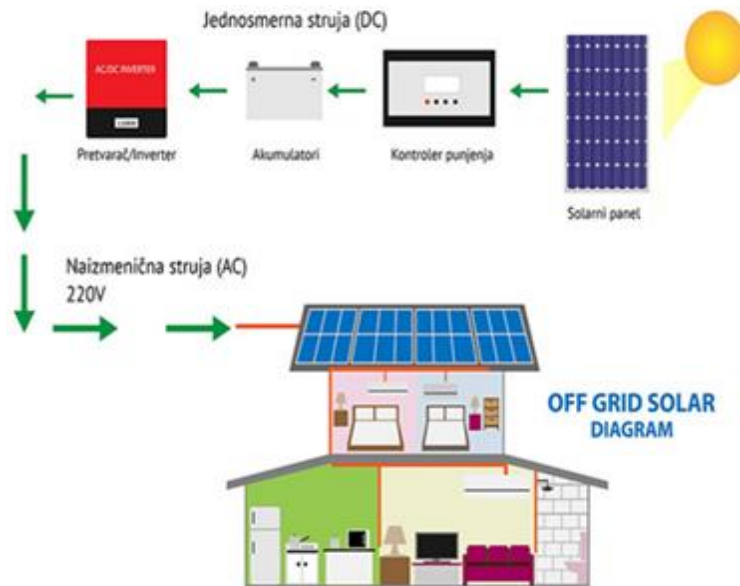
4.1. Samostalni (off-grid) fotonaponski sistemi

Samostalni fotonaponski sistem, kao što mu i ime kaže je sistem koji nije priključen na elektrodistributivnu mrežu i sadrži akumulatore za skladištenje energije. Snaga samostalnih sistema mora biti dobro proračunata tako da potrošači koji se priključuju na dati sistem ne ostanu bez energije tokom cijele godine ali i da akumulatorske baterije budu dovoljnog kapaciteta da napajaju potrošače ukoliko proizvodnja električne energije bude smanjena u periodima kada ima manje Sunčeve svjetlosti.

Komponente koje čine samostalni fotonaponski sistem su:

- Solarni paneli
- Baterija
- Invertor
- Kontroler punjenja baterija
- Električna zaštitna oprema kao što su prekidači i osigurači
- Sistem za praćenje i balansiranje potrošnje energije sa proizvodnjom

Samostalni fotonaponski sistemi su pogodni za izolovane potrošače koji se nalaze na ruralnim područjima gdje ne prolazi distributivna mreža kao i za vikendice. Takođe su pogodni za objekte različitih namjena kao što su razne vrste signalizacija i upozorenja, rasvjetu, telekomunikacione releje, svjetionike, sisteme nadzora i slično. Izgradnja ovih sistema ima svoje prednosti ali i mane. Prednosti samostalnih sistema su nezavisnost, ovi sistemi ne podliježu uslovima ili javnim politikama država, vlasnici ovih sistema nijesu podložni povećanju cijene ili restrikcije električne energije. Prednost jeste i okretanje ka racionalnom korišćenju električne energije koja se proizvodi pomoću datih sistema. Pored prednosti i dobrih strana ovi sistemi imaju i svoje nedostatke. Mane samostalnih sistema su cijena, zbog visoke cijene baterija i invertora, samostalni sistemi su mnogo skuplji u odnosu na mrežno povezane sisteme. Međutim zbog rastućeg trenda ugradnje samostalnih sistema, cijena opreme opada. Održavanje komponenti samostalnih sistema je skupo, a naročito baterija za skladištenje električne energije. Životni vijek baterija je ograničen pa je potrebno vršiti zamjenu baterija svakih pet do petnaest godina. Još jedna velika mana samostalnih u odnosu na mrežno povezane sisteme jeste što višak električne energije ostaje neiskorišćen. Na slici 10 je prikazan samostalni fotonaponski sistem.



Slika 10. Samostalni (off-grid) fotonaponski sistem

4.2. Mrežni (on-grid) fotonaponski sistem

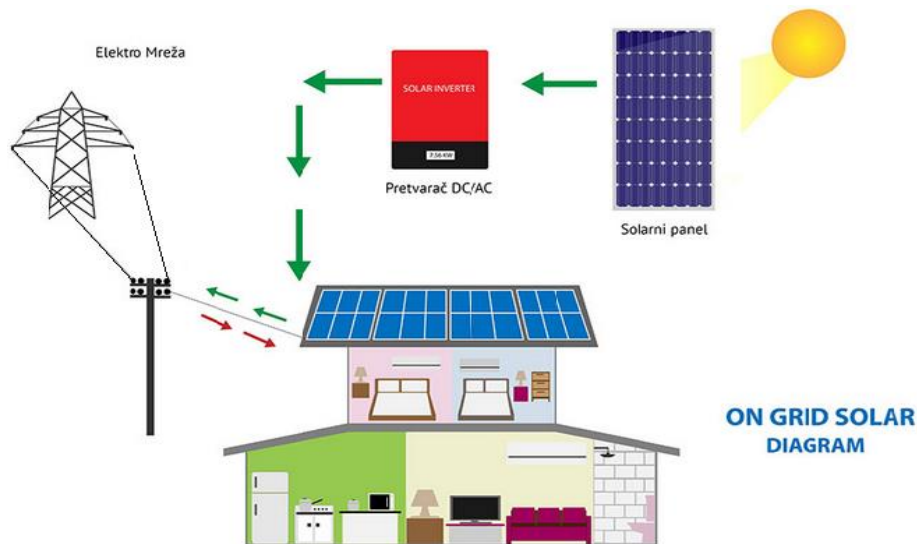
Mrežni (on-grid) sistemi su trenutno najčešći i najzastupljeniji sistemi za domaćinstva i poslovne prostore. Kod ovih sistema za razliku od samostalnih nijesu potrebne baterije jer njihovu ulogu preuzima distributivna mreža. Prema tome, mreža predstavlja akumulator neograničenog kapaciteta sa kojim fotonaponski sistem razmjenjuje električnu energiju.

Mrežni fotonaponski sistemi rade paralelno sa elektrodistributivnom mrežom, napajaju potrošače koji se nalaze na lokaciji fotonaponskog sistema i isporučuju viškove električne energije. Za sav višak proizvedene električne energije koji se predaje mreži proizvođači dobijaju novčanu naknadu. Vlasnici mrežnih fotonaponskih sistema uglavnom upravljaju sa ovim sistemima, međutim ovim sistemima može da upravlja elektrodistributivno preduzeće ukoliko se radi o velikim fotonaponskim sistemima. U zimskim periodima kada je manja proizvodnja iz ovih sistema kao i u drugim slučajevima kada nema Sunca, energija za nesmetan rad potrošača obezbjeđuje se iz distributivne mreže.

Komponente mrežnih (on-grid) fotonaponskih sistema su:

- Solarni paneli
- Invertor
- Električna zaštitna oprema kao što su prekidači i osigurači
- Sistem za praćenje proizvodnje i prijenosa električne energije

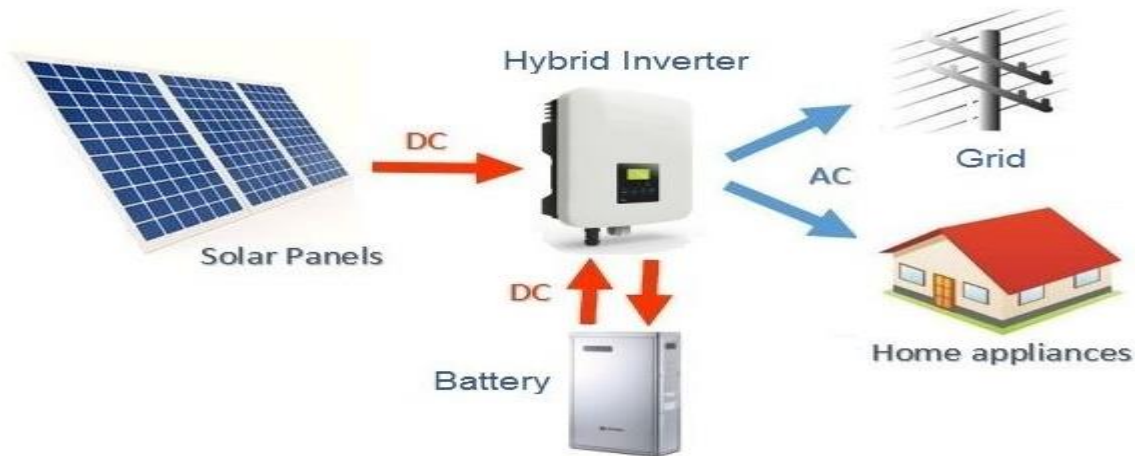
Prednosti korištenja mrežnih sistema su brojne, a možda najveća jeste ta što se sav višak predaje mreži koja predstavlja akumulator neograničenog kapaciteta. Zatim prednost mrežnih sistema jeste ta što kod ovih sistema nije potrebna ograničenost u potrošnji električne energije a samim time nije potrebno mijenjati i razne životne navike za razliku od samostalnih sistema[6]. Na slici 11 je prikazan mrežni fotonaponski sistem.



Slika 11. Mrežni (on-grid) fotonaponski sistem

4.3. Hibridni fotonaponski sistemi

Hibridni fotonaponski sistemi generišu električnu energiju na isti način kao i mrežni (on-grid) fotonaponski sistemi, ali koriste hibridne invertore i akumulatorske baterije za skladištenje energije koja se može koristiti kasnije. Hibridni fotonaponski sistemi omogućavaju potpunu autonomiju u radu i nezavisnost od elektrodistributivne mreže, ali i sigurnost da u slučaju nedostatka električne energije može da se preuzme ista iz mreže. Primjena hibridnih sistema ima svoje prednosti ali i nedostatke. Prednosti primjene hibridnih sistema su skladištenje energije i njena potrošnja u trenucima kada nam je potrebna, zatim smanjena potrošnja energije iz mreže. Dok su nedostaci visoki troškovi, uglavnom zbog visoke cijene akumulatorskih baterija. Duže vrijeme otplate, kompleksnija instalacija koja zahtijeva više prostora i sami troškovi instalacije su takođe nedostaci hibridnih sistema.



Slika 12. Hibridni fotonaponski sistem

4.4. Komponente fotonaponskih sistema

4.4.1. Fotonaponski paneli

Fotonaponski paneli predstavljaju najvažniju komponentu fotonaponskih sistema. Oni pretvaraju Sunčevu svjetlost u električnu energiju. Princip pretvaranja Sunčeve energije u električnu na kojem rade fotonaponski paneli jeste princip fotonaponske konverzije koji je u prethodnom poglavlju detaljno opisan. Postoji više vrsta fotonaponskih panela u zavisnosti od tehnologije koju koriste za izradu ćelija. Većina solarnih panela su uramljeni aluminijom, dopunjeni kaljenim staklom i zapečaćeni vodenopropusnom podlogom. Na poleđini panela ili modula je razvodna kutija koja može ali i ne mora imati dva kabla koji izlaze iz njega. Ako razvodna kutija ima dva kabla kakvih ima najviše ona je zatvorena i korisnik nema pristup njoj, dok kod onih kod kojih razvodna kutija nema kablova, ona se može otvoriti za pristup električnim terminalima na kojima se žice mogu pričvrstiti da bi sprovodile generisanu električnu energiju dalje od modula [7].

Postoji više vrsta tehnologija koje se koriste za izradu solarnih ćelija odnosno panela. Trenutno glavne na tržištu su:

- Monokristalni solarni paneli – solarne ćelije su izgrađene od monokristalnog silicijuma (mono-Si). Ove panele karakteriše tamnija boja a to je zbog čistoće silicijuma koji se koristi u izradi ovih panela. Ovi fotonaponski paneli su najpopularniji od onih koji se trenutno koriste a odlikuju se najvećom efikašnošću i životnim vijekom. Efikasnost ovih panela se kreće od 17%. Veća efikasnost monokristalnih panela znači da im je potrebno manje prostora za postizanje određenog energetskeg kapaciteta. Prema tome,

monokristalni paneli imaju uglavnom veću izlaznu snagu u odnosu na ostale vrste panela. Zbog načina proizvodnje i visoke efikasnosti monokristalni fotonaponski paneli su i najskuplji na tržištu.

- Polikristalni paneli – ovi paneli su izgrađeni od polikristalnih ćelija koje se dobijaju sječenjem livenih blokova silicijuma. Prilikom stvrdnjavanja blokova stvaraju se kristalne strukture različitih veličina uz manji broj grešaka, zbog čega imaju manju efikasnost u odnosu na monokristalne. Obično na polikristalnim silicijumskim solarnim ćelijama uglovi nijesu odsječeni, pa za razliku od monokristalnih panela na polikristalnim nema velikih bijelih površina na prednjoj strani panela. Prednost polikristalnih panela jeste niža cijena dok su mane slabija efikasnost i estetika. Efikasnost polikristalnih panela je manja od monokristalnih i kreće se od 12% do 17% ali sa razvojem tehnologije i unapređivanjem karakteristika ovih panela razlika u odnosu na monokristalne je sve manja.
- Tankoslojni solarni paneli – ovi paneli se izgrađuju taloženjem tankog sloja fotonaponske supstance na čvrstu površinu, poput stakla. Vrste ovih supstanci odnosno materijala koji se koriste za izradu panela su: amorfni silicijum (a-Si), kadmijum-telurid (CdTe), bakar indijum selenid (CIS) kao i solarne ćelije osjetljive na boje (DSC). Svaki od ovih materijala stvara drugačiji tip panela. Zbog svog načina proizvodnje, ovi paneli su lagani i uglavnom fleksibilni, što im još uz efikasnost i cijenu predstavlja prednost za korišćenje trenutno u odnosu na druge vrste panela. Mane tankoslojnih panela su efikasnost i kraći vijek trajanja. Oni se potpuno razlikuju od monokristalnih i polikristalnih solarnih panela[8]. Boja im je potpuno crna, bez uobičajenih okvira silicijumskih ćelija koje se vide na površini kristalnih solarnih panela. Ova vrsta panela se uglavnom koristi u velikim solarnim sistemima, poput industrijskih solarnih sistema.



Slika 13. Vrste fotonaponskih panela

4.4.2. Invertor

Invertor je uz same panele najvažniji dio fotonaponskog sistema on ima bezbjedonosnu ulogu u smislu da gasi sistem kada dođe do nestanka napajanja električne energije iz distributivnog sistema kao i ulogu ponovnog uspostavljanja konekcije kada dođe do ponovnog generisanja električne energije iz distributivnog sistema[21]. Električno kolo fotonaponskog sistema je veoma jednostavno. Najvažniji dio je invertor za konvertovanje jednosmerne struje DC u naizmeničnu struju AC. Dostupno je više tipova invertora u pogledu oblika izlaznog signala. Izbor odgovarajućeg invertora za određeni sistem zavisi od zahtjeva i potreba potrošača koje se odnose na talasni oblik izlaznog napona i efikasnost invertora. Takođe prilikom izbora invertora bitno je da li će dati fotonaponski sistem biti povezan sa mrežom ili će biti samostalan. Svaki invertor nebitno kakav oblik izlaznog signala daje njegove karakteristike se opisuju sa četiri parametra:

- nazivna izlazna snaga
- maksimalno udarno opterećenje
- efikasnost
- harmonijsko izobličenje

U pogledu oblika izlaznog signala razlikuju se:

- invertor sa kvadratnim talasnim oblikom
- invertor sa modifikovanim talasanim oblikom
- impulsni širinski invertor
- invertor sa čistim sinusnim oblikom izlaznog signala

Koji tip invertora će se koristiti zavisi od potreba potrošača u pogledu talasnog oblika signala kao i efikasnosti invertora.

Invertor sa kvadratnim talasnim oblikom napona je najjednostavniji invertor koji se koristi u fotonaponskim sistemima. Njegova cijena je pristupačna i relativno je efikasan. Efikasnost se kreće od 70% do 98%. Velika nazivna snaga i maksimalno udarno opterećenje su karakteristični za ovaj tip invertora. On se najviše koristi kada potrošači nisu previše zahtjevni u pogledu čistoće ulaznog signala jer mu je glavna slabost veliko harmonijsko izobličenje (THD) koje može ići i do 40%.

Invertor sa modifikovanim talasnim oblikom napona ima takođe pravougaoni talasni oblik ali modifikovan tako da je više nalik na sinusni talas. Ova modifikacija ima za posljedicu drastično smanjenje izobličenja izlaznog napona pa je harmonijsko izobličenje (THD) manje od 5%. Ovi invertori imaju veliku efikasnost ali im je mana jer su male nazivne snage od 300W do 2500W.

Impulsno širinski tip invertora ima dobre sposobnosti u pogledu nazivnih snaga koje idu i do 20 kW po jedinici kao i u pogledu efikasnosti. Mali udarni kapacitet od 2.5 puta nazivne snage je slaba tačka ovih invertora. Vrijednost harmonijskog izobličenja izlaznog napona je manja od 5%. Ovaj tip invertora se koristi tamo gdje je potrebno da se ima sinusni oblik napona bez velikih harmonijskih izobličenja.

Invertor sa čistim sinusnim oblikom izlaznog napona je najkvalitetniji ali i najskuplji invertor. On ima najveću efikasnost i minimalno izobličenje. Dvije najvažnije karakteristike invertora su efikasnost i kvalitet električne energije kojom snadbijevaju mrežu. Nivo efikasnosti invertora je definisan kao odnos njegove izlazne i ulazne snage, dok se kvalitet električne energije posmatra kroz ukupno harmonijsko izobličenje[9]. Kako je ulazna snaga invertora prije svega određena solarnom iradijacijom ona nije konstantna, pa se zato efikasnost kao funkcija ulazne snage ne može smatrati konstantnom. Maksimalna efikasnost može se postići praćenjem DC izlaza, odnosno praćenjem tačke maksimalne snage u zavisnosti od uslova rada cjelokupnog fotonaponskog sistema.

Sa razvojem tehnologije naročito u poslednje vrijeme mnogo se ulaže kako u razvoj fotonaponskih sistema tako i u razvoj svih komponenti koje čine ovaj sistem. Danas se na tržištu nalazi ogroman broj proizvođača koji se bave proizvodnjom invertora. Tako je u nastavku data slika 14na kojoj je prikazano trenutno stanje na svjetskom tržištu invertora što se tiče cijena i performansi.



Slika 14. Odnos cijena performanse različitih brendova invertora

4.4.3. Ostale komponente fotonaponskih sistema

Solarni kontroleri za punjenje baterija

Solarni kontroleri su nezaobilazni dio svakog baterijskog fotonaponskog sistema. Energiju koja se generiše u solarnim panelima potrebno je da se uskladišti u baterijama. Solarni kontroler je taj koji reguliše voltažu i amperažu sa kojima će se dopunjavati baterije. Kontroleri punjenja imaju jako važnu ulogu u solarnim sistemima. Kontroler ima dva zadatka i kao takav je važan dio svakog solarnog sistema. Prvi zadatak kontrolera je da sačuva i ne dozvoli baterijama da se prepune iz razloga što fotonaponski solarni paneli kada ima Sunca proizvode struju neprestano. Uslijed nedostatka ili neispravnosti kontrolera baterije bi se nekontrolisano punile i brzo bi se uništile. Drugi zadatak je isto kao i prvi podjednako važan a to je da ne dozvoljava potrošačima da baterije potupno isprazne a što je vrlo važno za baterije, čiji životni vijek zavisi od dubine pražnjenja. Kontroleri punjenja i pražnjenja imaju višestruke zaštite poput: slučajno izazvanog kratkog spoja, preopterećenja, obrtnog polariteta i slično. Solarni kontroleri od renomiranih proizvođača imaju pored gore navedenog i temperaturnu kompenzaciju napona punjenja baterija uslijed povišene ili snižene temperature u kojoj su baterije stacionirane. Gotovo svi trenutno tržišno dostupni kontroleri punjenja imaju LCD displej sa jasnim grafičkim prikazom tako da uvijek jednostavno i lako se mogu vidjeti svi parametri punjenja ili pražnjenja fotonaponskog sistema. Većina kontrolera punjenja i pražnjenja koja se danas nalazi na tržištu imaju tzv. „ Auto sense “ karakteristiku za prepoznavanje napona sistema na osnovu priključenih baterija 12V ili 24V[10]. Naime, najbitnija stvar za baterije jeste da se izabere kvalitetan solarni kontroler koji će baterijama produžiti životni vijek i samim tim vlasnika datog samostalnog (baterijskog) sistema spasiti dodatnih troškova zamjene baterija.

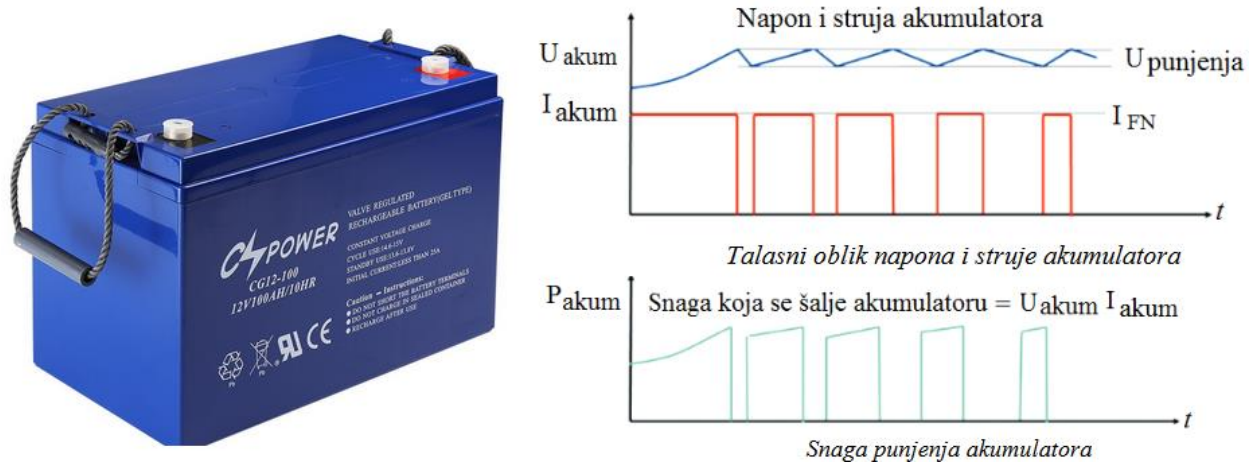
DC osigurači

Za sve solarne sisteme potrebni su AC i DC sigurnosni prekidači. Za samostalne solarne sisteme, između baterija u kojima se skladišti električna energija i pretvarača instalira se još jedan DC prekidač. Koristi se za isključivanje struje koja teče između ovih komponenti. Ovo je važno za održavanje, rešavanje problema i zaštitu od požara.

Akumulatorske baterije

Baterije predstavljaju neizostavan dio samostalnih (off-grid) sistema u kojima se skladišti električna energija koja se koristi u večernjim satima ili u periodima kada nema Sunčevog zračenja a samim time nema ni generisanja električne energije. Najpoznatiji način za skladištenje električne energije su akumulatorske baterije. Akumulatori imaju koeficijent korisnog dejstva koji se kreće od 85% do 90%. Kapacitet akumulatora se izražava u jedinici Ah, koja pokazuje

vrijednost struje koju akumulator daje za određeni vremenski period. Najpoznatije vrste akumulatora su: olovni, nikel-kadmijumovi, litijum-jonski, litijum-polimerni i cink-vazdušni[11]. Na slici 14 su prikazani talasni oblici napona, struje i snage punjenja akumulatora. Struja kojom se puni akumulator je jednaka struji fotonaponskog sistema. Dok što se tiče snage akumulatora, akumulatoru se predaje snaga koja je proizvod napona akumulatora i struje iz fotonaponskih panela.



Slika 15. Akumulatorska baterija i talasni oblici napona, struje i snage punjenja akumulatora

Rezervni generator

Rezervni generatori su neophodni dio za izgradnju i normalno funkcionisanje fotonaponskih sistema a njihova uloga dolazi do izražaja u periodima kada nema danima Sunčeve svjetlosti i proizvodnje električne energije. Jer potrebno bi bilo dosta ulaganja i veliki broj baterija da bi se za ovakve periode obezbijedila električna energija. Najčešće se vrši instaliranje rezervnih generatora koji rade na dizel gorivo i to je uvijek bolja opcija od ulaganja u veliku količinu baterija. Ovi generatori obično mogu da rade na propan, naftu, benzin i druge vrste goriva. Generatori obično imaju AC izlaz, koji se može poslati kroz pretvarač za direktnu upotrebu ili se može pretvoriti u jednosmjernu za skladištenje u baterijama.

5. Karakteristični parametri fotonaponske elektrane rezultati mjerenja

Efikasnost jedne fotonaponske elektrane može da se izrazi različitim parametrima. U literaturi je poznat čitav niz parametara, kojima se izražavaju različiti indikatori rada fotonaponskih sistema. Oni su definisani u odgovarajućim standardima, a onda primijenjeni u konkretnim situacijama i u skladu sa time odgovarajuće adaptirani.

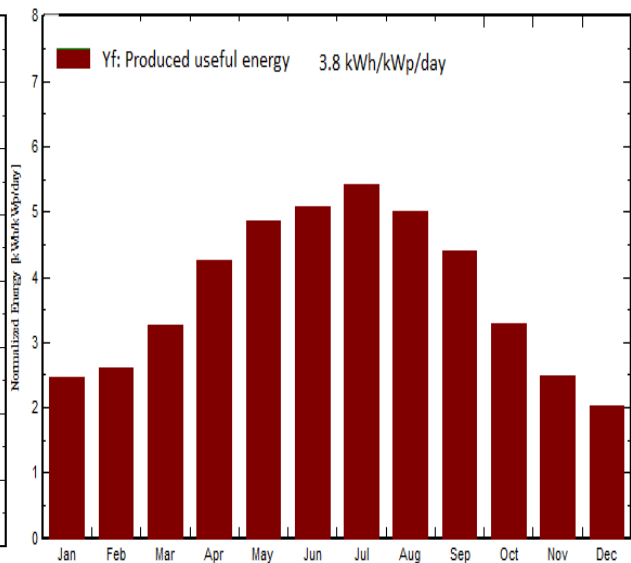
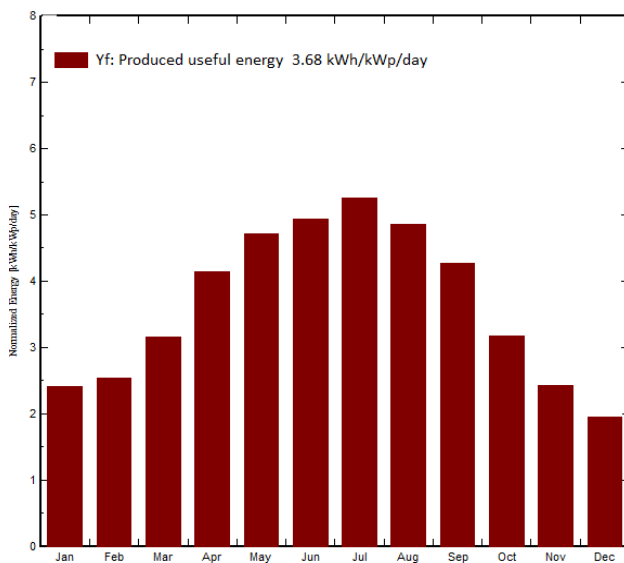
Za određivanje učinka cjelokupnog fotonaponskog sistema najzgodniji su pokazatelji u odnosu na energetska produkciju, solarne resurse i sveukupne efekte gubitaka sistema. Zato je napogodniji parameter koji opisuje učinak fotonaponske elektrane, odnosno odnos ostvarenja (Performance Ratio – PR). Ovaj parameter je pogodan i iz razloga što se preko njega mogu izraziti i drugi parametri.

Odnos performansi sistema (PR) podrazumijeva odnos specifičnog prinosa solarne elektrane i referentnog prinosa i izračunava se pomoću izraza:

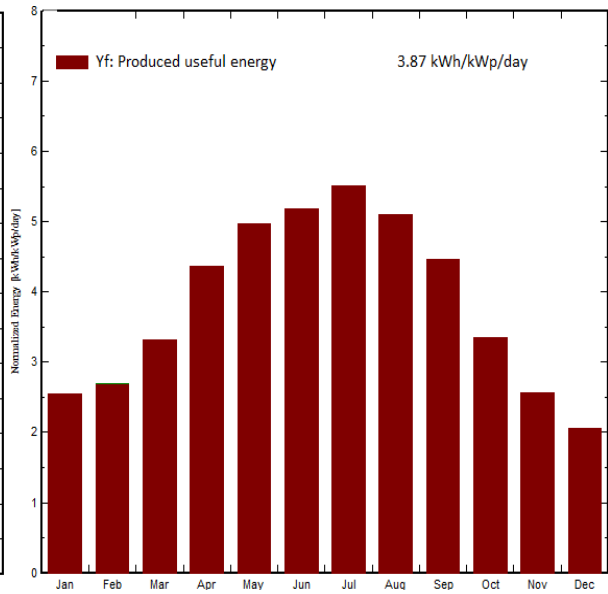
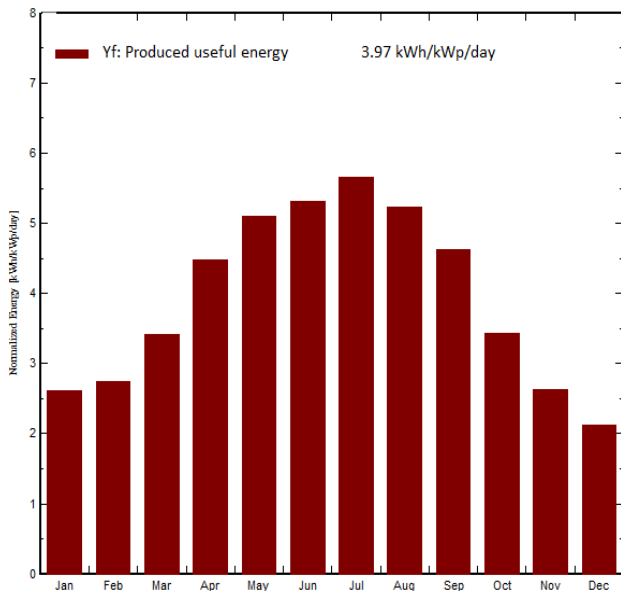
$$PR = Y_r / Y_f \dots\dots\dots(1)$$

gdje je Y_f - specifični prinos i Y_r – referentni prinos.

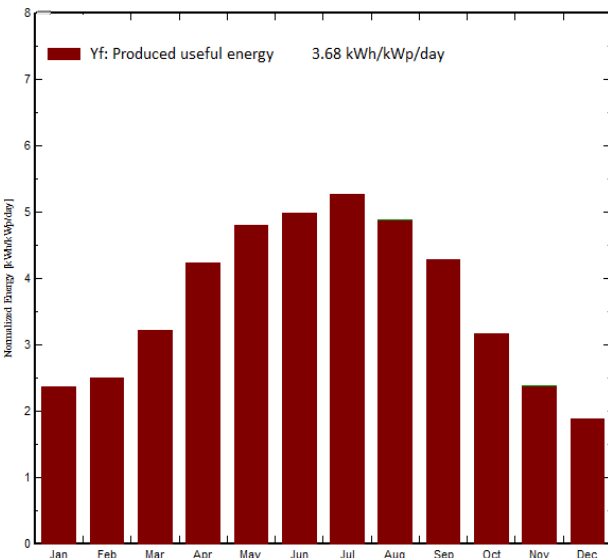
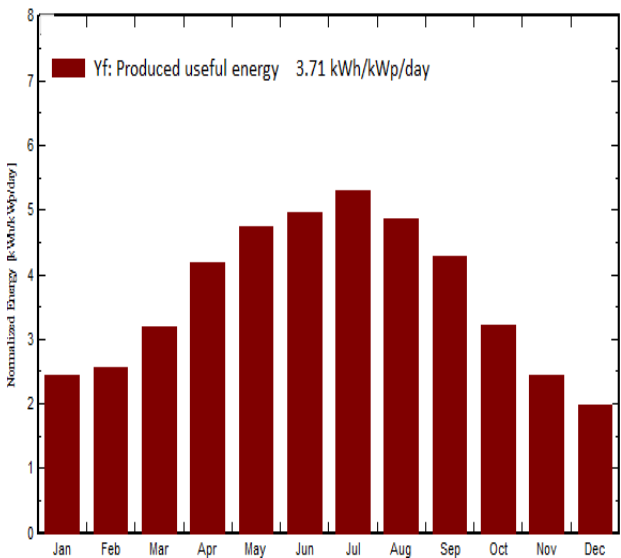
Pod specifičnim ili finalnim prinosom solarne elektrane (Y_f) podrazumijeva se odnos električne energije koja se dobije pomoću solarne elektrane u određenom vremenskom intervalu i koja se predaje elektrodistributivnoj mreži i ukupne instalisane snage solarnih modula. U skladu sa tim, može se govoriti o satnom, mjesečnom i godišnjem specifičnom prinosu solarne elektrane. U ovom radu su izračunate mjesečne i godišnje vrijednosti specifičnih prinosa za svaki od šest fotonaponskih sistema. Na slikama 16 do 21 prikazane su vrijednosti specifičnih prinosa za svaki sistem pojedinačno.



Slika 16. Specifični prinos FNE sa monokristalnim Slika 17. Specifični prinos FNE sa polikristalnim



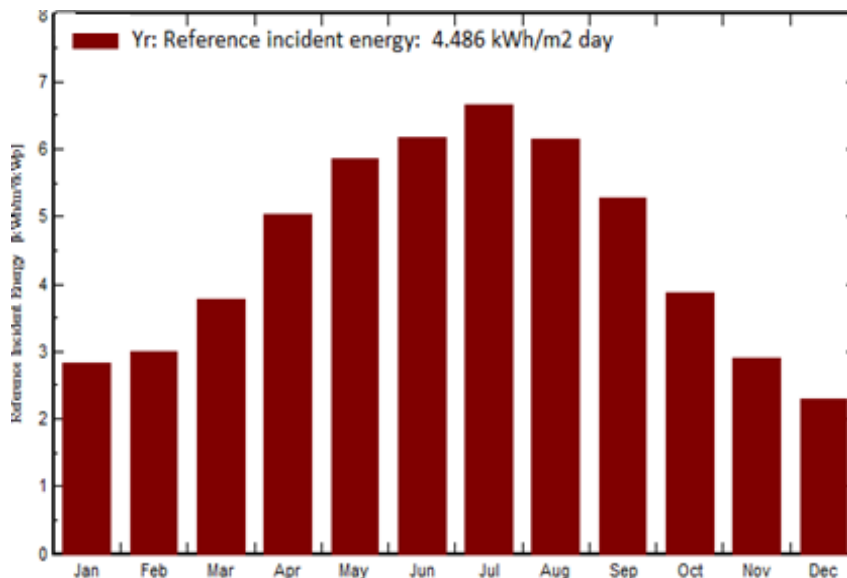
Slika 18. Specifični prinos FNE sa CIS panelima Slika 19. Specifični prinos FNE sa CdTe panelima



Slika 20. Specifični prinos FNE sa HIT panelima Slika 21. Specifični prinos FNE sa uSi-aSi panelima

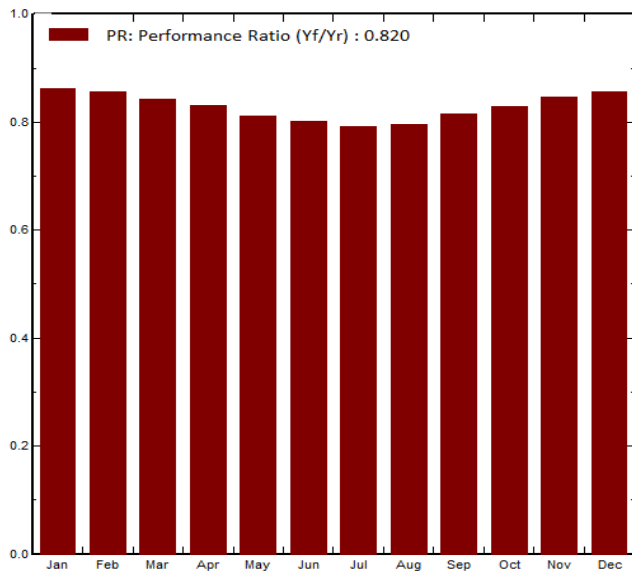
Upoređujući vrijednosti specifičnih prinosa koji su karakteristični za svaki od sistema, jer zavisi od kvaliteta panela, vremenskih prilika, temperature može se vidjeti da najveću vrijednost, odnosno najbolje performanse na godišnjem nivou daje sistem sa CIS panelima i on iznosi 3.76 kWh/kWp/day. Pored CIS panela odlične performansi pokazuju sistemi sa uSi-aSi panelima, CdTe panelima i sa polikristalnim panelima. Najmanju vrijednost u pogledu specifičnog prinosa daju sistemi sa monokristalnim i amorfnim panelima i ona iznosi 3.68 kWh/kWp/day.

Referentni prinos (YR) predstavlja maksimalne, teorijske mogućnosti fotonaponskog sistema, odnosno maksimalnu količinu električne energije, koja bi se mogla dobiti iz datih panela kada bi oni bili obasjani pod najpovoljnijim uslovima u odnosu na njihovu nominalnu (nazivnu) snagu. Referentni prinos predstavlja broj sunčanih sati sa maksimalnom iradijacijom i to u stvari definiše solarne resurse fotonaponskog sistema za određenu lokaciju. Pri najpovoljnijim uslovima referentni prinos za date sisteme jednake nazivne snage na istoj lokaciji iznosi 4.486 kWh/m² day.

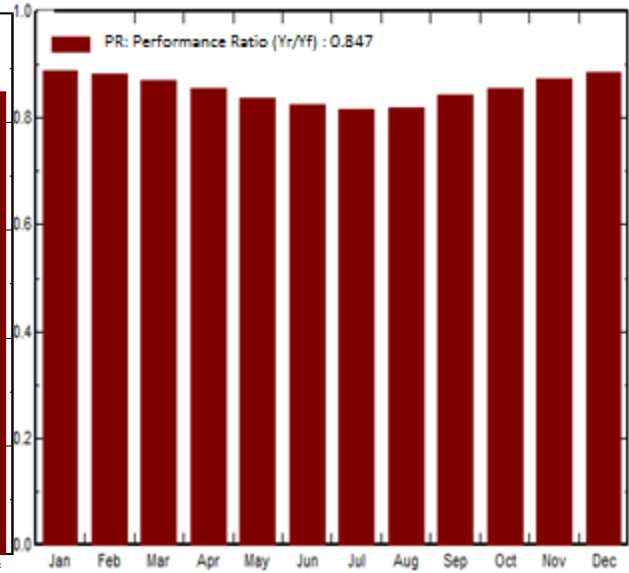


Slika 22. Referentni prinos fotonaponske elektrane

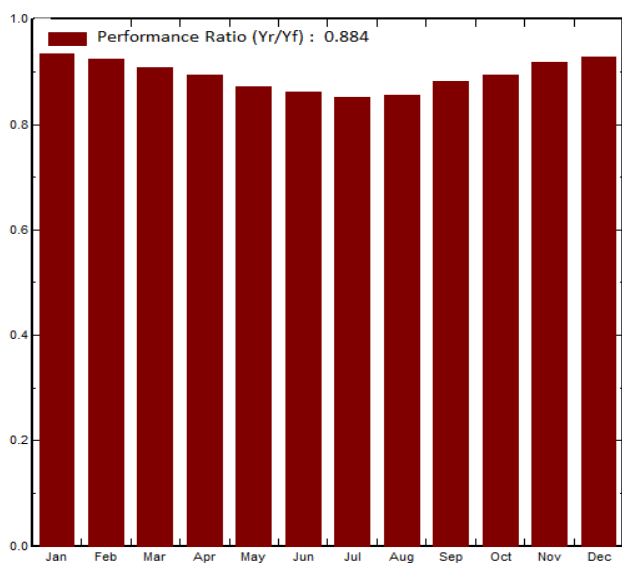
Odnos performansi sistema (PR) prikazuje realni učinak fotonaponske elektrane u odnosu na teorijski maksimalan mogući i izražava se u procentima. Odnos performansi sistema u odnosu na solarne zračenje, on kvantifikuje sveukupne efekte gubitaka u fotonaponskom sistemu (gubici u invertoru, u instalaciji, u fotonaponskim panelima, gubitke usled refleksije na panelima, smanjenja zbog zaprljanosti panela ili pokrivenošću snegom, te zbog kvarova komponenata i raznih zastoja u radu). Što je parametar bliži maksimalnim mogućnostima elektrane, tim je efikasniji rad, odnosno smanjeni su gubici u radu. Period za koji se računa ovaj parametar može biti dan, mjesec ili godina, ali se smatra optimalnim da taj period bude jedna godina što je slučaj i u ovom radu, jer su kraći vremenski intervali manje tačni i mogu biti podložni uticaju kratkotrajnih ekstremnih (minimum/maksimum) vrijednosti. Na slikama 23 do 28 su prikazane vrijednosti parametra PR za šest fotonaponskih elektrana koje su izgrađene od panela različitih tehnologija.



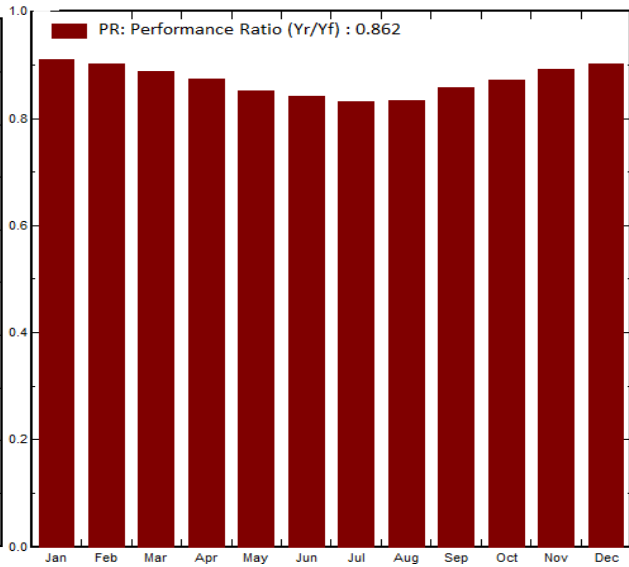
Slika 23. PR za FNE sa monokristalnim panelima



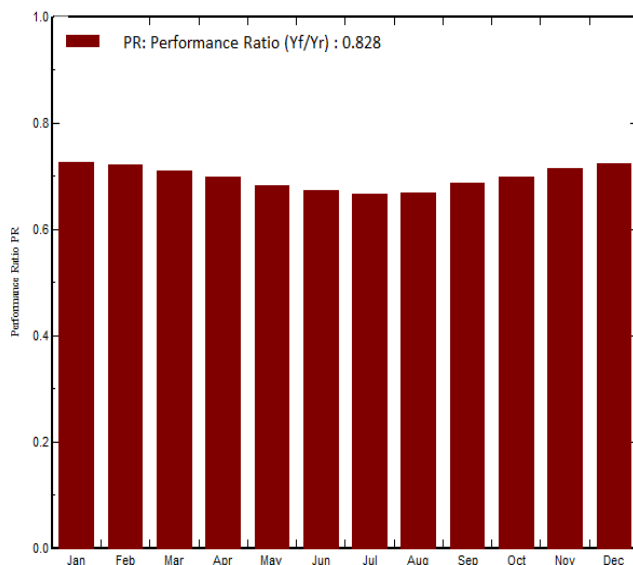
Slika 24. PR za FNE sa polikristalnim panelima



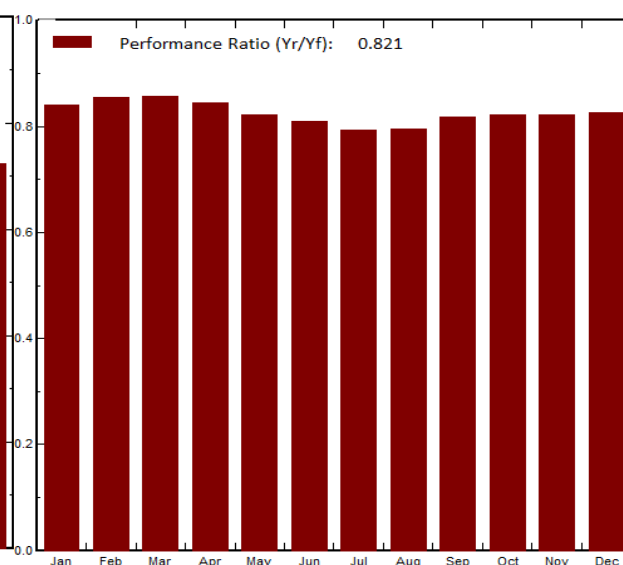
Slika 25. PR za FNE sa CIS panelima



Slika 26. PR za FNE sa CdTe panelima



Slika 27. PR za FNE sa HIT panelima



Slika 28. PR za FNE sa uSi-aSi panelima

Odnos performansi sistema (PR) omogućava upoređivanje energetske efikasnosti fotonaponskih elektrana na različitim lokacijama, bez obzira na ambijentalne uslove (zračenje, temperatura). U stvarnom radu PR=100% se ne može dostići, zbog raznih neizbežnih gubitaka, tako da se realni godišnji PR kreće između 60% i 90%. Može se reći da je fotonaponska elektrana dobro projektovana i kvalitetna, ako je PR veće od 75%. Elektrane sa veoma kvalitetnim invertorima (velika efikasnost pri različitim uslovima rada) mogu dostići godišnji PR i do 85%. Upoređujući vrijednosti PR za šest različitih tehnologija koje su primijenjene pri izradi fotonaponskih elektrana vidimo da je ovaj odnos iznad 75% u svim slučajevima tako da bi primjena svih šest vrsta fotonaponskih panela dale dobre rezultate ako bi se koristile za izgradnju solarnih elektrana teritoriji većeg dijela Crne Gore. Najbolje vrijednosti faktora PR imamo kod primjene CIS panela gdje ovaj faktor iznosi 88.4%. Ova vrsta panela nije mnogo zastupljena u ugradnji panela u Crnoj Gori. Zatim slijede polikristalni paneli čija vrijednost faktora PR iznosi 84.7%. Ovi paneli su ujedno i najviše zastupljeni i najviše se ugrađuju kako na teritoriji Crne Gore tako i u regionu. Posmatrajući vrijednosti ovog faktora dobijene kod svih šest sistema, najmanju vrijednost odnosa ostvarenja imamo kod primjene amorfnih i monokristalnih fotonaponskih panela i ona iznosi 82%. Vrijednost odnosa ostvarenja (PR) za ostale sisteme izgrađene od panela sa tankoslojnim filmovima, panela sa amorfnim ćelijama iznose respektivno 86.2%, 82.5% i 82.1%. Ono što je karakteristično za sve ove sisteme vidimo da je vrijednost performansi sistema najmanja u mjesecima kada imamo najveću količinu sunčevog zračenja to jeste u toku ljetnjih mjeseci jer su tada najveći gubici najviše usljed uticaja temperature.

Pored ovih gore navedenih parametara, gubici su vrlo bitan parametar u opisivanju performansi fotonaponskog sistema. Normalizovani gubici se računaju oduzimanjem prinosa i predstavljaju se kWh/KWp/day, odnosno daju broj sati rada dnevno (ili mjesečno, ili godišnje), koji nije iskorišćen. Postoje gubici u radu niza (Lc) i gubici u radu sistema (Ls).

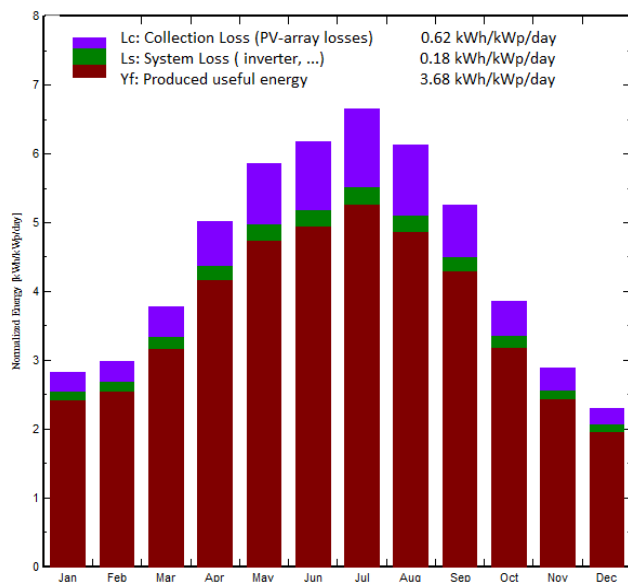
Gubici u radu niza (L_c) su dati kao razlika referentnog prinosa i prinosa niza i predstavljaju gubitke panela, odnosno gubitke u radu niza panela:

$$L_c = Y_r - Y_a \dots\dots\dots(2)$$

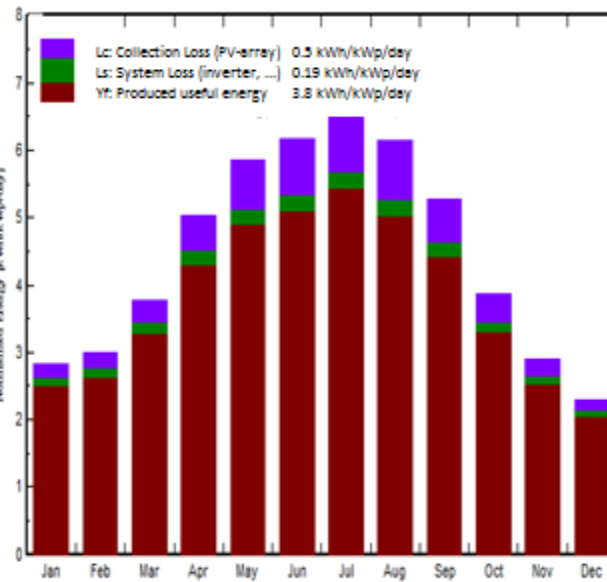
Gubici u radu sistema (L_s) su ukupni gubici u svim ostalim komponentama fotonaponskog sistema van panela. Tu spadaju gubici u kablovima, prekidačima, zaštitnoj opremi, energetskim pretvaračima (DC/DC i invertoru), priključnoj opremi i slično. Ovaj parametar pokazuje uravnoteženost proizvodnje električne energije u panelima sa jedne strane i potreba potrošača energije sa druge strane. Gubici sistema se računaju prema izrazu:

$$L_s = Y_a - Y_f \dots\dots\dots(3)$$

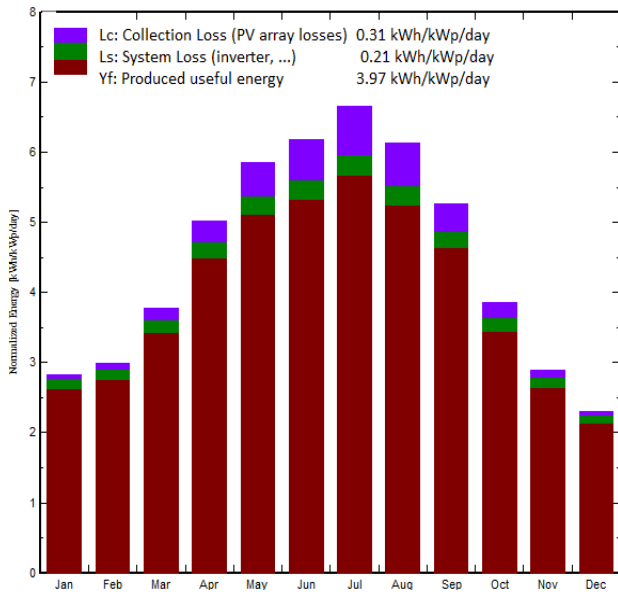
Na slikama 29 do 34 su prikazani gubici svakog pojedinačno fotonaponskog sistema kako na mjesečnom tako i na godišnjem nivou.



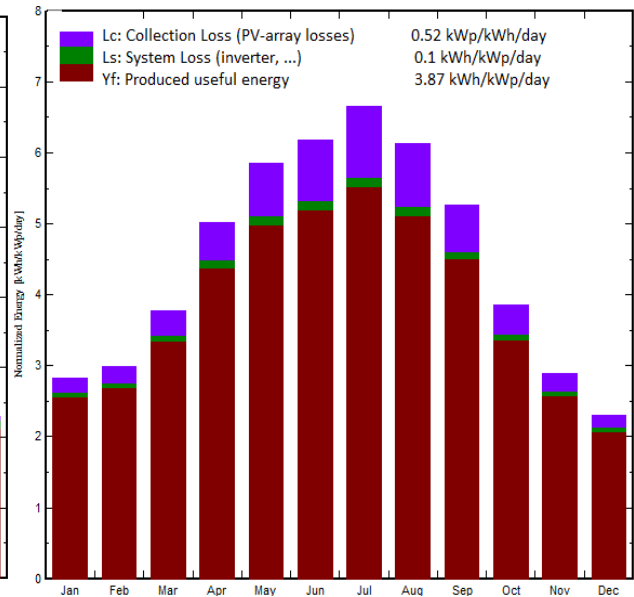
Slika 29. Gubici u monokristalnom FN sistemu



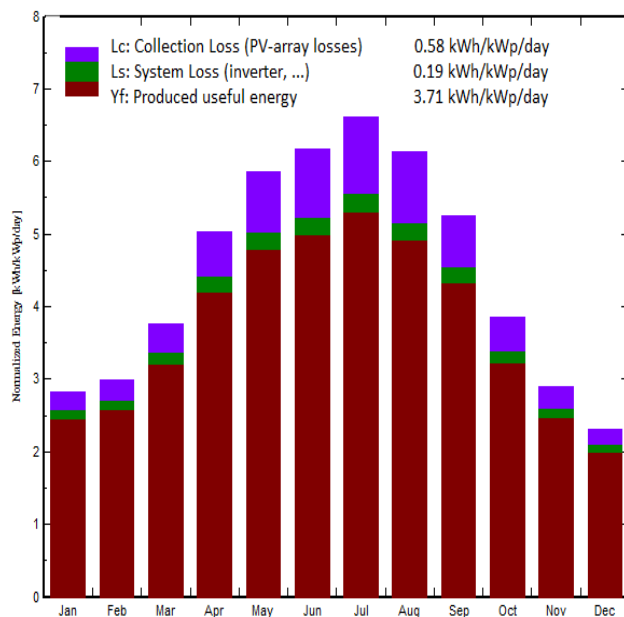
Slika 30. Gubici u polikristalnom FN sistemu



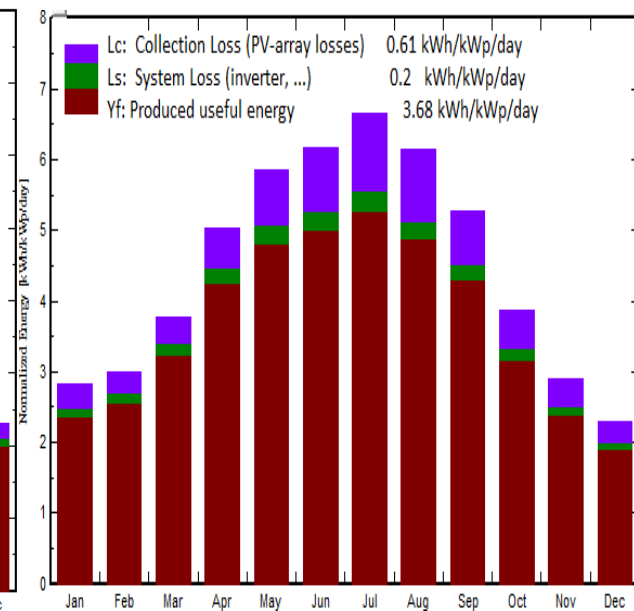
Slika 31. Gubici u FN sistemu sa CIS panelima



Slika 32. Gubici u FN sistemu sa CdTe panelima



Slika 33. Gubici u FN sistemu sa HIT panelima

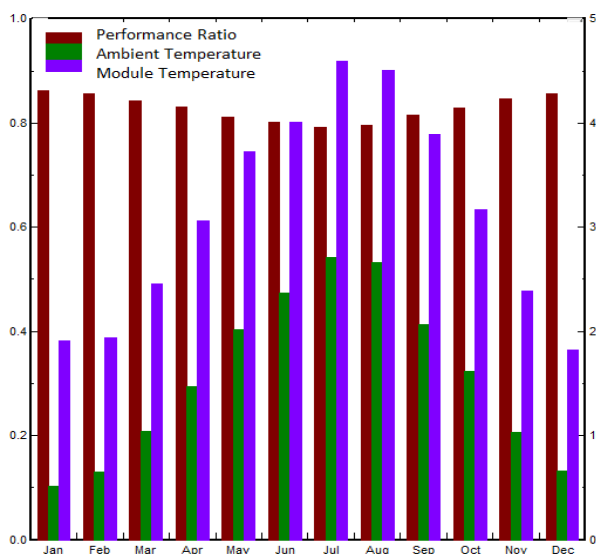


Slika 34. Gubici u FN sistemu sa uSi-aSi panelima

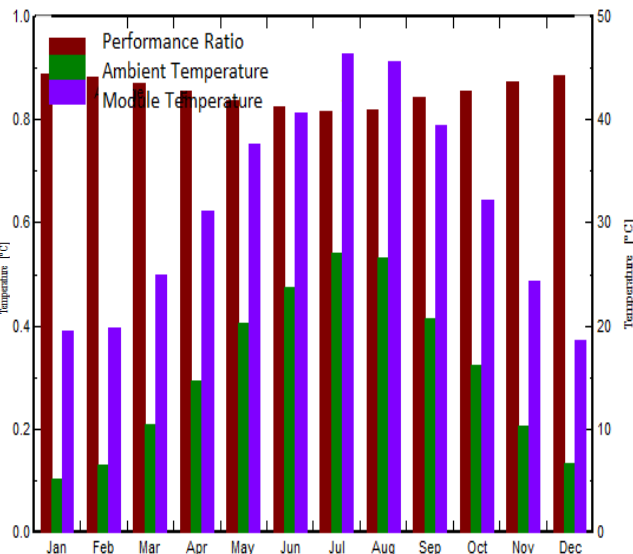
Najveći gubici su unutar samog niza panela i ti gubici su najveći u toku ljetnjih mjeseci jer su tada paneli najviše i najduže obasjani u toku dana. Gubici su usled velike temperature, zaprljanosti itd. Što se tiče gubitaka panela najveće gubitke kod panela imamo kod amorfnih i monokristalnih panela a oni su ujedno i najviše zastupljeni i najviše se ugrađuju kod nas. Najmanji gubici u panelima su kod panela sa tankoslojnih CIS i polikristalnih panela i oni iznose 0.31 i 0.5 kWh/kWp/day. Takođe relativno male gubitke unutar samog niza panela ima sistem sa tankoslojnim CdTe panelima i oni oni iznose 0.52 kWh/kWp/day. Ali u pogledu ukupnih gubitaka sistema koji su relativno mali, zbog kvalitetne opreme i pretvarača kod svih

sistema ovaj sistem sa polikristalnim uz panele sa tankoslojnim CIS ima najviše gubitke i oni iznose 0.19 i 0.21 kWh/kWp/day. Najmanji sistemski gubici su kod sistema sa tankoslojnim CdTe i monokristalnim panelima i oni iznose 0.1 i 0.18 kWh/kWp/day.

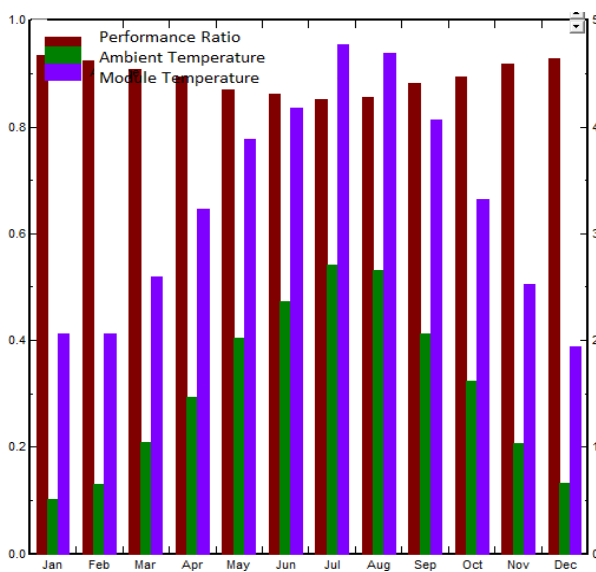
Ponašanje fotonaponskog sistema u mnogome utiče od temeperature i godišnjeg doba. Posmatranjem ponašanja sistema tokom vremena nadzora možemo primijetiti kako odnos performansi sistema zavisi od uticajsa temeperature. Tako su u nastavku prikazani dijagrami sa vrijednostima odnosa performansi, kao i temperature ambijenta i modula za posmatrani period za svaki fotonaponski sistem.



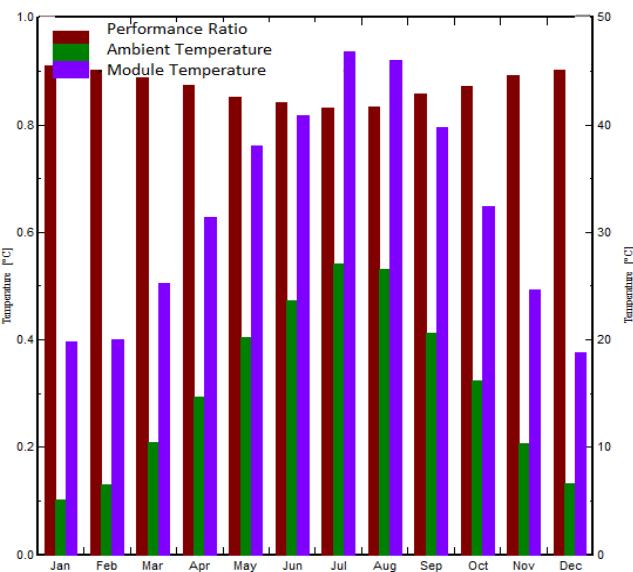
Slika 35. PR, Tamb, Tmod za mono FN sistem



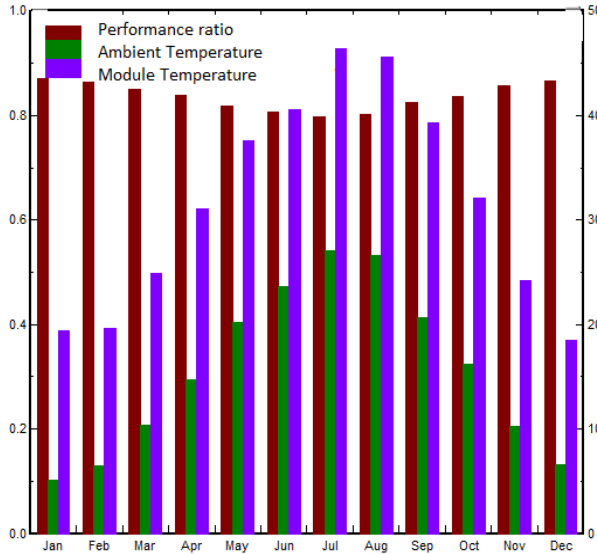
Slika 36. PR, Tamb, Tmod za poli FN sistem



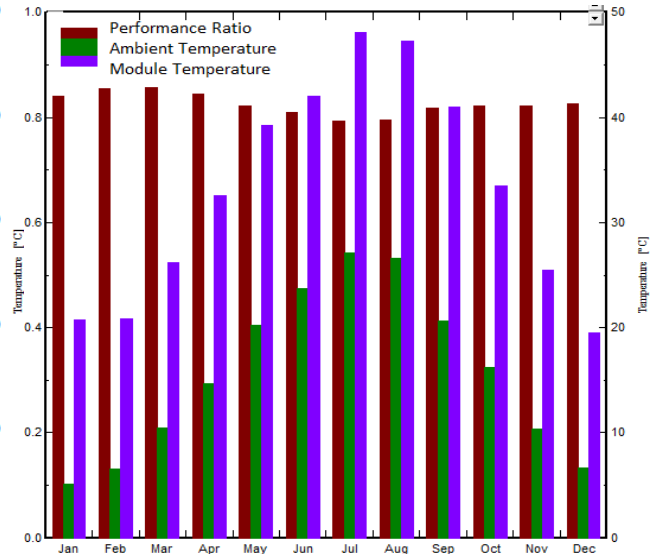
Slika 37. PR, Tamb, Tmod za CIS FN sistem



Slika 38. PR, Tamb, Tmod za CdTe FN sistem



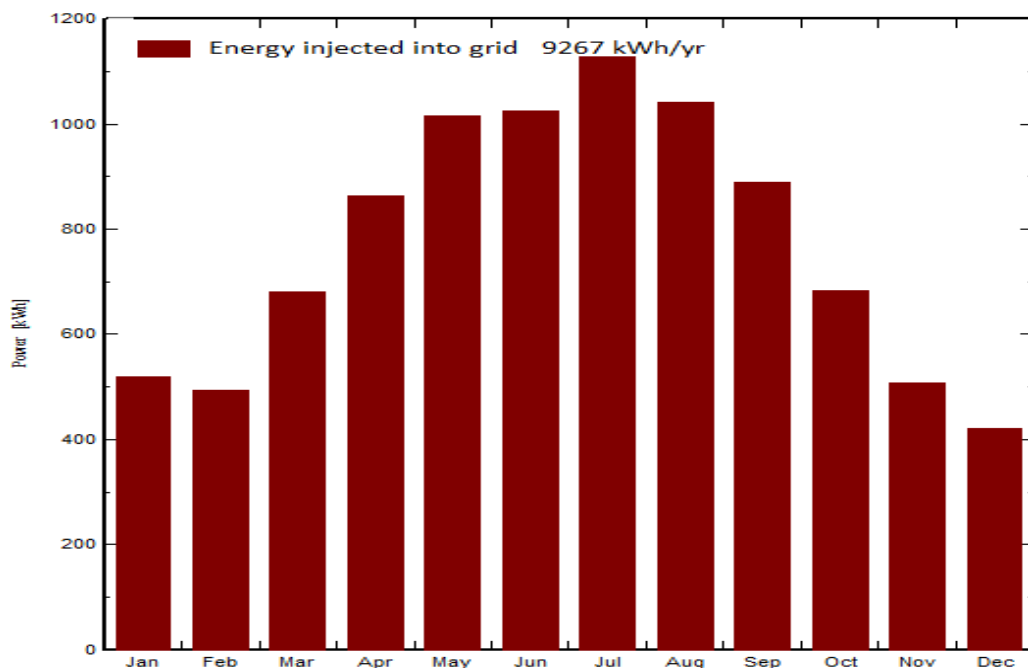
Slika 39. PR, Tamb, Tmod za HIT FN sistem



Slika 40. PR, Tamb, Tmod za uSi-aSi FN sistem

Posmatranjem svih fotonaponskih sistema može se vidjeti da su performanse sistema najbolje i da je najveće iskorišćenje Sunčeve energije tokom zimskih mjeseci, odnosno kada su dnevne temperature niže. Vrijednosti odnosa performansi svih sistema nezavisno od tehnologije od koje su paneli izgrađeni: monokristalni, polikristalni, tankoslojni i svi ostali su tokom zimskih mjeseci iznad 80 posto što predstavlja veliko iskorišćenje i smanjene gubitaka svih sistema nezavisno od tehnologije.

Lokacija koja je izabrana za postavljanje solarne elektrane ima izuzetan potencijal za proizvodnju električne energije kao i veliki dio Crne Gore. Sva električna energija koja se dobije pomoću ovog sistema bi se predavala distributivnoj mreži. Što se tiče količine električne energije koja se proizvede i preda mreži najviše se dobija kod solarnih elektrana kod kojih se koriste fotonaponski paneli od tankog filma, to jeste kod elektrana sa CIS i uSi-aSi panelima i to 9991 kWh i 9560 kWh. Fotonaponskom elektranom sa polikristalnim panelima dobija se velika količina energije i to 9400 kWh. Najmanja količina električne energije dobija se primjenom kadmijum telurid (CdTe) fotonaponskih panela. Kao što je i očekivano najveća količina električne energije dobija se u toku ljetnjih mjeseci a najmanja u toku zimskih kada ima manje sunčanih dana. U zimskom periodu kada je smanjena proizvodnja električne energije najbolje performanse pokazuju tankoslojni CIS i HIT paneli kao i polikristalni paneli. Za dati posmatrani period ukupna količina električne energije koja se dobija na mjesečnom nivou je prikazana na dijagramima za svaki sistem pojedinačno, kao i tabele sa pretpostavljenom satnom proizvodnjom električne energije za svaki mjesec u godini u posmatranom periodu.

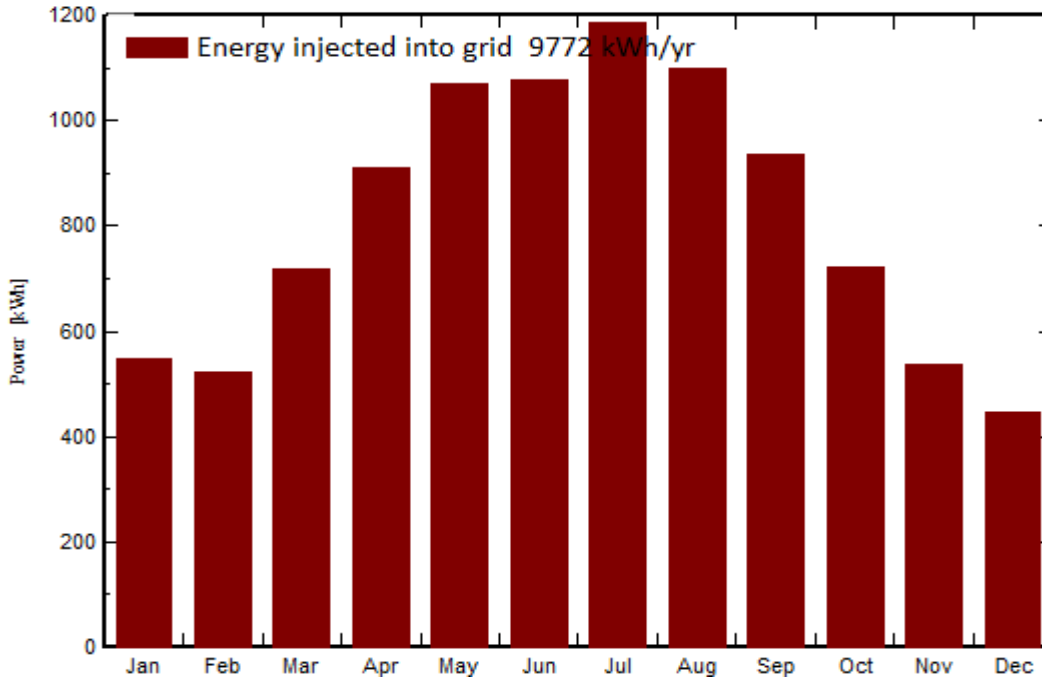


Slika 41. Električna energija proizvedena i predata mreži za monokristalni FN sistem

Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	32	59	79	86	83	84	65	33	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	12	34	56	69	72	68	73	58	37	13	0	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	6	31	57	77	91	98	92	89	68	48	22	1	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	2	23	55	84	102	115	116	105	90	76	56	31	8	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	9	32	63	89	113	130	122	120	113	97	71	40	14	1	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	10	33	60	86	105	121	127	127	115	96	74	47	18	4	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	8	32	66	95	120	135	141	134	125	112	83	51	19	4	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	3	28	61	93	120	138	131	127	118	96	72	41	13	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	19	51	78	102	113	118	120	106	90	62	28	2	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	8	36	61	85	96	98	88	91	72	41	7	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	19	41	56	71	80	79	82	55	24	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	1	31	53	59	72	71	67	48	21	0	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	33	181	455	782	1049	1216	1261	1214	1154	934	622	281	75	10	0	0	0	0	0

Tabela 1. Mjesečna satna suma proizvedene električne energije za monokristalni FN sistem

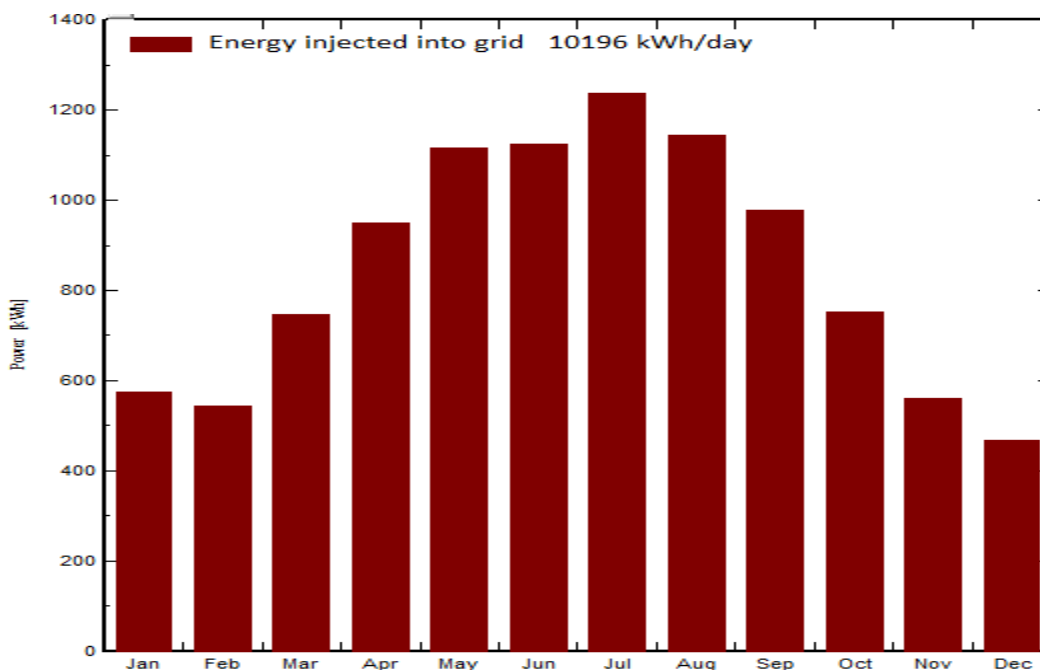


Slika 42. Električna energija proizvedena i predata mreži za polikristalni FN sistem

Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	34	62	83	91	87	88	69	34	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	12	36	60	73	76	72	77	61	39	14	0	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	6	33	60	81	96	103	97	94	72	51	23	1	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	2	25	58	89	107	121	122	111	95	81	59	32	8	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	9	34	67	94	119	137	129	126	119	102	76	43	15	1	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	11	35	64	91	111	127	133	134	121	102	78	50	19	5	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	9	34	69	100	127	142	149	141	132	118	88	54	20	4	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	4	29	65	98	127	145	138	133	124	101	76	44	14	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	20	54	82	108	119	124	126	111	95	65	30	2	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	8	38	65	90	101	103	93	96	76	44	7	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	20	43	59	75	84	83	86	58	25	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	1	33	56	62	76	75	70	51	22	0	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	35	192	481	826	1106	1280	1327	1278	1216	986	657	297	79	11	0	0	0	0	0

Tabela 2. Mjesečna satna suma proizvedene električne energije za polikristalni FN sistem

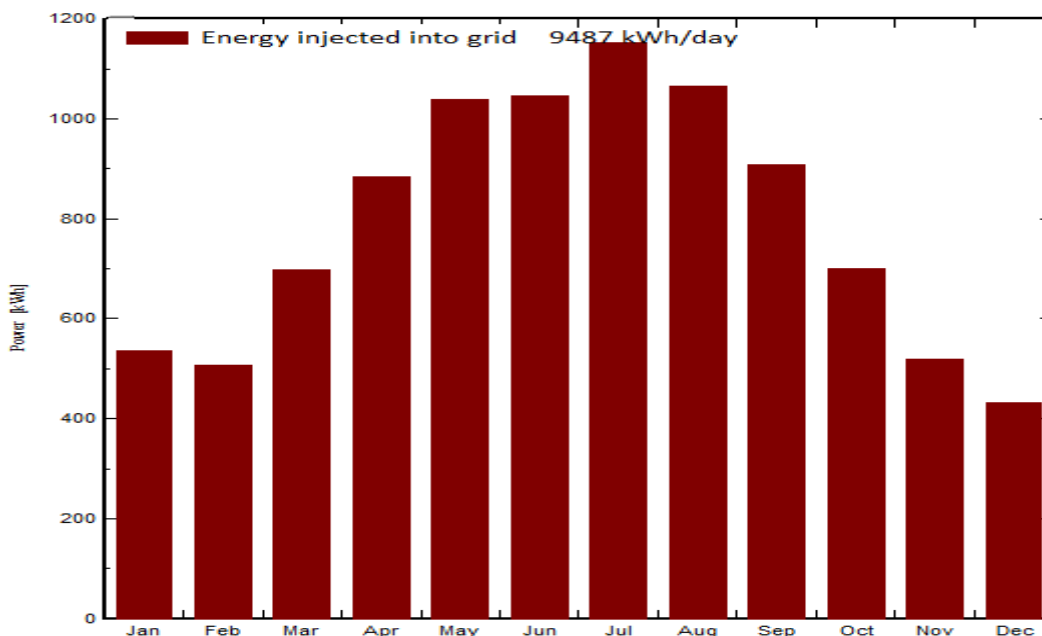


Slika 43. Električna energija proizvedena i predata mreži za FN sistem sa CIS panelima

Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	35	66	87	95	91	93	72	36	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	12	38	63	76	79	75	81	64	41	14	0	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	6	34	63	85	100	107	101	98	75	54	24	1	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	2	25	61	94	112	126	127	115	99	85	62	33	8	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	9	35	70	99	124	142	134	131	125	107	80	44	14	1	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	11	36	67	96	116	132	139	139	126	107	83	51	18	4	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	9	34	73	106	133	148	155	147	138	124	93	57	19	4	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	3	29	68	104	133	151	144	139	129	106	80	45	14	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	20	57	87	113	124	129	132	117	100	69	30	2	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	8	39	68	94	106	107	97	101	80	45	7	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	21	45	62	79	88	87	91	61	26	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	1	34	59	65	80	78	74	54	22	0	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	33	192	503	869	1159	1336	1383	1333	1272	1036	690	305	75	9	0	0	0	0	0

Tabela 3. Mjesečna satna suma proizvedene električne energije za FN sistem sa CIS panelima

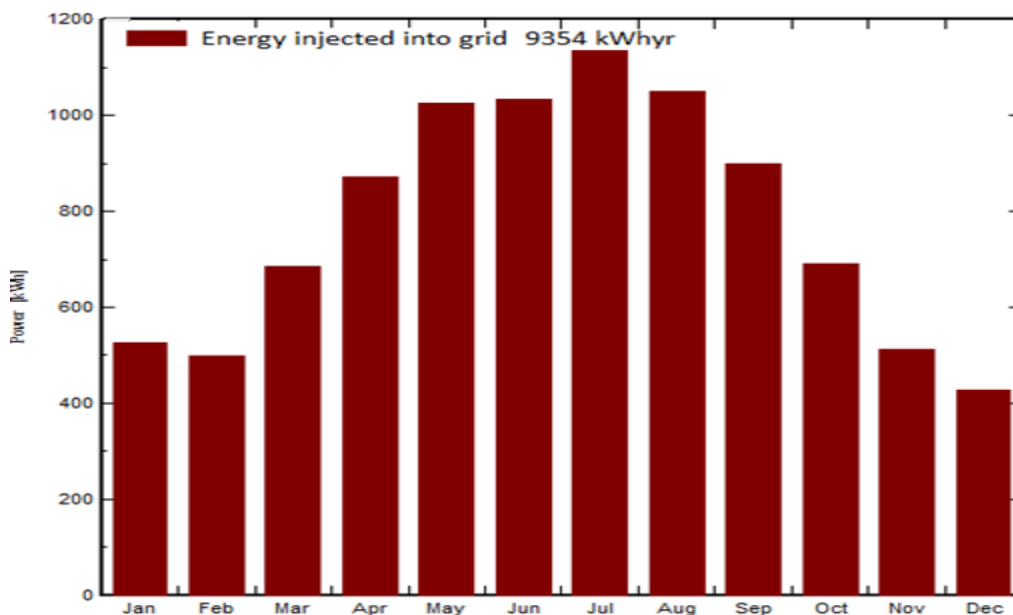


Slika 44. Električna energija proizvedena i predata mreži za FN sistem sa CdTe panelima

Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	33	61	81	89	85	86	67	33	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	12	35	58	71	74	70	75	60	38	13	0	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	6	32	58	79	93	100	95	92	70	50	22	1	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	2	23	56	87	104	118	119	108	93	78	57	31	8	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	9	32	64	92	116	133	125	123	116	100	73	41	14	1	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	11	33	62	89	108	124	130	130	118	99	76	47	17	5	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	8	32	67	98	123	138	145	137	128	115	85	52	18	4	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	4	27	62	96	123	141	134	130	120	98	74	42	13	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	19	52	80	105	116	121	123	108	92	63	28	2	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	8	36	63	88	98	100	91	94	74	42	7	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	20	42	57	73	82	81	84	57	24	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	1	32	54	60	74	72	69	49	21	0	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	33	180	464	804	1078	1248	1292	1244	1184	958	635	283	73	10	0	0	0	0	0

Tabela 4. Mjesečna satna suma proizvedene električne energije za FN sistem sa CdTe panelima

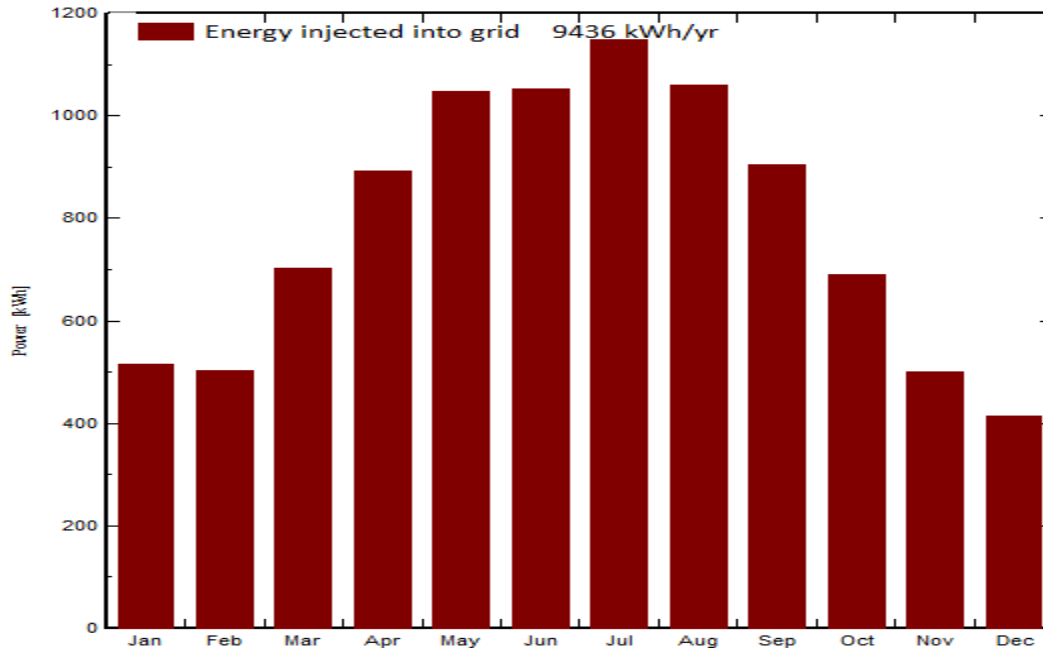


Slika 45. Električna energija proizvedena i predata mreži za FN sistem sa HIT panelima

Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	32	60	80	87	83	85	66	33	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	12	35	57	70	73	69	74	59	38	13	0	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	6	31	57	78	91	99	93	90	69	49	22	1	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	2	24	56	86	102	116	116	106	91	77	57	31	8	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	8	33	64	91	114	130	123	120	114	98	73	41	14	1	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	10	34	61	87	106	121	127	128	116	97	75	48	18	4	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	8	33	67	96	121	136	142	135	126	113	84	52	19	4	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	3	28	62	94	121	138	132	127	118	97	73	42	13	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	19	52	79	104	114	119	121	107	91	63	28	2	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	8	36	62	86	97	98	89	92	73	42	7	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	19	42	57	72	80	80	83	56	24	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	1	32	54	59	73	71	68	49	21	0	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	32	183	462	793	1060	1224	1268	1222	1164	946	631	285	75	9	0	0	0	0	0

Tabela 5. Mjesečna satna suma proizvedene električne energije za FN sistem sa HIT panelima



Slika 46. Električna energija proizvedena i predana mreži za FN sistem sa uSi-aSi panelima

Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	0	0	0	0	0	0	0	0	30	59	80	87	84	84	64	29	0	0	0	0	0	0	0	0
February	0	0	0	0	0	0	0	10	34	58	72	75	71	76	59	37	11	0	0	0	0	0	0	0
March	0	0	0	0	0	0	5	31	58	80	95	102	97	93	71	50	21	0	0	0	0	0	0	0
April	0	0	0	0	0	1	23	57	87	105	120	121	110	94	80	58	31	7	0	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	8	33	65	93	117	134	127	124	117	100	74	41	13	0	0	0	0	0	0
June	0	0	0	0	0	10	34	63	89	109	125	131	131	118	99	76	48	17	3	0	0	0	0	0
July	0	0	0	0	0	7	33	67	97	123	139	145	138	128	114	85	52	18	2	0	0	0	0	0
August	0	0	0	0	0	2	27	63	95	123	141	135	130	120	98	73	42	12	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	17	52	80	105	117	121	123	108	91	62	27	1	0	0	0	0	0	0
October	0	0	0	0	0	0	6	35	62	88	99	101	91	93	72	40	5	0	0	0	0	0	0	0
November	0	0	0	0	0	0	0	16	40	57	73	81	80	82	53	19	0	0	0	0	0	0	0	0
December	0	0	0	0	0	0	0	1	29	52	59	73	71	66	46	16	0	0	0	0	0	0	0	0
Year	0	0	0	0	0	27	178	458	796	1076	1252	1299	1249	1181	948	618	279	69	6	0	0	0	0	0

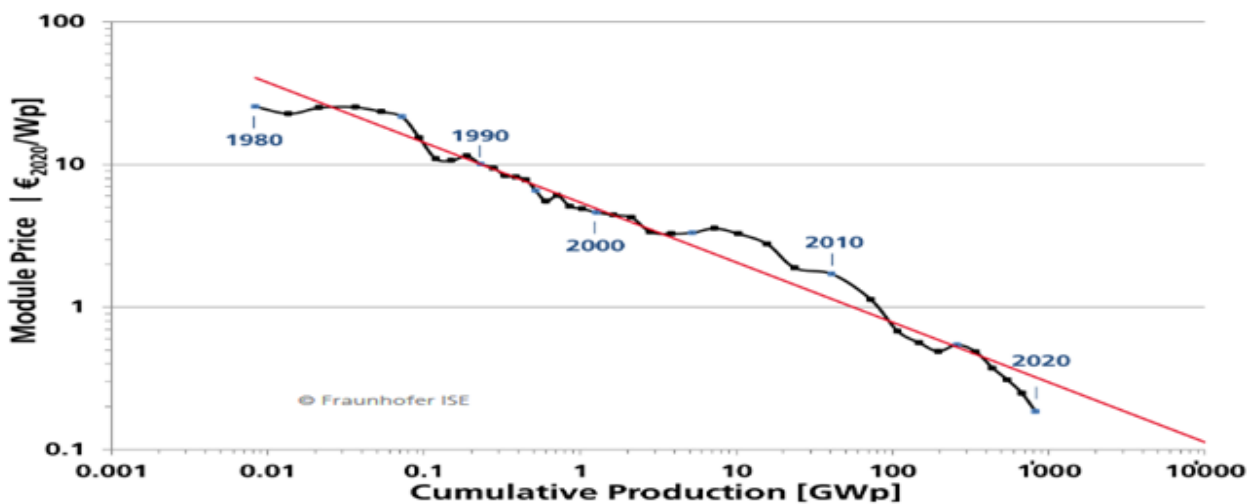
Tabela 6. Mjesečna satna suma proizvedene električne energije za FN sistem sa uSi-aSi panelima

6. Finansijska analiza

Solarni fotonaponski paneli su već sada najjeftiniji izvor energije na mnogim tržištima, a do 2030 će biti na mnogim svjetskim tržištima najjeftinija tehnologija. Dakle solarna fotonaponska energija će u narednoj deceniji proširiti svoj sadašnji tržišni udio za najmanje sedam puta, a u dugoročnijoj prognozi se očekuje da će to biti daleko veće.

Solarnaenergija je najbrže rastući sektor obnovljive energije i očekuje se snažan rast u ovom periodu do 2030-te godine a i dalje. Solarni fotonaponski sistemi su 2017. godine snadbijevali oko 2% svjetske proizvedene električne energije. Do 2030. godine očekuje se da će solarna energija dostići hidroenergiju a očekuje se da će oba izvora osiguravati najmanje 15% ukupno proizvedene električne energije.

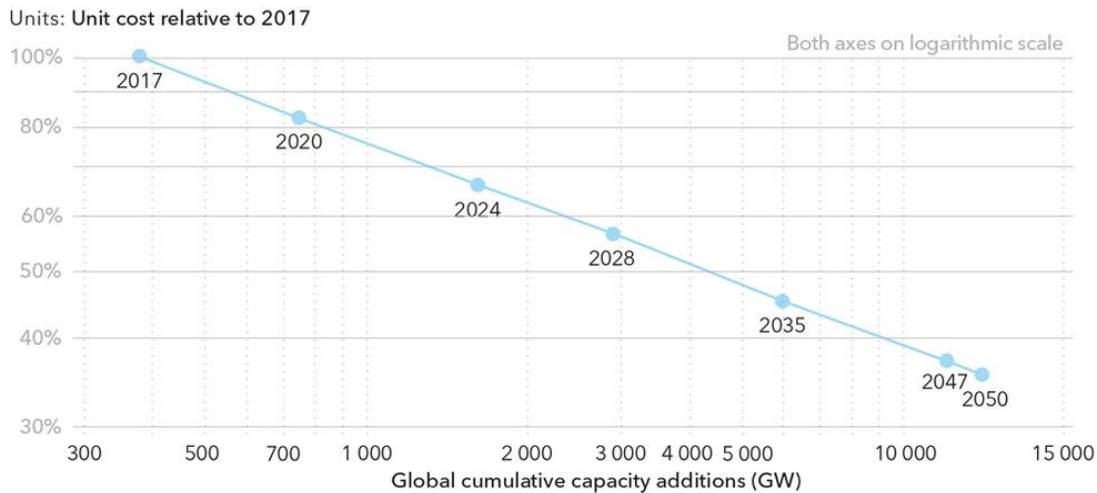
Cijena solarnih fotonaponskih sistema padaju drastično u zadnjih par godina a očekuje sa da će cijene i dalje drastično padati. Cijena proizvodnje iz fotonaponskih sistema se očekuje da bude najmanja u odnosu na druge izvore proizvodnje električne energije, tako da će u stvari sve ostale tehnologije za proizvodnju električne energije morati da se nadmeću sa solarnim sistemima u narednom periodu. Na slici 47je prikazano kretanje cijena modula različitih tehnologija u prethodnih četrdeset godina [22].



Slika 47. Kretanje cijena fotonaponskih panela svih komercijalno dostupnih fotonaponskih tehnologija

Posmatrajući kretanje cijena fotonaponskih panela kroz prethodni period do danas može se uočiti da uz povećanu proizvodnju električne energije iz fotonaponskih panela imamo i konstantan pad cijena panela svih komercijalno dostupnih tehnologija. Ovaj pad cijena fotonaponskih panela

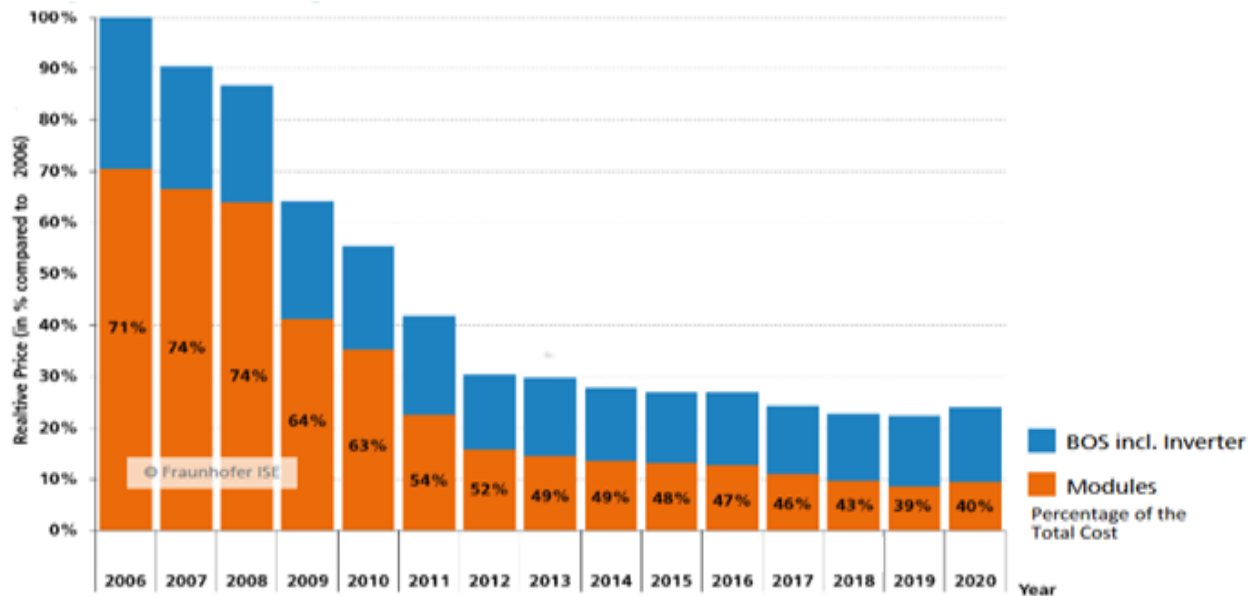
naročito je primjetan u zadnjih deset godina. Cijene svih komponenti fotonaponskih sistema konstantno su u padu kako zbog razvoja tehnologija tako i zbog sve veće ponude na tržištu. Tako je na narednoj slici prikazana projekcija kretanja cijena panela i invertora kao najznačajnijih komponenti fotonaponskih sistema u narednom periodu.



Slika 48. Kretanje cijena fotonaponskih panela svih tehnologija i invertora od 2017 do 2050

Ono što se može vidjeti sa slike jeste da cijene komponenti fotonaponskih sistema očekuje konstantan pad i u narednom periodu i one postaju sve pristupačnije a samim time i ugradnja fotonaponskih sistema postaje privlačnija a vrijeme povratka uloženog novca za izgradnju datih sistema kraće [23].

Cijena izgradnje fotonaponskih sistema bile su do skoro nepristupačne i privilegija samo imućnih dok sada i u nekom skorijem periodu se očekuje da će i skromno domaćinstvo moći sebi da priušti ugradnju fotonaponskih sistema. Na slici 49 je prikazano kretanje cijena svih komponenti fotonaponskih sistema od 2006 do 2020. Prikazan je udio u ukupnoj cijeni fotonaponskih sistema panela i ostalih komponenti sistema.



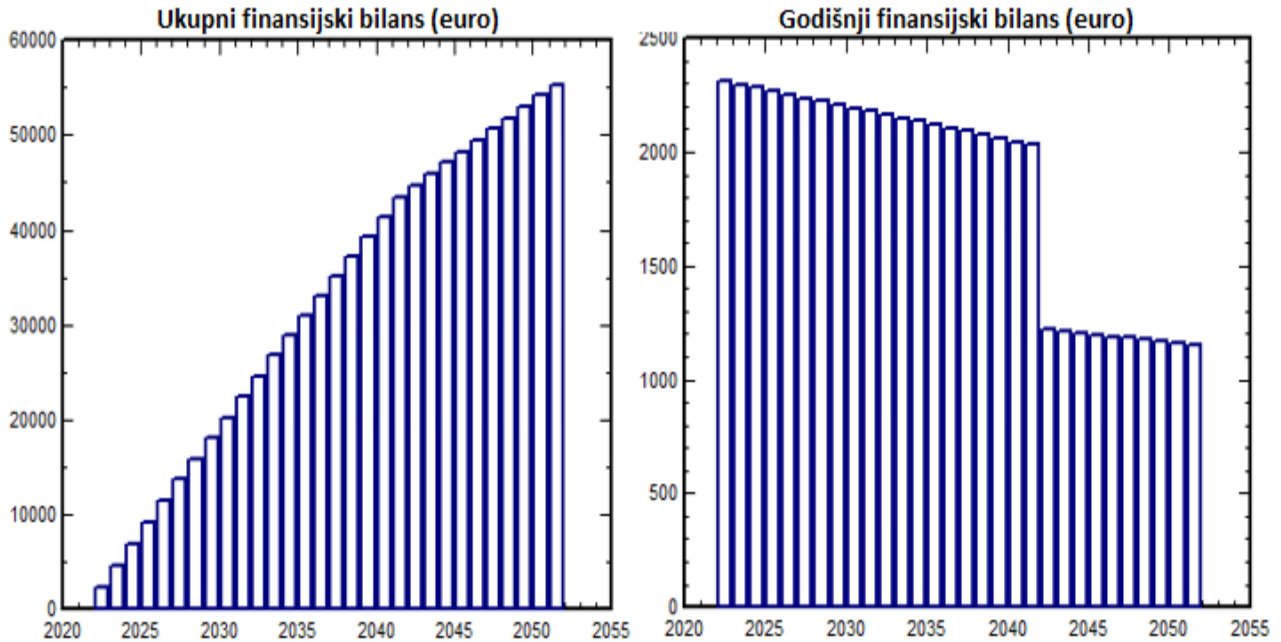
Slika 49. Kretanje cijena komponenti fotonaponskih sistema u Evropi

Ono što se može vidjeti sa slike jeste da cijene fotonaponskih sistema postaju sve povoljnije i primjetna je velika razlika u cijeni kada uporedimo cijene u prethodnih petnaestak godina. Takođe ono što je primjetno jeste da cijene fotonaponskih panela postaju sve pristupačnije i ne predstavljaju više najveći dio troškova prilikom izgradnje fotonaponskih sistema kao što je bio slučaj u ranijem periodu, već najveći dio troškova obuhvataju ostale komponente sistema. Balans sistema (BOS) obuhvata sve komponente fotonaponskih sistema sem panela a to su: invertori, prekidači, zaštitna oprema, kablovi, instalacioni radovi. Tako na primjeru 2020. godine možemo vidjeti da su troškovi svih komponenti sistema ne uključujući panele porasli za 2% u poređenju sa prethodnim godinama, a da su prosječni godišnji troškovi panela u istoj godini pali za 0.6%.

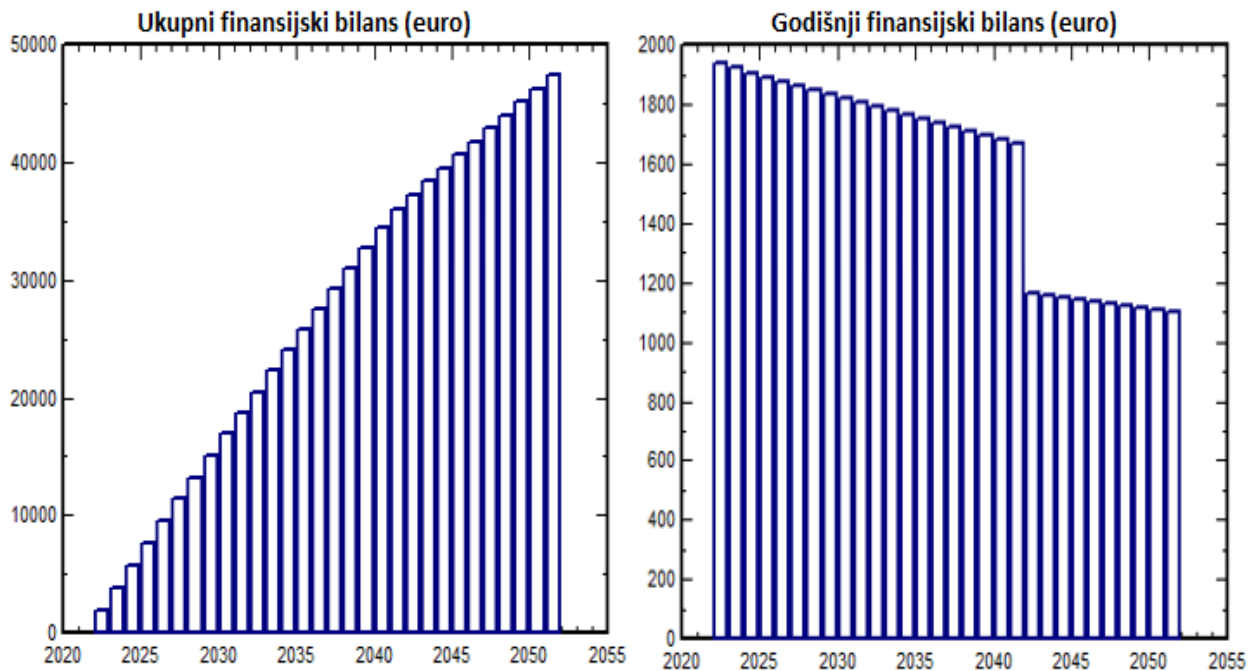
Prilikom projektovanja razmatranih fotonaponskih sistema baziranih na različitim tehnologija na primjeru Crne Gore odrađena je i finansijska analiza datih sistema. Finansijskom analizom su prikazani ukupni finansijski dobici svakog od sistema za period eksploatacije u periodu od trideset godina, kao i godišnji dobici svakog od sistema.

Svaki od sistema je jednake nazivne snage i korišćeni inverter je od istog proizvađača za svaki od šest fotonaponskih sistema, proizvađača Fronius model IG Plus 80V-3 tako da su sredstva potrebna za inverter jednaka za svaki od sistema pa se razlike u ukupnoj cijeni sistema odnose na cijenu odgovarajućih panela i druge prateće opreme.

U nastavku na slikama su prikazane vrijednosti ukupnog finansijskog balansa za svaki od sistema za period od 30 godina kao i godišnji finansijski balans tokom čitavog perioda.



Slika 50. Ukupni i godišnji finansijski bilans polikristalnog fotonaponskog sistema



Slika 51. Ukupni i godišnji finansijski bilans HIT fotonaponskog sistema

Na slikama 50 i 51 prikazane su vrijednosti ukupnog finansijskog bilansa i godišnjeg finansijskog bilansa za sisteme koji imaju najbolje i najslabije performanse u pogledu finansijske dobiti. Najbolje performanse odnosno najveću finansijsku dobit imamo kod sistema izgrđenih od

polikristalnih panela dok najslabije vrijednosti odnosno najmanju dobiti imamo kod sistema sa HIT panelima.

Najveća finansijska dobit se ostvaruje kod primjene polikristalnih panela i ona u ovome slučaju iznosi 55297€, zatim slijede sistemi sa CIS, amorfnim i CdTE panelima kod kojih se ostvaruju finansijske dobiti od 54253€, 54153€ i 53295€. Najmanja finansijska dobit se ostvaruje kod fotonaponskih sistema sa HIT tehnologijom za izradu panela i ona iznosi 47369€.

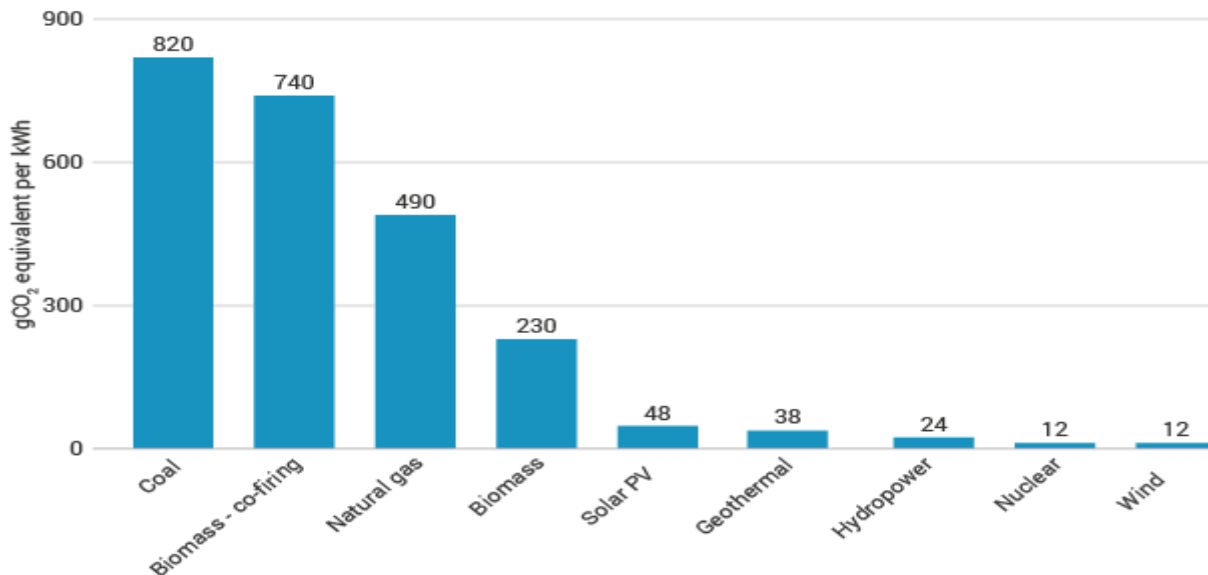
Upoređujući vrijednosti godišnjih bilansa koji se ostvaruju za svaki od sistema može se primijetiti kako sa vremenom uslijed degradacije panela i ostatka opreme dolazi do smanjenja proizvodnje svih fotonaponskih sistema. U pogledu ovih godišnjih prinosa može se primijetiti da najveću dobit u početku eksploatacije datih sistema se ostvaruje u prvim godinama i ona postepeno opada do dvadesete godine kada dolazi do osjetnijeg pada u iznosu godišnjeg finansijskog dobitka nakon čega dolazi do ponovog postepenog opadanja prinosa za svaki od sistema. Najveći godišnji prinos u prvim godinama eksploatacije imamo kod sistema sa polikristalnim zatim slijede CIS, CdTe, monokristalnim i amorfnim panelima, vrijednosti ovih prinosa iznose respektivno 2311€, 2237€, 2226€, 2211€ i 2131€. Dok najmanju finansijsku dobit imamo kod sistema sa HIT panelima i ona iznosi 1933€.

7. Dekarbonizacija

Solarna energija predstavlja izvor energije koji bi, u principu, mogao više puta zadovoljiti svjetske potrebe za proizvodnjom električne energije sa niskim sadržajem štetnih gasova. Tehnologija za proizvodnju solarne energije pretvaranjem svjetlosti u električnu energiju pomoću fotonaponskih panela postaje sve popularnija i pristupačnija u odnosu na proizvodnju na bazi fosilnih goriva.

Ubrzan rast primjene fotonaponske tehnologije od oko 40% godišnje dovodi i do smanjenja ukupnih troškova fotonaponskih sistema i to do 20% po udvostručenju instalisanih kapaciteta fotonaponskih sistema. Prema brojnim razmatranjima i projekcijama o broju instalisanih fotonaponskih sistema do 2050. godine, očekuje se da se smanji značajni dio emisije CO₂ [24]. Ovaj cilj je vrlo ambiciozan ali ukoliko bi se nastavilo sa integrisanjem fotonaponskih sistema i ako bi se ostvarile predviđene projekcije smanjenje predviđene emisije CO₂ bi se lako ostvarilo. Potrebe za smanjenjem emisije štetnih gasova usled ogromnih klimatskih promjena na svjetskom nivou zahtijevaju da se okrene izvorima električne energije koji će omogućiti smanjenje emisije štetnih gasova.

Na slici 52 je prikazan prosječna emisija CO₂ u toku radnog vijeka postrojenja za proizvodnju električne energije baziranih na različitim izvorima.



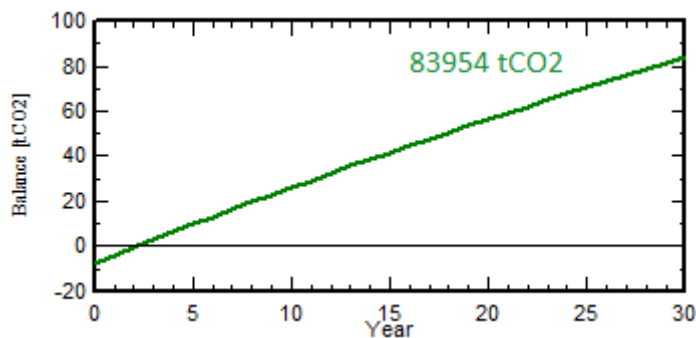
Slika 52. Emisija CO₂ tokom radnog vijeka postrojenja za proizvodnju električne energije

Na osnovu radnog vijeka postrojenja za proizvodnju električne energije možemo vidjeti da tradicionalni izvori za proizvodnju električne energije iz uglja emituju najviše CO₂ odnosno 820

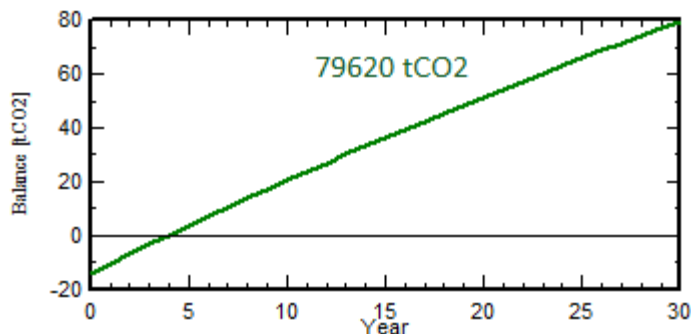
gCO₂/kWh. Dok sistemi koji emituju najmanje CO₂ u toku svog radnog vijeka su vjetroelektrane, one emituju 12 gCO₂/kWh. Fotonaponske elektrane u toku svog radnog vijeka u prosjeku emituju 48 gCO₂/kWh.

Kao što je poznato da se trenutno u svijetu proizvodi više od 70% električne energije iz neobnovljivih izvora odnosno onih koji najviše emituju štetnih gasova potrebno je okrenuti se izvorima koji su obnovljivi kojih ima neograničeno u prirodi, koji ne zagađuju životnu sredinu u toj količini. I ako je problem zagađenja životne sredine aktuelan već duži period nije se uradilo previše u pogledu smanjenja zagađenja i napredak na tom polju u narednom periodu mora biti veći. Uslijed sve većih potreba za električnom energijom i uslijed klimatskih promjena kojima nas priroda opominje da se moramo okrenuti korišćenju obnovljivih izvora danas se od fosilnih goriva proizvodi 50% više električne energije nego prije 20 godina. I to je jedan od alarmantnih podataka koji treba da se u narednom periodu promijeni. Donijete su direktive koje moraju sve zemlje da ispoštuju u pogledu smanjenja emisije štetnih gasova u narednom periodu i prema kojem je potrebno da se izvrši dekarbonizacija elektroenergetskih sektora.

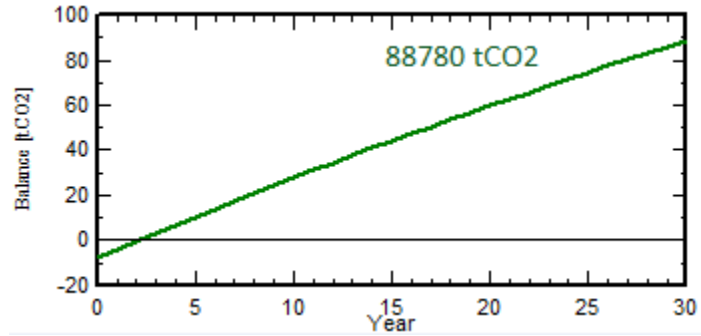
Za projektovane fotonaponske sisteme bazirane na različitim tehnologijama izrade fotonaponskih panela prikazane su i vrijednosti u smanjenju emisije CO₂ koje se postižu sa izgradnjom datih sistema, odnosno koliko dati sistemi utiču u procesu dekarbonizacije.



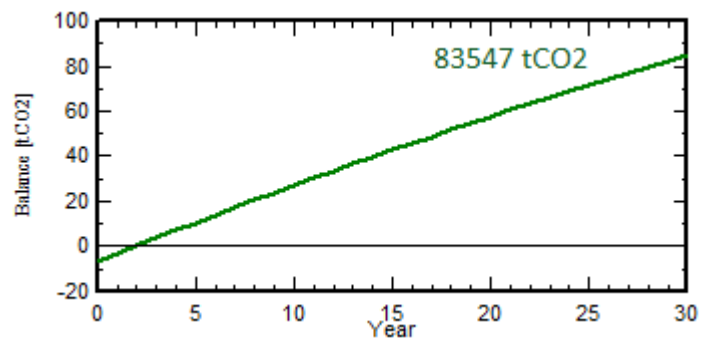
Slika 53. Sačuvana emisija CO₂ kod monokristalnog sistema



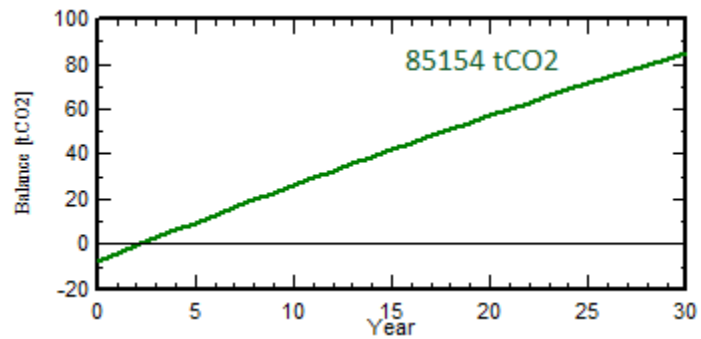
Slika 54. Sačuvana emisija CO₂ kod CdTe fotonaponskog sistema



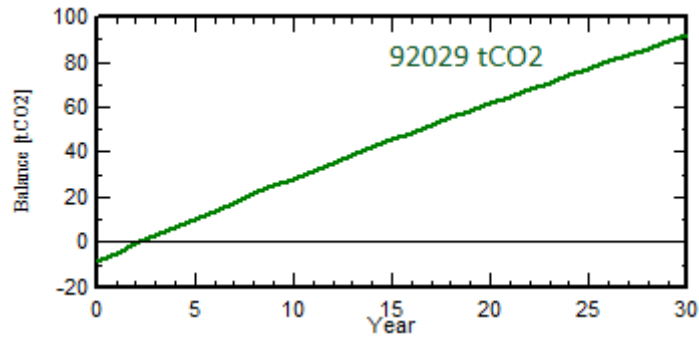
Slika 55. Sačuvana emisija CO₂ kod polikristalnog fotonaponskog sistema



Slika 56. Sačuvana emisija CO₂ kod fotonaponskog sistema sa HIT panelima



Slika 57. Sačuvana emisija CO₂ kod fotonaponskog sistema sa amorfnim panelima



Slika 58. Sačuvana emisija CO2 kod fotonaponskog sistema sa CIS panelima

U pogledu dekarbonizacije odnosno smanjenja emisije CO2 najbolje performanse pokazuje fotonaponski sistem sa tankoslojnim CIS panelima sa količinom od 92029 tCO2 u toku radnog vijeka fotonaponskog sistema odnosno godišnjem nivou od 3068 tCO2. Zatim slijede sistemi sa polikristalnim i amorfnim panelima sa količinom od 88780 tCO2 i 85154 tCO2 u toku radnog vijeka od trideset godina. Najslabije performanse u pogledu dekarbonizacije imamo kod sistema sa tankoslojnim CdTe panelima, ovaj sistem u toku radnog vijeka obezbeđuje smanjenje emisije CO2 u iznosu od 79620 tCO2.

8. Zaključak

„Energija to je ključni problem budućnosti – pitanje života i smrti. Sadašnji izvori energije su nepouzdana i truju našu planetu. Možda preživimo to trovanje, ali doći će dan kada će ti izvori energije presušiti.“ riječi su našeg Nikole Tesle. Još je Nikola Tesla postao svjestan da tradicionalni izvori energije nisu nepresušni i da su štetni po okolinu. On je govorio o tom problemu još tada ali je bilo potrebno da dođe do velikog razvoja, da porastu potrebe za električnom energijom kada zalihe rezervi su sve manje i kada je sredina u kojoj živimo ugrožena i priroda nas sama opominje da se mora okrenuti onim nepresušnim čistim izvorima. Dosadašnji neobnovljivi izvori energije moraju biti zamijenjeni obnovljivim, za početak u što većem procentu, a kasnije i sasvim.

Sunce je jedan nepresušni izvor energije i kao što je pokazano njegov potencijal je ogroman, a Crna Gora ima veliki potencijal za izgradnju solarnih elektrana koje treba da budu predvodnici tranzicije elektroenergetskog sektora kako u svijetu tako i kod nas. Danas se sve više računa na neposredno korišćenje solarne energije putem fotonaponskih ćelija. Njihova cijena uz napredak tehnologije i povećane ponude na tržištu svakim danom sve više pada, tako da je budućnost korišćenja Sunčeve energije neupitna. Zbog toga i zbog solarnog potencijala koje ima Crna Gora u ovom radu su projektovane šest fotonaponskih elektrana baziranih na različitim tehnologijama fotonaponskih ćelija. Svih šest fotonaponskih sistema su jednake nazivne snage, projektovani su na istoj lokaciji i izloženi istoj količini Sunčevog zračenja. Za svih šest fotonaponskih sistema baziranih na šest tehnologija i to: monokristalnoj, polikristalnoj, CIS, CdTe, HIT i amorfnoj. Za date sisteme su izračunati karakteristični parametri, upoređenje dobijene vrijednosti, zatim je odrađena finansijska analiza i uticaj na zagađenje okoline datih sistema. Upoređujući dobijene vrijednosti može se vidjeti da svi sistemi daju pozitivne rezultate i ostvarit će se profit u svakom smislu izgradnjom datih sistema. Upoređujući dobijene vrijednosti za prinose koji se ostvaruju pomoću datih sistema najbolje performanse se dobijaju kod primjene CIS, polikristalnih i CdTe panela ovi sistemi u pogledu prinosa daju najbolje rezultate. Dok se najmanji prinos ostvaruje kod primjene sistema sa tankoslojnim HIT panelima. Svi sistemi pokazuju veliku osjetljivost na sezonalnost odnosno promjene godišnjih doba kao i na intenzitet Sunčeve svjetlosti. Ono što je takođe vrlo bitno za buduću primjenu jeste fotonaponski sistemi koji koriste panele sa amorfnim ćelijama pokazuju dobre karakteristike kada su oblačni dani i kada je osvijetljenost slabija. Svi sistemi nezavisno od tehnologije koju koriste najbolje performanse odnosno najmanje gubitke i najveću učinkovitost ostvaruju u periodu od oktobra do aprila kada je temperatura niža i manja je količina Sunčevog zračenja. U ovom periodu su i gubici svih sistema najmanji. Gubici su sastavni dio svakog sistema a kod ispitivanja fotonaponskih sistema imamo dvije vrste gubitaka i to u panelima i systemske u svim ostalim komponentama sistema. Najmanje gubitke u panelima imamo kod panela sa amorfnim ćelijama (uSi-aSi) dok su najveći gubici kod HIT i monokristalnih fotonaponskih sistema. Dok što se tiče systemskih, ukupnih gubitaka koji su relativno skoro isti kod svih

sistema najveći su kod polikristalnih i amorfni sistema, a najmanji odnosno najbolje performanse su kod sistema sa tankoslojnim CIS i CdTe panelima. Posmatrajući dobijene vrijednosti za parametar odnos performansi sistema (PR) koji prikazuje realni učinak fotonaponske elektrane u odnosu na teorijski maksimalno mogući. Ovaj parametar takođe kvantifikuje sveukupne efekte gubitaka unutar sistema. Dobijene vrijednosti za svaki od šest sistema je iznad 75% što znači da svaki od sistema ima potencijal u izgradnji na datoj i sličnim lokaciji na teritoriji Crne Gore. Najbolji rezultati u pogledu ovog parametra dobijeni su kod sistema sa CIS panelima, a zatim slijede sistemi sa polikristalnim panelima. Sistemi sa tankoslojnim CIS panelima su malo zastupljeni Crnoj Gori a prema dobijenim rezultatima mogu naći primjenu i u mnogome zamijeniti skuplje monokristalne sisteme. Takođe je za svaki od sistema izračunata i potencijalna proizvedena električna energija iz datih sistema. U pogledu proizvedene električne energije najbolji rezultati, odnosno najveća količina električne energije se dobija kod sistema sa CIS i polikristalnim panelima a najmanja sa tankoslojnim HIT panelima.

Ono što je vrlo bitno kod izgradnje bilo kojeg sistema jeste količina sredstava koja je potrebna da bi jedan sistem bio u funkciji. Cijene svih komponenti sistema i fotonaponskih panela svih tehnologija su iz godine u godinu povoljnije tako da je period povratka uložene novca kraći i instalisanje ovih sistema postaje pristupačnije svim građanima i nije više privilegija imućnijih. Upoređujući dobijene vrijednosti i ostvareni profit kako na godišnjem nivou tako i u toku radnog vijeka instalisanih sistema gdje je uzet period od trideset godina, najveći profit se ostvaruje kod sistema sa polikristalnim panelima a to je ujedno i sistem zajedno sa CdTe i amorfni sistemom za koji je period povratka uložene sredstava najkraći. Što se tiče godišnjih prinosa on je što je i očekivano najveći u prvim godinama rada sistema a zatim uslijed degradacije i smanjenja efikasnosti postaje niži. Tankoslojni HIT i amorfni sistemi su u pogledu degradacije najslabiji, njihova proizvodna moć sa godinama najviše slabi.

Dok što se tiče uticaja na smanjenje emisije štetnih gasova odnosno negativnog uticaja na životnu sredinu svi sistemi pozitivno utiču i potrebno je što više ovih sistema da se instaliraju. U pogledu dekarbonizacije odnosno smanjenja emisije CO₂ najbolje performanse pokazuje fotonaponski sistem sa CIS panelima, zatim slijede sistemi sa polikristalnim, amorfni i monokristalnim panelima. Dok najslabije performanse u pogledu dekarbonizacije imamo kod sistema sa tankoslojnim CdTe panelima.

Pored svih prikazanih pozitivnih aspekata koje ima primjena fotonaponskih panela za proizvodnju električne energije iz energije Sunčevog zračenja postoje i negativni aspekti. Solarna energija nije konstantna već zavisi od vremenskih prilika tako da pri velikoj zastupljenosti ovog vida energije u sistemu se stvara problem pri regulaciji snage i napona u mreži. Tako tokom noći se ne može računati na proizvodnju iz ovih sistema pa se mora računati i obezbijediti neki drugi vid proizvodnje. Još jedan problem kod primjene solarne energije jeste što je potrebna velika površina za montiranje panela jer imaju mali kapacitet, pa je za velike instalisane kapacitete potreban veliki prostor. Veliki problem je i nekonkurentnost na tržištu električne energije pa mnoge zemlje, radi pospješivanja

proizvodnje iz energije Sunčevog zračenja, izdvajaju dodatna sredstva za subvencionisanje proizvodnje, ali to dovodi do poskupljenja električne energije.

Na osnovu dobijenih rezultata može se reći da pored monokristalnih sistema koji imaju najveću primjenu kako na svjetskom nivou tako i kod nas, neke druge tehnologije fotonaponskih panela daju bolje rezultate u pogledu određenih parametara u odnosu na monokristalne one mogu naći primjenu u Crnoj Gori koja ima ogroman solarni potencijal. Primjena polikristalnih panela kako zbog cijena, a uslijed porasta efikasnosti pokazuje dobre rezultate i prednost u odnosu na monokristalne panele. Dok primjena tankoslojnih tehnologija koje su generalno nepoznanica potrebno je da bude veća jer primjena ovih tehnologija sa brojnim unapređenjima ove tehnologije u posljednje vrijeme, pristupačnosti cijena je nešto što nameće veću primjenu ovih sistema.

9. Literatura

1. Green Home act green, „Energija Sunca“, dostupna na <https://www.greenhome.co.me/index.php?IDSP=447&jezik=lat>
2. Solarni potencijal Srbije, Sunce u Srbiji i Evropi dostupno na <http://solarnipotencijalsrb.blogspot.com/2016/06/>, Jun 2016.
3. M. Radaković, Obnovljivi izvori energije i njihova ekonomska ocjena, 2010.
4. Č. Zeljković, Obnovljivi izvori energije – solarna energetika, Beograd, 2018.
5. J. Mikulović, Ž. Đurišić, Solarna energetika, Akademska misao, Beograd, 2019.
6. V. Mijailović, Distribuirani izvori i sistemi za distribuciju električne energije, Akademska misao, Beograd, 2019.
7. M. Lambić, Solarne tehnologije – toplotni i fotonaponski sistemi, AGM knjiga, Srbija, 2013.
8. Hans Joakim Geist, Fotonaponska postrojenja, Agencija EHO, 2017.
9. A.K. Mukerjee, Nivedita Thakur, Photovoltaic systems – analysis and design, PHI, New Delhi, 2011.
10. Weidong Xiao, Photovoltaic power system: modeling, design and control, May, 2017.
11. Chetan Singh Solanki, Solar photovoltaics: fundamentals, technologies and applications, April, 2011.
12. „Procjena potencijala obnovljivih izvora energije u Crnoj Gori“, Ministarstvo za zaštitu životne sredine, kopna i mora Republike Italije, Februar 2007.
13. „Energy, transport and GHG emissions trend to 2050“, EU Reference Scenario, 2016. dostupno na https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf
14. The Power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025, IRENA, june 2016. dostupno na https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf
15. B. Parida, S. Iniyar, R. Goic, A review of solar photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy reviews.
16. https://sr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija
17. A. Loque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, 2003 John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-491196-9.
18. G. K. Singh, Solar power generation by photovoltaic technology: A review, Energy, May 2013.
19. L. El Chaar, L. A. Iamont, N. El Zein, Review of photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
20. Photovoltaics report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, Freiburg, July, 2021.
21. Kaveh Rahimi, Saeed Mohajeryamani, „Effects of photovoltaic systems on power quality“, Conference: North American Power Symposium (NAPS), Denver, 2016

22. F. John Hay, Solar electric investment analysis, 2016.
23. Pedro Crespo, Marijke Welisch, Michael Hartner, Navigating the roadmap for clean, secure and efficient energy innovation, Decarbonising the EU's energy system, April, 2019.
24. Maria Victoria, Kun Zhu, Tom Brown, Early decarbonisation of the European energy system pays off, Nature communications, December, 2020.