Tehnologija koncentratorskih fotonaponskih sustava

Cmrk, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:891247

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Karlo Cmrk

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidat **Karlo Cmrk**

Predao je izrađen završni rad dana: 15. rujna 2017.

Povjerenstvo u sastavu:

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
Prof. dr. sc. Juraj Šipušić, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 20. rujna 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Karlo Cmrk

TEHNOLOGIJA KONCENTRATORSKIH FOTONAPONSKIH SUSTAVA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:	izv. prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović
Članovi ispitne komisije:	izv. prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Zagreb, rujan 2017.

Hvala mentoru što mi je pomogao svojim savjetima i znanjem kod pisanja ovog završnog rada.

SAŽETAK

U ovom radu prikazana je tehnologija fotonaponskih koncentratorskih sustava, njihova efikasnost i primjena te zašto sve više ovakvih sustava zamjenjuje upotrebu ravnih fotonaponskih sustava. Tehnologija fotonaponskih koncentratorskih sustava zasniva se na fotonaponskoj tehnologiji koja pretvara sunčevu energiju u električnu energiju preko solarnih panela pomoću fotoelektričnog efekta. Ona jest skuplja od standardne tehnologije, ali je i znatno efikasnija od nje jer koristi višespojne članke koji zahtijevaju i znatno manje površine, a što ujedno čini i glavnu prednost ovakve tehnologije. Glavni nedostatak je mogućnost funkcioniranja samo pri direktnom solarnom zračenju. Najčešća klasifikacija sustava je po stupnju koncentracije, odnosno koliko je koncentrirani protok sunčeve svjetlosti veći od protoka primljenog na koncentrator. Kako se stupanj koncentracije povećava, tako se povećava i potreba za složenijim člankom te sustavima za hlađenje i pokretnim dijelovima za praćenje Sunca. U radu su uspoređeni podaci potrošnje električne energije na otoku Visu na godišnjoj razini s podacima koji odgovaraju proizvedenoj električnoj energiji potencijalne fotonaponske elektrane s koncentratorskim sustavom koji koristi višespojni solarni članak. Rezultati pokazuju da bi fotonaponska elektrana veličine 17 MW s koncentratorskim sustavom uspjela pokriti godišnju potrošnju električne energije na otoku Visu. Prikazan je i okvirni izračun potrebnog fotonaponskog modula.

Ključne riječi: solarna energija, fotonaponski članak, koncentratorski sustavi, višespojni solarni članak

SUMMARY

This paper presents the technology of photovoltaic concentrator systems, their efficiency and application, and why these systems are increasingly replacing the use of flat photovoltaic systems. The technology of photovoltaic concentrator systems is based on photovoltaic technology that transforms solar energy into electricity through solar panels as a result of the photoelectric effect. It is true that it is more expensive than standard technology, however, it is far more efficient as it uses multi-junction cells that require significantly smaller surface area, and that is the major benefit of such technology. On the other hand, the main disadvantage is the ability to function only under direct solar radiation. The most common classification of the system is by degree of concentration, i.e. how much is the concentrated solar energy flux higher than the flux received on the concentrator. As the degree of concentration increases, so does the need for a more complex cell, as well as cooling systems and mobile sun tracking parts.

The paper compares the data of annual electricity consumption on the Island of Vis and data corresponding to the electricity produced by a potential photovoltaic power plant with a concentrator system that uses a multi-junction solar cell. The results show that a 17MW photovoltaic power plant with a concentrator system would meet the annual electricity consumption needs of the Island of Vis. A provisional calculation of the required photovoltaic module is also included.

Key words: solar energy, photovoltaic cell, concentrator systems, multi-junction solar cell

SADRŽAJ

1. UVOD **4**

2. OPĆI DIO **6**

2.1. Vrste fotonaponskih koncentratorskih sustava 6

2.2. Izvedba sustava koncentriranja zračenja 7

2.2.1. Fresnel leće 8

2.2.2. Parabolična zrcala 9

2.2.3. Ravna zrcala 10

2.2.4. Luminiscentni koncentratori 11

2.3. Hlađenje 12

2.3.1. Pasivno hlađenje 12

2.3.2. Aktivno hlađenje 12

2.4. Sustavi za praćenje 13

2.5. Fotonaponska konverzija 13

2.5.1. Fotogeneracija 14

2.5.2. PN spoj 15

2.6. Višespojni solarni članak 17

3. EKSPERIMENTALNI DIO **20**

3.1. Potrošnja energije na otoku Visu 20

3.2. Ulazni podaci za otok Vis (Komiža) 22

4. REZULTATI **28**

5. RASPRAVA **31**

6. ZAKLJUČAK **32**

7. POPIS SIMBOLA **33**

8. LITERATURA **34**

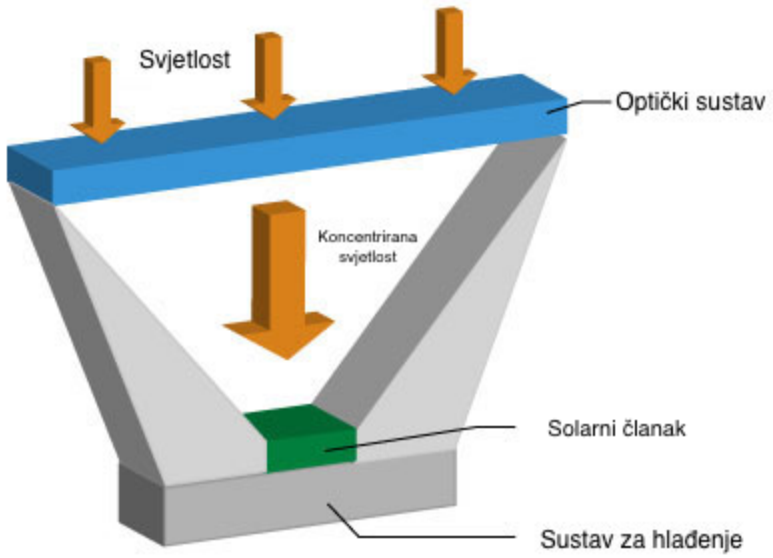
9. ŽIVOTOPIS **35**

1. UVOD

Pretvorba solarne energije može se promatrati s aspekta dobivanja električne i toplinske energije, pri čemu fotonaponski sustavi pretvaraju solarnu u električnu energiju, a solarni termalni sustavi pretvaraju solarnu u toplinsku energiju. Predmet ovog rada su upravo solarni fotonaponski sustavi novije generacije koji koncentriraju solarno zračenje.

Tipični fotonaponski sustav sastoji se od niza solarnih panela od kojih svaki sadrži veliki broj solarnih članaka u kojima se generira električna energija. Njihova tehnologija zasniva se na fotonaponskoj tehonologiji koja pretvara sunčevu energiju u električnu energiju, dok se sam proces pretvaranja sunčeve energije u električnu zasniva na fotoelektričnom efektu koji se odvija u poluvodičkim materijalima.

Koncentratorski fotonaponski sustav u osnovi može biti i hibridizacija korištenja fotonaponskog efekta i topline koja se time stvara. Glavna razlika između koncentratorskih fotonaponskih sustava i ravnih fotonaponskih sustava je u fokusiranju velikih količina sunčeve energije u visoko efikasni višespojni solarni članak pomoću optičkog uređaja, odnosno koncentratora. Time se efikasnost podiže na oko 40% [3].



Slika 1. Shematski prikaz koncentratorskog fotonaponskog sustava

Uz solarni članak i koncentrator, koncentratorski fotonaponski sustav sadrži i sustav za hlađenje te sustav za praćenje, pomoću kojih se podiže njegova efikasnost.

Koncentriranjem sunčevih zraka u malu površinu solarnog članka, ova tehnologija ima niz prednosti:

- Zahtjeva manji članak za hvatanje iste količine sunčevih zraka s obzirom na ravne fotonaponske sustave
- Korištenje visoko efikasnog višespojnog solarnog članka
- Materijali od kojih su izrađeni optički sustavi niže su cijene od materijala za izradu solarnih članaka
- Veća proizvodnja električne energije kroz dan zbog pokretnih dijelova koji omogućuju modulu da bude okrenut prema Suncu

Neki od nedostataka su:

- Mogućnost stvaranja užarenih točaka zbog koncentriranja sunčevih zraka
- Pokretni dijelovi pridonose složenosti cjelokupnog sustava
- Sustav može normalno funkcionirati isključivo kada je izložen direktnom sunčevom zračenju

Najčešća klasifikacija koncentratorskih fotonaponskih sustava je po stupnju koncentracije, odnosno koliko je koncentrirani protok sunčeve svjetlosti veći od onog bez koncentracije.
Tako se sustavi dijeli na nisko, srednje i visoko koncentrirane. Kako se stupanj koncentracije povećava, tako se povećava i potreba za složenijim solarnim člankom te sustavima za hlađenje i praćenje.
Dvije glavne izvedbe samog koncentriranja sunčevih zraka su refraktni tip koji koristi leće te reflektirajući tip koji koristi zrcala.

2. OPĆI DIO

2.1. Vrste fotonaponskih koncentratorskih sustava

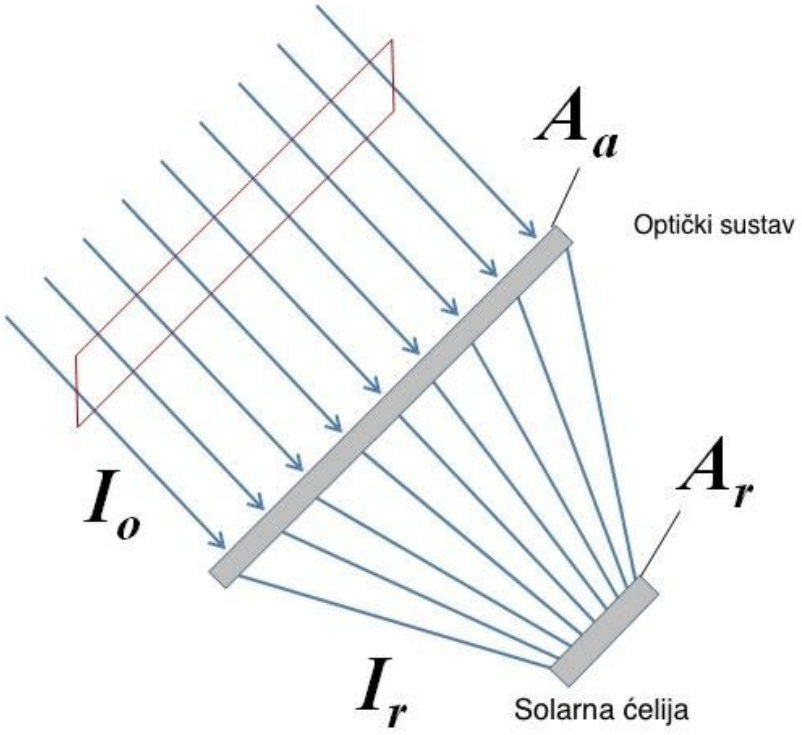
Najčešća klasifikacija fotonaponskih koncentratorskih sustava je prema stupnju koncentracije koji se mjeri u količini sunca. Sunce predstavlja mjeru uvećanja, odnosno koliko je koncentrirani intenzitet sunčevih zraka koji dolazi do solarnog članka veći od onog bez koncentracije. Sustavi se tako dijele na nisko, srednje i visoko koncentrirane, a njihove karakteristike prikazane su u tablici 1. [3]

Tablica 1.

	Nisko koncentrirani	**Srednje koncentrirani**	**Visoko koncentrirani**
Stupanj koncentracije	2 - 10	10 - 100	>100
Sustav za praćenje	Nije potreban	Praćenje po jednoj osi	Praćenje po dvjema osima
Hlađenje	Nije potrebno	Pasivno	Aktivno u većini sustava
Materijal fotonaponskog članka	Silicij (Si)	Kadmijev telurid (CdTe), Silicij (Si)	Višespojni članak

2.2. Izvedba sustava koncentriranja zračenja

Sustav koncentriranja solarnog zračenja glavna je razlika između ravnih fotonaponskih sustava i koncentratorskih fotonaponskih sustava, sl. 2. Mjera efikasnosti pojedinih izvedbi sustava označava se koncentratorskim faktorom.



Slika 2. Shematski prikaz procesa koncentriranja solarne energije

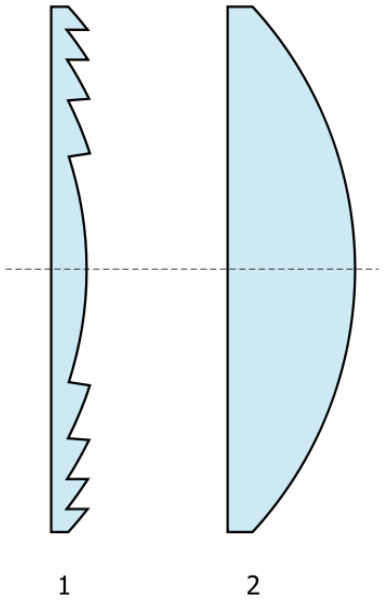
Koncentratorski faktor predstavlja omjer protoka solarne energije primljene na koncentrator i koncentrirane solarne energije primljene na solarnu ćeliju [7].

$$C = \frac{protok\ primljen\ na\ ćeliju}{protok\ primljen\ na\ leću} = \frac{\frac{1}{Ar}\int Ir\ dAr}{I_0} \qquad (1)$$

U nastavku su navedeni dizajni koji pokrivaju većinu izvedbi optičkih sustava, odnosno sustava koji su odgovorni za koncentriranje zračenja.

2.2.1. Fresnel leće

Glavna razlika Fresnel leće u odnosu na konvencionalne leće je ta što je leća podijeljena u skup koncentričnih prstenastih dijelova, čime se reducira masa i debljina same leće, odnosno smanjuje potrebna količina materijala za njenu izradu [7]. Fresnel leće karakterizira nešto bolja performansa fokusiranja s obzirom na konvencionalne leće, sl. 3. Leća je sastavljena samo od osnovnih dijelova koji su potrebni za savijanje paralelnih svjetlosnih zraka i njihovo usmjeravanje u žarišnu točku.

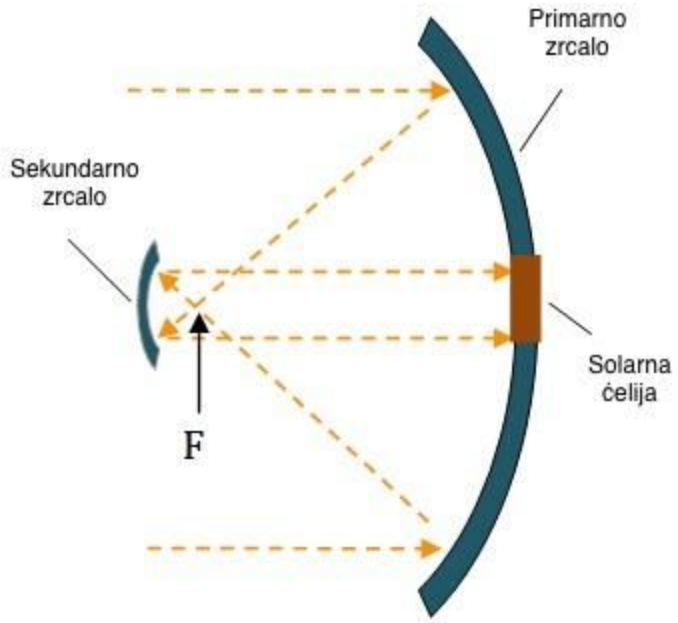


Slika 3. Usporedba Fresnel leće (lijevo) i konvencionalne konveksne leće (desno)

Samim time što je potrebno mnogo manje materijala za izradu Fresnel leće u usporedbi s konvencionalnom lećom, ona se često koristi kao optički dio u fotonaponskim koncentratorskim sustavima jer je lakše izvediva u velikim dimenzijama.
Ovisno o izvedbi, uporabom Fresnel leća moguće je postići koncentratorski faktor do oko 500.

2.2.2. Parabolična zrcala

Konfiguracija paraboličnih zrcala sastoji se od dva parabolična zrcala koja usmjeravaju zrake u solarnu ćeliju. Paralelne svjetlosne zrake dolaze na prvo, veće zrcalo koje ih reflektira kroz žarišnu točku u drugo, manje zrcalo, koje zatim reflektira zrake u sredinu većeg zrcala gdje se nalazi solarni članak, sl. 4. Oba zrcala imaju istu žarišnu točku [3].



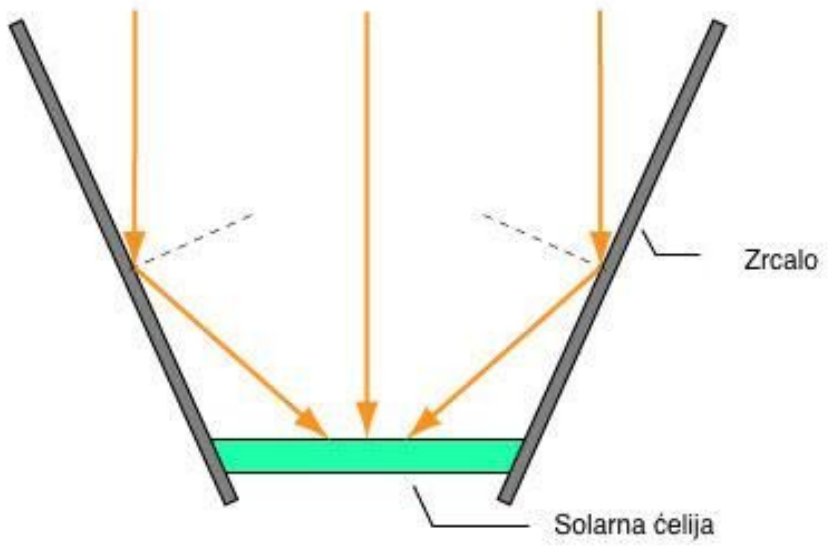
Slika 4. Shematski prikaz konfiguracije paraboličnih zrcala, gdje točka "F" predstavlja žarišnu točku

Glavna prednost konfiguracije je ta što ne zahtijeva optičke leće. Međutim, javljaju se gubici tijekom refleksije svjetlosnih zraka u oba zrcala.

Vodeći dobavljač fotonaponskih koncentratorskih sustava, tvrtka “SolFocus”, uspjela je dobiti koncentratorski faktor 500 uporabom paraboličnih zrcala uz sustav praćenja po dvjema osima.

2.2.3. Ravna zrcala

Uporaba ravnih zrcala za koncentriranje svjetlosnih zraka na solarni članak često se koristi kod nisko koncentriranih fotonaponskih sustava, sl. 5. Zrcala su često napravljena od materijala koji je prekriven silicijem, čime se postiže viša efikasnost smanjenjem gubitaka [3].

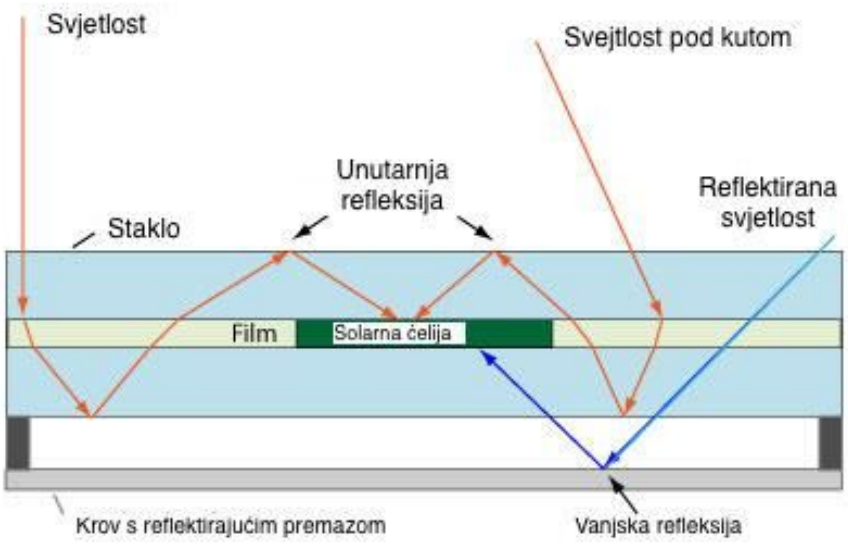


Slika 5. Uporaba zrcala za koncentriranje svjetlosnih zraka

Kut zrcala ovisi o dizajnu modela i uglavnom je fiksni. Stupanj koncentracije kreće se od 1,5 do 2,5.

2.2.4. Luminiscentni koncentratori

U luminiscentnom koncentratoru svjetlosne zrake reflektiraju se u luminescentnom filmu, a zatim se usmjeravaju prema fotonaponskom materijalu, sl. 6.



Slika 6. Uporaba luminiscentnog koncentratora

Ovo je vrlo obećavajuća tehnologija jer ne zahtijeva optičke leće ili ogledala. Čak štoviše, radi s difuznim svjetlom i stoga ne treba sustav za praćenje. Nije potrebno nikakvo hlađenje jer bi film mogao biti konstruiran tako da svjetlost valnih duljina koje se ne mogu apsorbirati jednostavno prolaze kroz ćeliju. Time će se ukloniti neželjene valne duljine i smanjiti štetno pregrijavanje. Faktor koncentracije je oko 3 [3].

2.3. Hlađenje

Koncentrirana solarna energija dovedena na solarni članak kreće se u rasponu od 20 pa sve do 75 W/cm^2. Solarna energija koja nije pretvorena u električnu struju mora se odvesti kako bi se sprječilo prekomjerno zagrijavanje solarnog članka. Solarni članak mora se držati ispod temperature tališta materijala od kojih je on izrađen jer bi u protivnom došlo do prestanka rada i uništenja članka. Također, pokazalo se da ukupna učinkovitost fotonaponskih članaka drastično pada s povećanjem temperature. Stopa smanjenja kreće se od 0,25% do 0,5% po stupnju Celzijusa, ovisno o karakteristikama materijala od kojeg je članak izrađen [5]. Učinkovitost solarnog članka funkcija je njegove radne temperature tako da niže temperature rezultiraju većom učinkovitošću. Sustav hlađenja koncentratorskih fotonaponskih sustava može se u grubo svrstati u dvije kategorije: pasivno i aktivno hlađenje.

2.3.1. Pasivno hlađenje

Većina sustava koristi pasivno hlađenje, obično hladnjake na stražnjoj strani modula kako bi se osigurala veća površina za prijenos topline u okoliš. Pasivno hlađenje koristi prirodnu konvekciju, odnosno kondukciju za odvođenje topline. Dijeli se u tri kategorije: zračno, vodeno i kondukcijsko hlađenje. Vodeno hlađenje je najefikasnije zbog većeg specifičnog toplinskog kapaciteta vode u odnosu na zrak i ostale materijale koji se koriste kod kondukcijskog hlađenja.

2.3.2. Aktivno hlađenje

Aktivne metode hlađenja mogu se smatrati onim metodama koje kontinuirano troše energiju kako bi se ohladio fotonaponski modul. Većina korištenih metoda temelji se na zračnom ili vodenom hlađenju, stoga je glavni izvor potrošnje pumpa ili ventilator potreban za održavanje cirkulacije tekućine, odnosno zraka. Općenito, aktivne metode hlađenja rezultiraju većom proizvodnjom energije, ali kada se u obzir uzme njihova

potrošnja energije, postavlja se pitanje samoodrživosti sustava za hlađenje. Kod koncentratorskih fotonaponskih sustava, aktivni sustav hlađenja može se lako primijeniti uglavnom zbog manjeg omjera mase tekućine potrebne za hlađenje i fotonaponskih stanica te općenito manje potrošnje rashladne tekućine. Stoga je potrebna manja snaga za održavanje sustava [5].

2.4. Sustavi za praćenje

Solarni sustav praćenja je elektromehanički sustav dizajniran za poboljšanje učinkovitosti fotoelektrične pretvorbe kod solarnih panela optimiziranjem korištenja sunčeve svjetlosti. Solarni sustav praćenja sastoji se od motora, zupčanika, sustava senzora i solarnog regulatora.

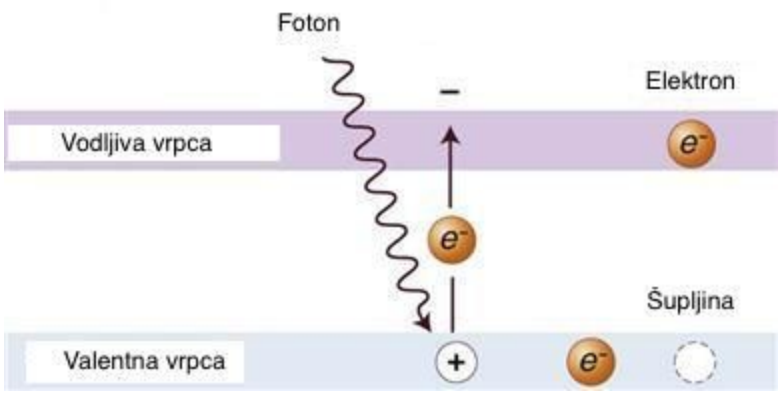
Mehanizmi za praćenje usmjeravaju modul tako da se zahvati maksimalna količina Sunčevog zračenja, što je vrlo bitno za visoko koncentrirane sustave. U usporedbi sa stacionarnim solarnim panelima, solarno praćenje može povećati učinkovitost fotonaponskih solarnih sustava od 25% do 40% [10]. Solarni sustavi praćenja obično se dijele u tri kategorije: vodoravni sustav za praćenje s jednom osi, vertikalni sustav i sustav za praćenja s dvije osi.

2.5. Fotonaponska konverzija

Fotonaponska konverzija je konverzija svjetlosne u električnu energiju kroz pobuđivanje elektrona do viših energetskih razina njihovom interakcijom s fotonima, gdje se tada slobodno kreću kroz materijal. U većini materijala pobuđeni se elektroni brzo vraćaju na nižu energetsku razinu. Fotonaponski uređaj tada ekstrahira energiju prijelaza pobuđenog elektrona kako bi mogao proizvesti korisntan rad u elektroničkom krugu pomoću poluvodiča. Poluvodiči su materijali koji imaju električnu vodljivost između izolatora i vodiča [1].

2.5.1. Fotogeneracija

Strukturu poluvodiča definiraju valentna i vodljiva vrpca koje su odvojene zabranjenim pojasom. Foton koji ima dovoljnu energiju, odnosno energiju veću od energije zabranjenog pojasa, moći će izbaciti elektron iz valentne vrpce i dovesti ga do vodljive vrpce, stvarajući parove elektron-šupljina. Foton koji posjeduje nižu energiju od energije zabranjene zone neće se apsorbirati te će proći kroz materijal, dok se foton s većom energijom od energije zabranjenog pojasa apsorbira i time pobuđuje elektron. U većini materijala elektron se brzo otpušta, odnosno relaksira natrag u vodljivu vrpcu. Ova promocija elektrona stvara šupljinu u valentnoj vrpci [1].



Slika 7. Shematski prikaz apsorpcije fotona i promocije elektrona u siliciju (Si)

Protok naboja koji je rezultat promocije elektrona pomoću fotona naziva se fotostruja. Izračun količine generirane fotostruje može se izraziti matematički:

$$J_\lambda = \Phi_\lambda \times EQE_\lambda \times q \qquad (2)$$

gdje J predstavlja fotostruju, Φ protok fotona i q električni naboj. λ predstavlja valnu duljinu fotona.

Nakon određenog vremena, unutar poluvodiča elektron-šupljina parovi će se rekombinirati, stoga je vrlo bitno izvući koristan rad iz prijelaza elektrona između energetskih pojaseva.

Materijali koji imaju energiju zabranjenog pojasa ispod približno 3 elektronvolta uglavnom se smatraju poluvodičima, dok se oni s većim energijama zabranjenog pojasa smatraju izolatorima.

Mjera učinkovitosti fotogeneracije pojedinog uređaja naziva se kvantna učinkovitost, QE. Kvantna učinkovitost na određenoj valnoj duljini opisuje učinkovitost kojom foton generira promovirani elektron, npr. QE od 75% ukazuje da se za svakih 100 fotona stvara 75 elektrona. Također, kvantna učinkovitost se može izraziti i brojem (npr. 75% = 0.75) [1].

2.5.2. PN spoj

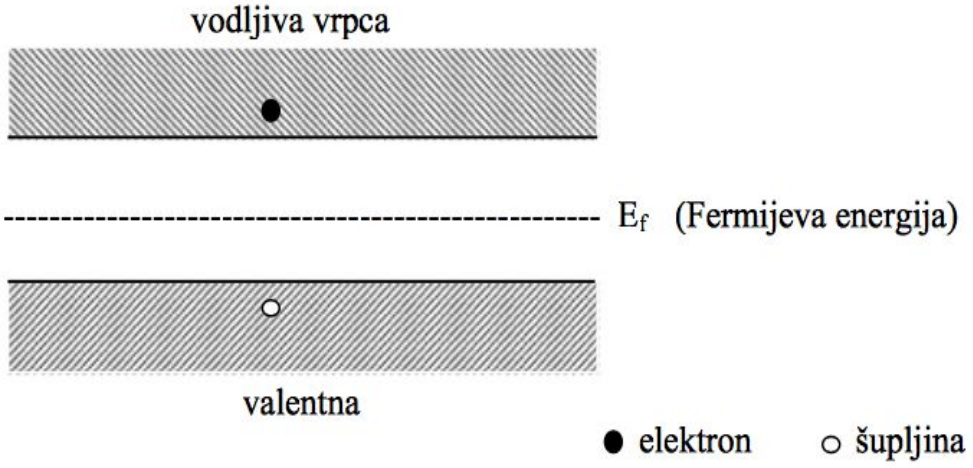
Proizvodnja električne iz solarne energije postiže se uporabom PN spoja u mnogim fotonaponskim uređajima. Na taj način moguće je izvući fotogenerirane nosioce naboja, elektrone i šupljine, iz materijala poluvodiča u električni krug radi korisnog rada. PN spoj sastoji se od dva sloja identičnog materijala. Sloj p-tipa ima veću gustoću šupljina u usporedbi s elektronima, dok sloj n-tipa ima veću gustoću elektrona u usporedbi sa šupljinama.

On se formira uvođenjem akceptorskih i donorskih primjesa, odnosno elemenata koji imaju više ili manje elektrona u odnosu na materijal poluvodiča. Za materijale p-tipa to su često elementi III. skupine poput bora (B) ili aluminija (Al), dok n-tip često koristi elemente V. skupine, kao što su fosfor (P), arsen (As) i antimon (Sb).

Na granici između tih dvaju područja u PN spoju većinski nosioci naboja iz svakog sloja, rupe u p-tipu odnosno elektroni u n-tipu, difundiraju u materijal na suprotnoj strani spoja čime nastaje difuzija elektrona odnosno šupljina, kao posljedica gradijenta koncentracije.

Pod uvjetima ravnoteže ne postoji protok struje u PN spoju, a svi nosioci naboja, elektroni i šupljine, rekombiniraju se istom brzinom kao što se generiraju. U radu

solarnog članka ova ravnoteža poremećena je dolaskom fotona s energijom veće od razlike energija između p i n područja, odnosno energije zabranjenog pojasa, povećavajući broj šupljina i elektrona iznad ravnotežnih vrijednosti. To rezultira promjenom raspodjele elektrona i šupljina te energetskih razina pojedinog područja - E_{Fp} za p dio, odnosno E_{Fn} za n dio spoja. Razlika tih energetskih razina naziva se Fermijeva energija koja u praksi predstavlja napon, sl. 8.



Slika 8. Energetski dijagram poluvodiča

Bitno je svojstvo PN spoja njegovo ispravljačko djelovanje, odnosno vođenje struje kada je p-područje pozitivno, a n-područje negativno. Tada je napon u propusnom smjeru. Dakle, PN spoj radi kao dioda i propušta struju samo u jednom smjeru. Ako se na PN spoj priključi izvor vanjskog napona u propusnom smjeru, tako da je pozitivan pol na p-strani, a negativan na n-strani, poteći će struja elektrona iz n-područja prema p-području i šupljina iz p-područja prema n-području [6]. Kada se solarni članak osvijetli, na njezinim krajevima pojavljuje se elektromotorna sila, odnosno napon. Tako solarni članak postaje poluvodička dioda i ponaša se kao ispravljački uređaj koji propušta struju samo u jednom smjeru. Apsorbirani fotoni u PN spoju proizvode elektron-šupljina parove. Ako apsorpcija nastane daleko od PN spoja, nastali par ubrzo se rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija unutar ili blizu PN spoja, unutrašnje električno polje

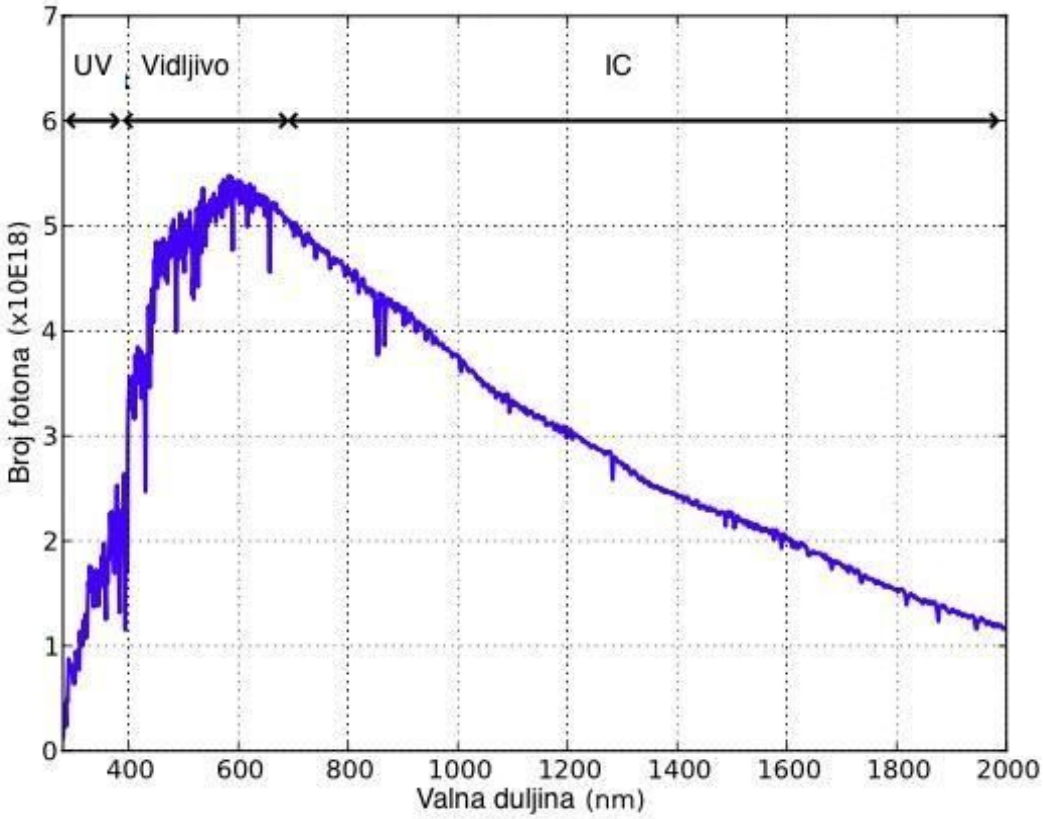
odvaja nastali elektron i šupljinu. Elektron se giba prema n-strani, a šupljina prema p-strani. Zbog skupljanja elektrona i šupljina na odgovarajućim suprotnim stranama PN spoja, dolazi do pojave elektromotorne sile na krajevima solarnog članka. Ukratko, kada se solarni članak osvijetli, kontakt na p-dijelu postaje pozitivan, a na n-dijelu negativan. Ako su kontakti članka spojeni s vanjskim trošilom, poteći će električna struja, a solarni članak postaje izvorom električne energije.

2.6. Višespojni solarni članak

Generiranje napona u solarnom članku ovisi o njegovoj izloženosti fotonima, ali također i o veličini zabranjenih pojaseva u PN spoju. U jednospojnom solarnom članku, zabranjeni pojasevi male energije dovest će do relativno velike fotostruje, ali i odgovarajućeg malog fotonapona, dok će zabranjeni pojasevi većih energija uzrokovati veće fotonapone, ali manju fotostruju zbog relativno malog postotka visokoenergetskih fotona, odnosno fotona s energijom većom od energije zabranjenog pojasa. Zbog navedenih ograničenja jednospojnog solarnog članka, njena efikasnost iznosi tek 31% pod stupnjem koncentracije od 1 sunca [1].

Rješenje za povećanje efikasnosti solarnih članaka leži u izvedbi koja se sastoji od više PN spojeva izrađenih od različitih poluvodičkih materijala. Svaki od PN spoja ima vlastiti zabranjeni pojas različite veličine. Takav solarni članak s više PN spojeva naziva se višespojni solarni članak.

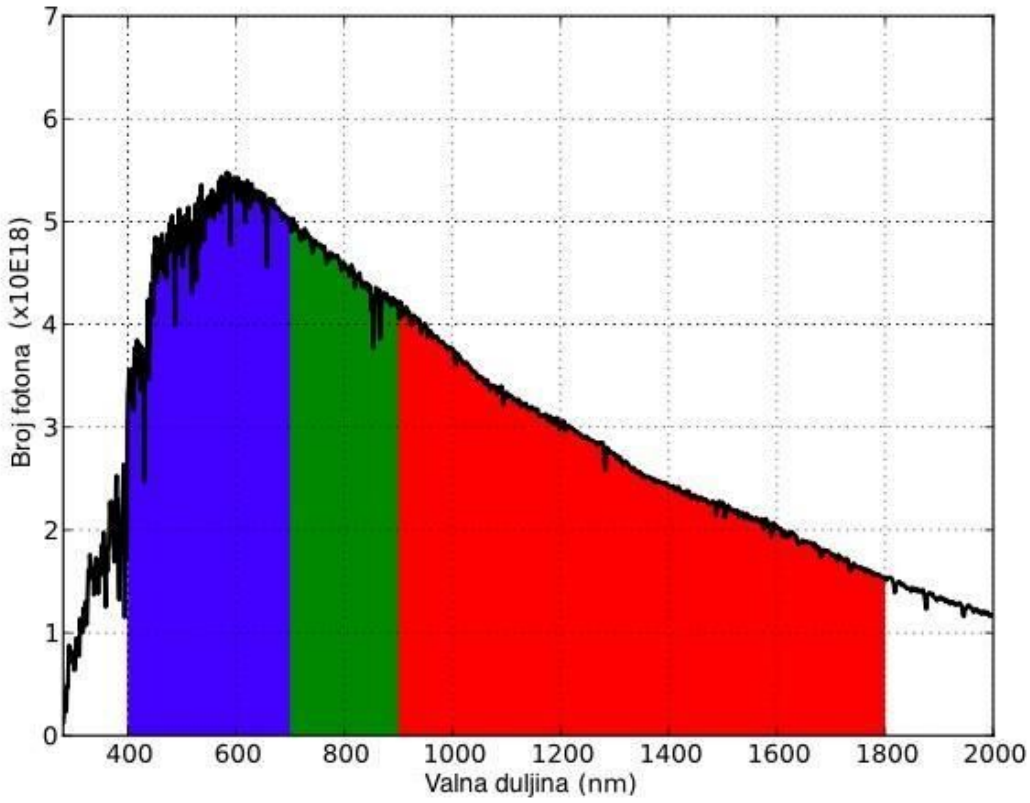
Spektar sunčevog zračenja sadrži fotone s velikim rasponom energije, kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Grafički prikaz broja fotona kao funkcija valne duljine u spektru solarnog zračenja

Korištenjem višespojnih solarnih članaka, solarni spektar učinkovito se razdvaja kako bi se apsorbirao u svakom od spojeva s odgovarajućim zabranjenim pojasevima, sl. 10. Drugim riječima, svaki PN spoj ima zabranjeni pojas različite energije i apsorbira različite dijelove spektra. Posljedica je smanjen gubitak toplinske energije, koja je rezultat apsorbiranih fotona koji posjeduju više energije od zabranjenog pojasa pojedinog spoja te niži gubitak fotona čija je energija niža od energije zabranjenog pojasa, odnosno fotona koji se ne apsorbiraju. Pojedinačno ti spojevi proizvode nižu fotostruju, ali zbroj njihove proizvedene snage je veći od onog koji se može postići jednim spojem [1]. Tvrtka "Solar Junction" uspjela je proizvesti članak čija efikasnost u laboratorijskim uvjetima iznosi 43,5%, što je trenutna maksimalna moguća dobivena

efikasnost [9]. Teoretska maksimalna učinkovitost, s beskonačnim brojem spojeva, iznosi 86% uz maksimalnu koncentraciju sunčevog zračenja [1].



Slika 10. Razdvajanje spektra solarnog zračenja s ciljem poboljšanja učinkovitosti solarnih članaka

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio napravljen je za slučaj primjene koncentratorskog fotonaponskog sustava koji bi napajao električnom energijom cijeli otok Vis.

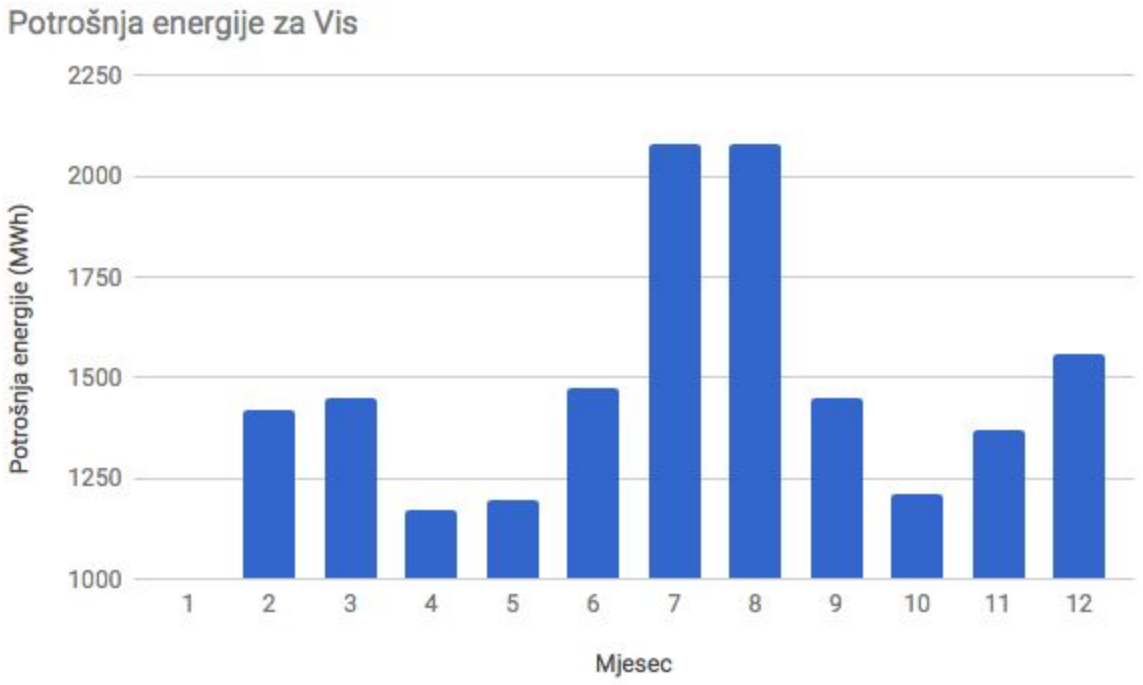
3.1. Potrošnja energije na otoku Visu

U tablici 2. prikazana je potrošnja energije za otok Vis u 2007. godini, dok je na slici 11. dan grafički prikaz te potrošnje.

Tablica 2.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	50.47	54.79	48.79	43.94	39.82	40.13	55.93	66.08	51.44	41.98	36.27	45.67	
2	50.97	55.40	47.49	42.66	38.28	40.81	57.88	66.39	52.16	42.62	40.80	47.71	
3	55.34	53.86	47.19	43.76	38.02	40.12	60.39	66.89	50.83	43.72	50.26	48.08	
4	53.94	54.90	44.63	48.93	38.58	41.05	60.19	67.78	51.61	44.64	54.53	49.09	
5	54.15	54.45	44.67	45.11	37.93	41.88	54.79	65.53	52.13	42.09	50.78	47.33	
6	51.63	54.28	44.34	44.48	36.69	41.72	55.00	67.94	53.28	40.64	46.79	46.92	
7	52.03	51.96	46.27	45.65	36.79	42.47	56.70	67.17	53.94	40.29	44.35	45.74	
8	51.54	49.80	48.57	42.16	37.06	44.33	58.34	71.01	53.13	39.00	44.06	44.50	
9	48.57	51.68	45.77	39.81	37.21	44.91	60.54	72.59	51.55	39.61	44.30	43.30	
10	48.01	51.69	45.55	39.72	36.88	43.74	62.39	67.25	50.04	38.86	46.72	43.37	
11	48.62	49.00	46.67	38.74	37.31	44.13	58.91	65.58	51.03	38.21	48.10	47.50	
12	48.98	48.88	44.84	38.18	38.36	38.85	57.66	65.39	50.43	38.82	48.19	48.50	
13	48.91	51.68	43.52	37.69	37.27	42.09	59.15	66.79	50.17	40.93	47.48	47.48	
14	50.29	48.96	43.24	38.25	38.37	45.86	61.44	68.19	50.58	43.12	46.54	50.38	
15	51.07	50.25	42.35	36.36	39.04	45.38	63.65	67.49	45.00	39.94	46.38	50.24	
16	52.02	50.38	42.85	35.98	38.27	48.15	66.25	70.46	40.80	38.04	47.55	49.47	
17	51.67	51.40	43.17	35.87	37.88	47.65	68.63	70.33	49.64	37.66	45.53	48.75	
18	49.04	51.40	43.93	35.61	37.73	50.03	72.58	71.87	47.24	37.66	44.89	48.06	

19	48.46	49.93	43.42	35.76	38.33	52.19	74.60	69.51	45.65	37.74	42.95	50.31	
20	47.59	49.36	40.85	35.27	38.47	54.57	74.89	68.62	46.66	38.93	43.29	51.80	
21	46.34	47.83	48.00	36.28	38.22	57.30	76.21	67.72	46.35	38.73	43.08	53.18	
22	46.82	48.95	51.44	34.98	38.35	51.95	77.26	70.08	46.14	37.39	46.36	53.70	
23	47.18	46.92	50.44	35.40	38.89	62.43	79.46	70.89	45.61	37.18	46.18	54.63	
24	49.71	46.52	49.02	35.29	35.11	60.19	**85.17**	67.52	44.13	37.23	46.54	55.39	
25	50.75	46.89	48.79	35.43	41.97	64.41	78.06	65.33	44.52	36.72	45.64	52.95	
26	55.21	49.14	51.75	36.66	43.25	62.44	74.32	64.41	46.29	36.67	44.61	52.68	
27	57.07	48.62	53.69	33.55	41.42	57.45	73.00	63.02	46.18	36.87	45.35	56.36	
28	56.96	49.43	51.16	40.59	40.77	54.98	75.11	61.97	45.54	37.02	43.30	57.87	
29	55.76		51.09	40.41	39.10	55.43	76.10	62.64	44.96	36.24	44.66	56.69	
30	53.70		49.88	41.02	38.80	56.62	76.60	61.72	43.34	37.15	45.21	55.73	
31	53.48		47.90		39.42		67.66	60.60		37.07		56.35	
Suma	**1586.29**	**1418.34**	**1451.26**	**1173.53**	**1193.61**	**1473.25**	**2078.84**	**2078.77**	**1450.39**	**1212.78**	**1370.72**	**1559.72**	**18048**



Slika 11. Grafički prikaz potrošnje energije za otok Vis u 2007. godini

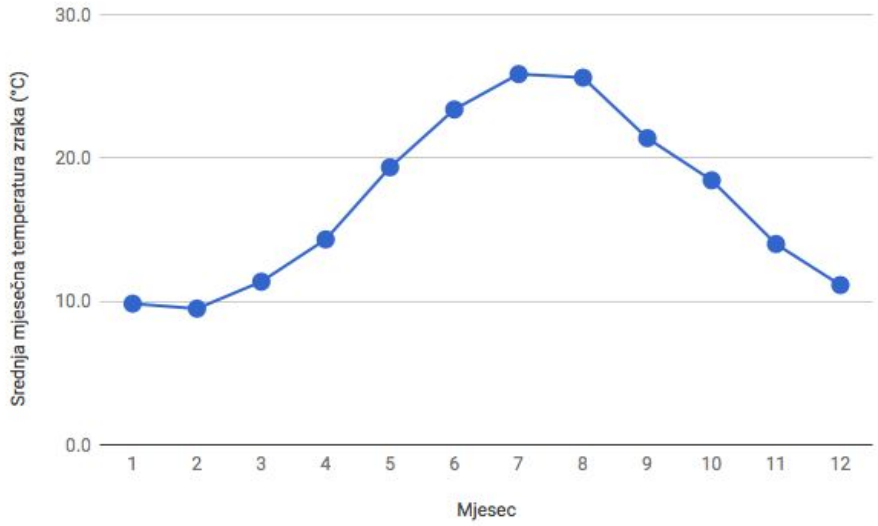
3.2. Ulazni podaci za otok Vis (Komiža)

U tablici 3. prikazana je srednja dnevna temperatura u stupnjevima Celzijusa (°C) za otok Vis u rasponu od 1995. do 2006. godine, dok je na slici 12. dan grafički prikaz srednje mjesečne temperature kroz godinu.

Tablica 3.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	11.7	8.5	9.5	13.4	17.2	20.6	26.1	26.2	22.8	19.8	17.6	12.2	
2	11.3	8.1	9.6	13.5	17.9	20.5	26.3	26.8	22.9	20.1	16.4	12.5	
3	11.3	9.8	10.8	14.3	18.4	20.7	26.8	26.4	23.0	20.5	15.9	12.7	
4	10.5	10.3	11.8	13.7	18.1	21.0	25.3	26.6	22.6	20.7	15.8	13.2	
5	10.2	9.2	11.0	13.5	17.6	21.7	25.8	26.1	22.7	20.1	15.5	12.7	
6	10.6	8.6	9.2	13.8	17.8	22.2	25.6	26.1	21.8	19.8	15.7	12.2	
7	10.5	9.2	9.7	12.6	17.8	22.9	26.6	26.1	22.2	20.3	15.2	10.7	
8	10.5	9.2	10.1	12.6	18.6	22.7	25.8	25.9	22.6	19.6	15.4	11.0	
9	10.8	9.6	10.5	12.8	18.5	23.5	24.5	26.4	22.2	19.8	14.7	12.0	
10	10.7	9.4	10.5	13.5	18.6	23.5	24.7	27.0	21.1	19.8	15.1	12.1	
11	10.7	9.2	10.3	13.6	18.7	24.1	24.6	27.1	21.9	20.1	14.9	11.9	
12	10.1	9.2	11.4	13.2	19.4	23.7	24.7	26.5	22.6	19.1	15.7	12.3	
13	9.5	9.6	11.9	13.2	18.8	23.3	25.4	25.6	22.3	19.0	14.6	11.9	
14	9.8	9.3	11.2	12.1	19.4	23.0	25.3	25.5	21.2	18.9	14.3	12.1	
15	8.7	9.0	11.0	13.4	19.0	23.7	25.6	25.3	20.9	18.6	14.6	12.0	
16	9.0	8.9	11.9	13.9	18.9	23.2	25.5	25.7	21.0	17.8	14.4	10.5	
17	9.8	9.4	11.8	14.2	19.1	23.9	24.6	25.8	21.2	16.9	14.9	10.5	
18	10.3	9.0	11.6	13.8	19.5	22.9	25.5	26.2	21.1	16.6	13.3	10.3	
19	10.2	9.9	11.8	14.6	19.9	23.8	25.9	26.1	20.8	17.3	11.9	10.5	
20	9.5	10.6	11.4	14.8	19.5	23.6	25.9	26.3	21.4	17.9	11.1	10.6	
21	10.3	10.5	11.2	15.2	19.6	24.5	25.5	25.3	20.9	18.8	11.1	9.9	
22	9.1	10.3	11.2	15.3	19.4	24.2	26.2	24.7	20.9	18.0	11.7	9.7	
23	8.9	10.1	10.9	15.3	20.0	24.1	26.5	25.3	20.9	17.6	12.0	9.4	
24	8.5	10.2	12.3	15.4	20.0	24.0	27.1	25.8	21.0	17.0	12.0	9.5	
25	8.4	9.8	13.1	15.5	19.8	23.9	26.5	25.4	20.4	16.9	11.8	11.0	
26	9.3	10.5	13.4	16.3	20.6	24.3	26.5	24.3	20.3	16.7	12.9	11.4	

27	9.0	9.6	13.2	16.4	21.6	24.8	27.1	24.7	19.9	16.5	13.4	10.6	
28	9.3	9.2	12.4	16.2	22.3	25.9	27.3	24.5	19.7	16.4	12.7	10.0	
29	9.4	9.3	12.3	16.6	21.4	26.4	26.3	23.8	19.9	17.3	12.5	10.0	
30	8.5		12.7	17.0	21.5	25.3	26.0	23.3	19.4	17.1	12.9	9.5	
31	8.5		13.1		20.9		26.1	22.9		17.1		10.3	
Suma	**9.8**	**9.5**	**11.4**	**14.3**	**19.4**	**23.4**	**25.9**	**25.6**	**21.4**	**18.4**	**14.0**	**11.1**	**17.0**

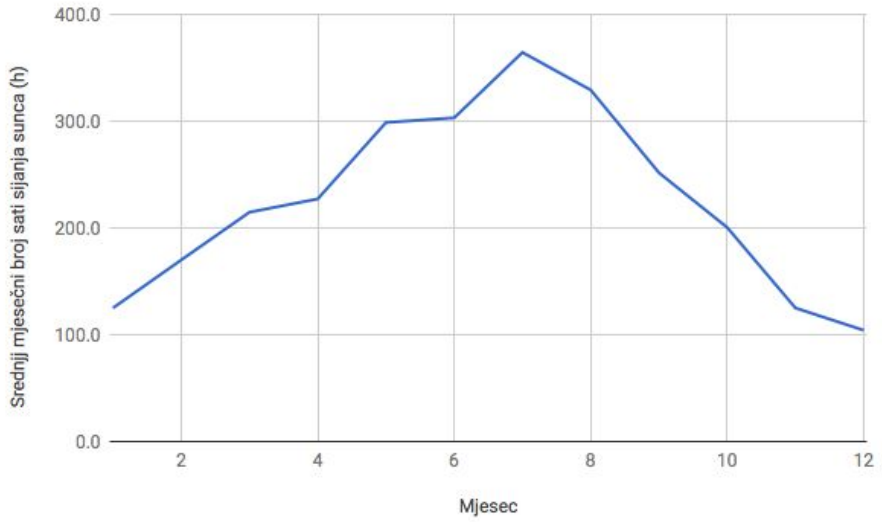


Slika 12. Grafički prikaz srednje mjesečne temperature zraka kroz godinu (°C), otok Vis, 1995. - 2006. godina

U tablici 4. prikazan je srednji broj sati sijanja Sunca u satima (h) za Palagružu u rasponu od 1995. do 2006. godine, dok je na slici 13. dan grafički prikaz srednjeg mjesečnog broja sati sijanja Sunca.

Tablica 4.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	3.5	4.4	7.1	7.6	7.1	8.4	11.6	10.9	10.3	8.6	4.0	4.3	
2	3.4	5.7	4.7	7.1	8.7	10.7	11.2	11.9	9.4	8.1	4.7	5.2	
3	4.4	5.4	6.2	7.3	9.6	10.5	10.5	11.4	9.9	6.7	5.8	3.9	
4	4.8	3.9	7.4	8.5	8.7	10.7	10.3	11.5	9.2	6.4	5.6	4.4	
5	5.9	4.9	6.6	8.2	7.7	9.9	11.4	11.5	7.7	5.9	5.3	3.6	
6	4.0	5.8	7.8	7.7	8.4	8.5	10.7	10.6	9.8	6.0	2.9	4.0	
7	3.1	7.0	6.5	9.4	9.4	10.7	9.4	10.9	8.0	7.1	3.6	4.5	
8	2.5	6.5	6.6	7.6	10.6	10.1	10.2	10.7	8.4	5.5	5.4	4.4	
9	3.1	4.8	5.3	7.4	8.4	10.6	12.6	11.3	8.5	6.8	5.6	2.5	
10	3.3	6.3	7.4	5.8	11.1	10.1	11.5	11.2	8.3	6.2	3.9	2.3	
11	2.8	5.0	6.8	5.8	8.2	8.8	10.8	10.6	9.8	7.2	4.8	3.3	
12	3.5	5.6	6.9	7.8	10.4	10.1	12.4	10.2	8.8	7.0	4.0	3.7	
13	4.0	6.1	5.9	8.1	11.4	8.9	13.0	11.1	7.7	8.0	4.3	3.7	
14	4.1	6.0	7.9	6.9	10.2	10.2	12.8	11.0	8.0	6.4	4.7	2.8	
15	4.7	4.7	5.6	7.8	9.9	10.8	12.3	11.3	8.8	6.5	3.9	2.3	
16	5.5	4.8	5.9	5.8	9.5	9.7	13.0	11.0	7.4	7.7	2.5	3.6	
17	4.2	6.1	8.3	7.6	9.6	9.7	12.1	11.5	6.5	7.9	4.8	1.7	
18	3.7	8.5	7.3	8.1	8.7	10.0	12.9	10.8	7.3	6.3	5.2	4.0	
19	4.1	6.2	7.4	10.3	8.6	8.9	12.4	9.6	8.3	6.3	3.5	4.2	
20	4.6	6.9	6.7	8.1	8.5	9.7	12.5	10.0	8.8	5.1	5.1	2.7	
21	3.1	6.5	7.7	8.8	9.6	11.0	13.4	9.2	8.2	5.7	3.8	2.6	
22	3.9	5.5	7.9	8.4	9.7	8.8	13.6	10.4	9.0	6.1	3.5	4.9	
23	3.7	5.4	6.2	8.2	9.5	10.8	11.8	12.1	7.8	7.1	2.8	3.7	
24	3.4	5.8	6.7	7.9	10.7	11.3	10.1	11.8	8.1	4.8	3.8	4.3	
25	5.0	5.2	6.9	8.6	10.2	10.3	10.8	10.0	7.5	7.3	3.7	2.8	
26	5.3	7.3	7.4	8.1	10.8	11.2	11.4	10.3	7.3	6.7	3.9	2.9	
27	4.8	5.8	8.2	6.4	11.3	11.6	13.0	10.1	8.1	6.6	2.9	2.1	
28	4.2	6.6	6.7	4.5	9.9	10.7	11.6	9.4	8.0	6.5	3.6	2.7	
29	4.3	7.3	8.0	7.8	9.8	9.7	11.4	9.4	8.6	5.2	4.3	2.1	
30	4.3		7.4	5.7	12.0	10.7	11.5	9.4	8.1	4.6	3.0	2.7	
31	4.0		7.7	0.0	10.7	0.0	12.5	8.1		4.1		2.3	
Prosjek	**3.8**	**5.8**	**7.4**	**6.7**	**8.9**	**9.6**	**12.0**	**9.5**	**9.2**	**6.3**	**3.5**	**3.3**	**7.2**
Suma	**125.1**	**170.0**	**214.8**	**227.2**	**298.8**	**303.2**	**364.5**	**329.2**	**251.7**	**200.4**	**125.0**	**104.2**	**2714.0**



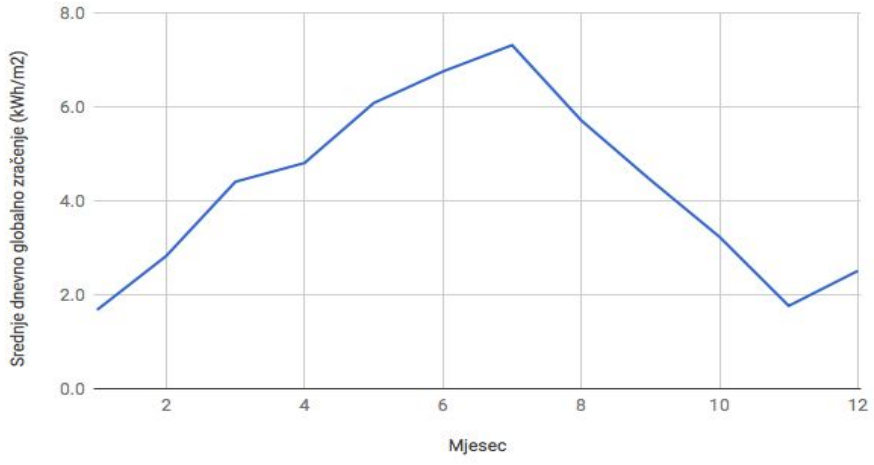
Slika 13. Grafički prikaz srednjeg mjesečnog broja sati sijanja sunca (h), Palagruža, 1995. - 2006. godina

U tablici 5. prikazana je količina srednjeg dnevnog globalnog zračenja u kilovat satima po metru kvadratnom (kWh/m^2) za otok Palagružu u rasponu od 1995. do 2006. godine, dok je na slici 14. dan grafički prikaz tog srednjeg dnevnog globalnog zračenja.

Tablica 5.

	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**
1	1.61	2.48	4.30	5.17	5.48	6.29	7.18	6.27	4.76	3.92	1.87	2.57
2	1.57	2.78	3.41	4.96	6.03	7.24	7.03	6.67	4.51	3.76	2.02	2.61
3	1.85	2.72	3.99	5.04	6.34	7.13	6.80	6.49	4.64	3.34	2.26	2.55
4	1.95	2.37	4.39	5.49	6.04	7.23	6.74	6.53	4.43	3.25	2.20	2.57
5	2.25	2.59	4.11	5.40	5.70	6.89	7.11	6.54	4.00	3.10	2.14	2.52
6	1.73	2.81	4.57	5.20	5.92	6.31	6.87	6.15	4.62	3.14	1.63	2.55
7	1.51	3.10	4.08	5.86	6.27	7.25	6.47	6.26	4.10	3.46	1.79	2.58
8	1.35	2.99	4.11	5.17	6.66	6.98	6.71	6.21	4.21	2.98	2.17	2.57
9	1.49	2.58	3.64	5.07	5.94	7.18	7.48	6.45	4.24	3.38	2.21	2.46
10	1.55	2.93	4.40	4.45	6.82	6.98	7.13	6.38	4.17	3.17	1.83	2.45
11	1.43	2.62	4.19	4.46	5.88	6.45	6.90	6.18	4.62	3.51	2.03	2.51
12	1.62	2.77	4.24	5.25	6.60	6.99	7.43	5.98	4.31	3.44	1.87	2.53
13	1.75	2.90	3.88	5.36	6.93	6.49	7.63	6.34	4.00	3.74	1.93	2.53

14	1.77	2.86	4.57	4.87	6.53	7.03	7.54	6.34	4.10	3.25	2.01	2.48
15	1.94	2.56	3.76	5.25	6.43	7.25	7.41	6.45	4.33	3.27	1.85	2.45
16	2.13	2.58	3.87	4.45	6.31	6.81	7.62	6.32	3.92	3.63	1.54	2.53
17	1.79	2.89	4.72	5.17	6.32	6.81	7.33	6.53	3.68	3.71	2.04	2.42
18	1.65	3.47	4.36	5.36	6.02	6.96	7.59	6.25	3.89	3.21	2.11	2.55
19	1.78	2.91	4.42	6.21	5.99	6.49	7.43	5.77	4.17	3.21	1.74	2.56
20	1.90	3.08	4.17	5.35	5.97	6.80	7.45	5.94	4.33	2.85	2.10	2.48
21	1.51	3.00	4.51	5.61	6.34	7.37	7.75	5.59	4.17	3.03	1.81	2.47
22	1.72	2.74	4.58	5.47	6.36	6.43	7.82	6.07	4.37	3.16	1.76	2.60
23	1.67	2.71	3.98	5.41	6.31	7.28	7.25	6.75	4.04	3.47	1.59	2.53
24	1.59	2.82	4.16	5.28	6.70	7.49	6.69	6.65	4.13	2.75	1.81	2.56
25	2.00	2.68	4.22	5.54	6.51	7.05	6.91	5.91	3.95	3.53	1.81	2.48
26	2.09	3.19	4.41	5.35	6.72	7.42	7.10	6.04	3.91	3.33	1.84	2.49
27	1.96	2.81	4.69	4.69	6.88	7.60	7.63	5.97	4.13	3.31	1.63	2.45
28	1.79	3.01	4.16	3.96	6.42	7.23	7.18	5.69	4.09	3.29	1.78	2.48
29	1.81	3.17	4.61	5.22	6.41	6.81	7.10	5.70	4.27	2.89	1.93	2.44
30	1.82		4.43	4.44	7.12	7.22	7.12	5.68	4.13	2.69	1.65	2.48
31	1.75		4.52		6.68		7.45	5.15		2.54		2.45
Prosjek	**1.7**	**2.8**	**4.4**	**4.8**	**6.1**	**6.8**	**7.3**	**5.7**	**4.4**	**3.2**	**1.8**	**2.5**



Slika 14. Grafički prikaz srednjeg dnevnog globalnog zračenja (kWh/ m^2), Palagruža

U nastavku rada biti će ispisan izračun teoretski moguće proizvedene električne energije iz navedenih podataka. Koristi se sljedeća jednadžba:

$$E_{el(CPV)} = \eta_{CO} \times [1 - \alpha_C(T_{cell} - T_0)] \times \eta_I \times A_C \times E_S \quad (3)$$

gdje je:

$E_{el(CPV)}$ - količina proizvedene električne energija u fotonaponskoj elektrani koja koristi koncentratorski fotonaponski sustav [MWh]

η_{CO} - efikasnost fotonaponskog članka

α_C - koeficijent temperature članka

T_{cell} - temperatura fotonaponskog članka [°C]

T_0 - temperatura fotonaponskog generatora u standardnim testnim uvjetima [°C]

η_I - efikasnost invertora električne struje

A_C - površina optičkog sustava [m^2]

E_S - srednje dnevno globalno zračenje [kWh / m^2]

4. REZULTATI

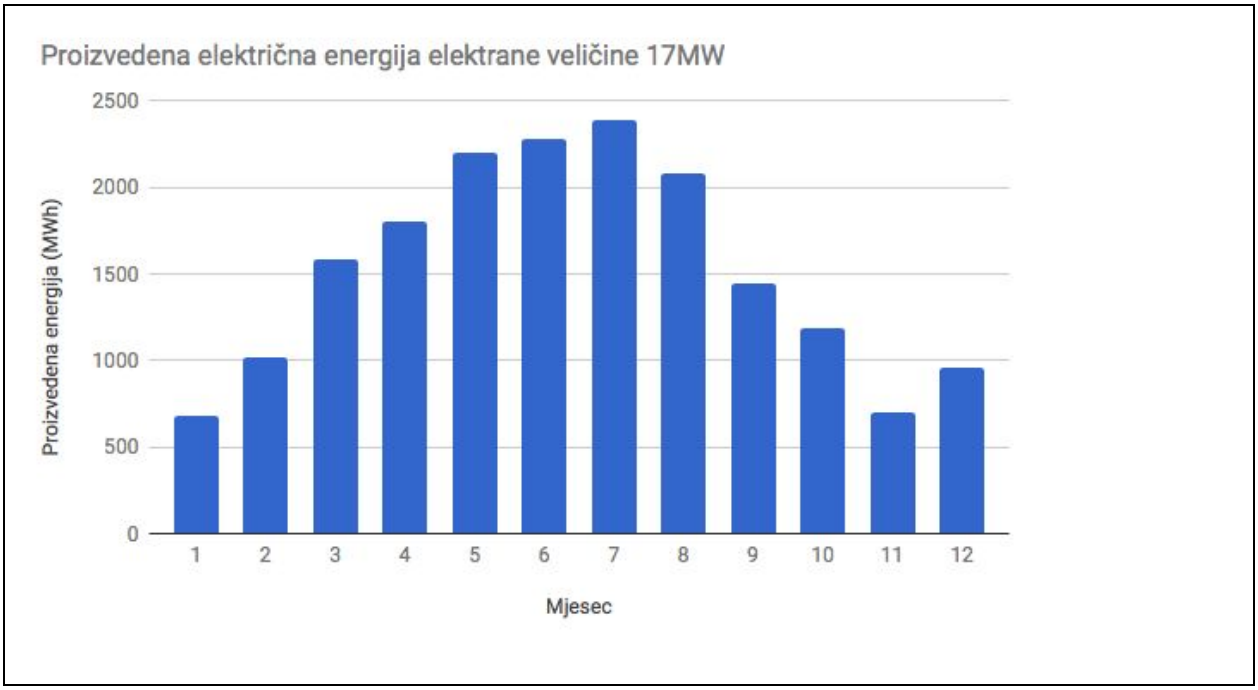
Proračun je napravljen iteracijom izračunate proizvedene energije pomoću jednadžbe (3) sve do poklapanja s potrošenom energijom (tablica 2.) u programu Excel. Račun je izveden za svaki dan u godini i odnosi se na fotonaponsku elektranu veličine 17MW. Površina optičkog sustava iznosi 42500 m^2 . U proračun je uzeta efikasnost solarnog članka od 40%.

Izračunata električna energija prikazana je u tablici 6., a na slici 15. grafički je prikazana izračunata energija po mjesecima.

Tablica 6.

	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**	
1	20	31	52	61	63	70	77	68	54	45	23	31	
2	20	35	42	59	68	80	75	71	51	44	24	32	
3	23	34	48	59	72	79	73	70	52	39	27	31	
4	24	29	53	64	68	79	73	70	50	38	27	31	
5	28	32	50	63	65	76	76	71	46	36	26	31	
6	22	35	55	61	67	70	74	67	52	37	20	31	
7	19	38	50	69	71	79	70	68	47	40	22	32	
8	17	37	50	61	75	76	72	67	48	35	26	32	
9	19	32	44	60	67	78	80	70	48	39	27	30	
10	19	36	53	53	76	76	77	69	48	37	22	30	
11	18	33	51	53	67	70	75	67	52	41	25	31	
12	20	34	51	62	74	76	80	65	49	40	23	31	
13	22	36	47	63	77	71	81	69	46	44	24	31	
14	22	35	55	58	73	77	80	69	47	38	25	30	
15	24	32	46	62	72	78	79	70	50	38	23	30	
16	27	32	47	53	71	74	81	68	45	43	19	31	
17	22	36	56	61	71	74	79	71	42	44	25	30	
18	21	43	52	63	68	76	81	68	45	38	26	32	
19	22	36	53	72	67	71	79	63	48	38	22	32	
20	24	38	50	62	67	74	79	65	49	34	26	31	
21	19	37	54	65	71	79	82	61	48	36	23	31	

22	22	34	55	63	71	70	83	66	50	37	22	32	
23	21	33	48	63	71	79	77	73	46	41	20	31	
24	20	35	50	61	75	81	72	72	47	33	22	32	
25	25	33	50	64	73	76	74	65	46	42	22	31	
26	26	39	52	62	74	80	76	66	45	39	23	31	
27	25	35	56	55	76	81	80	65	48	39	20	30	
28	22	37	50	47	71	77	76	63	47	39	22	31	
29	23	39	55	60	71	73	76	63	49	34	24	30	
30	23	0	53	52	78	77	76	63	48	32	20	31	
31	22	0	54	0	74	0	79	58	0	30	0	30	
Suma	**680**	**1015**	**1581**	**1808**	**2205**	**2277**	**2392**	**2078**	**1444**	**1191**	**697**	**960**	**18328**



Slika 15. Grafički prikaz proizvedene električne energije po mjesecima

Kao što je prikazano u tablici 2., ukupna potrošnja električne energije na otoku Visu u 2007. godini iznosila je 18048 MWh. Fotonaponska elektrana veličine 17 MW proizvela bi 18328 kWh prema podacima iz tablica 3., 4. i 5.

Kao referenca za procjenu površine i cijene višespojnog solarnog članka uzet je proizvod ET-CPV-125 češke tvrtke ELCERAM. Solarni panel ET-CPV-125 sastoji se od GaAs tipa višespojnog solarnog članka s optičkim sustavom koji koristi Fresnel leće.

Faktor koncentriranja iznosi oko 300 sunca [13].

Površina panela iznosi $A_{PV} = 5{,}76\, cm^2$ dok površina koncentratora iznosi $A_0 = 5530\, cm^2$, što ukazuje na omjer $\frac{A_{PV}}{A_0} = \frac{1}{960}$.

Ako se uzme u obzir površina otpičkog sustava od $42500\, m^2$ fotonaponske elektrane veličine 17MW koja je korištena u izračunu, sveukupna površina potrebnih solarnih članaka iznosila bi $42500\, m^2$ x $\frac{1}{960} = 442708{,}33\, cm^2$, odnosno 44,2 m^2. Bitno spomenuti da se ovdje radi o kumulativnom zbroju svih članaka u svim modulima navedene fotonaponske elektrane.

Ukoliko se uzme cijena solarnog članka prema NREL od 5$/W (u kojoj su uračunati svi troškovi), ukupna cijena elektrane mogla bi iznositi 5$/W x 17000000 W= 85 mil. $.

5. RASPRAVA

Iz priloženih rezultata vidljivo je da bi fotonaponska elektrana veličine 17 MW s koncentratorskim sustavom pokrila ukupnu potrošnju električne energije na otoku Visu, prema podacima iz 2007. godine.

U računu je uzeta efikasnost višespojnog solarnog članka od 40%.

Visoka efikasnost koncentratorskih fotonaponskih sustava glavna je prednost i razlika u usporedbi s ravnim fotonaponskim sustavima. Nadalje, materijal od kojeg je napravljen optički sustav za koncentriranje sunčevog zračenja ima nižu cijenu od materijala od kojeg su načinjeni solarni članci, čime se postiže niži prosječni trošak proizvodnje električne energije tijekom životnog vijeka sustava.

Sustav za praćenje također pomaže u ukupnoj efikasnosti. Zahvaljujući preciznom praćenju Sunca, modul koncentratorskog fotonaponskog sustava ima stalnu krivulju izlazne snage tijekom dana čime se omogućuje visoka proizvodnja energije tijekom sati kada je sunčevo zračenje najjače.

Glavni nedostatak sustava je nedovoljna razvijenost same tehnologije koncentriranja zračenja i vrlo visoka cijena višespojnog solarnog članka. Sustav može raditi isključivo kada je izložen direktnom sunčevom zračenju. Sustavi za praćenje također podižu cijenu i složenost cjelokupnog sustava te bi ta cijena za napajanje otoka Visa mogla iznositi oko 85 mil. $.

6. ZAKLJUČAK

U radu je objašnjena tehnologija fotonaponskih koncentratorskih sustava, njihove vrste, izvedbe te način rada. Koncentratorski fotonaponski sustavi se najčešće klasificiraju po stupnju koncentracije, odnosno na nisko, srednje i visoko koncentrirane. Podizanjem stupnja koncentracije javlja se potreba za složenijom izvedbom solarnog članka, uz sustav za hlađenje te sustav za praćenje. Višespojni članak trenutno pokazuje najbolje rezultate s trenutnom efikasnošću u laboratorijskim uvjetima od 43,5%. Optički sustav koji je zaslužan za koncentriranje sunčevog zračenja može biti izveden na nekoliko načina, od Fresnel leća preko paraboličnih i ravnih zrcala do luminiscentnih koncentratora, od kojih najveći potencijal imaju Fresnelove leće.

U eksperimentalnom dijelu uspoređena je potrošnja električne energije na otoku Visu i potencijalna proizvedena električna energija iz solarne energije na tom području, pri čemu je zaključeno da bi fotonaponska elektrana s koncentratorskim sustavom snage 17 MW uspješno pokrila navedenu potrošnju.

U budućnosti će se koncentratorski fotonaponski sustavi sve više upotrebljavati zbog svoje visoke učinkovitosti. Proizvodi se više energije po površini od ravnih fotonaponskih sustava zbog uporabe visoko učinkovitog višespojnog solarnog članka te sustava za praćenje Sunca.

7. POPIS SIMBOLA

Ar - površina solarnog članka [cm^2]

I_0 - protok sunčevog zračenja prije koncentriranja

I_r - protok sunčevog zračenja nakon koncentriranja

C - koncentratorski faktor

J - jačina fotostruje [A]

Φ - protok fotona

q - električni naboj [C]

λ - valna duljina [m]

$E_{el(CPV)}$ - proizvedena električna energija fotonaponskim koncentratorskim sustavom [MWh]

η_{CO} - efikasnost fotonaponskog članka

α_C - koeficijent temperature članka

T_{cell} - temperatura fotonaponskog članka [°C]

T_0 - temperatura fotonaponskog generatora u standardnim testnim uvjetima [°C]

η_I - efikasnost invertora električne struje

A_C - površina optičkog sustava [m^2]

E_S - srednje dnevno globalno zračenje [kWh / m^2]

8. LITERATURA

[1] Ngai Lam Alvin Chan: Solar Electricity from Concentrator Photovoltaic Systems, https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/14206/1/Chan-NLA-2013-PhD-Thesis.pdf

[2] Chukwubuikem Chukwuka, Komla Agbenyo Folly: Overview of Concentrated Photovoltaic (CPV) Cells, https://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014111215523944.pdf

[3] Concentrating Photovoltaics (CPV), Green Rhyno Energy, http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php

[4] Mark V. Fedkin, Ph.D.: EME 812: Utility Solar Power and Concentration, 5.1. What are concentrating photovoltaics?, https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/537

[5] Filip Grubišić-Čabo, Sandro Nižetić, Tina Giuseppe Marco: Photovoltaic Panels: A Review of the Cooling Techniques

[6] Ljubomir Majdandžić: Fotonaponski sustavi, http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf

[7] Fresnel Lens Comparison, Optical Communications, http://modulatedlight.org/optical_comms/fresnel_lens_comparison.html

[8] Mark V. Fedkin, Ph.D.: EME 812: Utility Solar Power and Concentration, 2.3. Concentration Ratio, https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/8

[9] Sarah Kurtz: Opportunities and Challenges for a Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry, https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/43208.pdf

[10] Solar Tracking Panel System Motion, Power Jack Motion, http://www.powerjackmotion.com/product-category/linear-actuator/solar-tracking-actuator/

[11] Plug&Sun CPV Advantages, Logsys Eco Energy, http://www.logsys.com.au/ecoenergy/why-use-cpv.php

[12] A Bottom-up Cost Analysis of a High Concentration PV Module, NREL, https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63947.pdf

[13] CPV solar panel based on GaAs - type die and optical concentrator, ELCERAM, http://www.elceram.cz/user-files/tinymce/files/solar_system_et_cpv_750_en_120307.pdf

9. ŽIVOTOPIS

[redacted] pohađam osnovnu školu “Đuro Ester” u razdoblju od 2001. do 2009. godine. Iste godine upisujem gimnaziju “Fran Galović”, matematički smjer. 2013. godine završavam gimnaziju i upisujem Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Kemijsko inženjerstvo. Od dodatnog obrazovanja istaknuo bi završenu osnovnu glazbenu školu u Varaždinu.