

# Određivanje optimalnog kuta i orijentacije fotonaponskih modula

---

Nekić, Jure

Master's thesis / Diplomski rad

2017

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:569050>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Diplomski studij Elektroenergetike**

**ODREĐIVANJE OPTIMALNOG NAGIBA I  
ORIJENTACIJE FOTONAPONSKIH MODULA**

**Diplomski rad**

**Jure Nekić**

**Osijek, 2017.**

## **Zahvala:**

*Zahvalu, u prvom redu, dugujem svom mentoru prof.dr.sc. Zvonimiru Klaiću koji mi je ustupio željenu temu te pokazao iznimno razumijevanje tijekom studiranja u inozemstvu.*

*Također, zahvaljujem se i profesorima sa bečkog sveučilišta Technische Universität Wien među kojima izdvajam profesora Christianu Diendorferu i njegov kolegij Solar Engineering uz čiju pomoć sam radio dnevne putanje Sunca, zatim zahvale pripisujem i profesoru Reinhardu Haasu uz čiji kolegij Energy Economics and Environment sam stekao znanja iz područja potražnje i ponude za energijom te naposljetku hvala profesoru Hermannu Hofbaueru i kolegiju Fuel and Energy.*

*Zahvaljujem se i svim drugim profesorima koji su mi omogućili zanimljivo, poučno, odgovorno i produktivno studiranje u svim nastavnim i izvannastavnim aktivnostima.*

*Hvala svim prijateljima i prijateljicama kao i trenerima, učiteljima i instruktorima koji su pokazali razumijevanje tijekom mog studija te obilježili moje cjelokupno obrazovanje i odrastanje.*

*Posebnu zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji koja me je uvijek podržavala, ohrabrivala i upućivala na pravi put.*

*Veliku zahvalu pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili tu, uz mene, u svakom trenutku i bez kojih sve ovo što sam postigao ne bi bilo moguće.*

*Veliko hvala svima!*

# SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Opis fotonapona i sunčeve energije .....	3
2.1. Sunčeva energija.....	3
2.1.1. Potencijal Sunca.....	3
2.1.2. Mjerenje sunčeva zračenja .....	5
2.1.3. Ozračenost na području Republike Hrvatske.....	9
2.2. Fotonaponski sustavi .....	10
2.2.1. Fotonaponski efekt.....	10
2.2.2. Karakteristike ćelije .....	12
2.2.3. Fotonaponski sustavi.....	16
2.2.4. Fotonaponski sustavi u RH .....	19
3. Orijentacija i nagib modula .....	22
3.1. Važnost položaja Sunca.....	22
3.1.1. Nagib modula.....	27
3.1.2. Orijentacija ili azimut modula .....	31
3.2. Krivulja proizvodnje i potražnje.....	32
3.3. Tržište električne energije .....	39
4. Simulacije.....	43
4.1. Kućanstvo .....	44
4.1.1. Krivulja potrošnje .....	46
4.1.2. Definiranje parametara mreže.....	48
4.1.3. Fotonaponski sustav 4,16 kW .....	51
4.1.4. Financijska analiza.....	52
4.1.5. Usporedba .....	57
4.2. Industrija.....	61
4.2.1. Krivulja potražnje .....	61

4.2.2. Projektiranje fotonaponskog sustava .....	62
4.2.3. Krivulja proizvodnje .....	63
5. Zaključak.....	67
Literatura [25] .....	69
Sažetak .....	72
Životopis.....	73
Prilozi .....	74

## 1. UVOD

Posljednjih godina sve više raste potražnja za električnom energijom iz obnovljivih izvora. Razlog toga su promjene u atmosferi nastale dugogodišnjim korištenjem konvencionalnih izvora energije koje se ponajviše očituju zagađenjem zraka te onečišćenjem okoliša, a posljedično, pokazalo se mijenjaju i klimu. Uz eksponencijalni rast stanovništva i porast ekonomije očekuje se gotovo dvostruko veća potrošnja električne energije do 2035. godine. [1] Kako bi se to spriječilo, izdan je međunarodni sporazum imena Kyoto protokol kojim se nastoje smanjiti emisije stakleničkih plinova za 20 %, povećati udio obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji energije na 20 % i uštedjeti energiju za 20 %. U prosincu 2015. godine, nastao je i novi globalni sporazum pod imenom Pariški sporazum čiji je cilj globalno zatopljenje ograničiti na razini znatno manjoj od 2 °C. Ulaskom u Europsku uniju i Hrvatska preuzima odgovornost za ispunjenje spomenutog zajedničkog cilja. [2] Do 2015. godine proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora činila je 10,7 % ukupne proizvodnje, uz izuzetak velikih hidroelektrana. [3] Iako postoji porast udjela obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji, još uvijek je zanemariv. Potaknuti na razmišljanje o manje štetnom utjecaju na čovjeka i prirodu, javlja se sve veći interes za direktno korištenje Sunca i sunčevog zračenja kao ekološki prihvatljivog izvora energije. Potencijal Sunca i mogućnost korištenja njegovog zračenja je itekako velik na području Republike Hrvatske te će biti detaljno opisan u drugom poglavlju.

Problematika koju ovaj rad sustavno analizira te nastoji riješiti odnosi se na učinkovito korištenje fotonaponskih elektrana. Proučava odnose orijentacije i nagiba modula sa proizvodnjom električne energije. U drugom poglavlju, detaljno će biti opisan fotonaponski efekt koji se postiže na najmanjoj jedinici FN sustava, ćeliji. Nadalje, rad će objašnjavati utjecaje potražnje i ponude električne energije na cijenu proizvedene odnosno cijenu kupljenog kWh električne energije. Iz tog pogleda, pokušat ćemo pronaći optimalne kutove azimuta i nagiba kako bi objasnili najučinkovitiju upotrebu fotonaponskih modula. Cijelu problematiku ćemo pratiti sa tehnološkog stajališta. Nekoliko pitanja će se postaviti na koje će rad pokušati dati odgovor. Ovisno o konzumaciji električne energije te potrebnoj instalaciji, rad smo podijelili na dva dijela. Prvi koji proučava privatne instalacije na krovovima kuća namijenjene za potrošnju kućanstva, te drugi kada se radi o potrebnoj proizvodnji energije gdje bi cjelokupna potreba za električnom energijom Republike Hrvatske bila pokrivena instaliranim kapacitetima fotonaponskog sustava.

Temeljna razlika između dvije simulacije koje se promatraju je potražnja za energijom koja se očituje iznosima njihove instalirane snage. Za pronalazak najbolje orijentacije modula u slučaju

opskrbe kućanstva koristit ćemo metodu povrata ulaganja sredstava. Za te potrebe služiti ćemo se računalnim simulacijskim programom Solarius. Obzirom da se za slučaj velikih instalacija ne mogu odraditi fizička mjerenja, proizvodnju elektrana velikih kapaciteta ćemo procjenjivati na osnovu dostupnih podataka prosječne ozračenosti na web stranici PVGIS-a. Na osnovu tako prikupljenih podataka, pomoću Excela će se napraviti proračun, a rezultati će se prikazati grafički u dijagramima.

Na kraju su iskazani rezultati simulacija i mjerenja te je izrečen kritički osvrt na cjelokupno korištenje energije, načine i razloge korištenja te mogućnosti za daljnja razmatranja. Osobni stav i argumentirano pojašnjenje rezultata optimiranja uz sve ostale komentare su navedeni u poglavlju zaključak.

## 2. OPIS FOTONAPONA I SUNČEVE ENERGIJE

### 2.1. Sunčeva energija

Sunce je glavni izvor energije i svega što postoji na našoj planeti Zemlji. Kao izvor elektromagnetskog zračenja prolazi kroz slojeve atmosfere te tako svojom energijom pokreće atmosferu, a različitim sustavima gibanja oblikuje vrijeme i klimu. Zbog svoje veličine i neprestanih nuklearnih reakcija na površini tijekom posljednjih 5 milijardi godina Sunce se smatra i dalje neiscrpnim obnovljivim izvorom energije koji omogućuje život.

#### 2.1.1. Potencijal Sunca

Smatra se da je nastalo od nakupine međuzvezdanog plina koja se počela sažimati zbog gravitacijskog privlačenja prouzročivši tako rast temperature. Daljnjim zagrijavanje je plin počeo zračiti te je nastalo „prasnuće“. U jezgri je rasla gustoća i temperatura, pa su se u određenoj fazi sažimanja stvorili uvjeti za početak termonuklearne fuzije vodika u helij. Plin koji je nastao u nuklearnim reakcijama počeo se još više zagrijavati, dostigao je dovoljan pritisak da izbalansira gravitacijsko privlačenje i tako zaustavi daljnje sažimanje. Procjenjuje se da je Sunce proživjelo već 5 milijardi godina, a da mu još toliko preostaje dok ne potroši sav raspoloživi vodik za fuziju.

Sunce se sastoji od 75 % vodika, 23 % helija, te od 2 % više od 60 različitih teških elemenata među kojima su najzastupljeniji: ugljik, dušik, kisik, neon, magnezij, natrij, kalcij, željezo, silicij i aluminij. Duboko u unutrašnjosti Sunca se odvijaju termonuklearne reakcije fuzije jezgara, u kojima atomi vodika sa četiri protona postaju atomi helija te nastaju druge teže jezgre. Masa helijeva nukleina je manja od mase četiriju protona, a gubitak mase  $\Delta m$  ( kg ) pretvara se u energiju  $E$ , koja se preko brzine svjetlosti  $c_0$  (  $3 \times 10^8$  ) prema Einsteinu može izračunati na sljedeći način:

$$E = \Delta m \cdot c_0^2, J \quad (2-1)$$

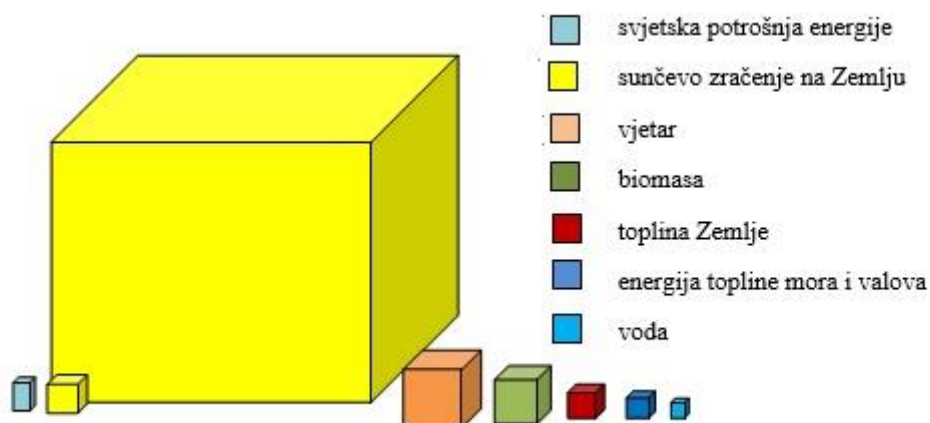
Pri čemu se energija dobiva u kilovatsatima, a masa se izražava u kilogramima. Iz toga se zaključuje kako jedan gram mase odgovara energiji od 25 milijuna kilovatsati, odnosno tu količinu energije dobili bismo ako jedan gram mase na neki način pretvorimo u energiju. Prema tome, i relativno male mase ostvaruju ogromne količine energije. Tako oslobođena energija nezadrživo se prenosi prema površini Sunca, da bi buknula u međuplanetarnom prostoru. [4] Na slici 2.1.



prikazana je usporedba sunčevog zračenja na površini Zemlje i svjetske godišnje potrošnje energije u svijetu te zaliha fosilnih i nuklearnih goriva.

Da se još uvijek na Suncu događaju burne reakcije svjedoči podatak kako se svake sekunde sa sunčeve površine u obliku solarnog vjetra oslobodi 3 000 tona. Teoretski, da se iscrpi u potpunosti, potrebno bi bilo 200 000 milijardi godina ovakvog ritma. Takva ogromna količina energije dobivena termonuklearnim reakcijama u unutrašnjosti Sunca, stvorila je nužne uvjete za razvoj života na Zemlji, ali i zalihe energije kroz naftu, ugljen i prirodni plin. [5]

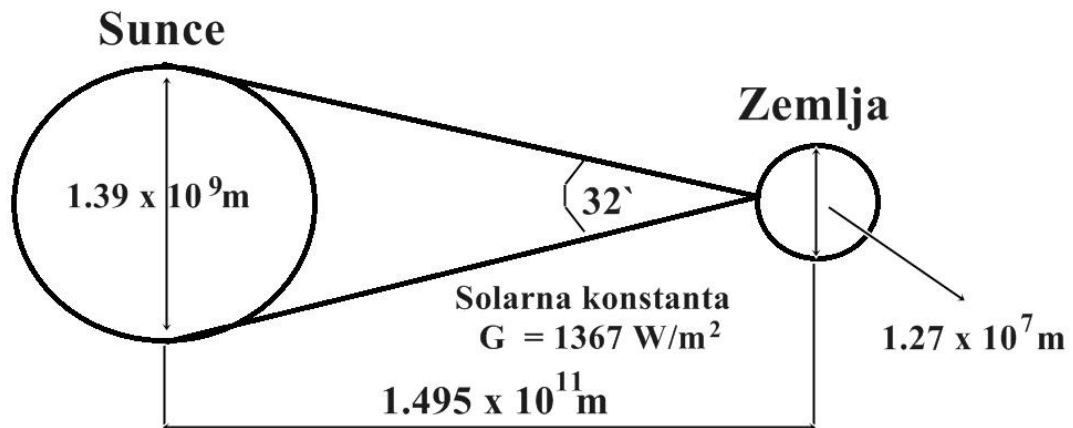
Činjenica da Sunce za jednu sekundu oslobodi više energije nego što li je naša civilizacija iskoristila tijekom svojeg razvoja govori o važnosti i nužnosti istraživanja te napretka korištenja i razvoja tehnologija koje će koristiti sunčevu energiju i pretvarati je u druge korisne oblike. Tako shvaćamo da Sunce ima veliki potencijal, a njegovu dospjelu energiju možemo mjeriti ozračenošću na područjima interesa.



**Slika 2.1.** Usporedba energije sunčeva zračenja i svjetske potrošnje energije na Zemlji [5]

Snaga sunčevog zračenja iznosi oko  $3,8 \cdot 10^{23}$  kW, odnosno  $3,3 \cdot 10^{27}$  kWh/god, od čega samo mali dio stigne na zemlju pod prostornim kutom od  $32'$ , odnosno  $0,53^\circ$  ( Sl. 2.2. ). Do vrha Zemljine atmosfere dolazi samo pola milijarditog dijela emitirane energije, tj. oko  $1,75 \cdot 10^{14}$  kW ili  $1,53 \cdot 10^{18}$  kWh/god. Toliki kapacitet snage premašuje 100 000 puta snagu svih elektrana na zemlji kada bi one radile punim kapacitetom. Stavljajući to u omjer dolazimo do činjenice da otprilike jedan sunčani sat može biti dovoljan za pokrivanje cjelokupnih potreba za energijom na svijetu odnosno, za 7,5 milijardi ljudi. Uspoređujući te brojke jasno je kako je potencijal Sunca

ogroman te da je nužno razvijati u tehnološki napredak kako bismo što učinkovitije iskoristavali sunčevo zračenje koje u enormnim količinama slobodno pada na Zemljinu površinu. Iako 30-ak posto energije sunčeva zračenja bude reflektirano natrag u svemir, Zemlja još uvijek dobiva oko  $1,07 \cdot 10^{18}$  kWh energije, što je i dalje više za nekoliko tisuća puta nego li što je ukupna godišnja potrošnja energije iz primarnih izvora.



**Slika 2.2.** Osnovne relacije Sunca i Zemlje te prostorni kut upada Sunčeve energije na Zemlju.

Kako bismo u što većoj mjeri iskoristili sunčevu energiju potrebno je dobro poznavati neke od čimbenika kao što su: geografsko područje, klima te ozračenost. Kao jedan od najvažnijih i najmjerodavnijih pokazatelja koji govore o potencijalu korištenja energije Sunca je zasigurno ozračenost. Međutim, postoje i drugi čimbenici koji su zapravo uzroci svega što smo naveli, a to su položaj Zemlje u odnosu na Sunce te nagib Zemlje koji se mijenja tijekom vrtnje oko Sunca.

### 2.1.2. Mjerenje sunčeva zračenja

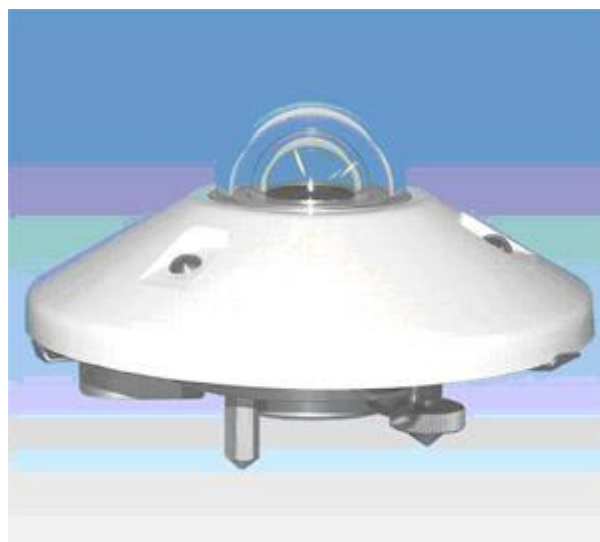
Mjerenje sunčevog zračenja je jedan od najvažnijih čimbenika koji ukazuju na kvalitetu lokacije odnosno samom potencijalu iskorištavanja energije Sunca koja u ogromnim količinama slobodno pada svuda oko nas. Razlikujemo dva pojma: ozračenje kao gustoću energetskega toka i ozračenost koju smatramo gustoćom koja pada na plohu.

Ozračenje ili iradijancija je gustoća energetskega toka Sunčevog zračenja i jednako je omjeru energetskega toka Sunčevog zračenja i površine plohe okomite na smjer tog zračenja.

Ozračenost ili iradijacija je gustoća dozračene energije koja u promatranom vremenu upadne na jediničnu površinu plohe. Dobiva se integriranjem ozračenja po vremenu, a jedinica za ozračenost je vat sat po četvornom metru ( Wh/m<sup>2</sup> ) ili džul po četvornom metru ( J/m<sup>2</sup> ).

Mjerenje Sunčevog zračenja obuhvaća kratkovalno zračenje koje prolazi kroz atmosferu kao izravno ili raspršeno zračenje te dugovalno zračenje Zemlje i atmosfere. Prolaskom kroz Zemljinu atmosferu sunčevo zračenje slabi jer se raspršuje na molekule plinova, čestice prašine i dima te često i apsorbira u međudjelovanju sa molekulama plinova. Prema tome razlikujemo izravno, raspršeno i odbijeno Sunčevo zračenje.

Ukupno (globalno) Sunčevo zračenje na vodoravnu plohu se sastoji od zračenja koje ploha izravno primi s površine Sunčevog diska i raspršenog zračenja neba. Instrument koji mjeri zračenje iz prostornog kuta 2 steradiana na plohu u valnom području između 0,3 do 3,0 μm je piranometar. Na idealno odabranoj lokaciji instrument ne bi trebao registrirati zračenje odbijeno od tla i okolnih predmeta. Mogu imati termoelektrične, fotoelektrične, piroelektrične ili bimetalne elemente kao osjetnike. U uporabi su najčešće termoelektrični piranometri koji koriste toplinske osjetnike. Oni proizvode napon na principu termoelektričnog efekta u funkciji upadnog Sunčevog zračenja. [6]



**Slika 2.3.** Piranometar [5]

Jedno od najsloženijih mjerenja u određivanju potencijala energije Sunca je direktno ili izravno mjerenje. Mjeri se pirheliometrom koji omogućava registraciju samo zračenja koje dolazi iz uskog pojasa oko Sunčevog diska. Razlog složenosti je što mu prijemna površina instrumenta mora biti u svakom trenutku okomita na Sunčeve zrake tako da prate Sunce po nebu uz kutnu grešku između  $0,75^\circ$  i  $1,5^\circ$  ili manju.

Raspršeno ili difuzno zračenje nastaje molekulama plinova i česticama raspršenim u atmosferi koje Sunce svojom energijom pobuđuje na titranje. Tako primljenu elektromagnetsku energiju molekule ili čestice odmah zrače u svim smjerovima u prostoru. Tada se energija širi u svim smjerovima, a posljedice su dvojake. S jedne strane smanjuje jačinu Sunčevog zračenja, a s druge strane uzrokuje raspršeno zračenje neba te je izgubljen za procese u atmosferi. To možemo objasniti na primjeru dnevne izloženosti Suncu. Tijekom dana Sunce postiže različite visine te mu je sredinom dana kraći put zračenja do tla. To znači da je raspršenje manje izraženo te sadrži više kratkovalnog zračenja dajući nebu plavu boju. Spuštanje ka obzoru, zračenje je raspršenije i time se udio kratkovalnog zračenja u ukupnom zračenju smanjuje. To rezultira apsorpcijom plavog spektra pa preostaje samo žuto i crveno zračenje.

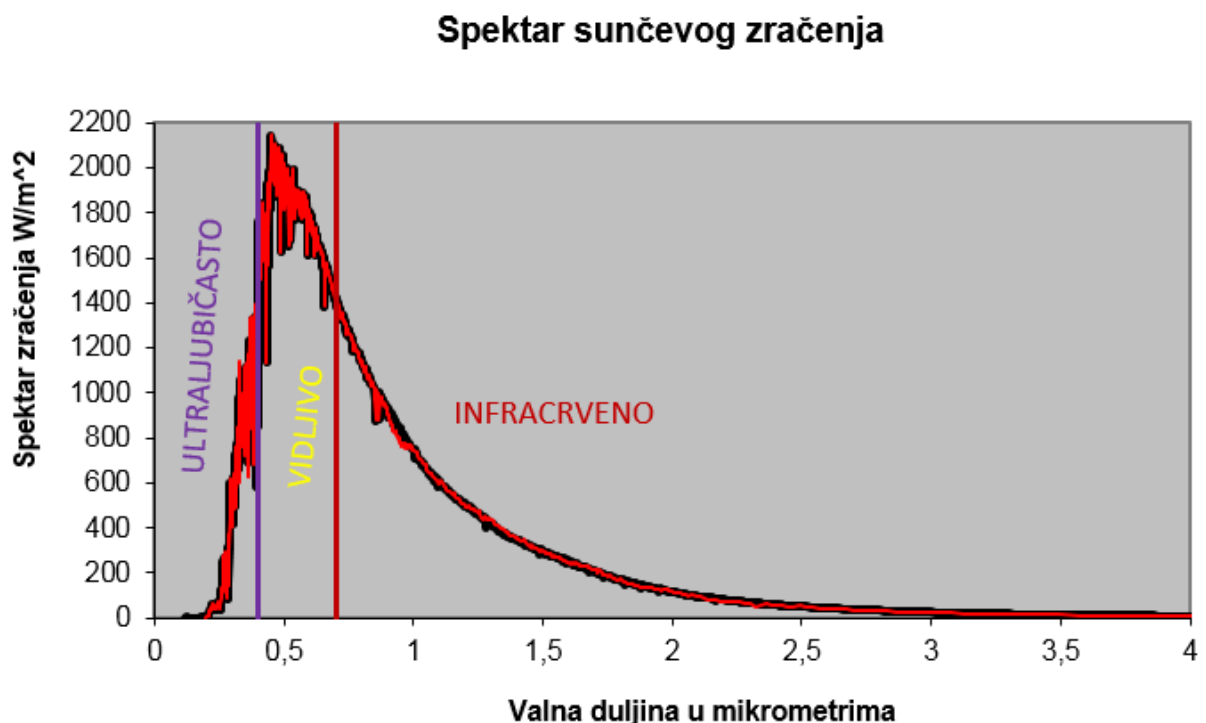


**Slika 2.4.** Pirheliometar [5]

Odbijeno ili reflektirano zračenje nastaje nakon prolaska sunčeve energije kroz atmosferu. Tada nailazi na tlo ili vodene površine te će se veći ili manji dio odbiti ovisno o svojstvima podloge na koju naiđe. Postoje tri vrste refleksije. Zrcalna refleksija je moguća na ravnim površinama kada je

hrapavost manja od valne duljine Sunčevog zračenja (od 0,4 do 2  $\mu\text{m}$ ). Difuzna refleksija se sastoji o više zrcalnih refleksija, odnosno hrapavost površine je usporediva s valnom duljinom zračenja. Volumna refleksija se događa kada zračenje prodire kroz površinu i odbije se od različitih slojeva ispod površine. [8]

Spektar sunčevog zračenja obuhvaća široki raspon valnih duljina. Na osnovu toga na nebu uz različite kutove sunčevih zraka vidimo različite nijanse boja. Spektar elektromagnetskog zračenja koje dolazi do Zemljina atmosfere, nalazi se u rasponu od 100 nm do oko 1 mm valne duljine. Najčešće dijelimo na ultraljubičasto zračenje, vidljivi dio i infracrveno zračenje. Slika 2.5. upravo prikazuje ovisnost sunčevog zračenja o valnoj duljini.

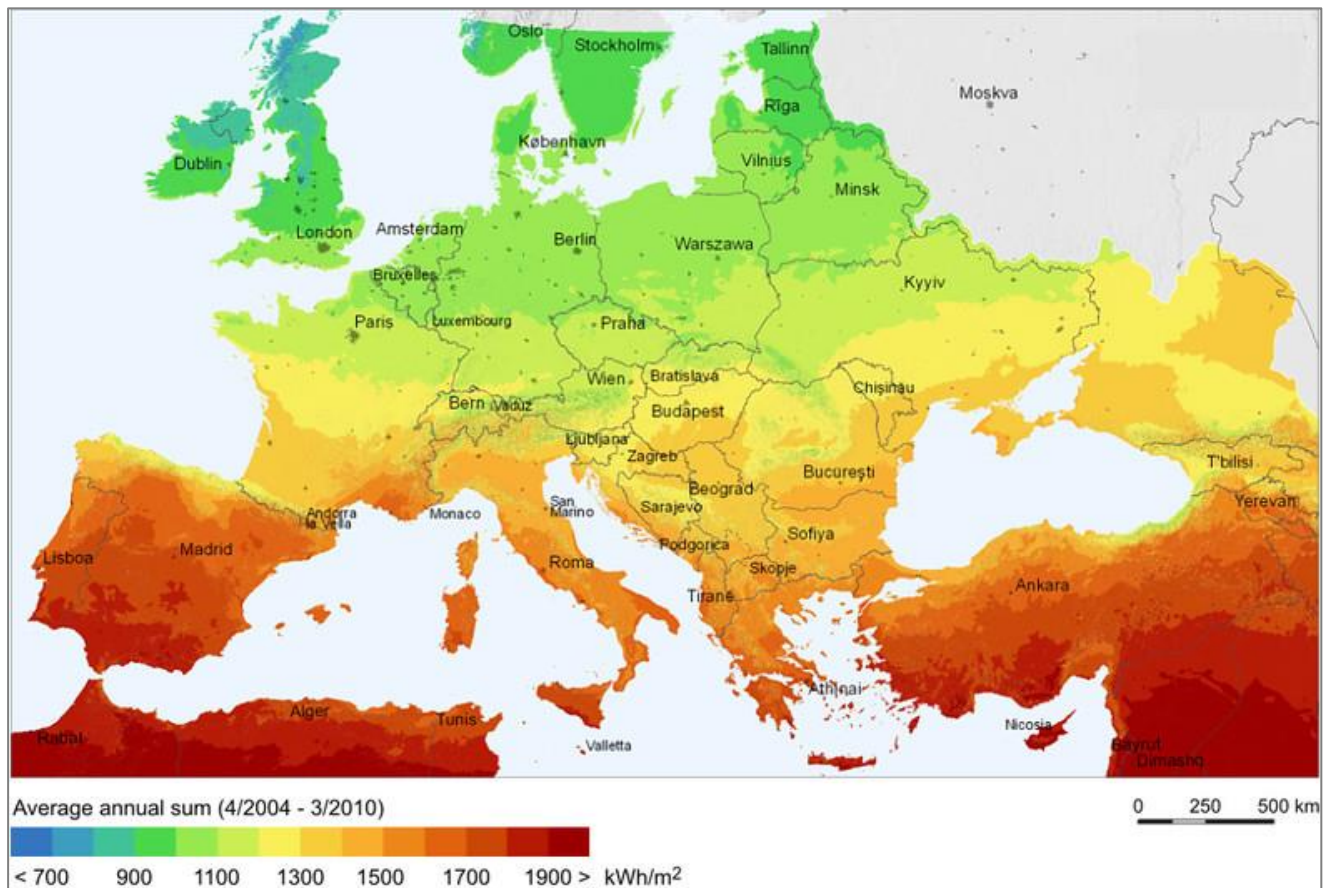


**Slika 2.5.** Prikaz sunčevog zračenja u odnosu na valnu duljinu [7]

Kao što vidimo, nama vidljiv dio pripada rasponu od 380 nm gdje su nijanse na granici ultraljubičastog zračenja pa do 780 nm gdje prelaze u infracrveno zračenje. Ovo zračenje je važno jer na osnovu dospjelih zraka odnosno valnih duljina, modul apsorbira određenu količinu energije. Kao što smo opisali, određene nijanse na nebu zapravo označuju o kojem se zračenju radi te na osnovu toga i o kojoj valnoj duljini je riječ. U poglavlju tri ćemo objasniti kako to utječe na ćeliju i vidjeti u koje su najpovoljnije valne duljine i u kojem dijelu dana se pojavljuju.

### 2.1.3. Ozračenost na području Republike Hrvatske

Ogromna količina sunčeve energije pada na Zemlju. Otprilike sa 89 000 TW kojim neprestano pada na tlo čini snagu koja je 6 000 puta veća od ekvivalentu potrošnje od 15 TW. Republika Hrvatska kao država srednje i južne Europe ima itekako dobar položaj za korištenje sunčeve energije.



Slika 2.6. Iradijacija Europe [8]

Uspoređujući je sa ostalim zemljama Europe, prema slici 2.6. Hrvatska pripada među one sa najviše godišnje ozračenosti sunčeve energije. U prosjeku godišnje na hrvatsko tlo ovisno o lokaciji pada od 1100 kWh/m<sup>2</sup> do 1400 kWh/m<sup>2</sup> sunčeve energije. Sa takvim potencijalom itekako je konkurentna za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora odnosno Sunca.

## **2.2. Fotonaponski sustavi**

Ozračenost sunčeve energije se može koristiti na dva načina: za dobivanje toplinske i za dobivanje električne energije. Objekti koji upijaju sunčeve zrake se zovu kolektori. Za dobivanje toplinske energije koriste se crna tijela koja imaju svojstva apsorpcije što veće količine energije. Za razliku od direktnog pretvaranja sunčeve u toplinsku energiju, električna energija se iz Sunca dobiva temeljem fotonaponskog efekta.

### **2.2.1. Fotonaponski efekt**

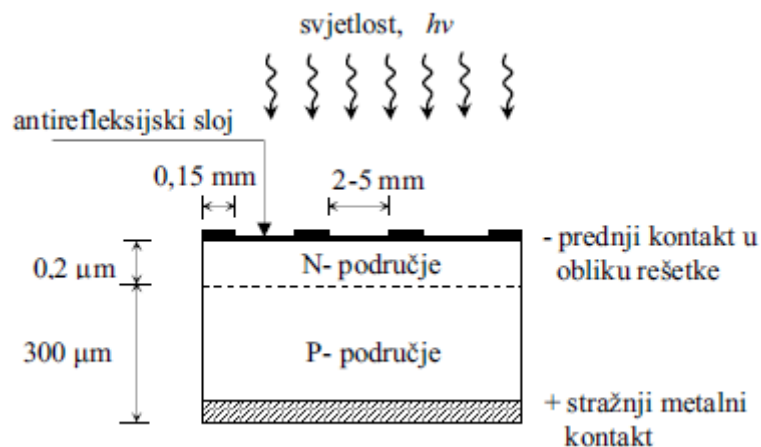
Zahvaljujući fotonaponskom efektu, danas je moguće koristiti električnu energiju dobivenu iz sunčevog zračenja. Materijali važni za izradu fotonaponskih ćelija mogu biti u obliku monokristala, poli kristala ili kao amorfne tvari. Ako se čitav aktivni obujam ćelija sastoji samo od jednog kristala, onda je takva ćelija monokristalna. Ako se u procesu rasta kristala većih dimenzija formira više kristala, najčešće zajedničko orijentiranih te iz njih uzme solarna ćelija, onda takve ćelije nazivamo polikristalnim ili multikristalnim. Kristali su po svojoj prirodi čvrsta tijela koja grade atomi, ioni ili molekule trodimenzionalnog rasporeda tvoreći tako kristalnu strukturu. Korisni su za fotonaponsku pretvorbu jer promjenom strukture koja se narušava primjerice toplinom, mijenjaju mehanička, toplinska, električna i magnetska svojstva kristala.

Godine 1839. Edmond Becquerel je otkrio fotonaponski efekt. Opisao je to kao proizvodnju električne struje kada se dvije ploče platine ili zlata urone u kiselu, neutralnu ili lužnatu otopinu te izlože na nejednolik način sunčeva zračenja. Potreba za proučavanjem tada nije postojala te nije bilo daljnjeg napretka. Prva silicijeva solarna ćelija je otkrivena kasnije, tek 1941. godine te je njezina učinkovitost bila ispod 1 %. Nekoliko godina kasnije, točnije 1954. g. izradila se i prva silicijeva ćelija sa 6 % učinkovitosti. Tada su ćelije bile poprilično skupe i nije se pronalazio veći interes.

Ono što danas kažemo za sunčanu ćeliju kao najmanju jedinicu fotonaponskog sustava je poluvodička dioda ili PN-spoj. Nastaje kada se dijelu kristala čistog poluvodiča dodaju akceptori ili trovalentne primjese, odnosno donori ili peterovalnte primjese. Tako nastaje p-tip odnosno n-tip poluvodiča. Na granici PN-spoja, kao posljedice gradijenta koncentracije nastaju difuzije elektrona i šupljina u suprotnim smjerovima. Obzirom da se radi o diodi, propušta struju samo u jednom smjeru i to kada je p-područje pozitivno, a n-područje negativno. U tom slučaju, napon je u propusnom smjeru, a kada se priključi na vanjski izvor, poteče struja elektrona iz n-područja

prema p-području, a šupljina iz p-područja prema n-području. Koncentracije šupljina i elektrona ne moraju biti jednake.

Dakle, osvjetljenjem solarne ćelije, odnosno apsorpcijom sunčevog zračenja, fotonaponskim efektom se na njezinim krajevima pojavljuje elektromotorna sila (napon). Na taj način solarna ćelija postaje izvorom električne energije.

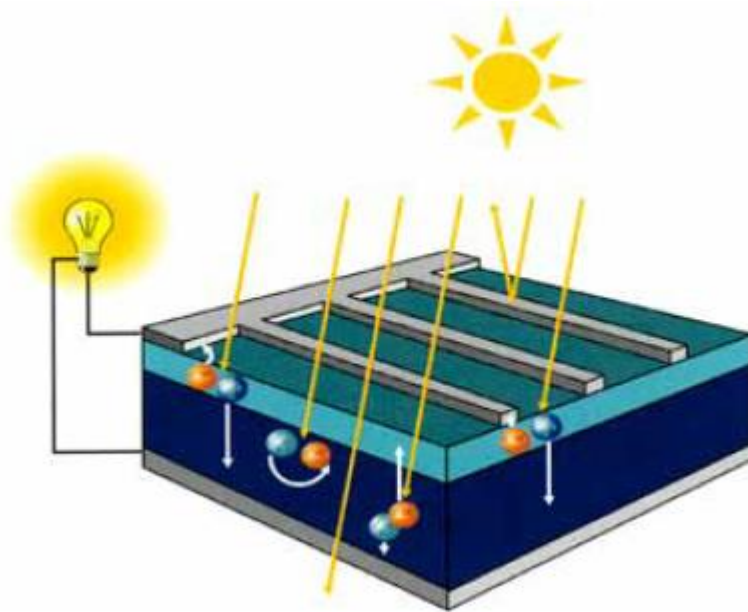


**Slika 2.7.** Fotonaponski efekt [5]

Na slici 2.7. vidimo kako je građena ćelija te prikaz presjeka PN spoja. Prednji kontakt od stražnjeg metalnog dijeli pozitivno i negativno područje. Pozitivno područje ispunjavaju šupljine, dok je negativno ispunjeno elektronima. Pri apsorpciji fotona dolazi do difuzije na granici tih dvaju područja, poteče struja te se javlja napon. Negativno područje može imati antirefleksivni sloj koji omogućava veću apsorpciju fotona jer smanjuje količinu odbijene energije. Na gornjoj strani je postavljena metalna rešetka kako bi skupila dopirane fotone. Razmaci su od 2 do 5 mm te u konačnici ne zauzimaju više od 5 % površine ćelije. Detaljniji opis razmjene šupljina i elektrona je prikazano u nastavku na slici 2.8..

Kada se solarna ćelija, odnosno PN-spoj osvijetli, apsorbirani fotoni predaju energiju elektronima. Zauzvrat šupljine popunjavaju novonastale rupe elektrona. Dakle, elektron se giba prema N-strani, a šupljina prema P-strani. Skupljanjem elektrona i šupljina na krajnjim stranama ćelije javlja se elektromotorna sila.





**Slika 2.8.** *Proces nastanka napona odnosno struje* [7]

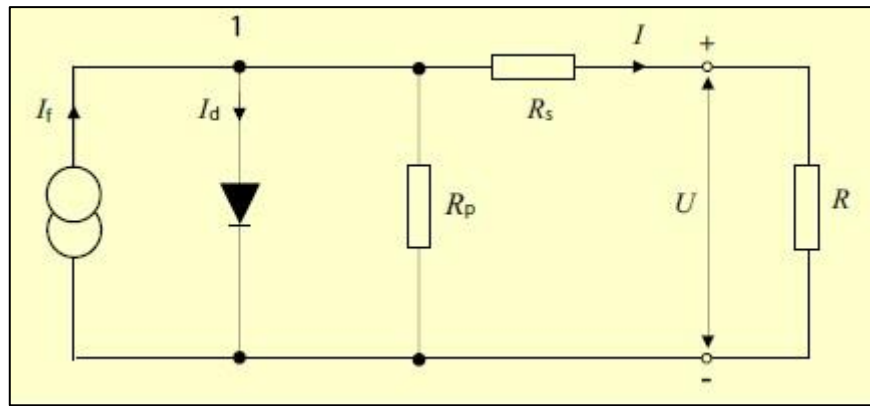
Prevladavajuće p-područje je u dužini od 300  $\mu\text{m}$  dok je negativno oko 0,2  $\mu\text{m}$ . Metalna rešetka usmjerava šupljine ka potrošaču dok elektroni nastoje strujni krug zatvoriti probijanjem kroz p-područje do stražnje metalne površine čime tvore nesmetan protok električne struje.

### 2.2.2. Karakteristike ćelije

Izlaganjem sunčevom zračenju, solarna energije se prenosi do same ćelije koja spojena sa trošilom te uz pomoć fotonaponskog efekta generira struju  $I_f$ . Tada vanjskim potrošačem protekne struja  $I$  koja je jednaka razlici struja diode  $I_d$  i fotostruje  $I_f$  kako je to prikazano na slici 2.9.. Kako fotonaponska ćelija ne bi postala potrošač u trenucima kada nema dozračene sunčeve energije, paralelno izvoru se stavlja dioda kako bi spriječila povratnu struju. Kako se želi osigurati što veća struja za trošilo, u paralelu se dodaje otpornik velike, a u seriju sa što manjom otpornosti.

Za čvor 1 prema slici 2.9. tada vrijedi :

$$I_f - I_d - I = 0 \quad (2-2)$$



**Slika 2.9.** Model fotonaponske ćelije

Uzimajući pozitivne vrijednosti struje, struja  $I$  postiže u vanjskom krugu vrijednost:

$$I = I_f - I_d = I_f - I_z(e^{eU/kT} - 1) \quad (2-3)$$

gdje su:

$I_f$ - fotostruja, A

$I_d$ - struja diode, A

$I_z$ - struja zasićenja, A

$e$ - elementarni naboj, ( $1,602176462 \cdot 10^{-19}\text{C}$ )

$U$ - električni napon, V

$k$  – Boltzmannova konstanta, ( $1,3806 \cdot 10^{-23}\text{J/K}$ )

$T$ - termodinamička temperatura, K

Jednadžba pokazuje relaciju između napona i jakosti struje kroz PN-spoj, a to zovemo  $I,U$  karakteristika diode.

Uzmemo li spomenute otpore  $R_s$  i  $R_p$  jednadžba dobija oblik:

$$I = I_f - I_z \left( e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (2-4)$$

Obično parametar  $m$  solarne ćelije ima vrijednost oko 1.

Elektromotorna sila je jedan od najvažniji parametara solarne ćelije. Napon na njezinim stezaljkama u slučaju otvorenog kruga ( $I=0$ ) ako uvrstimo  $I=0$  u prethodnu jednadžbu, iznosi:

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_f}{I_z} + 1\right) \quad (2-5)$$

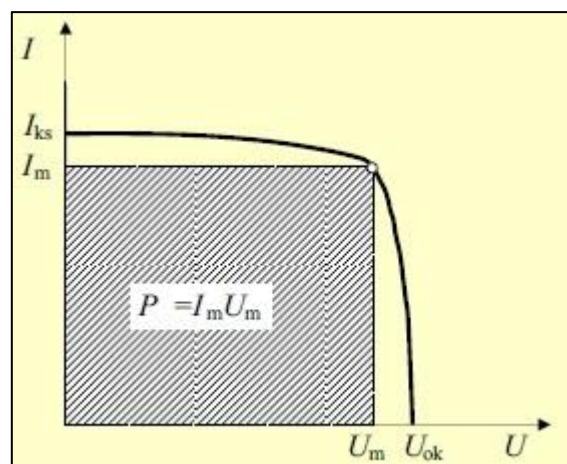
Ako sada u tu jednadžbu uvrstimo da je napon na stezaljkama jednak nuli ( $U = 0$ ) tada dobivamo struju kratkog spoja koja je jednaka fotostruji:

$$I_{ks} = I_f \quad (2-6)$$

Karakterističan otpor solarne ćelije  $R_k$  definiran je omjerom:

$$R_k = \frac{U_{ok}}{I_{ks}} \quad (2-7)$$

Struja kratkog spoja i napon otvorenog kruga su nam važni prilikom određivanja snage jer su to maksimalne točke za obje veličine te pokazuju teoretski moguću snagu pojedine ćelije. Kako na krivulju utječu i otpori te utjecaji temperatura, površina kao ekvivalent stvarne snage je ipak nešto manja, a to se može vidjeti na slici 2.10..



**Slika 2.10.** Maksimalna snaga solarne ćelije

Tako se snaga solarne ćelije može dobiti iz jednadžbe:

$$P = UI = U(I_f - I_z e^{eU/kT} + I_z) \quad (2-8)$$

Maksimalna snaga solarne ćelije se može odrediti pomoću elektromotorne sile i struje kratkog spoja:

$$P_m = U_m I_m = U_{ok} I_{ks} F \quad (2-9)$$

Faktor ispunjenja se kreće od 0,7 do 0,9 te ga možemo dobiti i sljedeće jednadžbe:

$$F = \frac{U_m I_m}{U_{ok} I_{ks}} \quad (2-10)$$

gdje su:

$I$  – struja, A

$P_m$  - maksimalna snaga, W

$U$  – napon, V

$G$  - ukupno sunčevo zračenje, W/m<sup>2</sup>

$I_f$  - fotostruja, A

$A$  - površina ćelije, m<sup>2</sup>

$I_z$  – struja zasićenja, A

$T$  – termodinamička temperatura, K

$e$  - elementarni naboj, (1,602176462 · 10<sup>-19</sup>C)

$U_m$  - maksimalni napon, V

$k$  – Boltzmannova konstanta, (1,3806 · 10<sup>-23</sup>J/K)

$I_m$  - maksimalna struja, A

$J_{ks}$  = gustoća struje kratkog spoja, W/m<sup>2</sup>

$F$  - faktor ispunjenja

$U_{ok}$  - napon otvorenog kruga, V

$I_{ks}$  - struja kratkog spoja,

Stupanj djelovanja solarne ćelije je omjer maksimalne snage solarne ćelije  $P_m$  i snage sunčeva zračenja na površinu  $A$  ćelije:

$$\eta = \frac{P_m}{GA} = \frac{I_m U_m}{GA} \quad (2-11)$$

Sređivanjem formule, dobijemo:

$$\eta = F \frac{U_{ok} J_{ks}}{G} \quad (2-12)$$

Obzirom da je maksimalna teorijska vrijednost fotostruje pri ukupnoj snazi zračenja od 1 kW/m<sup>2</sup> uz koeficijent mase zraka 1,5 i pri temperaturi od 25 °C, iznosa 40 mA/cm<sup>2</sup>, tada elektromotornu silu od 0,6 V uz maksimalni teorijski faktor punjenja 0,88 dobivamo stupanj djelovanja solarne ćelije 21 % što je i maksimalna dosegnuta djelotvornost silicijeve ćelije.

Želimo li povećati napon ili struju to možemo učiniti spajanjima ćelija u seriju ili paralelu. Tako utječemo na neke od karakteristika modula. Ćelije spojene u takve kombinacije zovemo

podmoduli. Ukupan iznos napona na izlazu modula proporcionalna je broju serijski spojenih ćelija, a izlazna struja je proporcionalna broju paralelno spojenih ćelija.

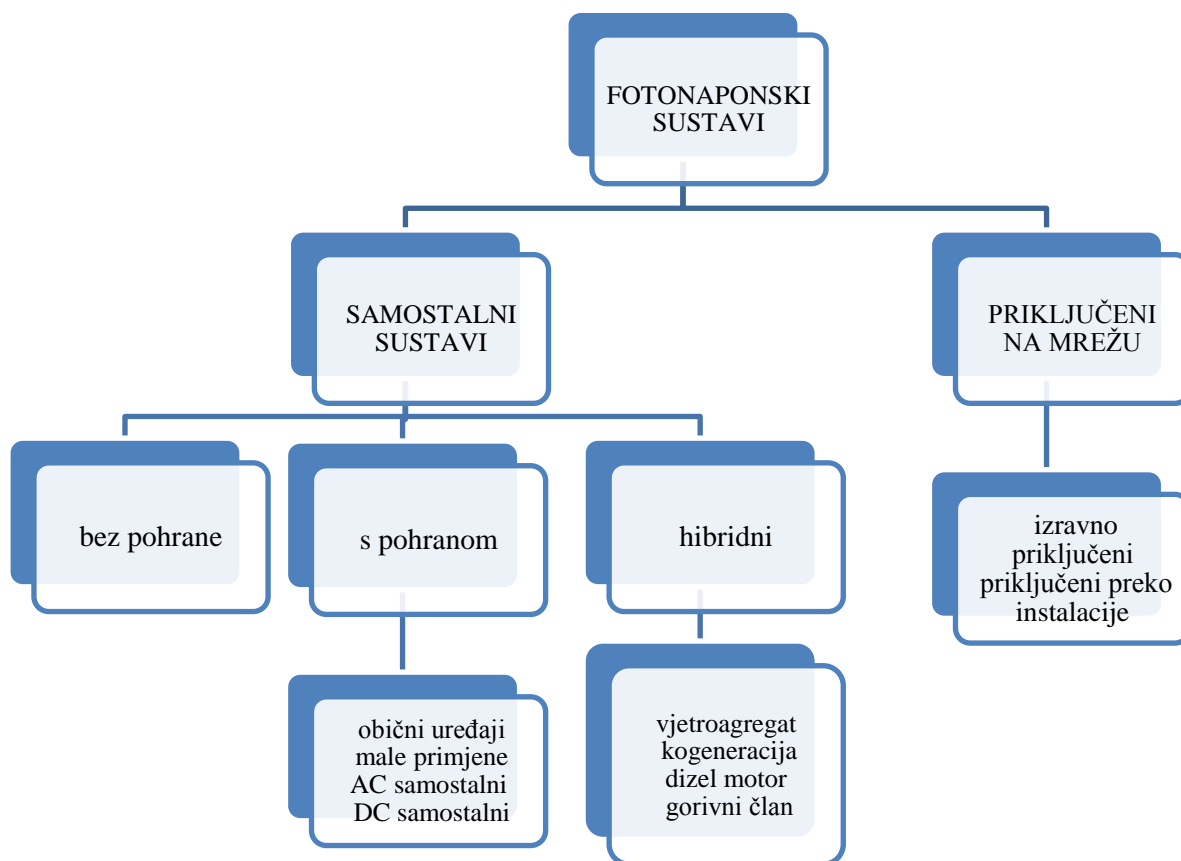
Moduli spojeni u paralelu daju ukupni napon jednak svakom pojedinom modulu. Serijski spojeni moduli će dati ukupan napon kao zbroj svih pojedinih napona modula. Obzirom da su u paraleli sve pozitivne strane spojene na jedan pol, a negativne na drugi, ta struja će se zbrajati i biti će nešto viša nego u serijski spojenim modulima. Prema tome, snaga će biti nešto viša kod paralelno spojenih modula jer će uz povećanje struje, svaki modul imati jednak napon, dok će primjerice na izlazu serijskog spoja snaga biti manja jer će najmanja proizvodnja modula utjecati na preostale na način da će njome poteći struja koja ograničava snagu proizvodnje preostalih modula. Zbog toga je u slučaju različitih snaga, module bolje povezati paralelno, jer ćemo dobiti veću izlaznu snagu.

### **2.2.3. Fotonaponski sustavi**

Solarne fotonaponske sustave (FN) dijelimo na dvije osnovne skupine: fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu, a zovemo ih još i samostalnim sustavima, i fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu.

Samostalni fotonaponski sustavi mogu biti sa ili bez pohrane. Ovisno o vrsti primjene i načinu potrošnje energije, mogući su i hibridni sustavi koji su nadopunjeni s agregatima, kogeneracijom, dizelskim generatorom ili gorivnim člancima. Fotonaponski sustavi koji su priključeni na elektroenergetsku mrežu imaju mogućnost izravnog spoja ili spoja preko kućne instalacije. Podjela fotonaponskih sustava je prikazana na slici 2.11.

Rad obuhvaća oba načina spajanja na mrežu, dakle, spojen preko kućne instalacije te elektranu koja je direktno spojena na mrežu. U nastavku će detaljnije biti opisan fotonaponski sustav priključen na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije.



**Slika 2.11.** Osnovna podjela fotonaponskih sustava

Fotonaponski sustavi koji se na javnu mrežu spajaju preko kućne instalacije smatraju se distribuiranom proizvodnjom električne energije jer omogućuju konekciju distribuiranih sustava na centralizirane, odnosno na niskonaponsku razinu mreže. Njegove temeljne komponente su:

- fotonaponski moduli
- spojna kutija sa zaštitnom opremom
- kablovi istosmjernog razvoda
- glavna sklopka za odvajanje
- izmjenjivač DC/AC
- kablovi izmjeničnog razvoda
- brojila predane i preuzete električne energije

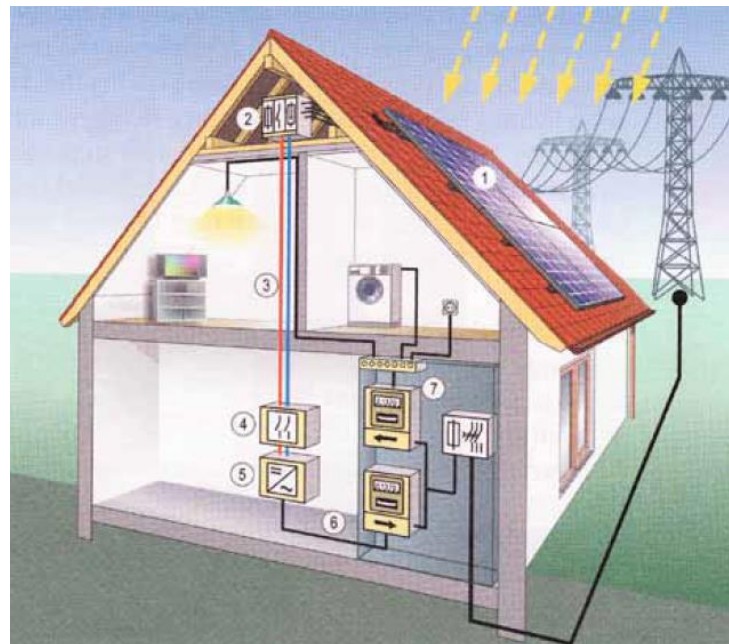
Fotonaponski moduli, spojeni serijski ili serijski-paralelno, proizvode istosmjernu struju i međusobno su povezani kabelima u nizove. Kabeli se dovode u razdjelni ormarić koji ima potrebnu zaštitnu opremu. Ondje se nalaze odvodnici prenapona i istosmjerni prekidači. Nadalje se razvode sve skupine fotonaponskih modula preko glavne sklopke za odvajanje do solarnih izmjenjivača. Oni pretvaraju istosmjernu struju modula u izmjenični napon reguliranog iznosa i frekvencije sinkronizirajući se sa mrežom. Tako nastala izmjenična struja se prenosi kabelima izmjeničnog razvoda do priključaka za elektroenergetsku mrežu. Tada govorimo o električnom ormariću gdje

se nalazi i električno brojilo. Sve češća su dvosmjerna brojila koja mjere predanu i preuzetu energiju iz mreže.

Tako projektiran sustav prikazan je na slici 2.12., a namijenjen je za napajanje trošila u obiteljskoj kući dok će višak energije prodati elektroenergetskoj mreži.

Tako proizvedena električna energija ima prednosti u ekološkom pogledu ali je povoljna i sa ekonomskog stajališta. Njegove prednosti su: ne šteti okolišu, pretvorba energije se obavlja u blizini mjesta potrošnje, nema gubitaka energije u prijenosu i distribuciji, pouzdana je i sigurna opskrba, troškovi su znatno niži, instalacija brza i jednostavna.

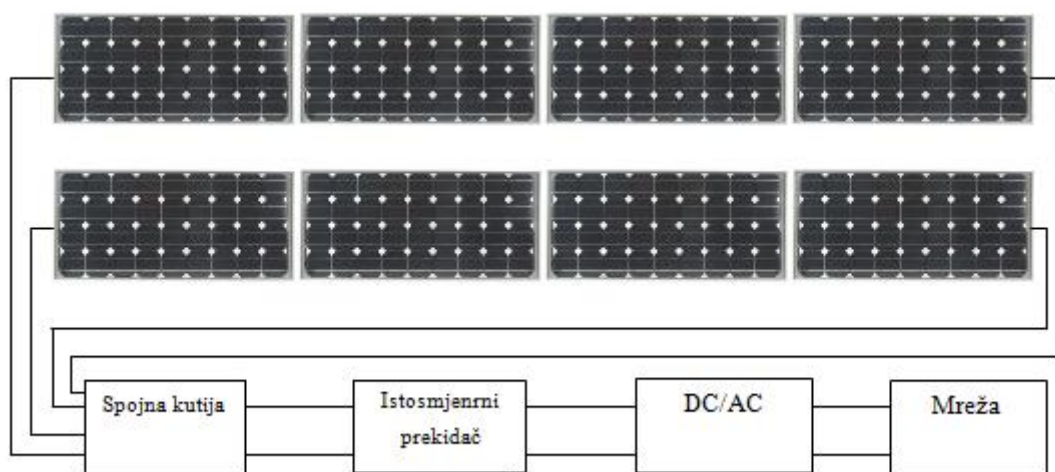
Uz primjerenu politiku može prerasti u jedan od najraširenijih, najekonomičnijih i ekološki prihvatljivih oblika proizvodnje i korištenja električne energije.



**Slika 2.12.** Fotonaponski sustav priključen na mrežu preko kućne instalacije [4].

Fotonaponski moduli mogu biti povezani serijski i/ili paralelno te tako tvoriti fotonaponski generator čija snaga se izražava u  $W_p$ ,  $kW_p$  ili  $MW_p$ . Fotonaponski moduli proizvode istosmjernu struju, obično napona 12 V ili 24 V, a izmjenjivači su ti koji pretvaraju proizvedenu energiju u potrebne i korisne mjerne oblike i iznose, što se ponajprije odnosi na napone i frekvencije korisne za daljnju upotrebu kućanstva ili mreže.

Drugi oblik fotonaponskog sustava koji će se razmatrati je fotonaponski sustav priključen na javnu elektroenergetsku mrežu (engl. *on-grid*). Takav solarni generator se sastoji od više fotonaponskih modula koji su serijski spojeni u nizove (engl. *string*) od kojih je svaki spojen s kutijom i istosmjernim prekidačima te dolazi do jednog centralnog izmjenjivača s transformatorom. Ondje se pretvara istosmjerna struja modula u izmjeničnu, te se sinkronizira s naponom i frekvencijom mreže ( slika 2.13. ). U takvom sustavu, glavni nedostatak je veća dužina istosmjernih kablova, što povećava cijenu sustava, iako u konačnici nudi veću sigurnost zbog nižih napona pojedinih nizova i galvanskog odvajanja.



**Slika 2.13.** Klasični fotonaponski sustav sa spojnom kutijom nizova modula i centralnim izmjenjivačem

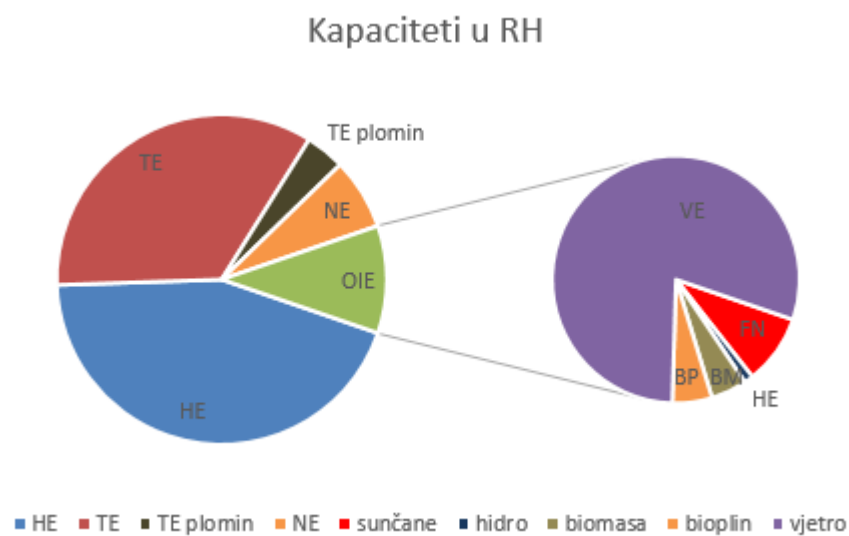
Kada ne bismo imali transformator u centralnom izmjenjivaču, tada bismo imali fotonaponske module spojene u seriju koji bi činili jedan niz. Niz kao takav bi bio spojen izravno preko istosmjernog prekidača do centralnog izmjenjivača. U tom slučaju bio stupanj djelovanja bio veći, čak do 98 %. [4]

#### 2.2.4. Fotonaponski sustavi u RH

Ulaskom Republike Hrvatske u Europsku uniju, prihvatili smo neke regulativne, norme i izazove koje provodi Unija zajedno sa njezinim članicama.. Tako smo se primjerice obvezali na višestruko povećanje udjela obnovljivih izvora energije, a time i fotonaponskih elektrana. Najveći udio instaliranih proizvodnih kapaciteta Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe čine hidroelektrane sa raspoloživom snagom 2 201,5 MW što čini 52,0 % udjela. Obzirom da velike



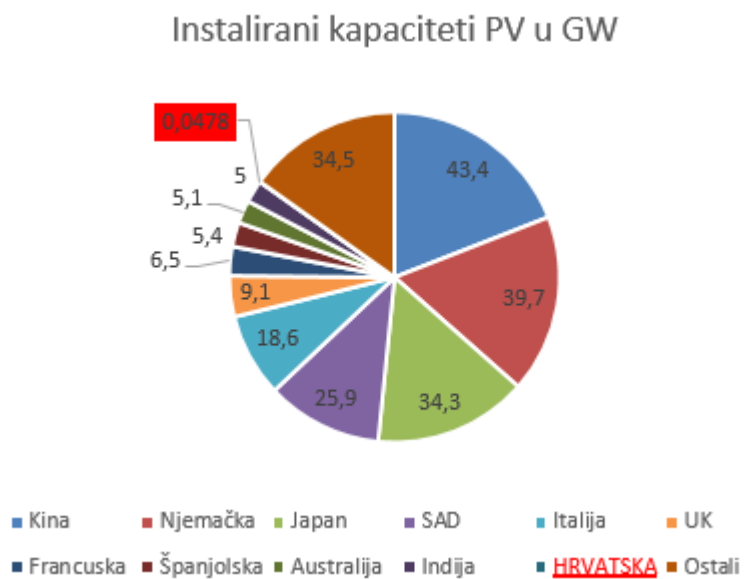
hidroelektrane spadaju u konvencionalne izvore energije, samo 520 MW je instaliranih kapaciteta za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, a koje ne spadaju u HEP grupu. Prema tom izvješću iz 2015. godine, Hrvatska ima instaliranih 47,8 MW sunčanih elektrana sa godišnjom proizvodnjom 57,1 GWh. U razdoblju od 2010. do 2015. bilježi se sveukupni rast od 256,1%. Instalirana snaga fotonaponskih sustava razlikuje se od službenih podataka Hrvatskog operatora tržišta energije (HROTE) jer uključuje i one sustave koji nisu u statusu povlaštenog proizvođača, a poznato je da proizvode električnu energiju. Snaga autonomnih fotonaponskih sustava koji se koriste za opskrbu električnom energijom objekata koji nisu spojeni na mrežu procijenjena je na oko 500 kW. [3]



**Slika 2.14.** Kapaciteti instalirane snage u Republici Hrvatskoj do 2015. godine

Iako bilježi rast, Hrvatska još uvijek ima mali udio proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije sa tek 10,45 %. Važno napomenuti da u OIE prema slici 2.14. ne spadaju velike hidroelektrane jer se one gledaju kao konvencionalni izvori energije. Najveći rast u odnosu na 2014. godinu bilježi izgradnja bioplinskih postrojenja te fotonaponskih elektrana što je potpomognuto sklapanjem ugovora o povlaštenim proizvođačima električne energije. Međutim, proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava je još na niskim razinama. Pad cijena opreme i gradnja solarnih elektrana u svijetu brzo napreduje te je spomenutih 48 MW apsurdno malo u odnosu na već ostvareno i planirano u drugim zemljama Europske unije. Znamo li da Hrvatska ima bolje prirodne uvjete od prosjeka EU to još više dobiva na značaju i potiče na razmišljanje. Na slici 2.15. vidimo da vodeća zemlja Europe, Njemačka ima instalirane kapacitete fotonaponskih elektrana u iznosu od 39,7 GW što je svrstava u sam vrh proizvođača električne energije iz korištenja fotonaponskih sustava iako je prema ozračenosti daleko siromašnija od naših

područja na Mediteranu ( slika 2.6. ). Prema podacima energetskeg portala [9] Kina je vodeći svjetski proizvođač električne energije za FN sustave.



**Slika 2.15.** Kapaciteti instaliranih fotonaponskih elektrana u svijetu do 2015. godine [9]

### 3. ORIJENTACIJA I NAGIB MODULA

Sve veći udio fotonaponskih sustava u elektroenergetskoj mreži kao oblika obnovljivih izvora povećava zabrinutost oko dodatnih troškova zbog promjenjive naravi proizvodnje spomenutih izvora. Kako bi se smanjili troškovi, rješenje se nadzire u instalacijskim kutovima fotonaponskih modula i elektrana. U određenoj mjeri, nagib modula utječe na povećanje proizvodnje od ljetnih do zimskih mjeseci, dok orijentacija prema istoku ili zapadu može utjecati na proizvodnju tijekom dana, povećavajući tako proizvodnju u jutarnjim ili večernjim satima. Međutim, za instalirane module pod stalnim ( engl. *fixed* ) kutom, postoji samo jedna kombinacija koja doprinosi najvećoj proizvodnji električne energije te tako smanjuje troškove instalacija, korištenja te troškove gubitaka nastale zbog promjenjive naravi prirode.

U nastavku se nastoji opisati, analizirati te izračunati najbolju kombinaciju kutova koji rezultiraju najvećim energetske outputom, odnosno najvećom proizvodnjom.

#### 3.1. Važnost položaja Sunca

Osim tehničkih specifikacija koje su određene pri standardnim testnim uvjetima ( engl. *Standard test conditions, STC* ), a to su struja kratkog spoja, napon praznog hoda, nazivna snaga te učinkovitost, postoje i tehničke karakteristike koje uvelike utječu na proizvodnju i potencijal korištenja dospjele sunčeve energije. To su svakako orijentacija i nagib modula koji će biti detaljnije opisani u nastavku. Sunčevo zračenje je opisano u potpoglavlju 2.1.2. gdje se opisuje kao zbroj difuznog, direktnog i odbijenog zračenja. Važno je napomenuti kako je upravo to razlog zbog kojeg će modul apsorbirati određenu količinu iradijacije. Raspršeno zračenje u rane jutarnje i kasne večernje sate će u atmosferi prouzročiti razne nijanse boja koje će uz pomoć reflektiranog zračenja i okolnih površina ipak dospjeti modula te tako predati dovoljnu energiju elektronima da provedu struju. To je pokazatelj kako različite duljine valnog zračenje sa sobom nose različite količine energije. Ovisnost valne duljine sunčevog zračenja i apsorpcije modula je prikazano na slici 3.1.

Energija sunčeva zračenja koja dopire do vanjskog ruba Zemlje ovisno o udaljenosti od Sunca iznosi  $1\ 307 - 1\ 399\ W/m^2$  na plovu okomitu na smjer zračenja. Srednja vrijednost sunčeva zračenja na okomitu plovu naziva se solarna konstanta i iznosi  $E_{0sr}=1\ 367,7\ W/m^2$ .

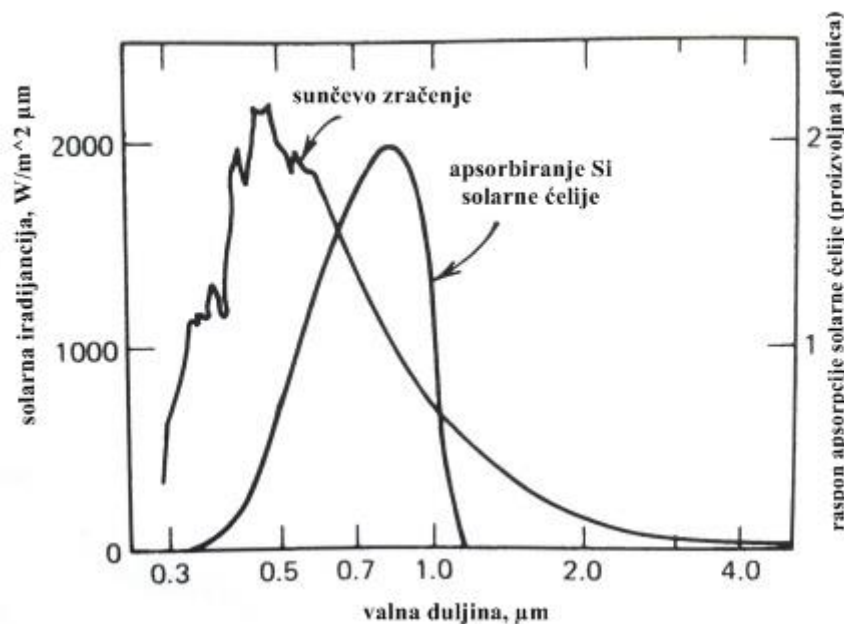
Za različite udaljenosti Zemlje od Sunca stvarna vrijednost sunčeva zračenja na okomitu plohu je:

$$E_0 = E_{0sr} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (3-1)$$

gdje su:

$r$  – srednja udaljenost Zemlje od Sunca

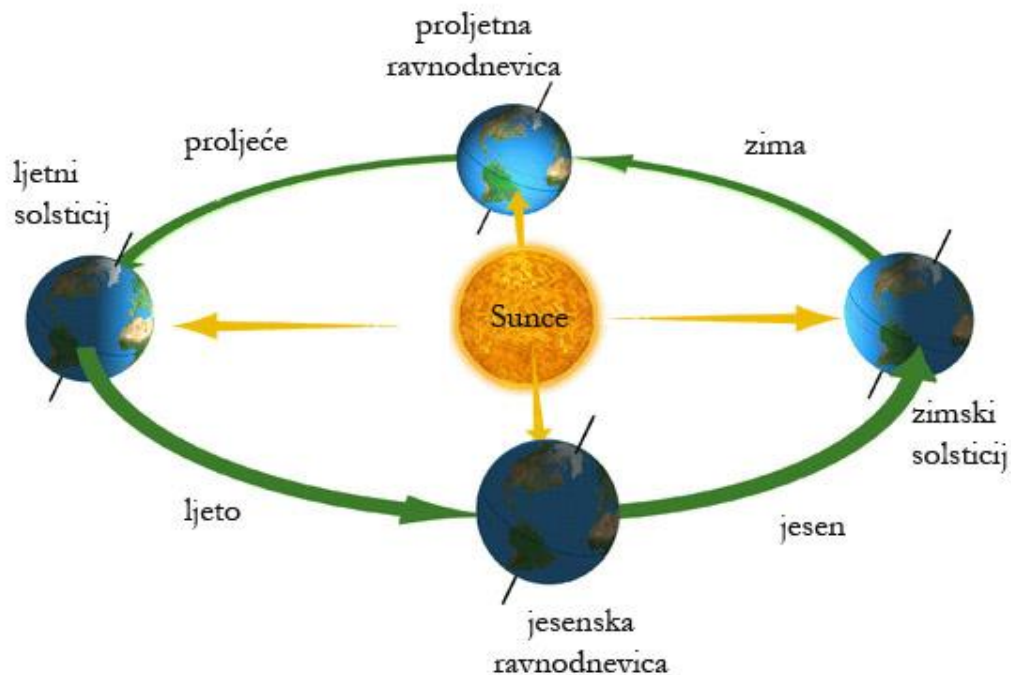
$R$  – stvarna udaljenost Zemlje od Sunca



**Slika 3.1.** Solarno zračenje i valne duljine koje ćelija apsorbira [7]

Prema slici 3.1. vidimo kako reagiranje silicijeve ćelije pokriva i vidljivi dio spektra, ali i u većoj mjeri i infracrveno zračenje [7]. Iz toga možemo zaključiti kako za određenu vrste ćelije, sunčevo zračenje ima različiti utjecaj.

Sunce tijekom godine prividno mijenja svoju dnevnu putanju. Obzirom na kut pod kojim zrake dopijeva u atmosferu, kratkovalno zračenje Sunca se rasprostire ili direktno pada na zemlju.. Tako određujući upadni kut, dospjele zrake tvore svoju valnu duljinu. Kako je u prethodnom poglavlju opisano, to ujedno određuje i spektar boja na nebu, ali i mogućnost apsorpiranja energije. Tako je primjerice, poželjno da u što većoj mjeri zrake padaju okomito jer je tada mogućnost apsorpcije najveća, baš kao i učinkovitost fotonaponskog modula.



**Slika 3.2.** Nagib Zemlje i putanja oko Sunca [10].

Prema slici 3.2. vidimo da je Sunce u središtu sunčevog sustava te da Zemlja kruži oko njega po eliptičnoj putanji, s time da je udaljenost od Sunca različita za pojedine dijelove godine. Zemlja je najbliža Suncu u zimskom ciklusu i to se naziva perihel, te najdalja u srpnju kada je Zemlja u tzv. afel poziciji. Svojom nagibom od  $23,5^\circ$  prividno kretanje Sunca postiže različite putanje. To je razlog zašto postoje godišnja doba, odnosno zašto je Sunce u ljetnim danima gotovo okomito na površinu. Također, ovisno o geografskoj širini, Sunce se kreće od južne do sjeverne obratnice u pojedinom razdoblju. Ljeto na južnoj polutki je u vrijeme kada je kod nas zima jer zbog svojeg prirodnog nagiba Zemlje, ono prividno odlazi prema južnoj obratnici te tako biva podalje od nas i naše sjeverne polutke. Prema tome, kut upada zraka prema Zemlji je mali, a Sunce nisko, odnosno bliže obzoru. Obratno je u ljetnim danima.

Raspon sučevog zračenja se dakle mijenja tijekom godine zbog različite udaljenosti Zemlje i Sunca. Razradi li se jednadžba ( 3-1 ) dobije se složena, ali točnija jednadžbu sunčeve ozračenosti koja pada na površinu:

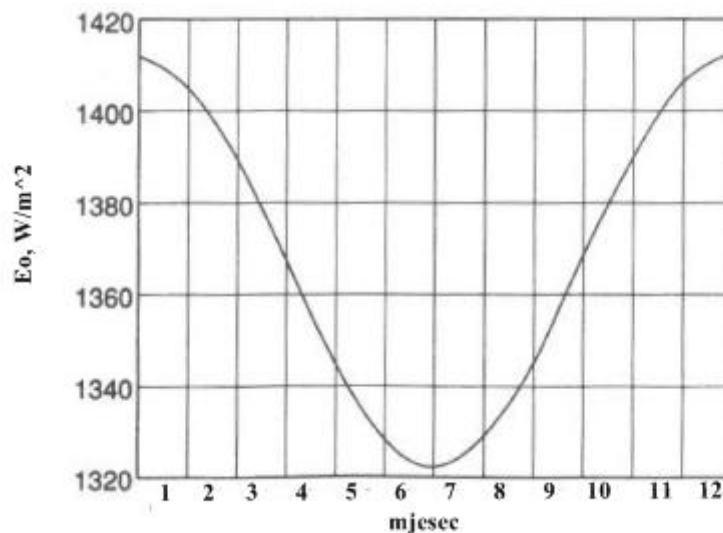
$$E_0 = E_{0sr} \left( 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \quad (3-2)$$

$$E_0 = E_{0sr}(0,000110 + 0,034221 \cos(B) + 0,001280 \sin(B) + 0,000719 \cos(2B) + 0,000077 \sin(2B)) \quad (3-3)$$

gdje je  $n$  broj dana u godini, a  $B$  izračunato pomoću:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3-4)$$

Iz tako postavljenih jednadžbi dobije se krivulja kao na slici 3.3.. Važno je napomenuti da ova krivulja nije isto što i ozračenost, nego se odnosi samo na sunčevo zračenje koje dopire do vanjskog ruba Zemlje u ovisnosti o udaljenosti Zemlje i Sunca. To se zove jakost sunčevog zračenja, a indirektno je povezano sa spektrom sunčevog zračenja koje nastaje daljnjim razlaganjem sunca na različite valne duljine.



**Slika 3.3.** Sunčevo zračenje kroz godinu [7]

Kako bi se bolje objasnila važnost nagiba i orijentacije modula, važno je razlikovati još neke veličine.

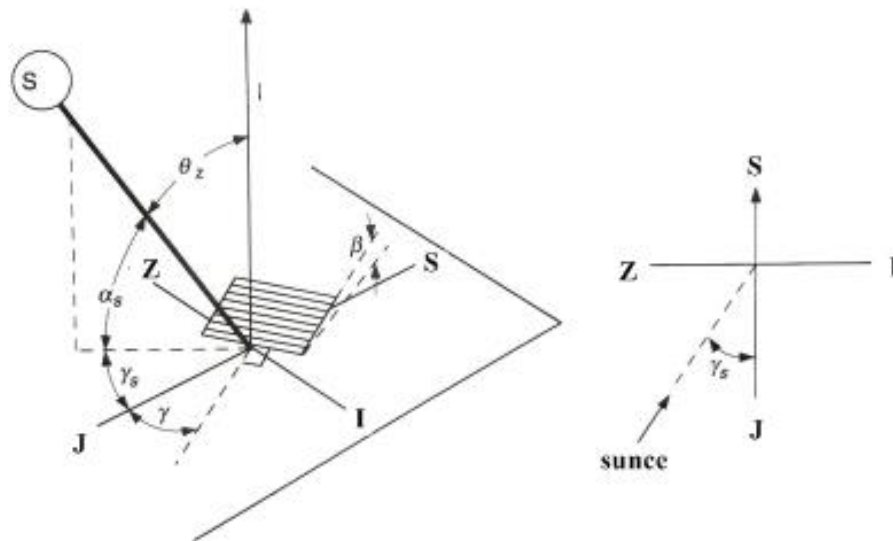
Prema slici 3.4. razlikuju se:

Geografska širina ( $\phi$ ) je kutna lokacija sjeverno ili južno od ekvatora, izražava se u stupnjevima, sjeverno do  $+90^\circ$  i južno do  $-90^\circ$ .

Deklinacija ( $\delta$ ) je kutna lokacija sunca u podne, a mjeri se južno i sjeverno od ekvatora u rasponu od  $-23,45^\circ$  do  $+23,45^\circ$ . Zapravo je određena nagibom Zemlje što ne daje uvijek podnevno Sunce u istoj točki.

Nagib ( $\beta$ ) je kut između površine modula i horizontale. Moguće je postaviti ga u rasponu od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  s time da  $\beta > 90^\circ$  znači okrenutost prema dolje, što je zapravo nepotrebno.

Azimut modula ili orijentacija ( $\gamma$ ) koji je kut između orijentacije modula i pravca prema lokalnom meridijanu. Drugim riječima, odstupanje od pravca prema jugu, istočno ( $-180^\circ$ ) ili zapadno ( $+180^\circ$ ).



**Slika 3.4.** Kutovi upada zraka i položaja modula [11]

Kut zenita ( $\theta_z$ ) koji je kut između okomice i pravca Sunca, odnosno, kut incidencije zračenja na postavljenu površinu.

Kut prema horizontali ( $\alpha_s$ ), kut između horizontale i pravca sunca, komplementarni kut zenita.

Azimut sunca ( $\gamma_s$ ), kut je između pravca juga i upadnih zraka Sunca.

Azimut se često naziva i orijentacija modula te se tada misli na odstupanje orijentacije modula od smjera juga. Tada se govori o gami,  $\gamma$ . Zenit je zapravo okomica na horizontalu te se koristi kada se govori o upadnim zrakama sunčeva zračenja. Međutim, u većini slučajeva koristit će se ipak kut koji pokazuje veličinu upada sunčevih zraka prema horizontali, u ovom slučaju to je alfa sa indeksom s, a označavamo ga  $\alpha_s$ . Za proračune u ovom radu još je važna veličina nagiba koja se označava grčkim slovom beta,  $\beta$ .

### 3.1.1. Nagib modula

Nagib modula je kut koji se određuje prema horizontali. Najčešće je već unaprijed određen samom izgradnjom kuća, odnosno krovova. U posebnim slučajevima, kada se izgrađuju velike fotonaponske elektrane na otvorenom ili postavljaju moduli na slobodnim površinama može se utjecati na proizvodnju pomoću optimalnog kuta. Najbolji kut je onaj u kojem je modul najviše izložen Suncu. To se zove energetski optimumom jer pri toj instalaciji daje najveću količinu električne energije na izlazu.

Zemlja svojim nagibom od  $23,5^\circ$  već u početku postavlja kut upadnih sunčevih zraka koje dopiru do atmosfere. Kako je to bilo opisano u prijašnjem poglavlju, Zemlja svojom rotacijom oko vlastite osi te revolucijom oko Sunca neprestano mijenja svoj položaj te tako utječe na prividni položaj Sunca. Tu pojavu zovemo deklinacija ( slika 3.5. ), a posljedica toga su i promjene preostalih kutova poput kuta zenita  $\theta_z$  i kuta prema horizontali  $\alpha_s$  na osnovu kojih se dobije prividna putanja Sunca na nebu.

Deklinacija se može prema [7] aproksimirati sljedećom jednačbom:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (3-5)$$



**Slika 3.5.** Deklinacija kroz 365 dana u godini, Excel

Slika 3.5. prikazuje deklinaciju Sunca za područje  $48^\circ$  geografske širine i  $35^\circ$  nagiba modula. Karakteristike su to za grad Beč, a dobili smo je proračunom u Excelu.



Želimo li većom preciznost koristiti ćemo jednadžbu:

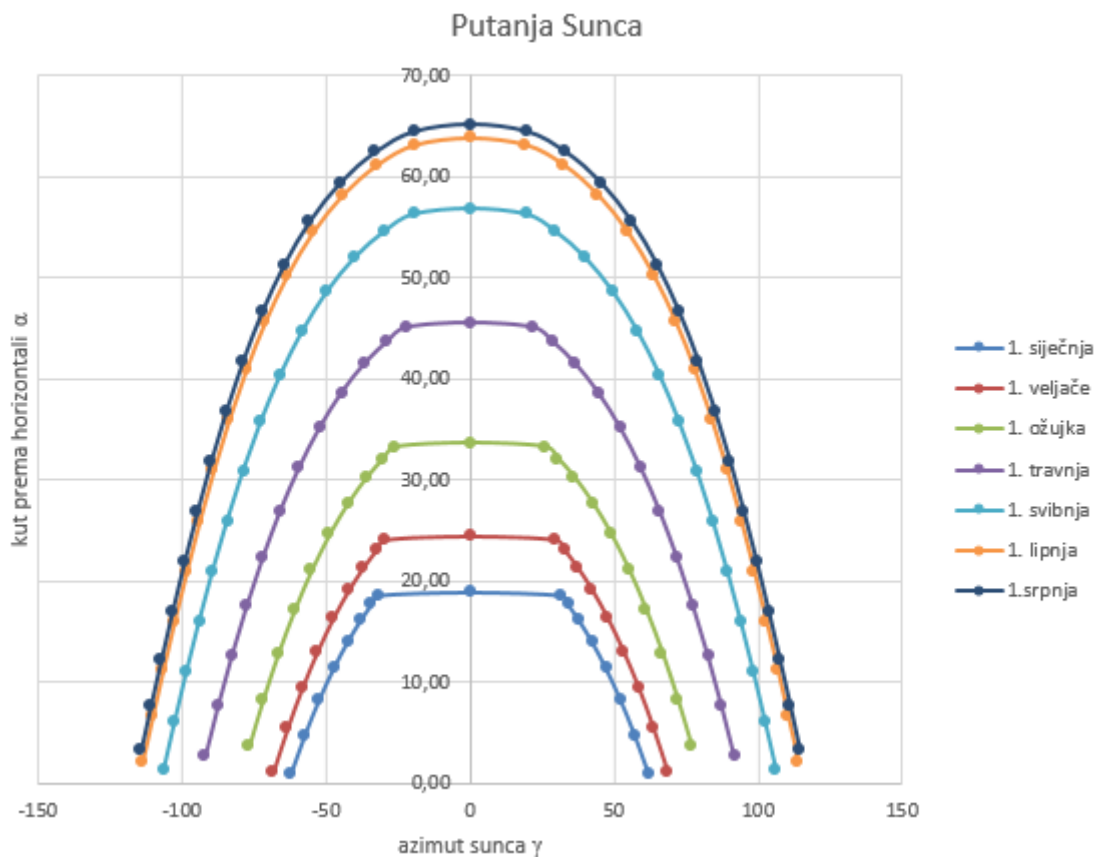
$$\delta = 0,006918 - 0,399912\cos(B) + 0,070257\sin(B) - 0,006758\cos(2B) + 0,000907\sin(2B) - -0,002679\cos(3B) + 0,00148\sin(3B) \quad (3-6)$$

gdje je n, broj dana u godini.

Da bismo dobili dnevnu putanju Sunca trebaju nam promjene u vremenu azimuta Sunca ( $\gamma_s$ ) i kuta prema horizontali ( $\alpha_s$ ). Azimut Sunca se računa prema jednadžbi (3-7):

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos(\theta_z) \sin(\phi) - \sin\delta}{\sin(\theta_z)\cos(\theta)} \right) \right| \quad (3-7)$$

gdje je  $\omega$  satni kut.



**Slika 3.6.** Putanja Sunca proračunom u Excelu

Na slici 3.6. se vidi kako je putanja Sunca različita tijekom godine, a vrhunac postiže u podne. Početkom godine Sunce je nisko, a to pokazuje mali kut prema horizontali. Sredinom godine Sunce je u najvišoj točki što čini kut od oko 65° što je i za očekivat obzirom da je tada ljetni solsticij

( 21.lipnja ). Nakon te točke, Sunce se polako spušta prema obzoru i njegov prosječni dnevni kut je sve manji. Radeći tako cikluse, Sunce opet postiže svoj maksimum jednom godišnje. Ovaj dijagram je dobiven pomoću proračuna u Excelu te je dovoljan za aproksimaciju na 48° paralele ili geografske širine ( Beč ). Međutim za točnije mjerenje i proračun koristit ćemo informacije dostupne online.

Iz ovog možemo zaključiti kako na sjevernoj zemaljskoj polutci ili hemisferi, nagib modula treba rasti kako se geografska širina poveća, odnosno što smo sjevernije. Primjerice, lokacija grada Osijeka, koji je na 45° geografske širine bi prema najgrubljoj teoriji 21. lipnja kada je Sunce na najsjevernijoj točki (sjeverna obratnica) trebao imat nagib modula prema jednadžbi:

$$\beta = \phi - \delta \quad (3-8)$$

što bi tada dalo rezultat,

$$\beta = 45,5^\circ - 23,5^\circ = 22^\circ$$

Međutim, kako je Sunce tada u najvišoj točki, tada ono ima i širu putanju, što vidimo i na slici 3.6.. Zbog toga dan traje duže, a zalazak Sunca je sjevernije nego inače te je potrebno nagib ipak malo smanjiti ( slika 3.7 ). Postoji mogućnost povećanja učinkovitosti korištenja dozračene energije na način da se dva ili četiri puta godišnje mijenja nagib instalacije. U našem radu, fokus je na fiksiranim i stalnim nagibima modula te je potrebno gledati najbolju kombinaciju za cijelu godinu.

Mnogi inženjeri postavljaju nagibni kut prema solarnom podnevu što ne znači nužno i najveću proizvodnju jer se to odnosi samo na sredinu dana kada je Sunce u najvišoj točki, ostatak dana radi sa manjom učinkovitošću te stoga nije najbolja opcija.

Za sjevernu hemisferu, solarno podne je:

$$\theta_{noon} = |\phi - \delta - \beta| \quad (3-9)$$

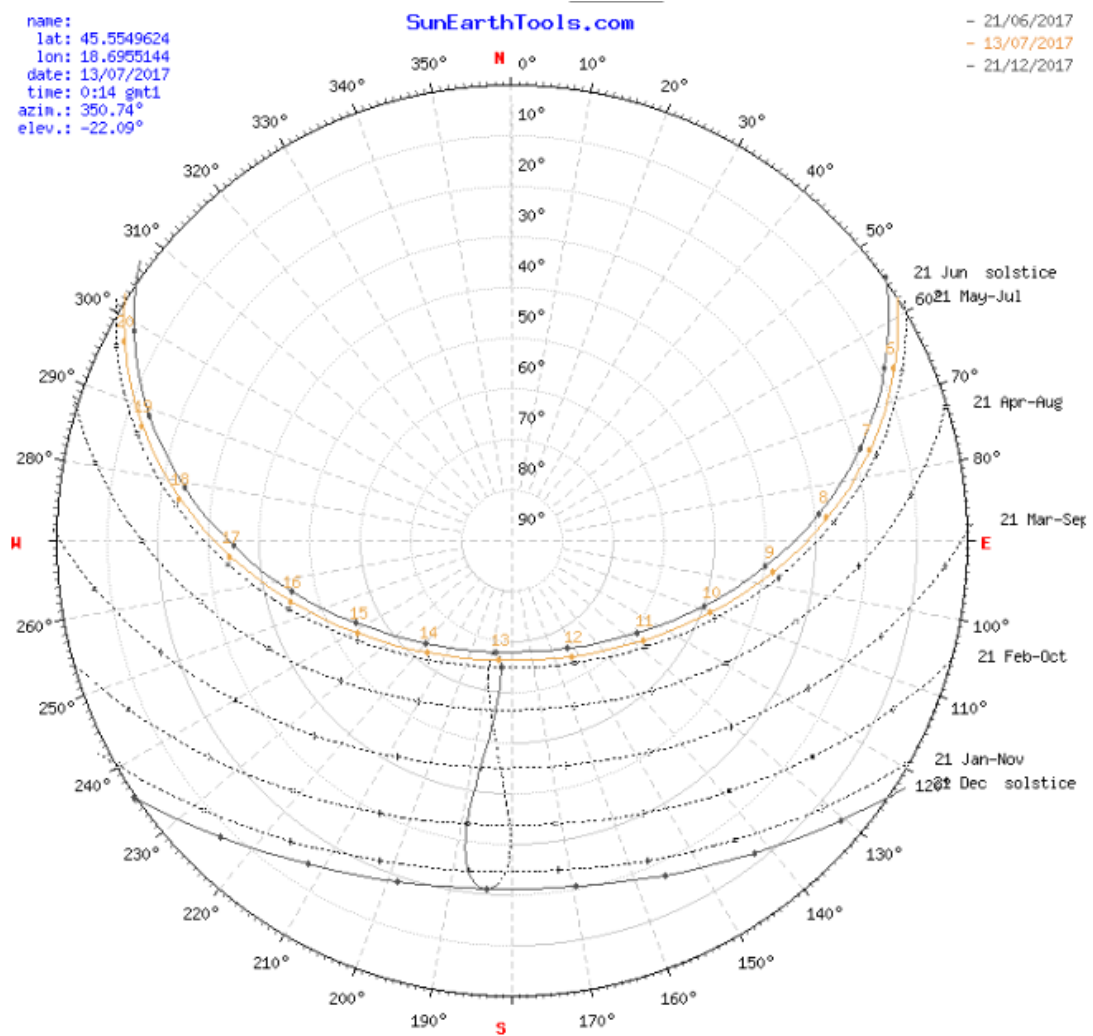
Na osnovu velikog broja mjerenja [12] Charles R. Landau je dao precizniju formulu nagiba modula koji će rezultirati sa najvećom proizvodnjom energije kroz 365 dana. On je podijelio geografsku širinu na 3 dijela:

- do 25°, kut se dobiva množenjem  $\phi$  sa 0,87
- od 25° do 50° množi se sa 0,76 te se dodaje još 3,1°
- za  $\phi$  preko 50°, računica je znatno složenija

Prema toj teoriji, najpovoljniji nagib za grad Osijek je:

$$\beta = 45,5^\circ \cdot 0,76 + 3,1 = 37,68^\circ$$

Mnoge literature i mjerenja nalažu kako je za naše područje dovoljan i nagib u rasponu od 30 do 40 stupnjeva.



**Slika 3.7.** Putanja Sunca za grad Osijek [13]

Detaljna putanja Sunca za grad Osijek pokazuje kako Sunce u ljetnom vremenskom razdoblju izlazi na sjeveroistoku, svoju najvišu točku postiže oko 13 sati, te zalazi na sjeverozapadu. To je razlog zašto mnogi stručnjaci svoje idealne nagibe spuštaju malo ispod nagiba solarnog podneva.

### 3.1.2. Orijentacija ili azimut modula

Kao što je prije bilo opisano, orijentacija modula prema jugu ili azimut je jako važan čimbenik u korištenju sunčeve energije. Različitim kutovima azimuta postižu se različite orijentacije modula, a time direktno i utjecaj na spektar valnog zračenja koje će modul apsorbirati odnosno, utjecaj na potencijal energije koju modul može apsorbirati te predati svojim trošilima na izlazu.

Najveći energetska vrijednost postići će modul koji je vremenski izložen što dužem sunčevom zračenju. Obzirom da je učinkovitost fotonaponskih modula oko 25 %, poželjno je smanjiti gubitke u preostalom procesu. Prije svega, proces počinje već samom izlaganju Suncu. To znači da se na početku teži odabiru orijentacije modula koja će ga izlagati najmanje raspršenom zračenju, a to je direktno sunčevo zračenje. Ono sa sobom nosi najviše energije što je i opisano u prijašnjim poglavljima te je stoga i najpoželjnije odnosno energetske najvrijednije.

Kut incidencije kojeg označujemo  $\theta$  je kut između sunčevog zračenja na površinu i normale na tu površinu, odnosno normale na modul. Kako je za veću proizvodnju potrebno da taj kut bude što manji, potrebno je odrediti kombinaciju nagiba i azimuta koji bi tako omogućili da se kut incidencije podudara sa normalom na modul. U tom slučaju, radilo bi se o direktnom zračenju te bi imali najveći potencijal za proizvodnju električne energije. Kut incidencije se računa:

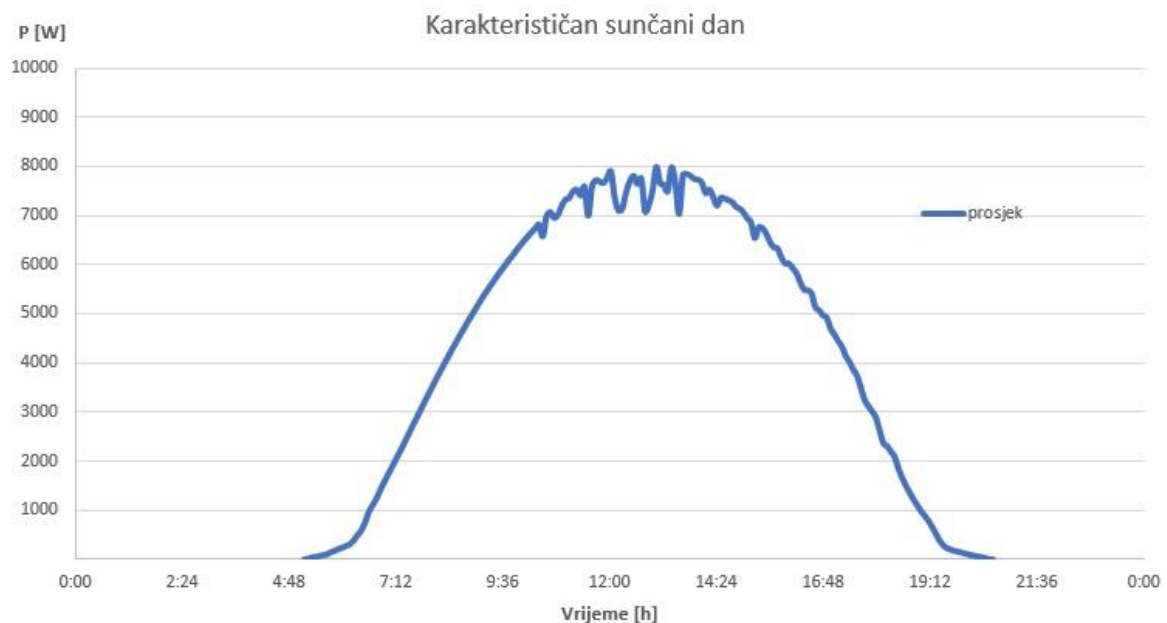
$$\cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega$$

(3-10)

U idealnoj situaciji, trebali bismo imati modul koji prati putanju Sunca. Takve sustave zovemo dvoosni sustavi jer pomiču svoj nagib i svoju orijentaciju. Ako gledamo samo nagib, on doprinosi povećanju proizvodnje energije najviše tijekom sezona, dok azimut može povećati dnevnu proizvodnju svojim zakretanjem oko osi.

## 3.2. Krivulja proizvodnje i potražnje

Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih modula direktno ovisi o sunčevom zračenju tijekom dana. Ovisno o vremenskim prilikama u atmosferi postižu se različiti oblici krivulja proizvodnje te prema njima razlikujemo 4 karakteristična dana. To su: karakterističan sunčan dan, pretežno karakterističan dan, karakterističan pretežno oblačan dan i karakterističan oblačan dan. Tijekom vedrog i sunčanog dana, krivulja poprima idealnu krivulju koju karakterizira maksimalna proizvodnja sredinom dana. Tada je i zračenje direktno, odnosno okomito i nema dodatnih rasipanja.

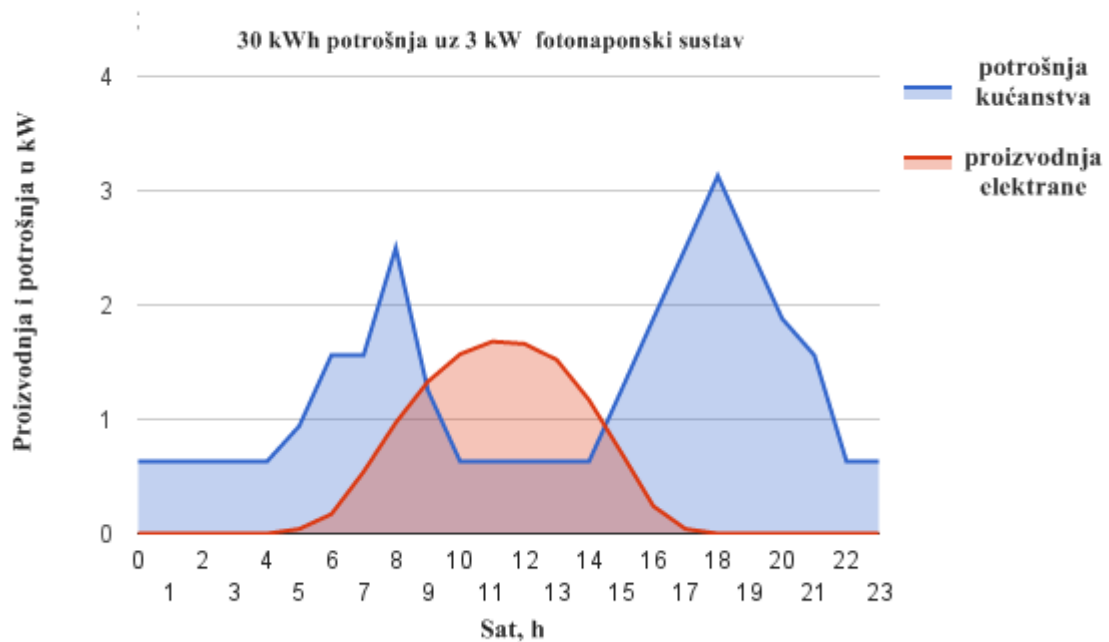


**Slika 3.8.** Sunčani karakterističan dan elektrane ETFOS 1 [14].

Slika 3.8. pokazuje krivulju proizvodnje za sunčani karakterističan dan kojeg je zabilježila Fotonaponska elektrana ETFOS 1 u ljetnom razdoblju 2014. godine. Svoj vrhunac proizvodnje elektrana postiže u središnjim satima dana kada je ozračenost najveća, a to je oblik krivulje kojega ćemo dalje koristiti za procjenu.

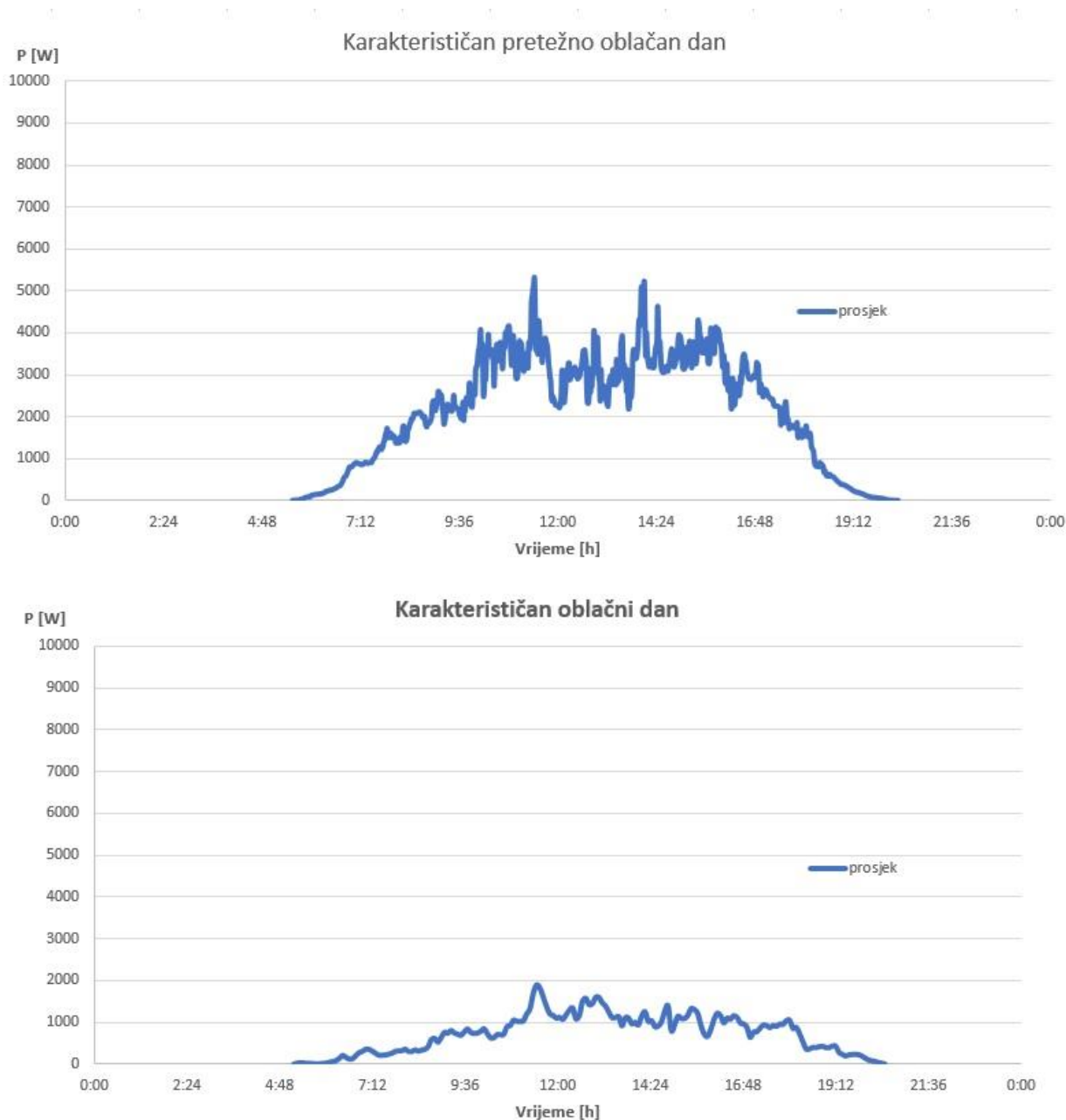
Krivulja proizvodnje u osnovi prati kretanje Sunca odnosno proporcionalna je kutu elevacije Sunca ( slika 3.6. ). Međutim, najzahtjevnije pitanje je kako krivulja proizvodnje može zadovoljiti potrebe kućanstva ili industrije čije krivulje su znatno drugačijeg oblika. Primjer kućanstva koje svoju potrošnju pokriva solarnim sustavom od 3 kW vidimo na slici 3.9..Vidimo kako vršne vrijednosti potrebe za električnom energijom kućanstvo postiže u 8 sati ujutro te u 19 sati navečer.

Takva krivulja predstavlja tipičan oblik krivulje potražnje kućanstava, ali i većih objekata. Zahtjev koji se postavlja inženjerima je kako pronaći rješenje za najučinkovitije korištenje energije koje mora zadovoljavati tehnološke, ekonomske i ekološke uvjete. To znači da je potrebno naći rješenje gdje će se električna energija dobivena iz fotonaponskog sustava iskoristi u potpunosti ili u najvećoj mjeri, da je taj način ekonomski isplativ te da je neutralan ili nepostojan utjecaj po okoliš.



**Slika 3.9.** *Primjer proizvodnje i potrošnje kućanstva [15]*

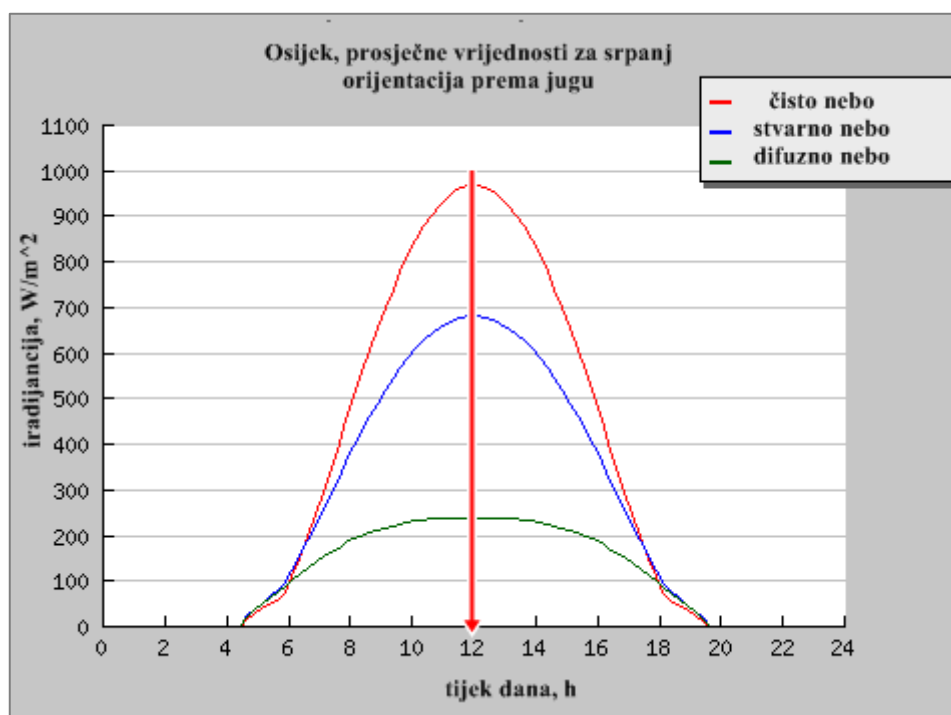
Opcija pohranjivanja energije se tehnološkim napretkom sve više razvija, međutim, najpovoljniji je i dalje slučaj korištenja energije odmah uz mjesto proizvodnje. Unazad nekoliko godina, prosječne cijene fotonaponskih modula su sve niže te se takvi oblici energije smatraju izuzetno povoljnim. Najveći trošak koji se pojavljuje u ovakvim sustavima je promjenjiva i nepredvidiva narav prirode koja uzrokuje gubitke kao i neučinkovito korištenje dobivene energije. Na slici 3.10. prikazujemo proizvodnju spomenute elektrane ETFOS 1 u vremenskom razdoblju sa izuzetno lošim vremenom te smanjenom proizvodnjom električne energije.



**Slika 3.10.** Niska proizvodnja električne energije uzrokovana nepovoljnim vremenskim uvjetima [14]

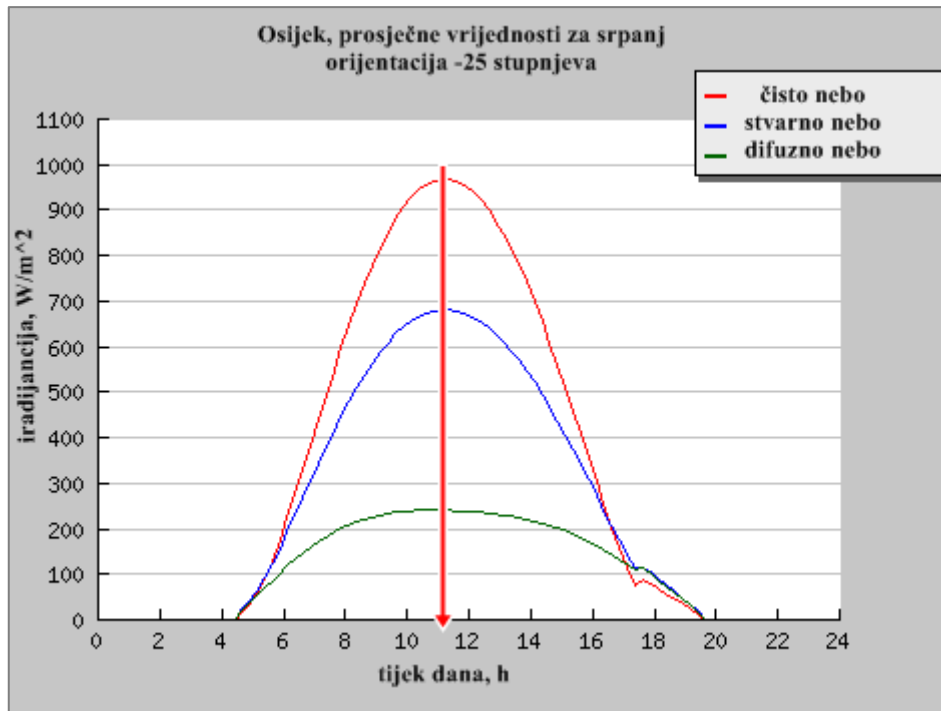
Spomenute elektrane ETFOS 1 i kućna elektrana 3 kW svoje proizvodnje pri fiksnom azimutu koji je gotovo  $0^\circ$ , odnosno usmjeren prema jugu. Promjenom orijentacije, vršna vrijednost, a samim time i krivulja poprimaju drugačiju vrijednost, odnosno oblik. Kao što smo rekli, svojom orijentacijom, ulazne zrake padaju okomito ( direktno zračenje ) prije ili nakon dosadašnje orijentacije ka jugu, ovisno o tome jesmo li ih pomjerali negativno prema istoku. ili pozitivno prema zapadu. Na osnovu mjerenja koja posjeduje PVGIS, prikazat ćemo utjecaj promjene orijentacije na dozračenost energije na površinu modula

Prema slikama od 3.11. do 3.15. vidimo kako promjena orijentacije FN modula prema istoku ili prema zapadu utječe na vrhunac ozračenosti energije u različitim trenucima tijekom dana. Slika 3.11. prikazuje početno stanje modula koji je lociran na području grada Osijeka pod kutom  $35^\circ$  prema horizontali te sa orijentacijom prema jugu. Postoje tri krivulje kojima PVGIS nastoji procijeniti gustoću energetskog toka koji u vremenu padne na jediničnu površinu plohe modula.. Ovisno o vremenskim prilikama u atmosferi, razlikujemo dozračenost u vrijeme čistog neba, zatim dozračenost koja prikazuje stvarno nebo koje nije pod direktnim zračenjem Sunca zbog atmosfere, te oblik gdje je stvarno nebo podvrgnuto dosta smetnji, a to nazivano raspršeno ili difuzno zračenje odnosno u našem slučaju difuzno nebo.

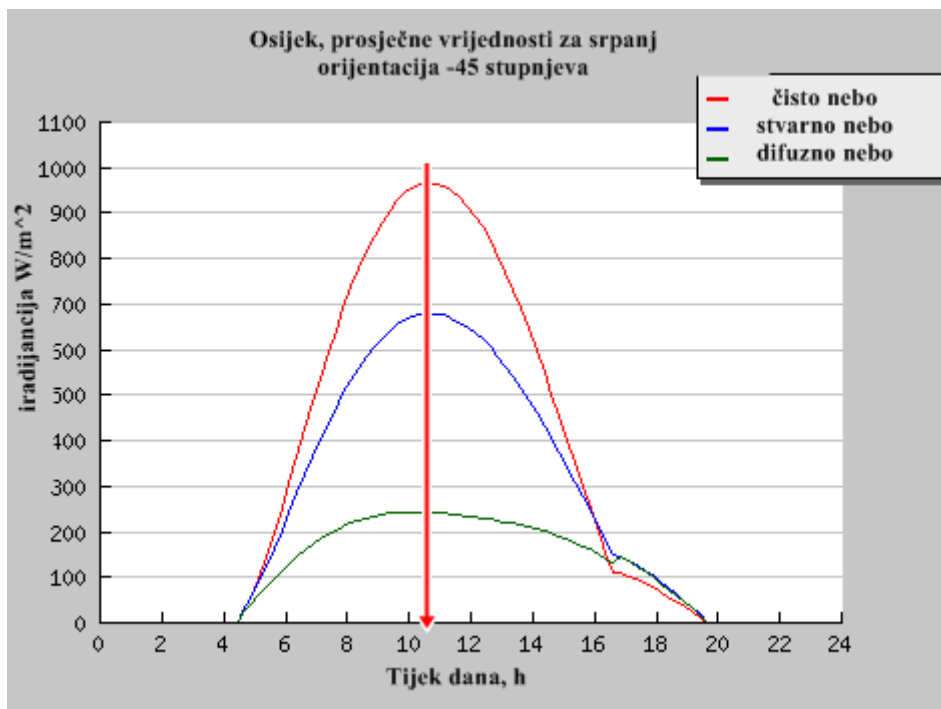


**Slika 3.11.** Ozračenost FN modula kada je orijentacija prema jugu

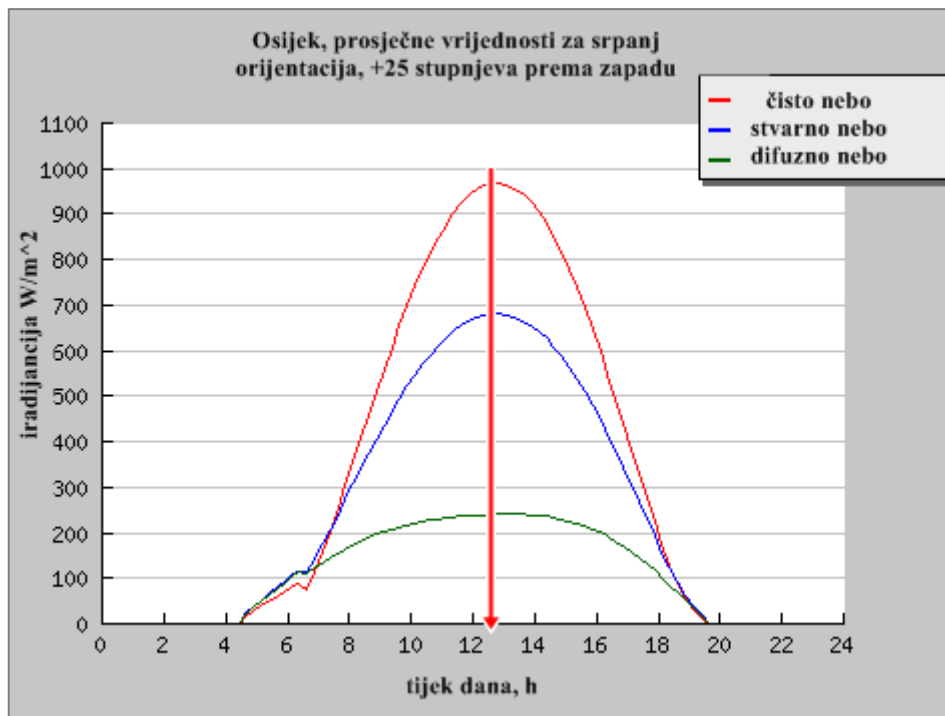




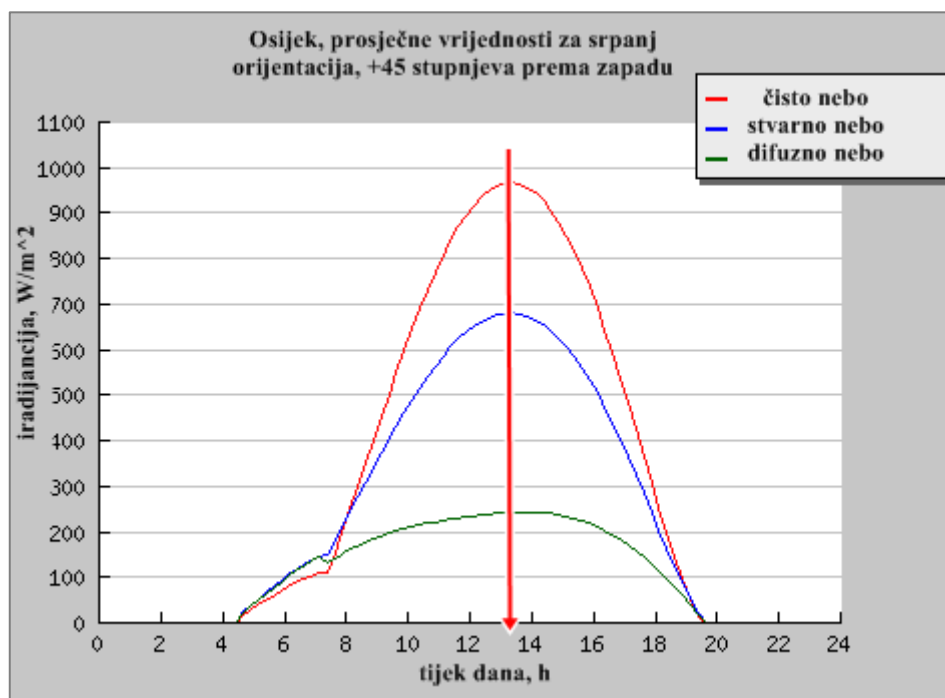
Slika 3.12. Ozračenost FN modula sa orijentacijom 25° istočnije



Slika 3.13. Ozračenost FN modula sa orijentacijom prema jugoistoku



slika 3.14. Ozračenost FN modula sa orijentacijom 25° zapadnije



Slika 3.15. Ozračenost FN modula kada je orijentacija na jugozapadu

Kako je i prikazano prema slici 3.11. vrhunac ozračenosti se postiže u podne kada je Sunce u svojoj najvišoj točki na obzoru. Taj vrhunac prate sve tri krivulje. Mijenjajući dalje orijentaciju FN modula prema istoku, vidimo kako se vršna vrijednost ne mijenja, ali da se mijenja vrijeme u

kojima se postiže najveća ozračenost. U tim slučajevima ( slika 3.12.i slika 3.13. ) vrhunac se događa oko 11 sati odnosno 10.30 sati. Ako bismo takav sustav zakrenuli zapadnije, došlo bi do pomjeranja vršnih vrijednost udesno, što bi označavalo kasnije postizanje vršnih vrijednosti.

Ovakvim procjenama možemo zaključiti kako se promjenama azimuta modula može utjecati na izlaznu karakteristiku proizvodnje jer je ozračenost modula proporcionalna proizvodnji, ali umanjena za učinkovitost cjelokupnog sistema. Zbog istog razloga, moguće je u određenoj mjeri prilagoditi dijagram proizvodnje dijagramu potrošnje odnosno, potražnje što ćemo pokušati i dokazati matematičkim modelom u 4. poglavlju.

Osim ozračenosti koja se izražava u  $W/m^2$ , za proizvodnju su nam potrebni korisni stupanj djelovanja modula, ukupni gubici sustava te površina elektrane izražena u  $m^2$ . Dobivena energija iz fotonaponskih modula prema [5] glasi:

$$E_{FN} = E_z \eta_m A_m \quad (3-11)$$

gdje su:

$E_z$ - upadna energija sunčeva zračenja na module,  $kWh/m^2$

$\eta_m$ - stupanj djelovanja modula

$A_m$  - površina modula,  $m^2$

Stvarno dobivena energija iz fotonaponskog sustava je ipak nešto manja te se množi sa koeficijentom 0,80 što daje jednadžbu:

$$E_{ST} = E_{FN} \cdot 0,80 \quad [kWh] \quad (3-12)$$

Na osnovu tih relacija, simulirat ćemo što će se dogoditi sa FN elektranom velikih površina ako je zakrećemo u određenom smjeru sa ciljem postizanja vršnih vrijednosti u različitim periodima tijekom dana.

Fiksni sustavi imaju samo jednu moguću kombinaciju azimuta i nagiba pri kojoj mogu proizvesti najveću količinu električne energije. Međutim, gledano sa stajališta ekonomije proizvodnje, nekada je moguće optimum energetske vrijednosti zamijeniti sa ekonomičnom proizvodnjom. U nastavku ćemo opisati utjecaj proizvodnje i potražnje na tržišnu cijenu električne energije.

### 3.3. Tržište električne energije

Tržište je mehanizam koji omogućuje kupcima i prodavačima da u međusobnoj interakciji kroz komunikaciju i dogovor zadovolje svoje potrebe. Tržište električne energije je specifično zbog karakteristika i svojstava električne energije koja značajno utječe na tržište. Neke od karakteristika su:

1. proizvodnja iz različitih oblika izvora energije čija cijena utječe na troškove proizvodnje i cijenu korištenja
2. električnu energiju je nemoguće skladištiti, a potražnja se konstantno mijenja
3. prijenos na veće udaljenosti zahtjeva veća ulaganja u infrastrukturu
4. troškovi vezani za okoliš, proizvodnju i prijenos

Kako ju je nemoguće skladištiti veličina tržišta je određena trenutnom potražnjom, a ne potražnjom u dužem vremenskom periodu. Tržište električne energije je specifično jer u svakom trenutku mora osigurati jednakost proizvodnje i potrošne, bez obzira na cijenu, kako bi se osigurala stabilnost sustava.

Cijena električne energije se može podijeliti na ulaznu i izlaznu cijenu. Ulazna predstavlja razinu stvarnih, standardiziranih i priznatih troškova proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije. Ovisno o organizacijskoj strukturi, razlikuje se cijena proizvodnje pojedinačne elektrane, cijena na pragu prijenosa i cijena na pragu distribucije, odnosno krajnjeg potrošača. Transformacijama ulaznih cijena kroz tarifni sustav dobije se izlazna cijena električne energije.

U elektroenergetskim sustavima u kojima na tržištu električne energije vlada monopol, tvrtka određuje cijenu električne energije na temelju troškova proizvodnje, prijenosa, distribucije i ostalih troškova osiguravanja električne energije. Cijenu može određivati i državna nezavisna regulatorna agencija koja regulira elektroenergetski sustav. Ona propisuje tarifnu metodologiju za određivanje cijena.

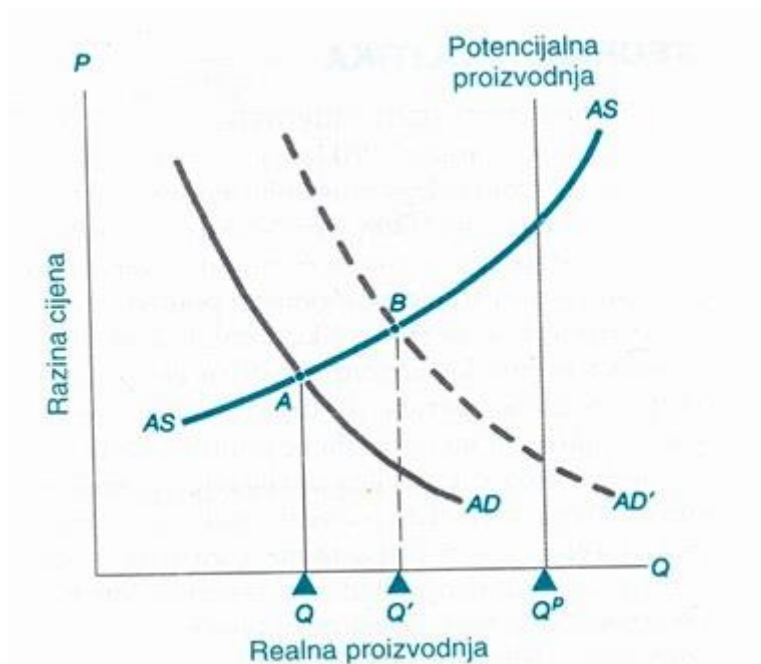
Cilj tarifne metodologije je formiranje tarifa koje su:

1. razumne, nediskriminirajuće, objektivne i transparentne
2. zasnovane na opravdanim troškovima rada i održavanja, zamjene, izgradnje, rekonstrukcije postrojenja, te troškovima amortizacije i poreza, uzimajući u obzir stopu povrata ulaganja te vodeći brigu o zaštiti okoliša i kupca

3. zasnovane na međunarodnoj praksi
4. jednostavne i razumljive
5. uspostavljene tako da omogućuju elektroprivrednim društvima odgovarajući tok prihoda što pruža mogućnost osiguranja povrata sredstava

Opisani način određivanja cijena osigurava formiranje što realnije cijene električne energije.

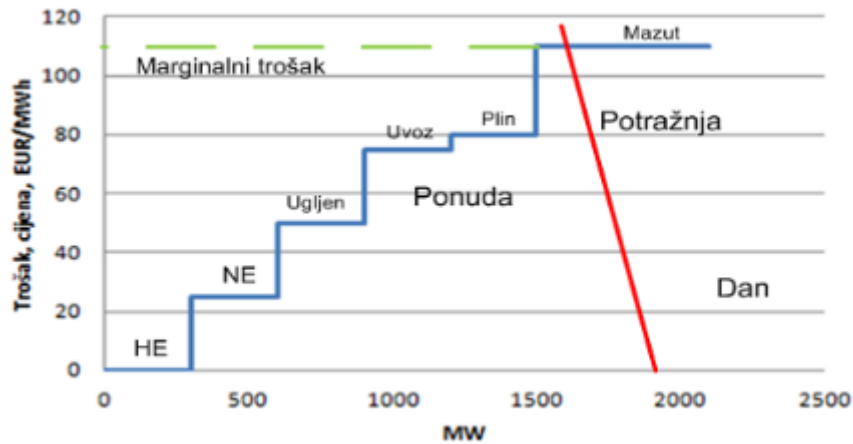
Zakon ponude i potražnje je jedan od temeljnih zakon određivanja cijene. Krivulja agregatne potražnje kao ukupne potražnje za energije je označena AD (engl. *aggregate demand*) te je padajuća što je i karakteristično za svaku potražnje bilo kojeg proizvoda. U našem slučaju, radi se o proizvodnji električne energije. Ukupna ponuda svih proizvođača je označena sa AS (engl. *aggregate supply*) te predstavlja krivulju ponude. Ona je uvijek rastućeg nagiba. Na vodoravnoj osi je količina proizvoda odnosno proizvodnje, dok je vertikalna os raspon cijena (slika 3.16).



**Slika 3.16.** Utjecaj povećanja potražnje na cijenu električne energije [16]

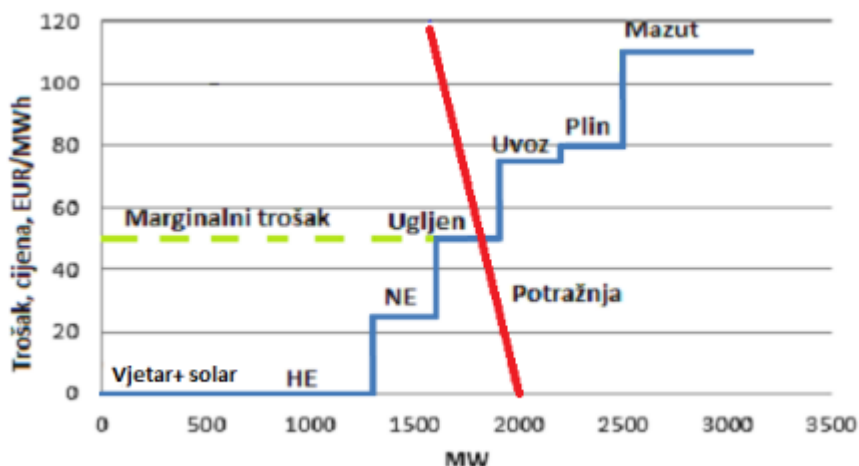
Dakle, vidimo kako će u našem slučaju promjena potražnje porasti što se odnosi na kupce električne energije. To znači da će se krivulja pomaknuti u desno. Obzirom da dolazi do povećane potražnje za energijom, njezinom pomicanje uzduž krivulje ponude će značiti nužnost veće proizvodnje. Na taj način, osim povećanja proizvodnje, porasti će i cijena električne energije što znači porast troškova kroz resurse, samu proizvodnju, distribuciju i slično.

Proizvodnja električne energije iz različitih oblika energije postiže i različite cijene odnosno, ima različite troškove proizvodnje. Na slici 3.17. vidimo kako pojedine elektrane imaju utjecaj na cijenu proizvedenog MWh energije.



**Slika 3.17.** Potražnja za električnom energijom i cijena korištenja [17].

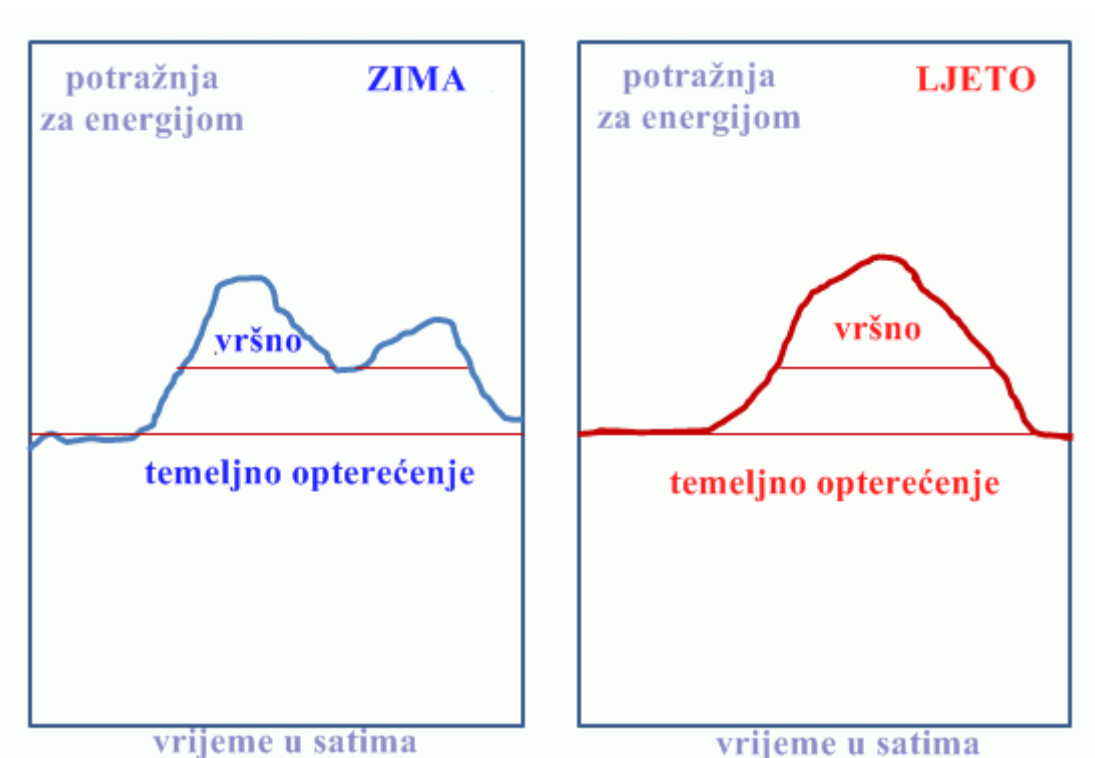
Potražnja za električnom energijom je oko 1 800 MW. Ponuda (engl. *merit order*) električne energije postiže razne cijene ovisno o način dobivanja tako je u našem slučaju najjeftinije dobivanje energije iz hidroelektrana, dok je najskuplje korištenje mazuta. Obzirom da je to prikaz dnevne potražnje za energijom u vrijeme naoblake i sa nepostojanim vjetrom, proizvodnja iz FN elektrane ili vjetroparkova nije moguća te je najjeftinija opcija korištenje hidroelektrana. Sustav formiranja cijena prikazan je na slici 3.18..



**Slika 3.18.** Potražnja za električnom energijom tijekom sunčanog i vjetrovitog dana [16].

Kada bi bilo moguće proizvoditi električnu energiju iz FN elektrana i iz vjetroparkova, tada bi njihova niska cijena proizvodnje utjecala na pomicanje ponude u desno, što bi uz istu potražnju značilo i manje marginalne troškove.

Karakteristični oblici potražnje za energijom u zimskim i ljetnim danima prikazani su na slici 3.19.. Njihova dnevna potražnja za energijom je pokrivena temeljnim elektranama, dok vršne vrijednosti mogu biti pokrivenne elektranama na biomasu, a ljeti i FN sustavom jer brzo proizvode energiju, a relativno su jeftini.



**Slika 3.19.** Prikaz potražnje energijom u ljetnom i zimskom razdoblju [18]

## 4. SIMULACIJE

Glavna problematika ovog rada se zasniva na određivanju orijentacije i nagiba modula u cilju zadovoljenja potreba i potražnje za energijom sa što ekonomičnijom i što učinkovitijim načinom korištenja.

Rad se fokusira na module, a time i elektrane sa stalnim kutom nagiba i orijentacije. Općenito, za svaku lokaciju postoji kombinacija kutom instaliranih modula ( $\beta^{\max\_out}, \gamma^{\max\_out}$ ) koja povećava izlaznu vrijednost modula ( engl. *output* ) tijekom životnog vijeka (  $Q^{\max\_out}$  ) i nazivamo je energetske optimumom. njegova jednadžba je sljedeća:

$$Q^{\max\_out} = \max \int_0^T q(t, \beta, \gamma) dt \quad (4-1)$$

Ako se cijena tijekom vremena ne bi mijenjala, tada bi prikazana kombinacija kutova ujedno davala i najveću vrijednost cijelog sistema. Međutim, cijena električne energije nije konstantna tijekom dana i godine. Uzimajući u obzir da se vrijednost električne energije korištenjem fotonaponskih elektrana mijenja i uvelike ovisi o troškovima sustava koji su niži sa smanjenjem potražnje, cijena dodatne proizvodnje iz fotonaponskih sustava u određenoj točki je dana marginalnim troškovima odnosno uštedom korištenja te elektrane u tom vremenu. Svi ti troškovi su uzeti u obzir na tržištu električne energije i utječu na cijenu. Na osnovu toga postoje kombinacije kutova koji vode do najveće vrijednosti sustava ( engl. *system value* ) te su dani relacijom (4-2) koja glasi:

$$V^{\text{opt}} = \max \int_0^T q(t, \beta, \gamma) p(t) dt \quad (4-2)$$

Takva se kombinacija kutova  $\beta^{\text{opt}}$  i  $\gamma^{\text{opt}}$  može interpretirati kao kombinacija kutova koja maksimizira profit investitora na način da prodaje proizvedenu energiju u trenucima visoke potražnje.

Na osnovu toga možemo postaviti temeljno pitanje ovog rada:

*Postoji li kombinacija kutova (  $V^{\text{opt}}$  ) koja odstupa od energetske maksimuma (  $V^{\max\_out}$  ), a istovremeno sustav čini isplativijim?*

$$V^{\max\_out} = \int_0^T q(t, \alpha^{\max\_out}, \beta^{\max\_out}) p(t) dt \leq V^{\text{opt}} = \int_0^T q(t, \alpha^{\text{opt}}, \beta^{\text{opt}}) p(t) dt$$



U cilju pronalaska rješenja koristit će se računalni simulacijski program Solarius PV. Spomenuti Solarius je profesionalna programska podrška namijenjena za dizajniranje fotonaponskih sustava te analizu njihove učinkovitosti, isplativosti i održivosti. U ovom radu poslužit će za procjenu proizvodnje električne energije ovisno o postavljenim kutovima te njihovu isplativost.

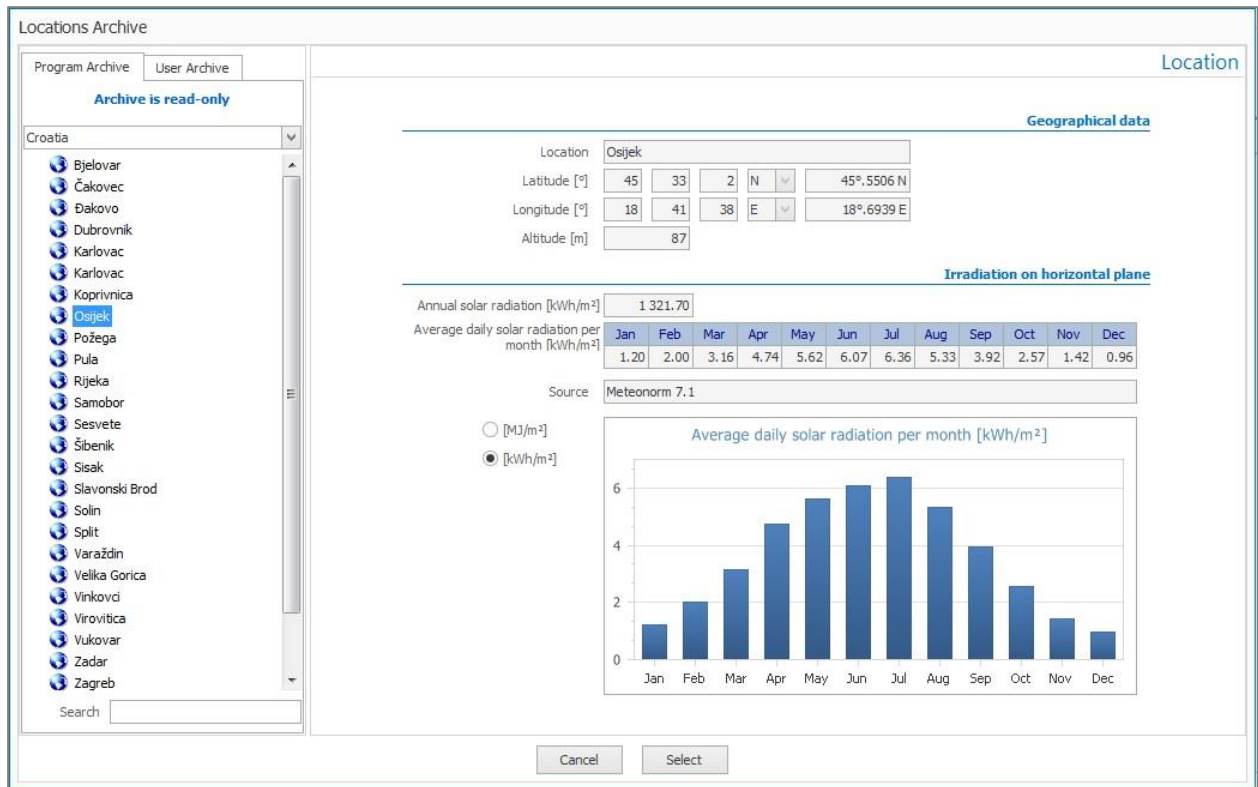
Kapaciteti fotonaponskih sustava obuhvaćaju velik spektar mogućnosti i područja primjene. Ovisno o potrebnoj količini i profilu potraživane energije grade se veći ili manji pogoni fotonaponskih sustava. Prema toj podjeli rad se dijeli na instalirane kapacitete u kućanstvu te velike industrijske kapacitete. Za analizu kutova u kućanstvima koristit će se Solarius dok će se veliki pogoni analizirati u Excelu na osnovu dostupnih podataka sa stranice PVGIS-a koji daje procjenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava na temelju zemljovida odnosno meteoroloških mjernih postaja koje izravno ili neizravno mjere sunčevo zračenje.

#### **4.1. Kućanstvo**

U nužnosti korištenja obnovljivih izvora energije politika odigrava važnu ulogu. Svojim poticajnim cijenama uvelike potiče potrošače na djelovanje. U prvom redu, to se odnosi na male potrošače ili kućanstva. Daljnjom administracijom pruža svim potrošačima mogućnost postizanja tzv. statusa povlaštenog proizvođača električne energije čime korisniku omogućuje povoljnu prodaju viška električne energije u elektroenergetski sustav. Dotadašnji potrošači postaju proizvođači koji trguju svojim proizvedenim kilovatima te tako čine tržište električne energije znatno dinamičnim i kompleksnijim. Instalirani kapaciteti u kućanstvu su manjih snaga, u rasponu od nekoliko kilovata do nekoliko desetaka kilovata. Glavna namjera potrošača koji se na to odlučuju je pored proizvodnje vlastite energije umanjiti i troškove opskrbe koliko je god to moguće. Hrvatski operator tržišta električne energije ( HROTE ) je nadležan za sklapanje ugovora o otkupu električne energije i isplatu poticaja povlaštenim proizvođačima električne energije. Visine tarifnih stavki u reguliranom sustavu poticanja koje se isplaćuju povlaštenom proizvođaču za proizvedenu električnu energiju iz postrojenja fotonaponskih elektrana su prikazane u tablici 4.2.. Ovisno o načinima postavljanja instalirane elektrane i korištenja sustava vode ili grijanja stječu se dodatne tarifne stavke.

Za potrebe rada, simulirat ćemo potražnju električne energije peteročlane obitelji. Zbog nužnosti lokacije, odnosno geografske širine i dužine što direktno utječe na iradijaciju te posljedično

proizvodnju uzete su koordinate grada Osijeka ( Sl. 4.1. ). Solarius PV pruža mogućnost odabira iradijacije za mnogo svjetskih među kojima nalazimo i nekolicinu hrvatskih.



**Slika 4.1.** Odabir lokacije grada Osijeka i dostupna iradijacija

Nakon odabira grada, automatski daje prosječnu godišnju te dnevnu dozračenost po mjesecima koja doprije na ravnu plohu osječkih koordinata. Izvor iz kojeg podatke obrađuje je Meteonorm 7.1.. Osim dozračenosti Solarius daje mogućnost zasjenjenja elektrane zbog stambenog utjecaja okoline ili prirodnih prepreka kojima bi se smanjio utjecaj dnevne proizvodnje.

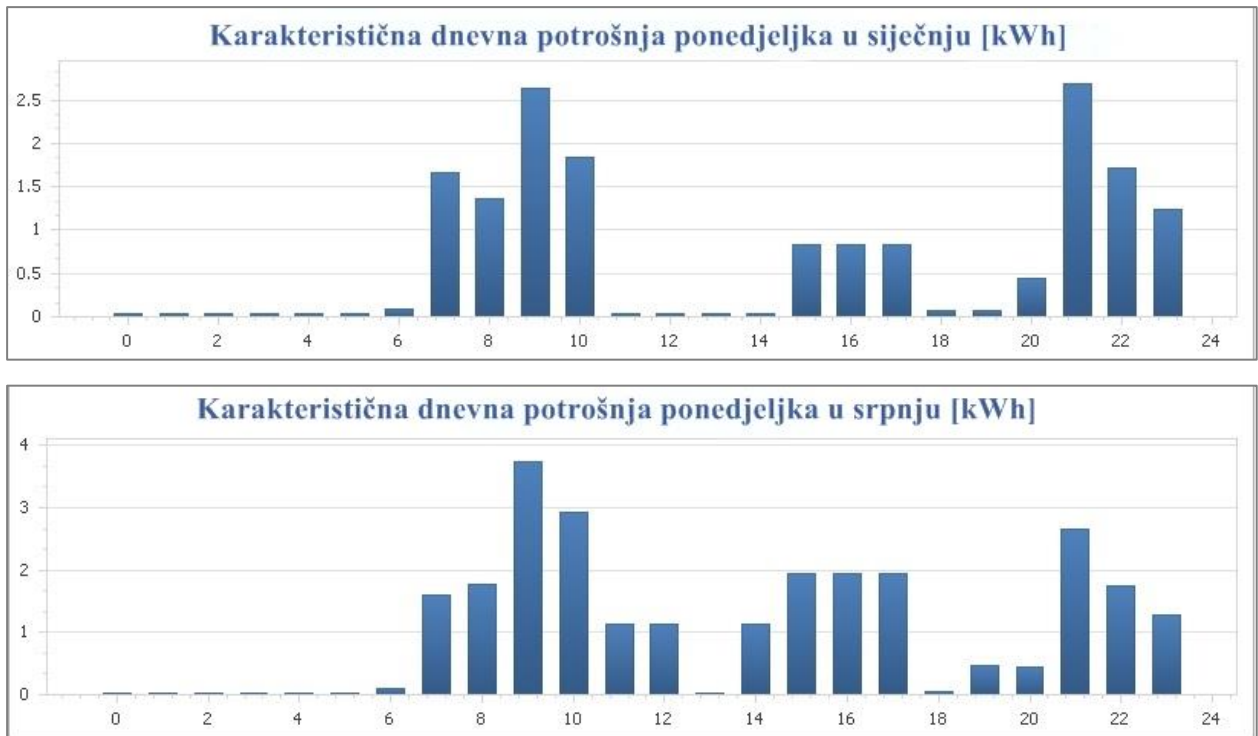
#### 4.1.1. Krivulja potrošnje

Glavna značajka koja određuje instalirani kapacitet je potrebna količina energije u kućanstvu. Za peteročlanu obitelj smo napravili simulaciju njihovi potreba kroz pojedine uređaje. U svojoj arhivi, Solarius već nudi godišnju krivulju potražnje koja u konačnici za 5 članova obitelji iznosi 3 900 kWh. Štoviše, pruža mogućnost kreiranja dnevne potrošnje svakog pojedinog uređaja u kućanstvu. Tablica 4.1. prikazuje glavne potrošače električne energije u kućanstvu.

**Tablica 4.1.** *Solariusova procjena trošila i količine preuzete električne energije za peteročlanu obitelj*

Trošilo	Godišnja Potrošnja [kWh]	Trošilo	Godišnja potrošnja [kWh]	Trošilo	Godišnja potrošnja [kWh]
Perilica rublja	942,00	TV	191,16	Računalo	43,16
Klima uređaj	572,00	Drugi TV	159,30	Preostala rasvjeta	39,79
Perilica posuđa	502,40	Mikrovalna pećnica	146,00	Osvjetljenje spavaće sobe	35,24
Usisivač	376,80	Sušilo za kosu	143,20	Osvjetljenje ostalih soba	35,24
Peglanje	314,00	Osvjetljenje boravka	77,74	Osvjetljenje kuhinje	32,25
hladnjak	219,00	Zamrzivač	70,08	<b>UKUPNO</b>	<b>3 899,35</b>

Odabirom vremenskog perioda u kojem koristimo trošila, dobiva se dnevni dijagram potrošnje. Karakteristični su dani u zimi i ljetni dani. Isto tako, razlikuje se potrošnja tijekom radnih dana te potrošnja tijekom vikenda. U nastavku će se prikazati karakteristični ponedjeljak u siječnju i srpnju. Dnevne krivulje potrošnje se razlikuju po količini i vremenu uporabe. Prepoznaju se vršne vrijednosti u prijepodnevrim satima te na kraju radnog dana. To se interpretira kao vrijeme odlaska na posao i dolaska sa posla kada ukućani uz kuhanje i pripremu obroka koriste veću količinu energije.



**Slika 4.2.** Usporedni prikaz karakterističnog ponedjeljka u kućanstvu zimi i ljeti

Povećanju potrošnje u ljetnim danima najviše doprinosi klima uređaj koji radi gotovo tijekom cijelog dana. Prema tome, potrebna količina energije je daleko veća ljeti nego zimi. Upravo slika 4.3. to i prikazuje.



**Slika 4.3.** Potrošnja električne energije po mjesecima

Na osnovu prikazane potražnje za energijom iz tablice 4.1. koja iznosi 3 899 kWh, instalirat će se fotonaponska elektranu kapaciteta 4,16 kW koju tvore dva niza od 8 modula snage 260 W. Time se nastoji, prvenstveno zadovoljiti potreba za električnom energijom, a potom i umanjiti račune dosadašnje opskrbe.

#### 4.1.2. Definiranje parametara mreže

Prije nego se počne dizajnirati elektrana, nužno je postaviti tehničke i ekonomske parametre. Tehničke parametre sustava određuje program automatski uz mogućnost dodatnog podešavanja, ovisno o zahtjevima i okolnostima u kojima se fotonaponska elektrana izgrađuje. Tako se primjerice unose minimalna i maksimalna temperatura kojoj će moduli biti izloženi, zatim se unosi očekivano opterećenje izmjenjivača, te ukupni gubici ( Prilog P.4.1. ).

Ekonomske parametre određujemo tarifama mreže. Njima definiramo strukturu troškova mrežne snage. Prema cjeniku dostupnom na stranicama Hrvatske elektroprivrede [19] te zbog jednostavnosti proračuna uzimamo Plavi jednotarifni model plaćanja električne energije koji uz njihov popust 5% iznosi 0,4938 kn/kWh. Zbog potreba valute, taj iznos prebačen u eure je 0,066 €/kWh. Dakle, jedan kilovatsat električne energije krajnji potrošač je obavezan platiti 0,066 €. Poticajne cijene (  $C$  ) koju dobivaju povlašteni proizvođači električne energije fotonaponskih elektrana dane su u tablici 4.2.. Korekcija poticajne cijene (  $C_k$  ) izražene u kn/kWh za električnu energiju proizvedenu iz proizvodnih postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije i kogeneraciju te isporučenu u elektroenergetsku mrežu za različite grupe proizvodnih postrojenja se računaju prema (4-3):

$$C_k = C \cdot k_1 \quad (4-3)$$

Ukupna poticajna cijena za integriranu fotonaponsku elektranu koja se koristi u slučaju kućanstva te koja nema dodatnih sustava za pripremu sanitarne tople vode i/ili grijanje pomoću obnovljivih izvora energije prema tablici 4.1. i prema relaciji (4-3) je iznosa 1,91 kn/kWh.

**Tablica 4.2.** Prikaz visina poticajnih cijena za sunčane elektrane priključene na prienosnu ili distribucijsku mrežu instalirane snage do uključivo 5 MW. [20]

Sunčane elektrane	Visina tarifne stavke [kn/kWh]	Korektivni koeficijent za korištenje toplinskog sustava na OIE k1	Minimalni omjer t0 (omjer instalirane toplinske snage i električne) potreban za ostvarenje korektivnog koeficijenta
Do 10 kW	<b>1,91</b>	1,2	0,25
Od 10 kW do 30 kW	1,70	1,1	0,20
Od 30 kW do 300 kW	1,54	1,03	0,15

Obzirom da se naš sustav od 4,16 kW gradi za obiteljsku kuću, svrstavamo je u integrirane sunčane

Feed In Tariff	
Feed in tariff [€/kWh]	0.2553
Feed in tariff duration [years]	25
General Data	
Total annual consumption [kWh]	3 899.35
Export tariff [€/kWh]	0.0000
Import tariff [€/kWh]	0.0660

**Slika 4.4.** Tarifni sustav

elektrane do 10 kW. Prema toj podjeli naknada za našu fotonaponsku elektranu iznosi 1,91 kn po proizvedenom kilovatsatu električne energije. Sve cijene su iz kuna preračunate u valutu eura 7,48 kn/€ (SI.4.4.) prema dostupnim informacijama [21] na dan tečajne liste 16. rujna 2017.g. ( Prilog P.4.2. ).

Višegodišnji trend izgradnje fotonaponskih sustava je utjecao i na smanjenje prosječnih troškova izgradnje. Prema [5] prosječni troškovi 2011.g. su bili oko 3 500 €/kW. Danas su cijene znatno

niže, te smo za prosječne troškove uzeli 2 200 €/kW. Dodatni troškovi održavanja su procijenjeni na 15 €/god. ( Sl. 4.5. ).

System construction cost

Project cost	Per kW	[€/kW]	2 200.00	[€]	9 152.00	✖
Professional fees	Fixed	[%]	0.00	[€]	0.00	
Other expenses				[€]	0.00	
<b>Total Cost [€]</b>					<b>9 152.00</b>	

---

One-off costs

Description	Characteristics	Year	Type of cost	[%]	[€/kW]	Amount [€]	+
Extraordinary maintenance		25	Fixed	0.33	7.21	30.00	-

---

Periodic costs

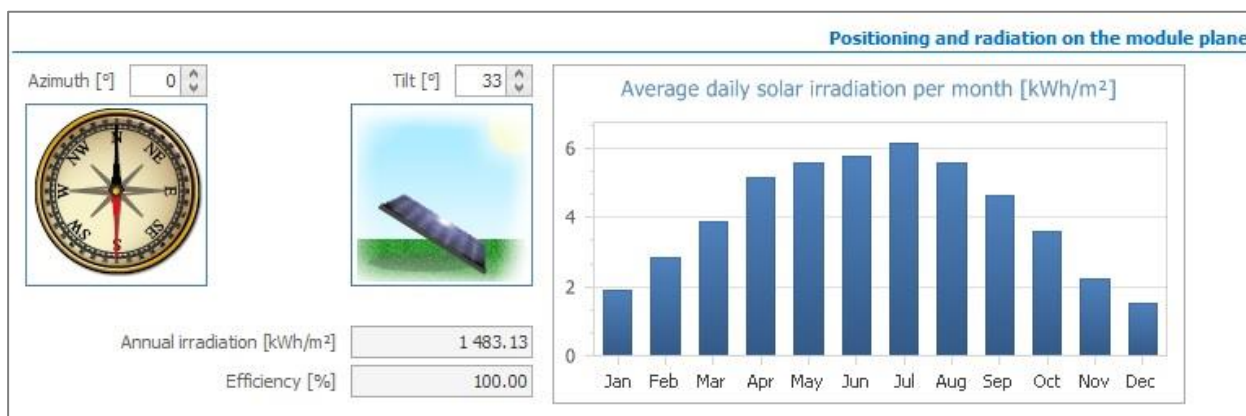
Description	Characteristics	Period	Duration	Type of cost	[%]	[€/kW]	Amount [€]	+
Maintenance		25	25	Fixed	0.16	3.61	15.00	-

**Slika 4.5.** Prikaz prosječnih i periodičkih troškova

Za instalirani sustav od 4,16 kW, a prema prosječnim troškovima od 2 200 €/kW dobivamo ukupne troška u iznosu od 9 152 € što u kunama iznosi 68 456 kn. Dodatni troškove će biti naknadno dodani u analizi isplativosti.

### 4.1.3. Fotonaponski sustav 4,16 kW

Kako bismo opskrbili kućanstvo dovoljnom količinom energije potrebno je dizajnirati generator odgovarajućih karakteristika. Važno je reći kako je sustav dizajniran za rad na mreži bez dodatnih mogućnosti akumuliranja energije. Prvi korak pri dizajniranju je određivanje kuta modula. Solarius PV za lokaciju grada Osijeka automatski daje najbolju kombinaciju kutova. Dakle, određuje azimut i nagib fotonaponskog modula pri kojoj na njegovu površinu dolazi najviše sunčeve energije ( Sl 4.6. ).



**Slika 4.6.** Optimalni kut za lokaciju grada Osijeka

U sljedećem koraku, potrebno je izabrati željenu tehnologiju modula te njegove karakteristike. Ovdje program također nudi preuzimanje već postojećih modula i karakteristika iz arhive. U ovom slučaju, karakteristike modula su unesene ručno prema internet katalogu [15]. Zbog povoljne cijene koristit će se polikristalna tehnologiju naziva SOLE 260. Njegove karakteristike su dane u prilogu. ( P.4.3. ). Nakon modula biraju se izmjenjivači. Važno je obratiti pažnju na snagu izmjenjivača koja ne smije biti manja od snage koju kumulativno daju fotonaponski nizovi. Izmjenjivač pri vršnoj snazi ne smije biti opterećen više od 120 %. Za potrebe ove elektrane, koristit će se ABB-ov izmjenjivač snage 4 200 W. U prilogu ( P.4.4. ) se nalaze njegove karakteristike. Fotonaponska elektrana 4,16 kW sastavljena je od 2 niza ( engl. *String* ) po 8 modula. Sveukupno ima 16 modula od 260 W. Točku maksimalne snage ( engl. *MPPT* ) odrađuje sam izmjenjivač ( engl. *Inverter* ) i to za oba niza ( P.4.5. ). Na kraju, program nudi estetsko uljepšavanje kao i jednopolne električne sheme ( P.4.6. ). Konačno stanje dizajniranog generatora je dano na slici 4.7..



Assisted generator design

---

**General Data**

Generator name:

Positioning modules:

Mounting structure:

Connection type:

**Module**

Module:

Material Type:

Peak power [W]:       mber of modules:

Module area [m<sup>2</sup>]:       Tot. Area [m<sup>2</sup>]:

---

**Positioning and radiation on the module plane**

Azimuth [°]:       Tilt [°]:

Annual irradiation [kWh/m<sup>2</sup>]:

**Inverter**

Inverter:

Phase type:       Dimens. [%]:

Nominal Power [W]:       Inverter nr.:

Integrated accumulation capacity [kWh]:

Settings	MPPT	N. modules	Str. X mod.
1		8	1 x 8
2		8	1 x 8

---

**Total**

Annual energy [kWh]:       Total Power [kW]:

Total extension [m<sup>2</sup>]:

**Slika 4.7. Fotonaponski generator**

Dizajniranjem generatora su dostupne sve potrebne informacije o sustavu nužne za njegov rad. Pokretanjem simulacije, moguće je u potpunosti analizirati njegov rad kao i isplativost cjelokupnog instaliranog sustava.

#### 4.1.4. Financijska analiza

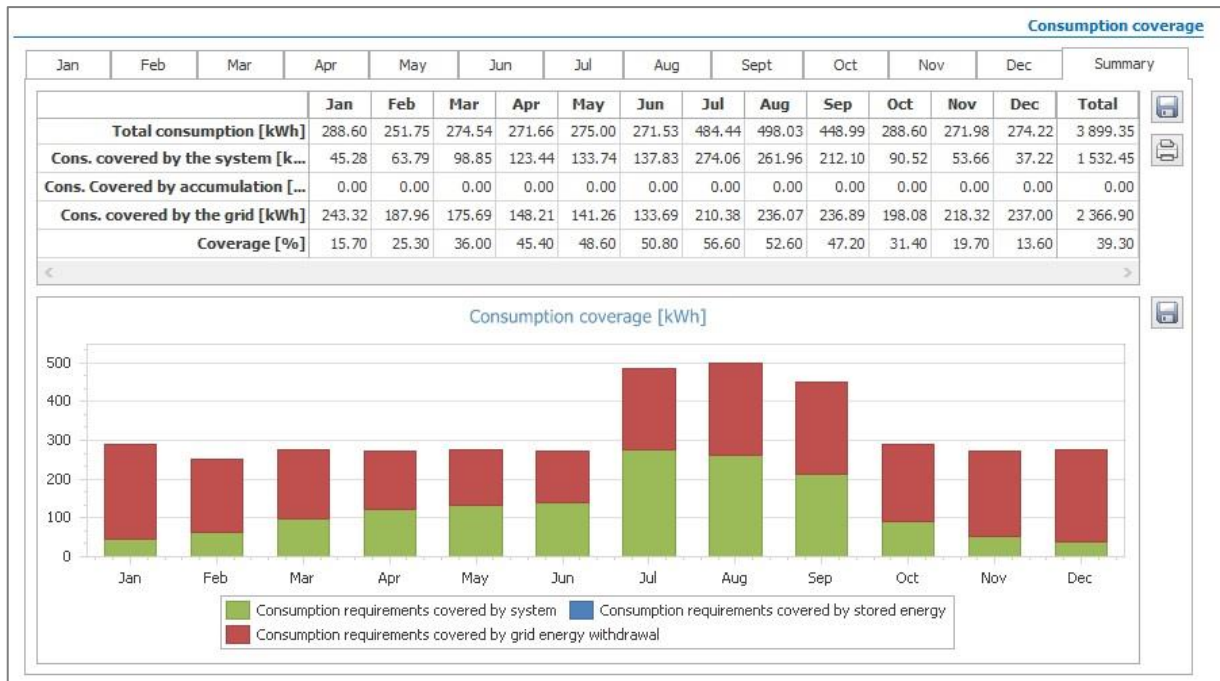
Koristeći opciju financijske analize, imamo mogućnost uvida u račune, potrošnju električne energije i isplativost. Slika 4.8. prikazuje ukupnu instaliranu snagu, količinu proizvedene električne energije te broj modula i izmjenjivača.

Total annual energy [kWh]	<b>4 624.54</b>
Total Power [kW]	<b>4.160</b>
Total number of modules	<b>16</b>
Total number of inverters	<b>1</b>

**Slika 4.8. Pregled fotonaponskog sustava**

Na osnovu toga, daljnjom se usporedbom procjenjuju svi faktori isplativosti i povrata ulaganja. Na slici 4.9. prikazani su rezultati simulacije fotonaponske elektrane. Rezultati su prikazani na godišnjoj razini iz čega je vidljivo kako niti u jednom mjesecu tijekom godine nije postignuta potpuna potreba za energijom. Razlog toga je karakteristična dnevna putanja Sunca odnosno,

karakterističan oblik proizvodnje fotonaponskih modula. Svoj vrhunac postižu za vrijeme podneva kada je Sunce gotovo okomito na površinu panela. Drugi razlog nepotpunog iskorištavanje proizvedene energije je krivulja potražnje koja svoje maksimume postiže u različitim periodima dana, najčešće prijepodne te u kasnim poslijepodnevним satima. Ovakav podatak ne znači nužno i neisplativost, štoviše, status povlaštenog proizvođača električne energije omogućuju vlasniku prodaju viška energije u mrežu.

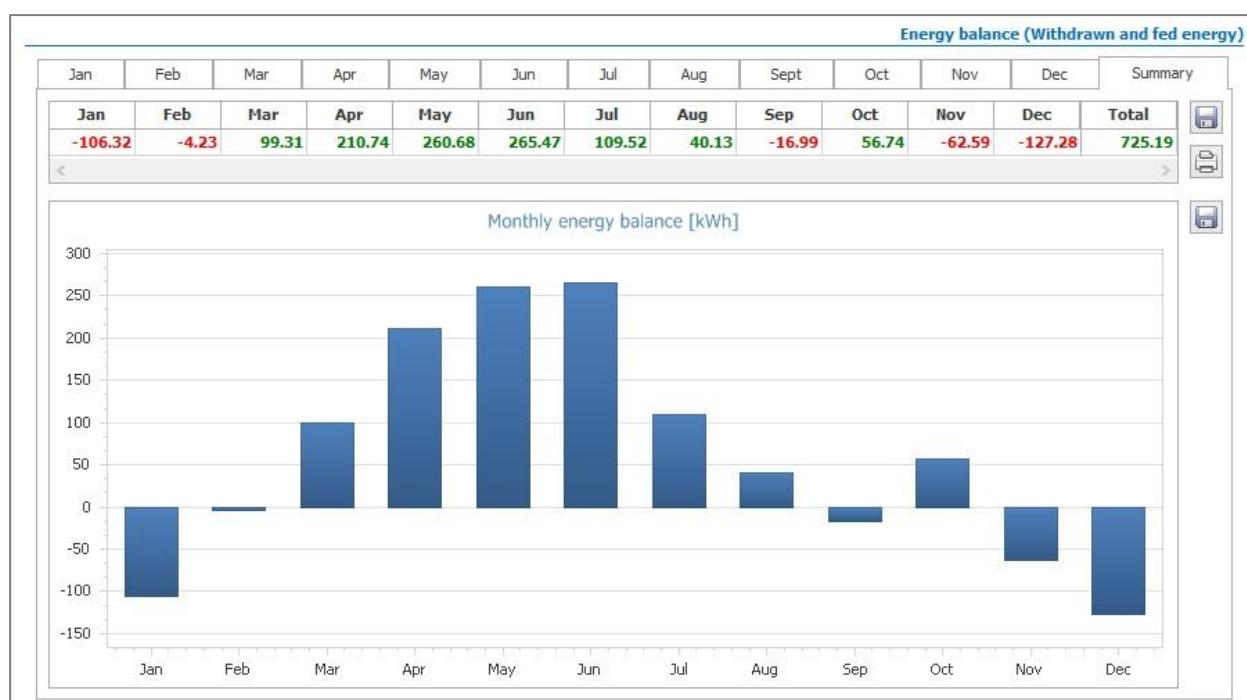


Slika 4.9. Pokrivanje potreba kućanstva



**Slika 4.10.** Karakteristična srijeda u srpnju

Iako se ne može u potpunosti zadovoljiti potrebe kućanstva za električnom energijom iz vlastite proizvodnje, na slici 4.10. se jasno vidi mogućnost i količina prodaje viška energije u mrežu. Stupci u dijagramu prikazuju potražnju za električnom energijom tijekom srijede u srpnju. Vidljivo je kako potražnja raste od 6 sati ujutro te svoj maksimum ima preko dana. Obzirom da je cijela potreba za tom količinom energije preuzeta od fotonaponskog izvora, stupac je označen zelenom bojom. To znači da je sustav u tim trenucima potpuno neovisan o elektroenergetskoj mreži te svu potrebu za električnom energijom napaja iz vlastitog izvora. Također, iz tablice iznad su vidljivi suficiti energije nastali zbog veće proizvodnje u tom periodu dana. Energija koja se proizvodi u 12h iznosi 2 400 kWh dok potražnja iznosi 1 133 kWh. U tom se trenutku proizvodi više nego duplo električne energije. Razlika tih iznosa je električna energija koja se prodaje u mrežu za 0,2553 €/kWh.



**Slika 4.11.** Ravnoteža električne energije

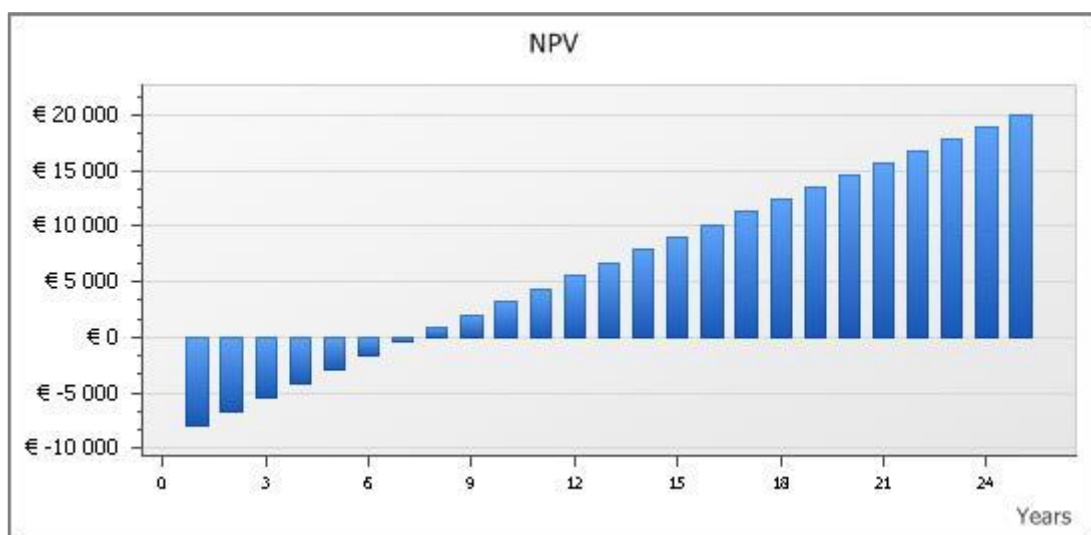
Sveukupno gledajući, električna energija se može koristiti ili prodavati u trenucima viška energije. Najpovoljnija opcija je korištenje vlastite električne energije u što većoj mjeri [22]. Slika ravnoteže električne energije zapravo prikazuje da se tijekom godine proizvode različite količine energije što u određenim mjesecima može tvoriti suficit, odnosno deficit ako se troši više električne energije nego što elektrana proizvodi. Dakle, prikazani su viškovi ili manjkovi električne energije. Njihovim zbrojem dobijemo suficit od 725,19 kWh električne energije. Uz potrošnju od 3 900

kWh i suficit dobijemo konačnu proizvedenu električnu energiju u iznosu od 4 625,18 kWh. Jednostavnom računicom možemo doći do iznosa prodane električne energije koja potpomaže isplativosti sustava, a iznosi 1 385 kn godišnje. Konačna isplativost sustava je dana na slici 4.12..

System data		General Data	
Total power [kW]	4.160	Total annual consumption [kWh]	3 899.35
Total annual energy [kWh]	4 624.54	Export tariff [€/kWh]	0.0000
		Import tariff [€/kWh]	0.0660
Feed In Tariff		System construction costs	
Feed in tariff [€/kWh]	0.2553	Total system cost [€]	9 152.00
Feed in tariff duration [years]	25	Type of financing	None
		Financing [€]	0.00
		Expenditure commitment [€]	9 152.00
Summary			
Expenditure commitment [€]	<b>9 152.00</b>	NPV at 25 years [€]	<b>19 926.15</b>
Payback time [years]	<b>8</b>	IRR at 25 years [%]	<b>12.60</b>

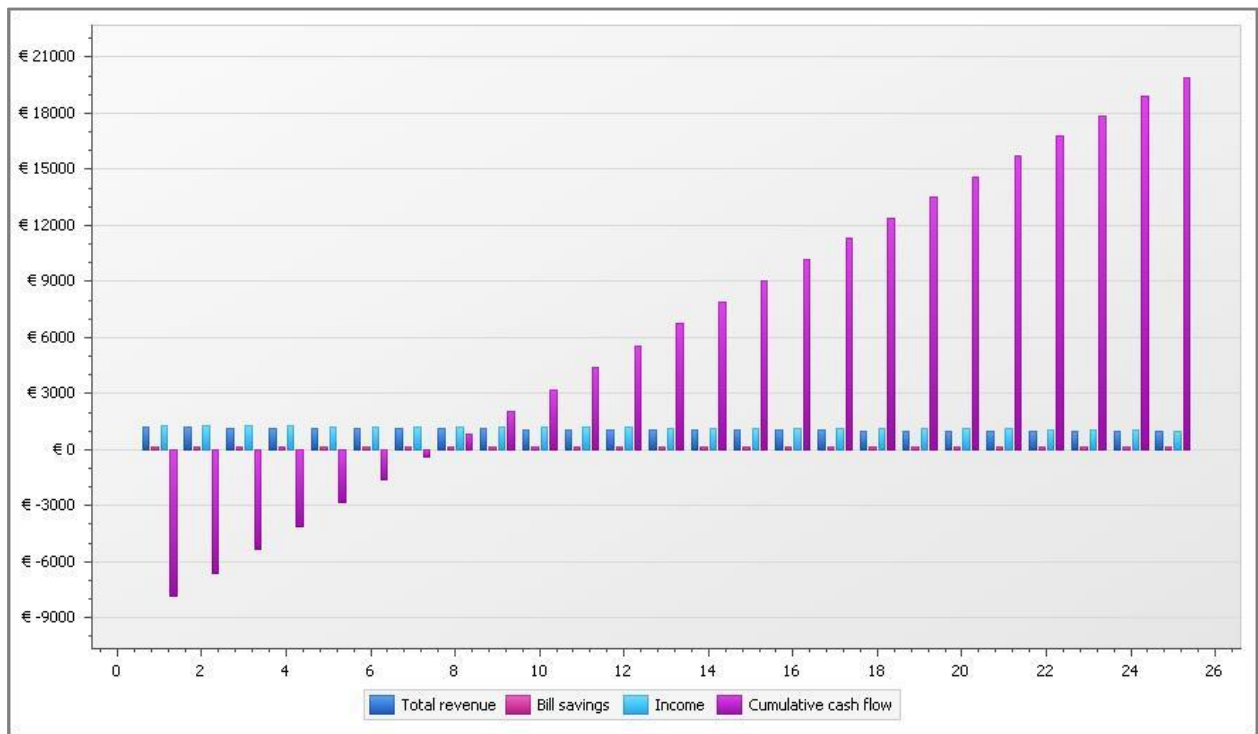
**Slika 4.12.** Profitabilnost sustava

Životni vijek fotonaponskih sustava iznosi 25 godina te se prema njemu gleda rok isplate. Uključujući sve to, naša fotonaponska elektrana uz pretpostavljeni prosječni godišnji trošak od 2 200 €/kWh vraća uloženi novac već nakon 8 godina rada. To znači da tada elektrana počinje pokrivati uloženi novac od 9 152 €.



**Slika 4.13.** Neto vrijednost

Neto vrijednost ( engl. *Net Present Value* ) nakon 25 godina iznosi 19 926,15 €. Na slici 4.14. je prikazana ušteda novca od smanjenih računa tijekom vremena uz ukupne prinose i ukupni tijek novca tijekom pretpostavljenog životnog vijeka fotonaponskog sustava od 25 godina. Osim toga, sa slike se vidi kako ukupni prinos čini zbroj uštede na računima i ukupnih prinosa proizvedene odnosno prodane električne energije.



**Slika 4.14.** Paralelni prikaz ukupnih prinosa, ušteda računa i tijeka novca

Sada se poznata isplativost te vrijeme povrata početnih ulaganja za fotonaponski sustav 4,16 kW uz kut azimuta  $\gamma = 0^\circ$  i nagib  $\beta = 33^\circ$ . To je ujedno i idealna kombinacija kutova za fiksirane module odnosno integrirane na krovove zgrada. Idealna kombinacija kutova daje najveći maksimum na izlazu fotonaponske elektrane. U većini slučajeva bi se uvijek odlučili za takvu kombinaciju jer time postižu i veći prinosi. Međutim, mogućnost odabira kutova za instalaciju fotonaponske elektrane se drastično smanjuje kada govorimo o integriranim sunčanim elektranama. Razlog toga su upravo zgrade i kuće koje su svojim orijentacijama namijenjene prilazima i cestama. Prilagođavanjem prilaznim cestama one postižu različite orijentacija te stoga nisu u mogućnosti koristiti potpuni potencijal Sunca. Orijentiranjem modula prema Suncu, odnosno mijenjanjem azimuta modula od azimuta krova okrećući ga prema jugu se ne postiže veća ukupna proizvodnja jer se time zasjenjuju preostali moduli. Zbog tih razloga, slučaj promjene azimuta modula se u

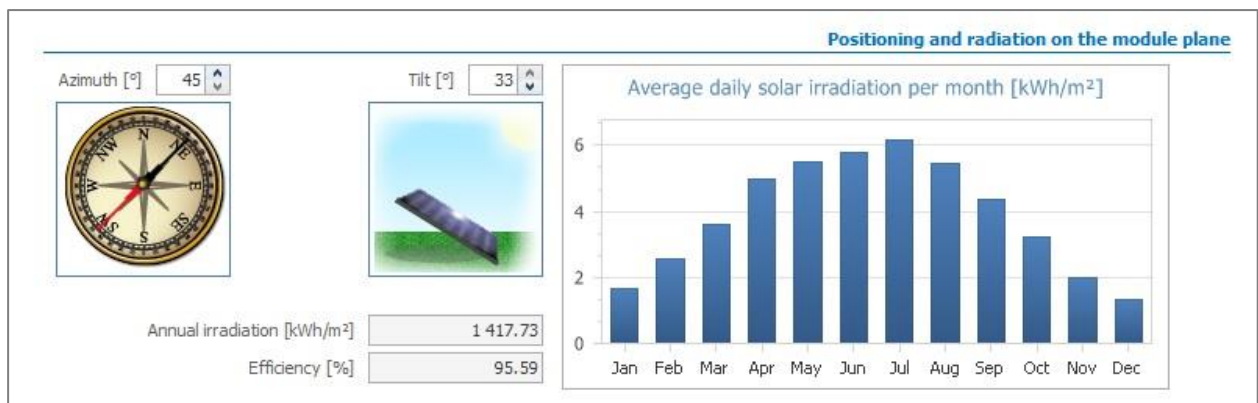
ovom radu ne razmatra. Dakle, razmatraju se samo integrirani sustavi sa fiksnim kutovima krovova, a to se ponajviše odnosi na kuće i već postojeće zgrade.

Kombinacija kutova sa najvećom količinom proizvedene električne energije je opisana u dosadašnjem dijelu. Sljedeće što se proučava su slučajevi koji nemaju tu mogućnost. U cilju pronalaska njihovog potencijala, simulira se elektrane za isto područje grada Osijeka i sa istom nominalnom snagom, ali sa različitom kombinacijom kutova.

#### 4.1.5. Usporedba

U cilju pronalaska optimalnog raspona kutova fotonaponskih integriranih elektrana koristit će se usporedba alternativnih kombinacija sa izvornom elektranom orijentiranom ka jugu pod nagibom  $33^\circ$  stupnja. Njihova isplativost će biti opravdana povratom ulaganja. U primjerima se proučavaju dvije elektrane jednake instalirane snage od kojih je jedna okrenuta prema jugozapadu, a druga prema zapadu sa azimutom  $90^\circ$  stupnjeva.

Fotonaponska elektrana 2 - 4,16 kW ( $\gamma = 45^\circ$ ,  $\beta = 33^\circ$ )



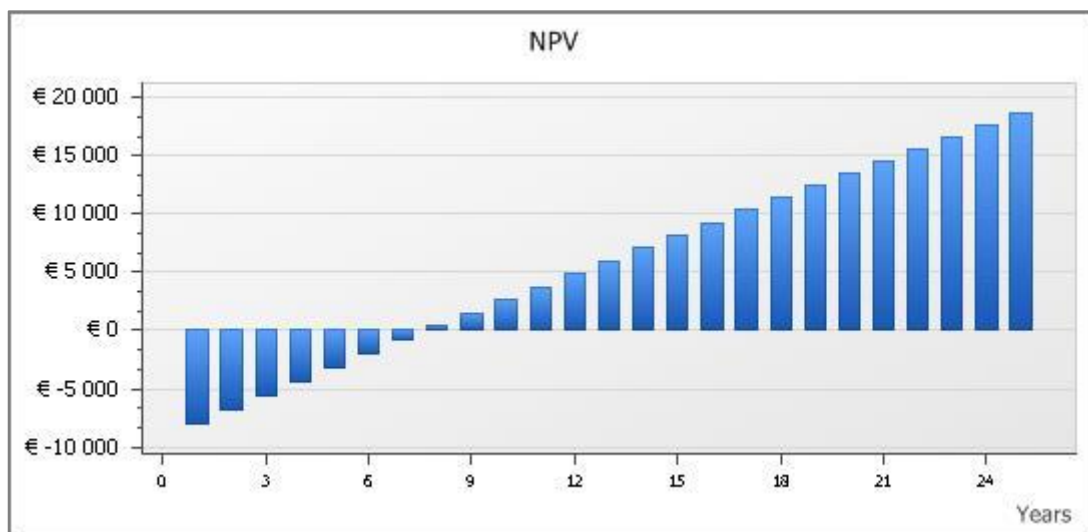
**Slika 4.15.** Iradijacija za orijentaciju jugozapad

Nakon postavljanja kutova nagiba i azimuta vidimo kako se prosječna učinkovitost smanjila što znači da je dopiranje sunčeve energije na površinu modula smanjeno. Pod tim utjecajem smanjena je i ukupna proizvodnja sa 4 624 kWh na 4 420 kWh što i nije značajna razlika. Veća razlika se ne primjećuje niti u dijagramima profitabilnosti, a povrat sredstava se bilježi također nakon 8 godina.



System data		General Data	
Total power [kW]	4.160	Total annual consumption [kWh]	3 899.35
Total annual energy [kWh]	4 420.73	Export tariff [€/kWh]	0.0000
		Import tariff [€/kWh]	0.0660
Feed In Tariff		System construction costs	
Feed in tariff [€/kWh]	0.2553	Total system cost [€]	9 152.00
Feed in tariff duration [years]	25	Type of financing	None
		Financing [€]	0.00
		Expenditure commitment [€]	9 152.00
Summary			
Expenditure commitment [€]	<b>9 152.00</b>	NPV at 25 years [€]	<b>18 599.12</b>
Payback time [years]	<b>8</b>	IRR at 25 years [%]	<b>11.89</b>

**Slika 4.16.** *Proizvodnja i povrat ulaganja*



**Slika 4.17.** *Neto vrijednosti*

Neto vrijednost u prijelomnoj 8. godini iznosi 353 € što je manje nego pri azimutu od nula stupnjeva, ali nije značajno. Unatoč zamjetnoj promjeni azimuta, fotonaponski sustav je zadržao isplativost što nam govori kako nije neophodno da orijentacija krova bude nužno okrenuta prema jugu.

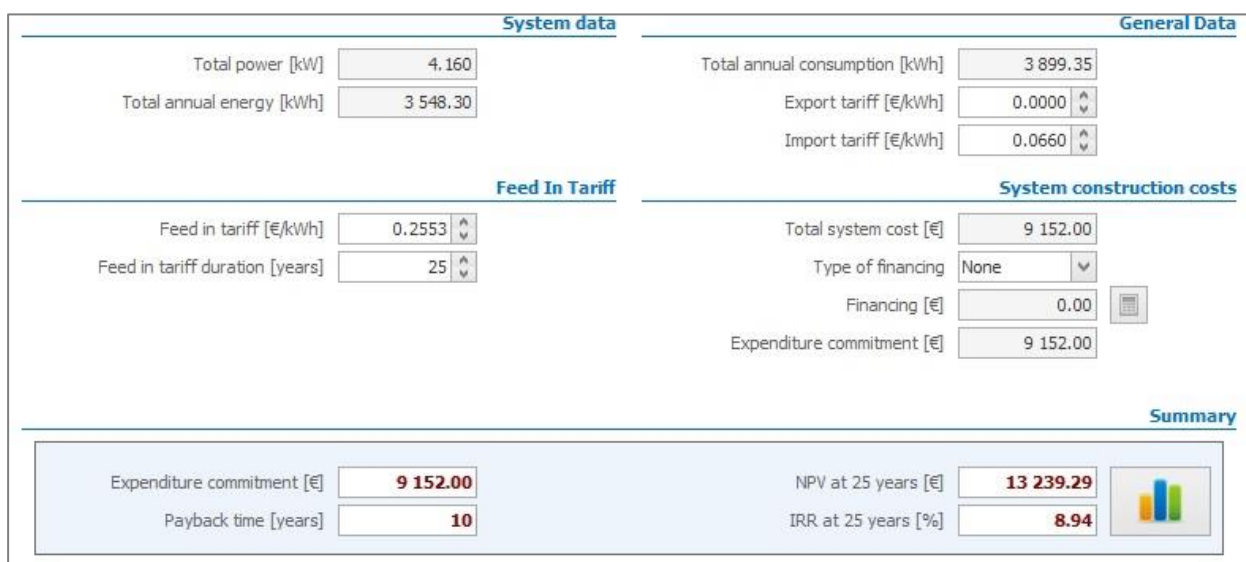
U drugom slučaju, korigirat ćemo i nagib i azimut kako bismo stekli osjećaj vrijednosti za kuće sa nepoželjnom orijentacijom. Fotonaponska elektrana 3 je okrenuta svojim krovom prema zapadu sa nagibom instalacija od 51° stupanj. Maksimalna vrijednost iradijacije se postiže u srpnju te je značajno manja nego li kod Fotonaponske elektrane 2. Ukupna godišnja iradijacija je stoga

1 137 kWh što je uspoređujući sa Fotonaponskom elektranom 1 smanjeno za 23,3 %. Time možemo reći da je gotovo cijela proizvodnja smanjena za približno  $\frac{1}{4}$ .

Fotonaponska elektrana 3 - 4,16 kW ( $\gamma=90^\circ$ ,  $\beta=51^\circ$ )



**Slika 4.18.** *Iradijacija za orijentaciju zapad*



**Slika 4.19.** *Proizvodnja i povrat ulaganja*

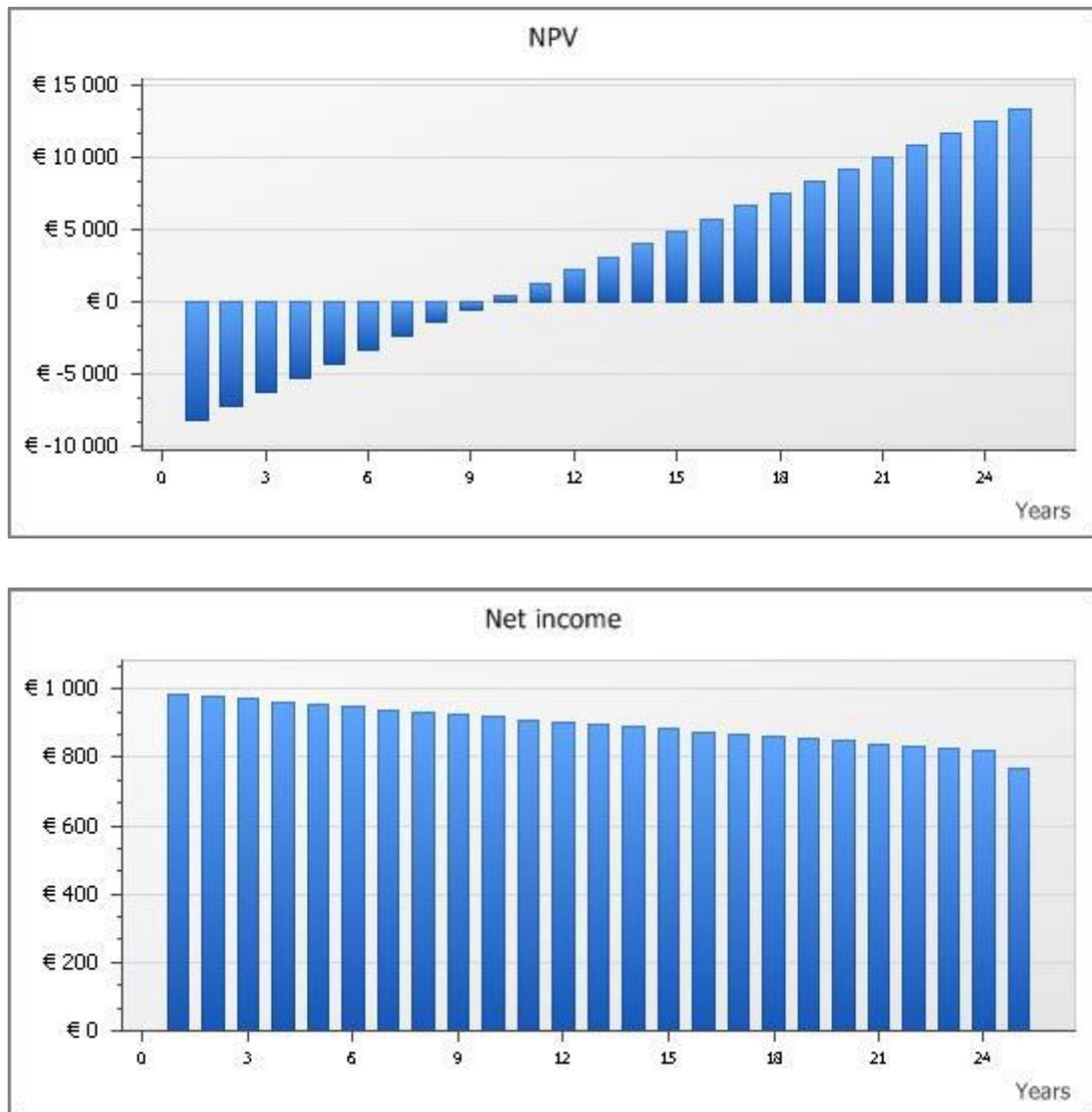
Ukupna proizvodnje električne energije je u ovom slučaju 3 548,30 kWh. Smanjena proizvodnja utječe na povrat sredstava te iznosi 9 godina. Neto vrijednost sustava će također nakon 25 godina biti manja, a iznositi će 13 240 €.

Koliko god proizvodnja opala, sustav će biti isplativ ako je potpomognut poticajnim cijenama te je isplativ unutar pretpostavljenog životnog vijeka. Neplanirani troškovi, kao i zamjena invertera nakon 10-te godine su uračunati u prosječne troškove postavljene na početku simulacije. Na osnovu toga, krivulja neto vrijednosti kao i tijek novca su kontinuiranog koeficijenta smjera, bez



propada nakon 10 godina. Za razliku od prijašnjih elektrana, ova postiže svoju isplativost nakon 10 godina u pogonu. Razlog tomu je potpuno okretanje ka zapadu.

Prihodi opadaju sa godinama, a time se objašnjava i smanjenje učinkovitosti cjelokupnog sustava. Pretpostavlja se da tijekom 10 godina sustav smanji učinkovitost za 10 % što bi značilo da na kraju svojeg vijeka sustav radi sa 75 % te je podložan kompletnoj revitalizaciji. Taj omjer proizvodnje i učinkovitosti je vidljiv na dijagramu neto prihoda gdje se očituje smanjenim prinosima.



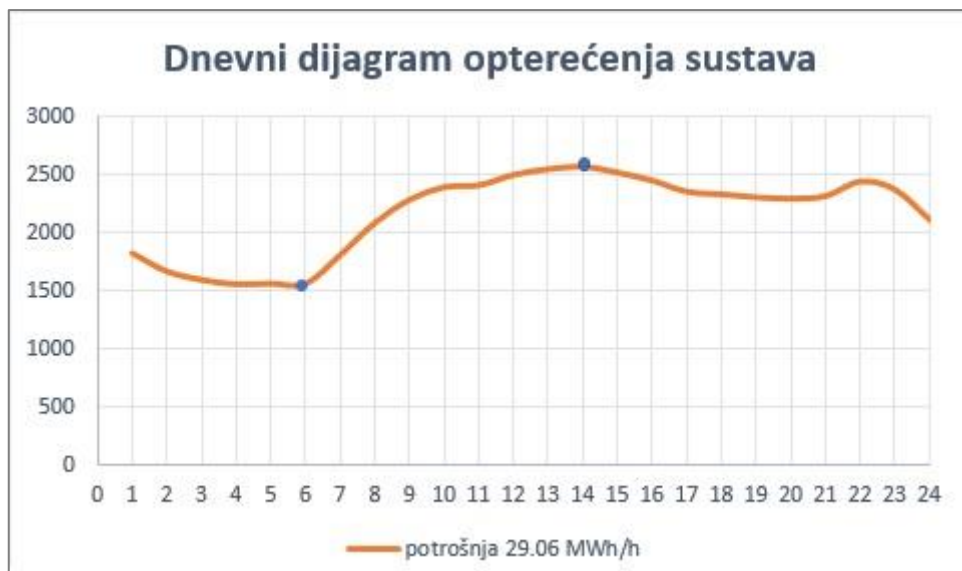
Slika 4.20. Neto prihodi i neto vrijednosti

## 4.2. Industrija

Osnovna razlika između kućanstva i industrije je potrebna količina električne energije koja je nužna za napajanje potrošača. Prema njihovim potrošačima razlikuju se i njihove krivulje potražnje.

### 4.2.1. Krivulja potražnje

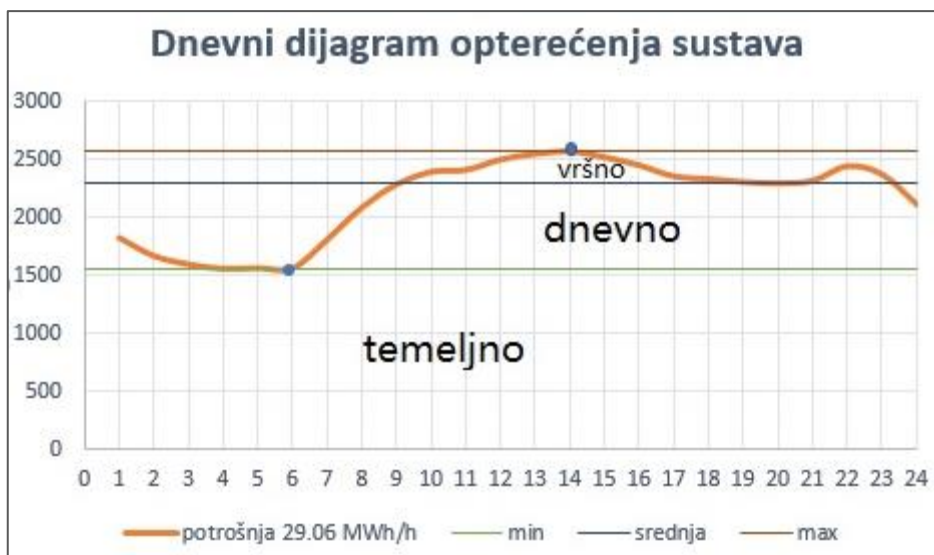
Krivuljom potražnje industrije se zapravo nastoji preslikati opterećenje sustava kroz dnevni dijagram opterećenja. Dakle, dijagram će obuhvatiti cjelokupno opterećenje elektroenergetskog sustava prema podacima dostupnim na internet stranicama [23] za dan 29. lipnja 2017. godine. Podaci su uneseni u Excel, a dobivena krivulja je prikazana na slici 4.21..



**Slika 4.21.** Dnevni dijagram opterećenja elektroenergetskog sustava 29. lipnja 2017. g.

Vidi se kako krivulja svoj globalni minimum postiže u 6 h ujutro, a maksimum za vrijeme najvećeg opterećenja u 14 h. Iako se za svaki dan predviđa opterećenje elektroenergetskog sustava, krivulje ne odstupaju značajnije od svoje karakterističnog oblika nalik krivulji na slici. Iz toga se može postaviti pretpostavka kako se maksimalna dnevna opterećenja javljaju u periodu ručka, te za vrijeme korištenja veliki potrošača što u suvremenom životu predstavljaju klima uređaji.

Kada bi dijagram podijelio na tri dijela tako da se pokriva temeljni, dnevni i vršni dio krivulje, dobila bi se ovakva podjelu ( Sl. 4.22. ).



**Slika 4.22.** Podjela opterećenja

Temeljno opterećenje bi se pokrivalo sa 1 500 MWh konstantne proizvodnje od nekih konvencionalnih izvora, dnevni dijagram bi se mogao napajati plinskim pogonima, dakle biomasom ili brzo pokretnim pogonima neosjetljivim na dinamičnost sustava. Razlika maksimalnog opterećenja i dnevnog opterećenja prema slici bi se odnosila na vršno opterećenje. Potrebna energija za to područje pri vršnom opterećenju bi iznosila 275 MWh. Kako se radi o periodu dana kada su ostvarene i maksimalne vrijednosti fotonaponskih elektrana, teoretski bi bilo moguće nedostatak energije nadopuniti korištenjem dozračene sunčeve energije. Međutim, fotonaponske elektrane svoju vršnu vrijednost postižu oko podneva te tako postavljaju pitanje tehničke izvedbe te isplativosti.

U nastavku će se pokušati objasniti utjecaj orijentacije na izlaznu karakteristiku modula odnosno u ovom slučaju fotonaponskog sustava koji bi zadovoljio dnevno vršno opterećenje.

#### 4.2.2. Projektiranje fotonaponskog sustava

Poznato nam je kako je za vršno opterećenje nužno proizvesti 275 MWh. Sa gledišta proizvodnje to je iznos kojeg fotonaponski sustav treba predati u mrežu. Prema relaciji (3-12) sada se može izračunati  $E_{FN}$  koji ne uključuje gubitke sustava:

$$E_{FN} = E_{ST}/0,80 = 275/0,80 = 343,75 \text{ MWh}$$

Ovo je iznos energije koju daju fotonaponski moduli. Množenjem sa 0,80 smanjuje se iznos proizvedene energija za gubitke u sustavu. Iz  $E_{FN}$  se dalje može računati stupanj djelovanja modula, upadnu energiju sunčeva zračenja te potrebnu površinu modula.

Koristit će se tehnologija modula kao u kućanstvima, a to je polikristalna tehnologija i modul naziva SOLE 260 Poly. Njegove karakteristike se nalaze u prilogu. Učinkovitost modula je 16,01% , a njegova površina iznosi 1,624 m<sup>2</sup>. Koristeći relaciju (3-11) sada se može izračunati kolika je potrebna upadna energije sunčevog zračenja  $E_Z$ :

$$E_Z = E_{FN}/\eta_m A_m = 343,75/(0,1601 \cdot 1,624) = 1\,321,99 \text{ MWh/m}^2$$

Obzirom da je nemoguće da na 1 m<sup>2</sup> padne tolika energija Sunca, promijenit će se raspoloživu površinu. Za to je potrebna i krivulja dozračenosti.

#### 4.2.3. Krivulja proizvodnje

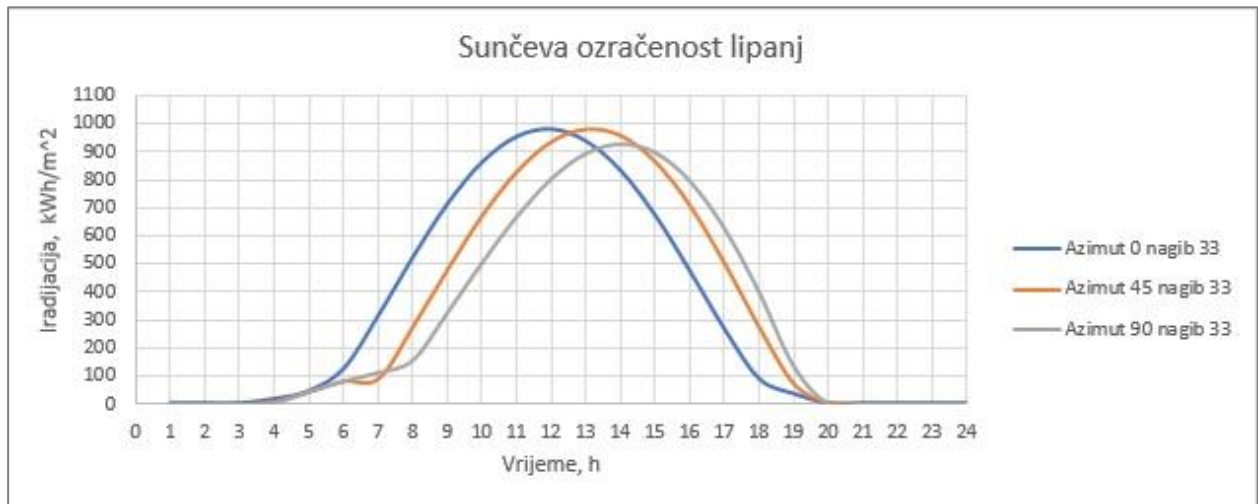
Krivulja sunčeve ozračenosti pomoći će pri projektiranju sustava na način da nam otkrije potencijal sunčeva zračenja na području grada Osijeka ili okolice gdje se primjerice planira izgraditi dovoljno veliko postrojenje za vršno zadovoljenje. Kako se radi o velikim postrojenjima, pretpostavka je da se mogu graditi na velikim površinama i sa slobodnim odabirom azimuta. Kao što je u poglavlju 4.1. pokazano, za ovo područje je najpovoljniji nagib od 33° stupnja te azimut 0°stupnjeva.



**Slika 4.23.** Krivulja sunčeve ozračenosti za Osijek.

Ova krivulja svoj vrhunac postiže u podne, dok u slučaju početne krivulje opterećenje svoj vrhunac bilježi oko 14 h. Ako bismo rekli da je ozračenost u podne 1 000 kWh/m<sup>2</sup>, a u 14 h otprilike

830 kWh/m<sup>2</sup> to bi značilo da je potencijal smanjen za 17 %. Proporcionalno time, smanjila bi se i proizvodnja energije proizvedene fotonaponom. Postoje dvije mogućnosti kojima može zadovoljiti vrhunac mreže u 14 h. Prva opcija je povećanje instaliranih kapaciteta kako bi se u 14 h proizvela dovoljna količina električne energije da zadovolji vršnu vrijednost. Ta opcija je ujedno i skuplja, a sljedeća slika to i pojašnjava.



**Slika 4.24.** Prikaz ozračenosti površina modula zakretanjem prema zapadu.

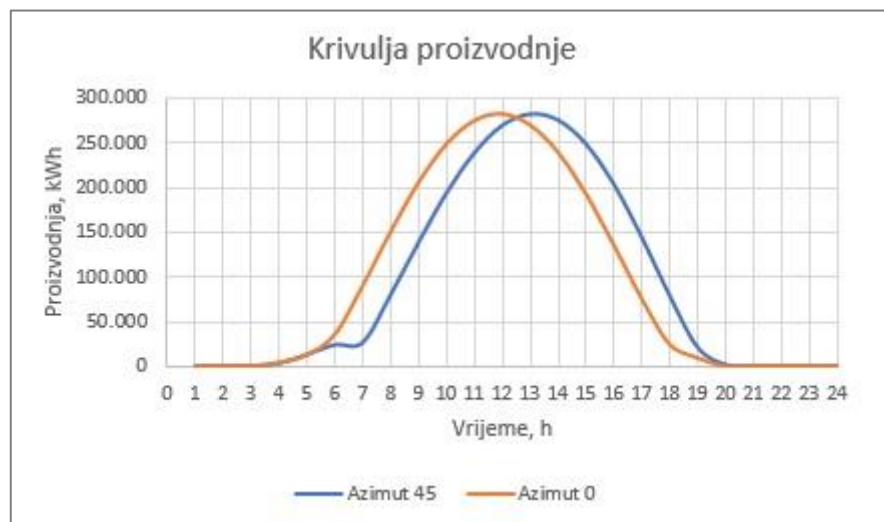
Svaki dodatno instaliran kilovatt električne energije zahtjeva dodatno investiranje i ulaganje, a zbog nužnosti povećanja površine kojom bi se eventualno nadoknadila potreba za električnom energijom prosječni troškovi postaju znatno skuplji. U taj trošak ulazi zakup površine, pronalazak prave orijentacije zgrade, dodatna administracija i projektiranje kao i oprema cjelokupnog sustava. Uspoređujući to sa mogućnošću rotacije modula prema jugozapadu, dodatna izgradnja fotonaponskih sustava kao rješenja gubi smisao. Slika 2.24. zorno prikazuje nezamjetan utjecaj rotacije modula na izloženost sunčevom zračenju. Pomoću PVGIS-a se dobiju tri krivulje kojima se prikazuje povezanost orijentacije i ozračenosti površina. Podaci su istih nagiba, ali različitih azimuta. U prijašnjim poglavljima je objašnjeno kako nagib djeluje na godišnju proizvodnju dok azimut utječe na dnevnu krivulju proizvodnje. Osnovna krivulja koja je ujedno i ona najvećeg potencijala je plava krivulja čiji je azimut nula. Preostale krivulje su nastale blagim zakretanjem prema zapadu. Jedna je zakrenuta za 45° stupnjeva dok je sivom bojom označena krivulja usmjerena prema zapadu. Uspoređujući krivulje, opaža se ozračenje koje je i dalje vrlo visoko te je pogodno za korištenje bez značajnih razlika i prevelikog odstupanja iako se radi o pomaku od 90° stupnjeva. Točka maksimuma se postiže za drugu krivulju postiže u 13.30 h te iznosi oko 980 kWh/m<sup>2</sup>. U 14h prosječno ozračenje je 956 kWh/m<sup>2</sup> pa će se taj iznos uzeti u obzir prilikom daljnjeg projektiranja sustava.

Svi ovi pokazatelji ukazuju na to da se vršnu proizvodnju može odrediti orijentacijom modula, a ne samo dnevnom putanjom Sunca. Ako je poznata krivulja ozračenosti, vrlo jednostavno se dolazi do krivulje proizvodnje. Krivulja proizvodnje se dobiva prema relaciji (3-11) množenjem sunčeve ozračenosti, učinkovitosti modula i površinom elektrane. Kako je sada fiksirana dozračenost energije ( $E_Z$ ) u trenutku najveće potražnje, preostaje odrediti potrebnu površinu elektrane.

$$A_{FN} = E_{FN}/\eta_m E_Z = 343\,750/0,1601 \cdot 956 = 2\,246,9 \text{ m}^2$$

Zbog površine modula iznosa  $1,624 \text{ m}^2$  površina elektrane od  $2\,246,9 \text{ m}^2$  pokrit će se sa 1384 modula. Njihova ukupna snaga jednaka je 359 840 kW i trebala bi biti dovoljna da uz pomoć temeljnih i dnevnih elektrana pokrije vršno opterećenje nastalu u 14 sati.

Usporedni prikaz krivulja proizvodnje elektrana jednakih kapaciteta, ali različitih orijentacija prikazan je na slici 4.24.. Na osnovu podataka ozračenosti koje daje sustav PVGIS-a [24], te o izračunatoj potrebnoj površini, Excel daje krivulje proizvodnje za usmjerenje prema jugu te jugozapadu.



**Slika 4.24.** Usporedni prikaz krivulja proizvodnje za različite orijentacije.

Krivulje su proporcionalne dozračenosti sunčeve energije za kutove kojima su izloženi. Obje krivulje su napravljene za tzv. čisto nebo, što se odnosi na najveći potencijal dnevnog zračenja. Krivulje postižu svoj maksimum u različitim periodima dana čime imaju mogućnost opskrbe vršnih opterećenja mreže. Apsolutna razlika njihovi vrhova proizvodnje je nezamjetna i iznosi 287 kWh.

Ovime je prikazan jedan od načina kako bi se moglo upravljati vršnom proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije. Ovo ne znači da je cijeli vršni pojas sa slike 4.22. opskrbljen opisanom elektranom od 360 MW. Teoretski, vršni pojas bi se mogao podijeliti na više ovako projektiranih fotonaponskih elektrana na čime bi se u potpunosti zadovoljila potreba za električnom energijom. Korigiranje vršnih vrijednosti bi bilo moguće do neke mjere, jer je neracionalno povećavati količinu instaliranih kapaciteta očekivajući vršnu vrijednost primjerice na sjeverozapadu. U tim slučajevima je apsurdno raditi na podešavanju azimuta.

Najvažnija stvar koja je ovime prikazana je da orijentacija modula uvelike može utjecati ne samo na krivulju proizvodnje nego i na cijeli elektroenergetski sustav. Proizvodnjom dovoljne količine energije u periodima vršne vrijednost moguće je smanjiti marginalne troškove preostalih elektrana u pogonu, a eventualnom prodajom proizvedene električne energije u sustav je moguće povećati isplativost sustava. Konačno se može zaključiti kako je moguće da sustav manje proizvodnje, ali optimalne orijentacije više doprinosi svojoj isplativosti i cjelokupnom procesu nego prekomjerna količina proizvedene energije u nepotrebno vrijeme.

Ovaj proračun ukazuje kako se energetska i ekonomska optimuma razlikuju, ali i da veća proizvodnja ne znači nužno i ekonomičniji način korištenja. Dakle, energetska optimuma bi prikazivala krivulja čiji je globalni azimut elektrane usmjeren ka jugu odnosno iznosi  $0^\circ$  stupnjeva. U tom slučaju, sunčev potencijal se koristi u najvećoj mogućoj mjeri jer je izložen njegovom najvećem zračenju kao i trajanju te izloženosti. Taj optimum bi bio i ekonomski kada se cijena električne energije ne bi mijenjala tijekom dana. Ovisno o potražnji, ona se mijenja tijekom dana. U trenucima visoke potražnje, cijena enormno raste jer se povećavaju marginalni troškovi zbog uključivanja ostalih elektrana u pogon i slično. To znači da sa dovoljno velikim kapacitetima, privatni investitor svoju energiju može prodavati u mrežu po znatnoj cijeni te tako činiti ekonomski optimum koji je možda manji po količini proizvedene energije, ali jači za visoku cijenu na tržištu..

## 5. ZAKLJUČAK

Određivanje kombinacije kutova modula koje će dati najveću snagu na izlazu je poprilično jednostavno kada je poznata dnevna putanja Sunca ili krivulja iradijacije. U najvećoj mjeri to je sustav okrenut prema jugu. Iako se uvijek teži maksimizaciji, mnogi sustavi nisu u mogućnosti iskoristiti sav potencijal sunčevog zračenja. Međutim, različita potražnja za električnom energijom tijekom dana kao i status povlaštenog proizvođača pružaju mogućnost ekonomske isplativosti i za različite kombinacije kutova. Mali proizvođači su usmjereni na smanjivanje troškova, a veliki na prodaju električne energije pri vršnim opterećenjima. Na osnovu toga, rad je podijeljen na kućanstvo i industriju koji su analizirani sa tehno-ekonomskog stajališta.

Kućanstvo predstavlja peteročlanu obitelj i njihovu godišnju potrebu za opskrbom električne energije. Njihov najčešći problem je smanjenje kućanskih računa odnosno troškova. Kako bi to ostvarili, na krovove svojih kuća zbog poticajnih cijena se nerijetko odlučuju za izgradnju fotonaponskih elektrana. Kuće su najčešće u neplanski građenim naseljima te stoga imaju svakojake orijentacije i odstupanja krova od juga. Proizvodnja električne energije iz fotonapona je stoga kod njih uvelike ograničena. Module se može okrenuti prema jugu te tako odstupati od azimuta svoga krova međutim zbog utjecaja zasjenjenja i smanjenja preostale korisne površine taj način korištenja energije se ne razmatra. U radu se razmatraju tehnička i ekonomsku isplativost fotonaponskih sustava fiksiranih kutova. Optimalne kombinacije kutova za kućanstva su analizirana kroz period povrata uloženi sredstava. Rezultati su pokazali kako za energetske zadovoljavanje potreba kao i ekonomsku isplativost ne postoji samo jedna kombinacija kutova. Štoviše, primjeri pokazuju da orijentacije ka istoku ili zapadu također postaju prihvatljive ako je sustav spojen na mrežu gdje uz poticajnu cijenu prodajemo višak električne energije. U pravilu, okrećući se istočno ili zapadno od juga, poželjno je imati nagib što nižim kako bi se u što većoj mjeri obuhvatilo raspršeno sunčevo zračenje za vrijeme izlaska ili zalaska Sunca.

Kod industrije je situacija drugačija. Industrija u našem slučaju predstavlja dnevni dijagram opterećenja sustava. Kao krivulju opterećenja uzeli smo realni dnevni dijagram opterećenja sustava na 29. lipnja 2017.g.. Osim velikih opterećenja, pretpostavka je da za industriju mogu birati azimut i nagib jer se nalaze na slobodnim velikim površinama na kojima nastojimo izgraditi velike kapacitete. Industrija proučava problem pokrivanja vršnih vrijednosti opterećenja fotonaponskim sustavima koje se ne povaljuju u sredini dana. Vršna opterećenja u prikazanim dijagramima nastaju između 13 i 14 h. Analizirani je utjecaj orijentacije na proizvodnju velikih



kapaciteta. U cilju zadovoljenja potreba instalirana je elektrana od 360 kW te se njome nastoji pokriti vršna vrijednost od 275 MWh. Time je pokazano kako je za velike instalirane kapacitete lakše promijeniti azimut nego li dodavati skupocjene kilovatsate novih modula. Na tom je primjeru također objašnjeno kako energetska optimum ne znači nužno i ekonomski optimum.

U konačnici, može zaključiti kako je za kućanstva na području grada Osijeka povoljno uz postojeće poticajne cijene instalirati fotonaponske sustave za azimut u rasponu od jugoistoka do jugozapada te nagibe između  $25^\circ$  i  $45^\circ$  za gotovo istu vremensku otplatu početnih ulaganja.

Veliki kapaciteti poput elektrane 360 kW svoju ekonomsku isplativost mogu povećati zakretanjem modula prema jugozapadu jer time imaju mogućnost pokrivanja vršnih vrijednosti opterećenja sustava.

U daljnjem istraživanju bilo bi korisno napraviti detaljniji model kojim bi se moglo prikazati utjecaj smanjenja emisije stakleničkih plinova dodavanje fotonaponskih sustava u elektroenergetski sustav kao i scenarije kada bi se sustav RH napajao sa kapacitetima od nekoliko stotina MW. Usporedbe radi, takvi scenariji u Austriji i Njemačkoj predviđaju okretanje modula do  $90^\circ$  prema zapadu za dodatnih 300 GW

## LITERATURA [25]

- [1] »Zelena energija,« [Mrežno]. Available: <http://www.zelenaenergija.org/clanak/svijet-je-nezasitan-u-potrosnji-elektricne-energije/3044>. [Pokušaj pristupa 29. lipnja 2017.g.].
- [2] »Europski fondovi,« 11 10 2013. [Mrežno]. Available: <http://www.europski-fondovi.eu/vijesti/eu-na-dobrom-putu-prema-ispunjenju-klimatskih-ciljeva>. [Pokušaj pristupa 29. lipnja 2017.g.].
- [3] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, »Energija u Hrvatskoj 2015,« prosinac 2016.. [Mrežno]. Available: <http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2016/12/Energija2015.pdf>. [Pokušaj pristupa 29. lipnja 2017.].
- [4] L. Majdandžić, »Fotonaponski sustavi Vježbe«. *Fotonaponski sustavi, Vježbe*.
- [5] L. Majdandžić, »Fotonaponski sustavi Priručnik«. *Fotonaponski sustavi, Priručnik*.
- [6] Z. Matić, *Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske*, Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar, 2007.
- [7] D. J. & B. W.A., *Solar engineering of Thermal Processes*, 2006.
- [8] »ADVENSA,« [Mrežno]. Available: [http://advensa.bg/general\\_info\\_solarpanels.html](http://advensa.bg/general_info_solarpanels.html). [Pokušaj pristupa 30. lipnja 2017.].
- [9] »Forecast International's Energy Portal,« 2016. [Mrežno]. Available: <http://www.fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html>. [Pokušaj pristupa 1. srpnja 2017.].
- [10] »Akademsko astronomsko društvo Rijeka,« [Mrežno]. Available: [http://www.aad.hr/lista/3/zanimljivosti/4/zasto\\_dolazi\\_do\\_izmjene\\_godisnjih\\_doba\\_.htm](http://www.aad.hr/lista/3/zanimljivosti/4/zasto_dolazi_do_izmjene_godisnjih_doba_.htm). [Pokušaj pristupa 11. srpnja 2017.g.].
- [11] P. D. M. M.Haider, »Introduction to Solar Engineering,« Vienna, 2016.
- [12] C. R. Landau, »<http://www.solarpaneltilt.com/optosolar.html>,« [Mrežno]. Available: <http://www.solarpaneltilt.com/optosolar.html>. [Pokušaj pristupa 10. srpnja 2017.g.].

- [13] »Sun Earth Tools,« [Mrežno]. Available: [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=en](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en). [Pokušaj pristupa 13. srpnja 2017.g.].
- [14] J. Nekić, »Mjerenje i analiza proizvodnje FN elektrane ETFOS,« Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2014.g..
- [15] »Solar Webshop,« [Mrežno]. Available: <http://www.solar-webshop.eu/hr/katalog/proizvod/119/>. [Pokušaj pristupa 16. rujna 2017.g.].
- [16] J. M. Keynes, »Seminarski radovi,« [Mrežno]. Available: <http://www.maturski.org/MAKROEKONOMIJA/DzonMajnardKejnz.html>. [Pokušaj pristupa 13. srpnja 2017.g.].
- [17] »Energetska tržišta,« [Mrežno]. Available: [http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKA\\_TR%C5%BDI%C5%A0TA](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKA_TR%C5%BDI%C5%A0TA). [Pokušaj pristupa 13. srpnja 2017.g.].
- [18] »Department of energy and mineral engineering,« [Mrežno]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/eme807/node/667>. [Pokušaj pristupa 13. srpnja 2017.g.].
- [19] »Hep cjenik,« [Mrežno]. Available: <http://hepi.hep.hr/cjenik>. [Pokušaj pristupa 17. rujna 2017.g.].
- [20] HROTE, »Solarni paneli,« [Mrežno]. Available: <http://www.solarni-paneli.hr/pdf/Tarifni%20sustav%20HEP%20HERA%20HROTE.PDF>. [Pokušaj pristupa 17. rujna 2017.g.].
- [21] »Mjenjačnice,« [Mrežno]. Available: <http://www.mjenjacnice.com/>. [Pokušaj pristupa 16. rujna 2017.g.].
- [22] Z. K. Mario Primorac, »Tehno ekonomska analiza primjene fotonaponske elektrane u istočnoj Hrvatskoj,« Osijek, 2017.g..

- [23] »HOPS,« Hrvatski operator prijenosnog sustava, [Mrežno]. Available: <https://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/hees/dijagram/danu>. [Pokušaj pristupa 29. lipnja 2017.g.].
- [24] E. commission, »Photovoltaic Geographical Information System,« [Mrežno]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>. [Pokušaj pristupa 29. lipnja 2017.g.].
- [25] »BISOL,« Company for Solar engineering, [Mrežno]. Available: <http://www.bisol.com/en/products/pv-modules/bisol-premium-series-mono.html>. [Pokušaj pristupa 29. lipnja 2017. g.].

## SAŽETAK

Ovaj rad proučava kombinaciju optimalnih kutova fotonaponskih modula s tehno-ekonomskog stajališta. Na energetska maksimum utječe prirodni nagib Zemlje, posljedično dnevna putanja Sunca iz čega proizlazi različit spektar sunčeva zračenja, zatim, nagib i orijentacija modula kao i njegove karakteristike te geografski položaj odnosno klima. Promjenom nagiba mijenjamo proizvodnju tijekom godine, a azimutom tijekom dana. Sa ekonomskog aspekta čimbenici koji utječu na isplativost su poticajna cijena, te cijena električne energije na osnovi njezine potražnje. Mali kapaciteti služe prvenstveno za smanjenje troškova dok veliki instalirani kapaciteti mogu imati značajniji utjecaj na cijenu električne energije. Određivanje optimalnog kuta smo napravili uz pomoć simulacijskog programa Solariu PV, dok se za industrijska postrojenja i zadovoljavanje vršnih vrijednosti koristio Excel.

KLJUČNE RIJEČI: azimut, nagib modula, isplativost, vršne vrijednosti, Solarius, PVGIS

## SUMMARY

This research takes an economic perspective on optimal angle combinations and tries to evaluate whether the system optimum deviates from energy optimum. Some factors that influence on energy output are Earth slope, Sun path, solar irradiation, tilt angle and azimuth of panel and location. The tilt angle of solar panel can shift production between summer and winter while the azimuth angle shifts production throughout the day. Some economics factors are price of electricity and feed-in tariff. Households in general use photovoltaic systems to reduce bills while great amount of installed photovoltaic capacities are able to control the whole system in period of peak load. Financial analysis were made by software named Solarius while the coverage of peak load were presented in Excel.

KEY WORDS: azimuth, tilt angle, profitability, peak value, Solarius, PVGIS

## ŽIVOTOPIS

Jure Nekić, rođen je 3. prosinca 1992. godine u Našicama, a svoje djetinjstvo provodi u Markovcu Našičkom sa svojom peteročlanom obitelji. Ondje je započeo svoje obrazovanje upisavši u rujnu 1999. godine prvi razred Osnovne škole Dore Pejačević. Nakon uspješno završena prva četiri razreda školovanje nastavlja u novootvorenoj Osnovnoj školi kralja Tomislava u Našicama gdje uzornim vladanjem i odličnim uspjehom završava svoje osnovnoškolske dane. Godine 2007. upisuje Isusovačku klasičnu gimnaziju sa pravom javnosti u Osijeku gdje boravi godinu dana te s vrlo dobrim uspjehom završava prvi razred. Zbog okolnosti primoran je vratiti se u rodne mu Našice gdje 2008.g. upisuje drugi razred Opće gimnazije- U Srednjoj školi Isidora Kršnjavog boravi sljedeće tri godine gdje uz natjecanja u području matematike i fizike, zapaženu ulogu ima u sportskim aktivnostima svoje škole. Jure je maturirao 2011., a svoje je cjeloživotno obrazovanje nastavio na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku upisom preddiplomskog studija Elektroenergetike. Na preddiplomskom studiju boravi od 2011. do 2014. te uz neizostavno bavljenje sportom sudjeluje i u hrvatsko-mađarskom projektu Regphosys pod nazivom, Fotonaponski sustavi kao pokretači regionalnog razvoja u sklopu kojega piše i polaže završni rad. Po završetku preddiplomskog, 2014. godine upisuje diplomski studij Elektroenergetike na istoimenom Fakultetu. Nova znanja i kompetencije nastoji steći aktivnim zalaganjem za studente i njihova prava ulaskom u Studentski zbor FERIT-a i Fakultetsko vijeće. Ondje promičući sport kao sastavni dio studiranja ukazuje i na ostale mogućnosti i pogodnosti studiranja na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Na drugoj godini diplomskog studija, početkom 2016. odlazi na studentsku razmjenu na Tehničko sveučilište u Beču. Povratkom iz Austrije, ljeto provodi na neobaveznoj stručnoj praksi u zagrebačkom Siemensu na odjelu automatike. U rujnu 2016. godine upisuje apsolventsku godinu na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija te istovremeno upisuje prvu godinu diplomskog studija na Ekonomskom fakultetu u Osijeku gdje odabire smjer poduzetničkog menadžmenta.

# PRILOZI

## P.4.1. Parametri sustava

### System Parameters

---

### System Parameters

---

#### Modules working temperatures for voltage calculations

Minimum temperature [°C]  Maximum temperature [°C]

---

#### Inverter sizing factor

Minimum value [%]  Maximum value [%]

---

#### Losses

	Type	Value [%]
a	Losses due to reflection	3.10
b	Losses due to shading	3.30
c	Mismatching Losses	5.70
d	Losses due to temperature effects	7.60
e	DC circuit losses	1.20
f	Inverter Losses	4.00
g	AC circuit losses	2.00

Total Losses\* [%]

(\*) Total loss [%] =  $[1 - (1 - a - b) \times (1 - c - d) \times (1 - e) \times (1 - f)] + g$

Specified from losses  **Balance of system**

---

BOS [%]

---

#### Accumulation system

Accumulation system Efficiency [%]

---

### P.4.2. Ekonomski parametri i valuta

**Profitability parameters**

---

**Currencies**

Currency

---

**Rates**

Inflation rate [%] <input type="text" value="0.00"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>	Energy inflation rate [%] <input type="text" value="0.00"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>
Discount rate [%] <input type="text" value="0.00"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>	Consumption INCREASE [%] <input type="text" value="2.00"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>

---

**System**

Efficiency loss [%] <input type="text" value="0.90"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>	Lifespan [years] <input type="text" value="25"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>
---	--

### P.4.3. Karakteristike polikristalnog modula POLY 260

**Module**

---

**General Data**

Code <input type="text" value="M.D.0001"/>	Material type <input type="text" value="Polycrystalline Silicon"/> <input type="button" value="v"/>
Make <input type="text" value="no1"/> <input type="button" value="v"/>	Cost [€] <input type="text" value="167.10"/>
Model <input type="text" value="SOLE 260W Poly"/>	

---

<b>Electrical characteristics in STC</b>				<b>Other electrical characteristics</b>			
Peak power [W] <input type="text" value="260.0"/>	Efficiency [%] <input type="text" value="16.01"/>	Voc Coeff. [%/°C] <input type="text" value="-0.3400"/> <input type="button" value="v"/>	NOCT [°C] <input type="text" value="45.0"/>	Isc Coeff. [%/°C] <input type="text" value="0.060"/> <input type="button" value="v"/>	Vmax [V] <input type="text" value="1000.00"/>		
Im [A] <input type="text" value="8.42"/>	Vm [V] <input type="text" value="30.90"/>						
Isc [A] <input type="text" value="8.89"/>	Voc [V] <input type="text" value="36.70"/>						

---

<b>Mechanical characteristics</b>				<b>Notes</b>	
Length [mm] <input type="text" value="1640"/>	Thickness [mm] <input type="text" value="40"/>	Notes <input style="width: 100%; height: 100%;" type="text"/>			
Width [mm] <input type="text" value="990"/>	Weight [kg] <input type="text" value="21.00"/>				
Area [m <sup>2</sup> ] <input type="text" value="1.624"/>	Number of Cells <input type="text" value="60"/>				



#### P.4.4. Karakteristike ABB izmjenjivača

Inverter
Inverte

---

General Data

Code

Make

Model

Phase type

Cost [€]

---

MPPT inputs

N	VMppt min	VMppt max	Vmax	Imax	
1	140.0	530.0	600.0	16.0	+
2	140.0	530.0	600.0	16.0	-

Max. Power [W]

Electrical output parameters

Nominal Power [W]  Dist. Current [%]

Nominal Voltage [V]  Frequency [Hz]

Maximum efficiency [%]  European Eff. [%]

European efficiency [%]

---

Mechanical characteristics

WxDxH Dimensions [mm]

Weight [kg]

Accumulation data

Energy Storage

Battery type

#### P.4.5. Karakteristike modula i MPPT nizova

✓ MPPT 1
✓ MPPT 2

---

Electrical characteristics of the module in STC

Peak power [W]

Vm [V]  Voc [V]

Im [A]  Isc [A]

Electrical characteristics for MPPT input

Nominal Power [W]

VMppt min [V]  V max [V]

VMppt max [V]  I max [A]

---

MPPT input configuration

N° inverter  No. of modules

N° strings  Modules x string

Inverter Sizing

Pow. Modules [W]  Pow. Inverter [W]

Sizing [%]

---

Generator voltages

Vm at -10 °C [V]  Voc at -10 °C [V]

Vm at 25 °C [V]  Voc at 25 °C [V]

Vm at 70 °C [V]  Voc at 70 °C [V]

Generator Currents

Im at 25 °C [A]  Isc at 25 °C [A]

---

Verifications

- ✓ Vm at 70 °C (202.28 V) greater than or equal to Vmppt min. (140.00 V)
- ✓ Vm at -10 °C (282.14 V) less than or equal to Vmppt max. (530.00 V)
- ✓ Voc at -10 °C (328.54 V) less than or equal to the maximum voltage. MPPT input (600.00 V)
- ✓ Voc at -10 °C (328.54 V) less than or equal to the maximum voltage. Module system (1 000.00 V)
- ✓ Max. generated current (8.89 A) less than or equal to the maximum MPPT input current (16.00 A)
- ✓ Sizing (100.96%) comprised between 70% and 120%

Legend

✓ Verified

✗ Not verified

⚠ Verified without respecting the safety margins

### P.4.6. Električna shema elektrane

