

# Fotonaponski sustavi sa praćenjem kretanja Sunca

---

**Radanović, Tomislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:200:171829>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija**

**FOTONAPONSKI SUSTAVI SA PRAĆENJEM KRETANJA  
SUNCA**

**Završni rad**

**Tomislav Radanović**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Tomislav Radanović
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4907, 21.09.2020.
<b>JMBAG:</b>	0165088220
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Fotonaponski sustavi sa praćenjem kretanja Sunca
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Opisati princip rada fotonaponskih sustava sa praćenjem kretanja Sunca. Usporediti performanse fotonaponskih sustava sa fiksnim i promjenjivim kutem. Napraviti pregled literature u području fotonaponskih sustava sa praćenjem kretanja Sunca. Ispitati utjecaj promjenjivosti kuta fotonaponskih modula na njihove performanse i analizirati rezultate simulacija. Sumentor - voditelj: dr.sc. Matej Žnidarec Tema za studenta: Tomislav Radanović
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	04.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	11.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	11.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 11.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Tomislav Radanović
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4907, 21.09.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Fotonaponski sustavi sa praćenjem kretanja Sunca**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Damir Šljivac

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED LITERATURE</b> .....	<b>2</b>
<b>3. SUNČEVO ZRAČENJE</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1. Sunčeve komponente zračenja</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2. Geometrija Sunčevog zračenja</b> .....	<b>7</b>
<b>3.3. Deklinacija kuta</b> .....	<b>8</b>
3.3.1. Kut nadmorske visine ili elevacijski kut .....	8
3.3.2. Sunčevi azimutni kut .....	8
3.3.3. Geografska širina .....	9
<b>4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE</b> .....	<b>10</b>
<b>4.1. Mrežna fotonaponska elektrana</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2. Autonomna (samostalna) fotonaponska elektrana</b> .....	<b>13</b>
4.2.1. Autonomna hibridna fotonaponska elektrana .....	14
<b>5. FOTONAPONSKI SUSTAVI ZA PRAĆENJE SUNCA</b> .....	<b>16</b>
<b>5.1. Fiksni fotonaponski sustav za praćenje Sunca</b> .....	<b>16</b>
<b>5.2. Strategija praćenja Sunca</b> .....	<b>17</b>
<b>5.3. Jednoosni fotonaponski sustav za praćenje Sunca</b> .....	<b>17</b>
<b>5.4. Dvoosni fotonaponski sustav za praćenje Sunca</b> .....	<b>20</b>
<b>5.5. Podjela fotonaponskih sustava za praćenje Sunca na temelju korištenja sustava upravljanja koji se upotrebljava</b> .....	<b>21</b>
5.5.1. Sustav praćenja zatvorene petlje.....	21
5.5.2. Sustav praćenja otvorene petlje .....	21
<b>5.6. Podjela fotonaponskih sustava za praćenje Sunca na temelju mehaničkog sustava koji se upotrebljava</b> .....	<b>22</b>
5.6.1. Pasivni sustav praćenja Sunca .....	22

5.6.2. Aktivni sustavi praćenja Sunca.....	22
<b>6. ANALIZA UTJECAJA SUSTAVA ZA PRAĆENJE SUNCA NA PERFORMANSE TIPSKOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1. PV*SOL premium program .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2. Postavke simulacijskih modela .....</b>	<b>23</b>
6.2.1. Podaci lokacije.....	24
6.2.2. Podaci fotonaponskih modula i pretvarača .....	25
<b>6.3. Rezultati simulacije.....</b>	<b>28</b>
6.3.1. Simulacija fiksnog fotonaponskog sustava .....	28
6.3.2. Simulacija jednoosnog fotonaponskog sustava s os jug – sjever.....	30
6.3.3. Izrada simulacije jednoosnog fotonaponskog sustava s os istok – zapad .....	34
6.3.4. Simulacija jednoosnog fotonaponskog sustava s rotirajućom vertikalnom os.....	37
6.3.5. Simulacija dvoosnog fotonaponskog sustava .....	41
6.3.6. Usporedba proizvodnje električne energije za različite sustave praćenja.....	44
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>50</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>51</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>55</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>56</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>57</b>

# 1. UVOD

U svijetu sve se više povećava interes za uporabom obnovljivih izvora energije, fotonaponski sustavi s praćenjem Sunca postaju sve više značajniji kao tehnološko rješenje koje može poboljšati proizvodnju električne energije koristeći energiju sunčevog zračenja. Praćenje Sunca nudi fotonaponskim sustavima mogućnost prilagođavanja Sunčevom položaju u toku dana, čime se znatno povećava mogućnost iskorištavanja raspoložive energije Sunčevog zračenja. Dostupne su različite vrste sustava za praćenje Sunca, kao što su jednoosni i dvoosni sustavi, namjenjeni za razne geografske i klimatske uvjete. Jednoosno praćenje uobičajno se upotrebljava za poboljšanje dnevne proizvodnje energije, a dvoosno praćenje nudi dodatne prednosti u područjima s velikim varijacijama Sunčevog položaja u godini. Ovaj rad proučava tehnološke karakteristike i inovacije u domeni sustava za praćenje Sunca u okviru fotonaponskih sustava. Daljnje napredovanje u tehnologiji praćenja Sunca bitno je za ostvarivanje u domeni obnovljivih izvora energije i ostvarivanje globalne održivosti.

## 1.1. Zadatak

Zadatak ovog rada je opisati princip rada fotonaponskih sustava sa praćenjem kretanja Sunca. Usporediti performanse fotonaponskih sustava sa fiksnim i promjenjivim kutem. Napraviti pregled literature u području fotonaponskih sustava sa praćenjem kretanja Sunca. Ispitati utjecaj promjenjivosti kuta fotonaponskih modula na njihove performanse i analizirati rezultate simulacija.

## 2. PREGLED LITERATURE

Otpriblike instalirana snaga ukupnih fotonaponskih sustava u svijetu u 2022. godini iznosi 1.185 GW [1]. Sunčeva energija je jako važan energetska izvor, koji se nemože iscrpiti i u budućnosti biti će jako bitan. Gustoća sunčevog zračenja razlikuje se od jedne lokacije do druge, što utječe na učinkovitost korištenja sunčeve energije. Iskorištavanje sunčeve energije može se postići putem fiksnih fotonaponskih sustava ili pomoću fotonaponskih sustava koji slijede kretanje Sunca. Cilj fotonaponskih sustava za praćenje Sunca jest optimizirati energetska učinak, težiti maksimiziranju proizvodnje električne energije. U skladu s najnovijim istraživanjima, povećanje energetska prinosa fotonaponskih sustava za praćenje Sunca kreće se od 22% do 56% naspram fiksnog fotonaponskog sustava. Ipak, to povećanje ovisi o načinu upravljanja sustavom, stupnju automatizacije, slobodi kretanja fotonaponskih modula te meteorološkim uvjetima. Električna energija koja je pohranjena iz fotonaponskih sustava zavisi o sunčevom zračenju što dopire fotonaponske module, uz materijale koji se upotrebljavaju [2], te o temperaturi [3] i zavisi o pretvaraču. Gustoća snage sunčevog zračenja koje stiže na Zemlju nije moguće direktno kontrolirati jer je uvjetovana atmosferskim prilikama i lokacijom. Fotonaponski sustavi mogu biti usmjereni kako bi Sunčeve zrake padale okomito na površinu fotonaponskog modula i time poboljšali proizvodnju električne energije. Stupanj djelotvornosti konverzije sunčevog zračenja u električnu energiju zavisi o toplinskim karakteristikama fotonaponskih modula [4, 5], te o vrsti fotonaponskih modula i njihovoj upotrebljivosti [6]. Optimizacija stupnja djelotvornosti konverzije ostvaruje se podešavanjem impedancije, poznatom kao praćenje točke maksimalne snage. Optimizacija električnih parametara ključna je za dobivanje najveće moguće proizvodnje električne energije koja dolazi od fotonaponskog sustava, upotrebljavajući algoritam za praćenje točke maksimalne snage. Fotonaponski sustavi koji prate Sunce osiguravaju da Sunčeva svjetlost padne okomito na površinu fotonaponskog modula. Praćenje Sunca ostvaruje se korištenjem odgovarajuće kontrole i sklopova za upravljanje praćenjem. Energija sunčevih zraka direktno se prikuplja na fotonaponskim modulima i distribuira se prema različitim stupnjevima slobode. Fotonaponski sustavi za praćenje Sunca mogu biti jednoosni [7] i mogu biti dvoosni [8]. Jednoosni fotonaponskih sustavi, slijede kretanje Sunca oko jedne osi, od istoka k zapadu, i od juga k sjeveru, dok dvoosni sustavi slijede kretanje u dvije osi, od sjevera prema jugu i od istoka prema zapadu. Dvoosni sustavi su precizniji od jednoosnih, ali imaju veće troškove zahvaljujući pomoćnoj rotirajućoj osi. U određenim situacijama, investiranje u dvoosne sustave može postati financijski nepovoljno zbog manjeg



stupnja djelovanja u proizvodnji energije. Kontrolni sustavi, kao što su sustavi praćenja pomoću zatvorene petlje [9] i otvorene petlje [10], upotrebljavaju se za upravljanje jednoosnim ili dvoosnim fotonaponskim sustavima. Ključna razlika kod otvorenih i zatvorenih sustava praćenja je ta, što otvoreni sustav upotrebljava fotosenzor koji odašilje signal upravljačkoj jedinici, dok zatvoreni sustav upotrebljava algoritam ugrađen u upravljački procesor. Hibridni sustav praćenja kombinira elemente oba pristupa. Prikaz dvoosnog sustava koji upotrebljava hibridni sustav praćenja, nalazi se u radu [11]. Osim pružanja preciznosti sustava praćenja, neophodno je svesti na minimum električne gubitke koji nastaju pokretanjem sklopova za pogon.

### 3. SUNČEVO ZRAČENJE

Sunce je goruća sfera čiji promjer iznosi 1.39 milijuna kilometara i mase koja iznosi  $1.98 \cdot 10^{30}$  kg, uglavnom se sačinjava od helija i od vodika. Sunce se nalazi u samome središtu Sunčevog sustava. U Suncu događa se fuzijska reakcija, znači vodik se transformira u helij. Prosječna temperatura na površini Sunca dostiže 5780 K, te se efektivna temperatura prihvaća kao 5760 K, budući da spektar kod Sunčevog zračenja je sličan spektru idealnog crnog tijela određene temperature [12].

Formula (3-1) koristi se za izračun oslobađanja sunčeve energije:

$$E = m \cdot c^2 \text{ [J]} \quad (3-1)$$

$E$ - iznos ispuštene sunčeve energije [J]

$m$ - iznos mase helijevih jezgri [kg]

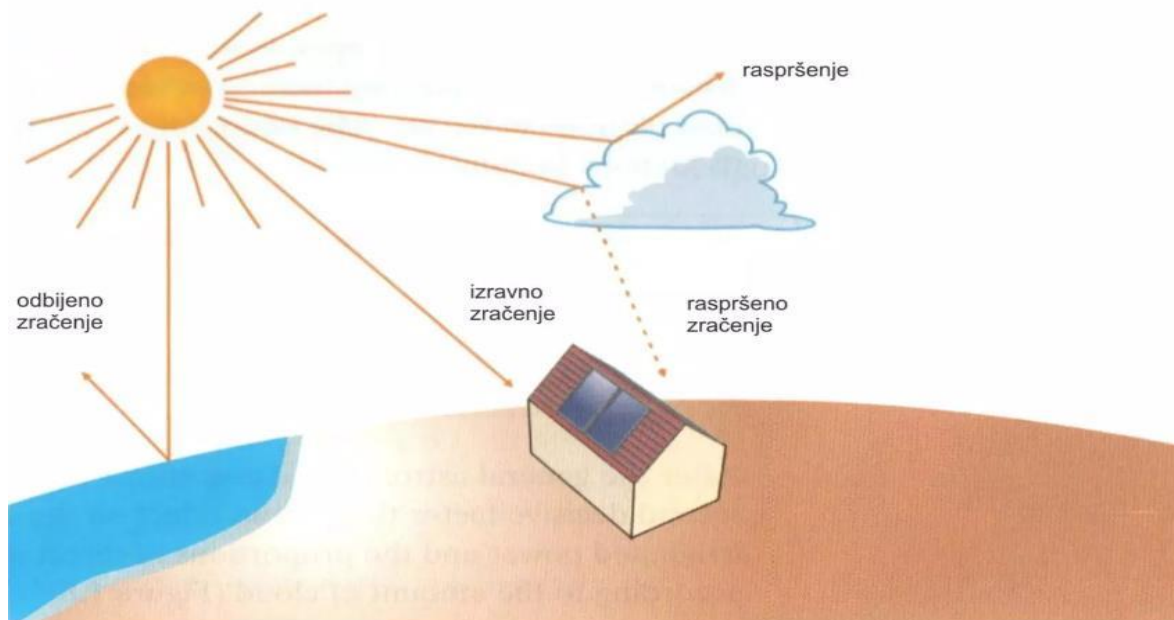
$c$ - brzina svjetlosti Sunčevih zraka [m/s]

Oslobodena Sunčeva energija približno je  $3,85 \cdot 10^{17}$  GW, to je približno  $10^{17}$  puta više od izlazne snage tipičnog nuklearnog reaktora od 1200 MW snage. Zbog toga je sunčeva energija istinski primjer nuklearne energije. Na svu sreću, nuklearni reaktor poznat kao Sunce smješteno je na veoma velikoj i bezopasnoj udaljenosti od Zemlje. Zemlja godišnje izvrši jednu rotaciju oko Sunca u lagano eliptičnoj orbiti, na prosječnoj udaljenosti koja iznosi 149,6 milijuna km. Pošto je Sunčevo zračenje raspoređeno ravnomjerno u svim pravcima, prosječna osvjetljenost na vanjskoj granici Zemljine atmosfere približno je  $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ ; to se još naziva i sunčeva konstanta. Zbog blago eliptičnog oblika Zemljine orbite oko Sunca, osvjetljenost se mijenja tokom godine, postizujući maksimum iznosa od  $1414 \text{ W/m}^2$ . Sunčeva energija koja dolazi na Zemlju najveća je među svim energijama koje se upotrebljavaju. Uzimajući u obzir to da potrošnja energije ima značajne implikacije na okoliš Zemlje, prikupljanje i korištenje ove moćne energije za ljudske aktivnosti predstavlja jako važan zadatak [13].

#### 3.1. Sunčeve komponente zračenja

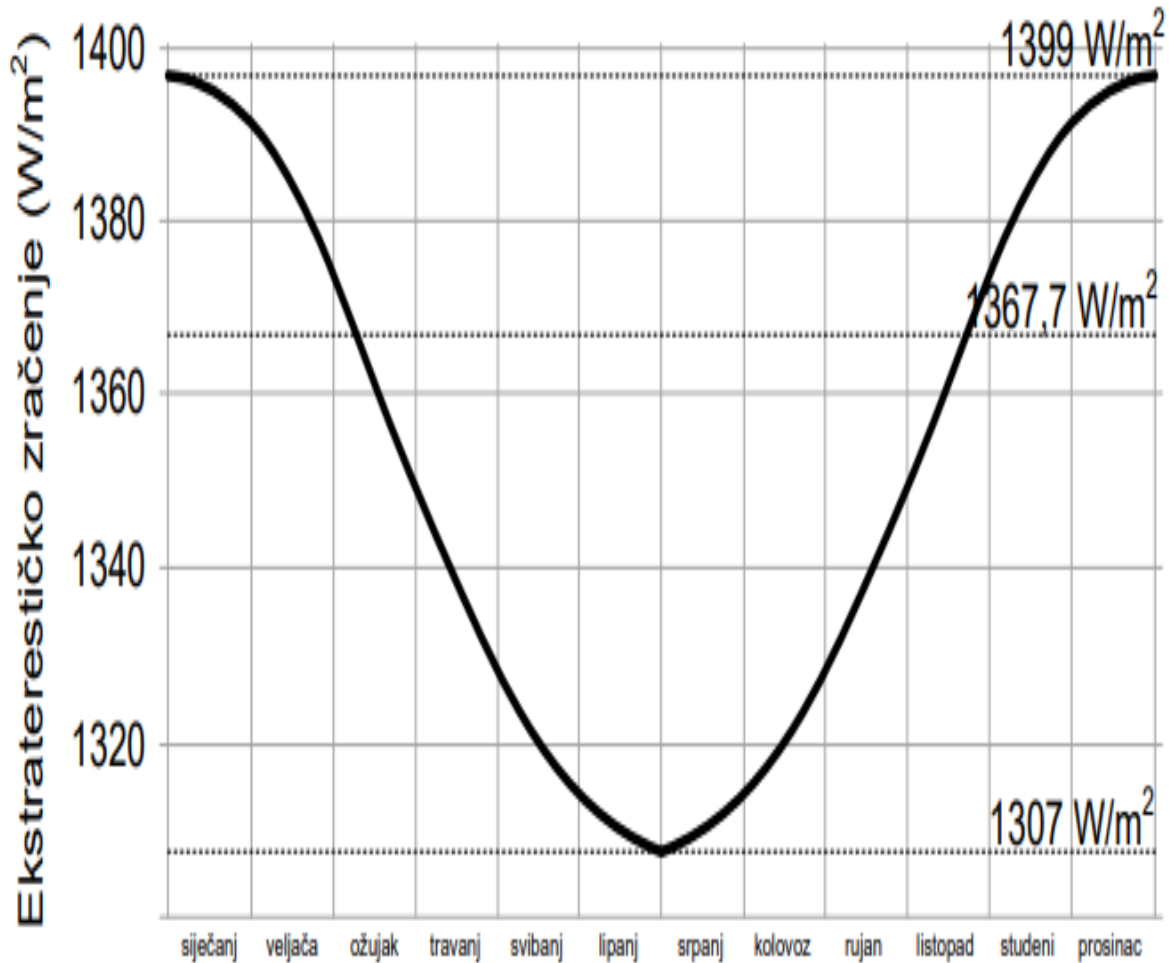
Sunčevo zračenje koje dopire do gornjeg sloja zemljine atmosfere poznato je kao ekstraterestričko zračenje i prikazuje samo djelić ukupne sunčeve energije. Radi promjene udaljenosti između Zemlje

i Sunca kroz godinu, intenzitet ekstraterestričkog zračenja na površinu u smjeru okomitom na orijentaciju zračenja varira između  $1307 \text{ W/m}^2$  i  $1399 \text{ W/m}^2$ . Ekstraterestričko zračenje na prosječnoj udaljenosti Zemlje od Sunca na okomitu površinu poznata je kao sunčeva konstanta, čija vrijednost iznosi  $E_s = 1367 \text{ W/m}^2$ . Osim vidljivog dijela konstanta obuhvaća cijeli spektar Sunčevog elektromagnetskog zračenja. Cjelokupno Sunčevo zračenje koje pristiže do Zemljine površine uključuje difuzno i direktno zračenje. Kad Sunčevo zračenje udari u atmosfere molekule plina ili čestice, dolazi do njihovog osciliranja i emitiranja, čime oni postaju izvori elektromagnetskog valova s specifičnom valnom duljinom. Te molekule ili čestice prenose energiju koju su primili nejednoliko u različitim pravcima; dio se reflektira natrag u svemir, a dok se drugi dio širi k Zemlji. Ovaj raspršeni dio zračenja u atmosferi poznato je kao difuzno zračenje. Difuzno zračenje povećava se s porastom oblaka i vodene pare. Direktno zračenje kratkovalni je spektar i neposredno se širi od Sunca do Zemlje. Čim Sunčevo zračenje dosegne zemljinu površinu susreće se s kopnom ili vodenom plohom, pri čemu dolazi do toga da se dio zračenja odbija. Površina ima svojstvo da reflektira zračenje te se opisuje se faktorom refleksije također poznatim albedo. Na primjer, sasvim bijeli predmeti imaju albedo 1 zbog toga jer odbijaju Sunčevo zračenje u potpunosti, ali sasvim crna tijela imaju albedo 0 [12]. Na slici 3.1 prikazano je Sunčevo zračenje koje dolazi do površine Zemlje i vrste zračenja.



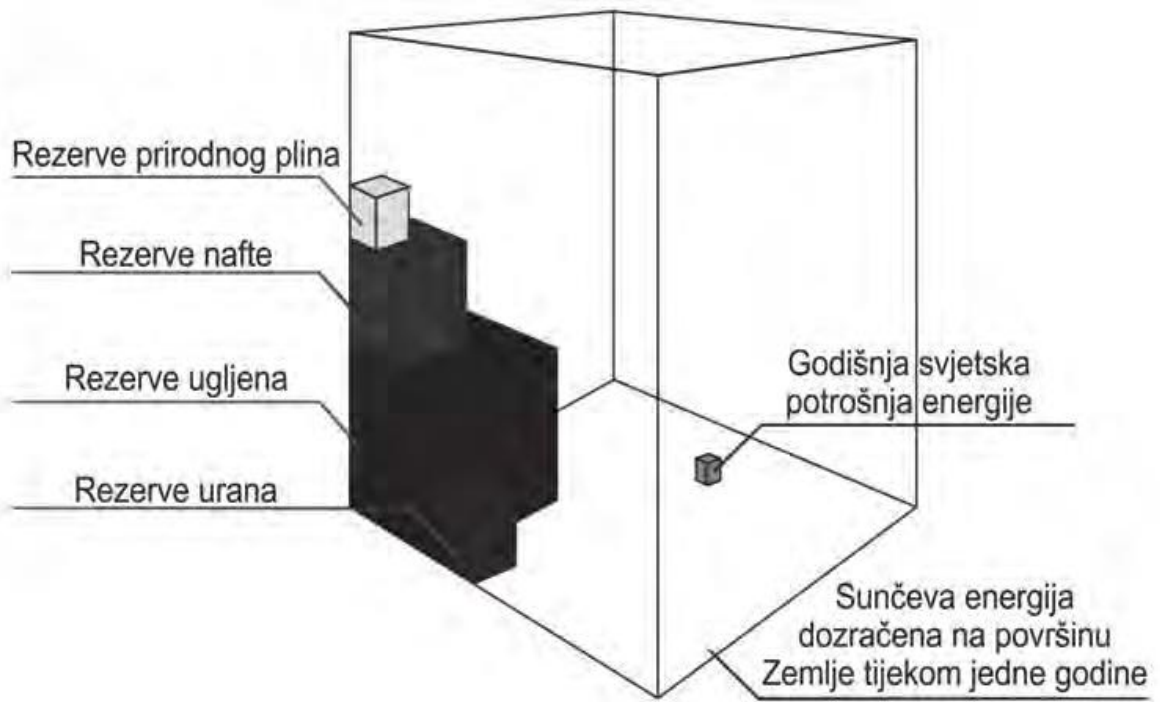
Slika 3.1. Interakcija sunčevog zračenja s atmosferom i površinom Zemlje [14]

Na slici 3.2 uočljiva je varijacija ekstraterestičkog zračenja te zavisi o godišnjem dobu. Najveća vrijednost je u siječnju mjesecu, a najmanja vrijednost je u srpnju mjesecu.



Slika 3.2. Godišnje fluktuacije ekstraterestričkog sunčevog zračenja [15]

Na slici 3.3 prikazuje potrošnju energije na svjetskoj razini u usporedbi sa svim količinama fosilnih goriva i s ukupnim godišnjim potencijalom sunčeve energije. Sunčevo zračenje približno je 14000 puta veće sunčeve energije koje dolazi na površinu Zemlje u odnosu na potrošnje energije u svijetu. Sunčevo zračenje koje dopire na površinu Zemlje značajno prelazi sve postojeće izvore fosilnih goriva [16].



Slika 3.3. Sunčeva energija u usporedbi sa zalihama ostalih izvora i ukupnom svjetskom potrošnjom energije [15]

### 3.2. Geometrija Sunčevog zračenja

Zemljina staza oko Sunca približno je eliptična, smještena na udaljenosti koja otprilike iznosi 149,6 milijuna km. Os rotacije planeta Zemlje naginje se pod kutom koji je  $\varepsilon = 23,441^\circ$  s obzirom na okomicu na horizontalu Zemljine putanje, poznata kao ravnina ekliptike. Ravnina koja se proteže kroz Zemljin ekvator ima nagib koji iznosi  $\varepsilon$ , u odnosu na ravninu ekliptike [17]. Radi očuvanja momenta gibanja, Zemljina os rotacije orijentirana je kao nepokretni smjer u prostoru, što pokazuje da visina Sunca varira kroz godinu za istu lokaciju na Zemlji u isto vrijeme [18]. Za određivanje kuta sunčevoga zračenja upotrebljavaju se tri ključna referentna okvira: ekvatorskih, ekliptički i horizontni okviri. Referentni okviri su postavljeni s centarom u središtu Zemlje, koristeći se simuliranim kretanjem Sunca za analizu. Pretpostavka je da su Sunce i druga nebeska tijela smještena u nebeskom prostoru dosta velikog radijusa. Zemljina dnevna rotacija predstavlja se kao okretanje nebeske sfere oko svoje polarne osi, dok se trenutna pozicija Sunca definira kutem  $\omega$ . Taj kut  $\omega$  predstavlja kut između meridijana koji se proteže putem Sunca i meridijana određene lokacije na Zemlji [19].

### 3.3. Deklinacija kuta

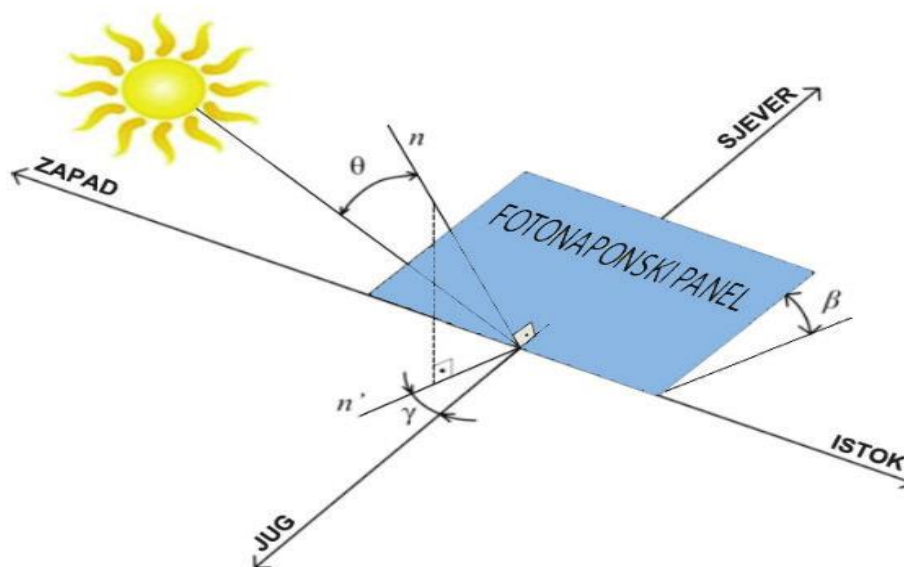
Kutna udaljenost pozicije Sunca prema jugu ili sjeveru ekvatora Zemlje definira se kao kut deklinacije. Zemljina os nagnuta je pod kutem koji iznosi  $23,34^\circ$  prema ravnini zemljine putanje ili orbite oko Sunca, što rezultira promjenom kutne deklinacije kroz godinu. Ta deklinacija varira od  $23,45^\circ$  sjeverno 21. prosinca do  $23,45^\circ$  južno 21. lipnja [20, 21, 22].

#### 3.3.1. Kut nadmorske visine ili elevacijski kut

Kut kojim se određuje visina Sunca na nebu naziva se kut nadmorske visine ili elevacijski kut. Mjeri se između zamišljenog pravca koji povezuje promatrača i Sunce te horizonta promatrača. Kada Sunce izađe ispod horizonta, kut nadmorske visine postaje negativan [18].

#### 3.3.2. Sunčevi azimutni kut

Sunčevi azimutni kut poznat je kao kutna udaljenost od pravca juga do pravca promatranja k Suncu na tlo. Kada je sunčev azimutni kut pozitivan to označava smještaj istočno od juga, međutim kada je sunčev azimutni kut negativan to označava smještaj zapadno od juga [23]. Na slici 3.4 može se vidjeti sunčevi azimutni kut na fotonaponskom modulu. Položaj fotonaponskih modula u odnosu na Zemlju određuje se koristeći orijentacijski kut površine  $\gamma$  i nagibni kut površine  $\beta$ , dok se njezin položaj s obzirom na Sunce određuje kutom upada sunčevih zraka  $\theta$  [24].



Slika 3.4. Orijentacija i nagib fotonaponskog modula [23]

Kut koji se nalazi između pravca juga i pravca  $n'$  zove se orijentacijski kut površine  $\gamma$  ili azimut. Pravac  $n'$  predstavlja preslikavanje pravca  $n$  na vodoravnu ravaninu, gdje je pravac  $n$  okomica na površinu fotonaponskog modula. Azimut je pozitivnog iznosa kada se preslikavanje okomice nalazi zapadno od juga, dok je negativnog iznosa kada se preslikavanje okomica nalazi istočno od juga [23].

### **3.3.3. Geografska širina**

Geografska širina definira lokaciju ili točku na Zemlji kao kut radijalne linije koja povezuje tu lokaciju ili točku s središtem Zemlje, te njegovo preslikavanje na ravnini ekvatora. Zemljina os rotacije siječe površinu na geografskoj širini od  $90^\circ$  (Sjeverni pol) i do  $-90^\circ$  (Južni pol) [18].

## 4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE

U fotonaponskim sustavima nastaje električna energija koja je produkt pretvorbe energije sunčevog zračenja, ovaj preobražaj dopušta izravnu upotrebu svjetlosti Sunca za proizvodnju električne energije. Sunčeva svjetlost uključuje fotone s različitim energetska vrijednostima koje su povezane s raznim valnim duljinama spektra. Energija fotona se prikazuje kroz razne valne duljine energija fotona iznosi:

$$E = h \cdot f \quad (4-1)$$

$h$  – Planckova konstanta čija vrijednost iznosi  $6,625 \cdot 10^{34}$  Js

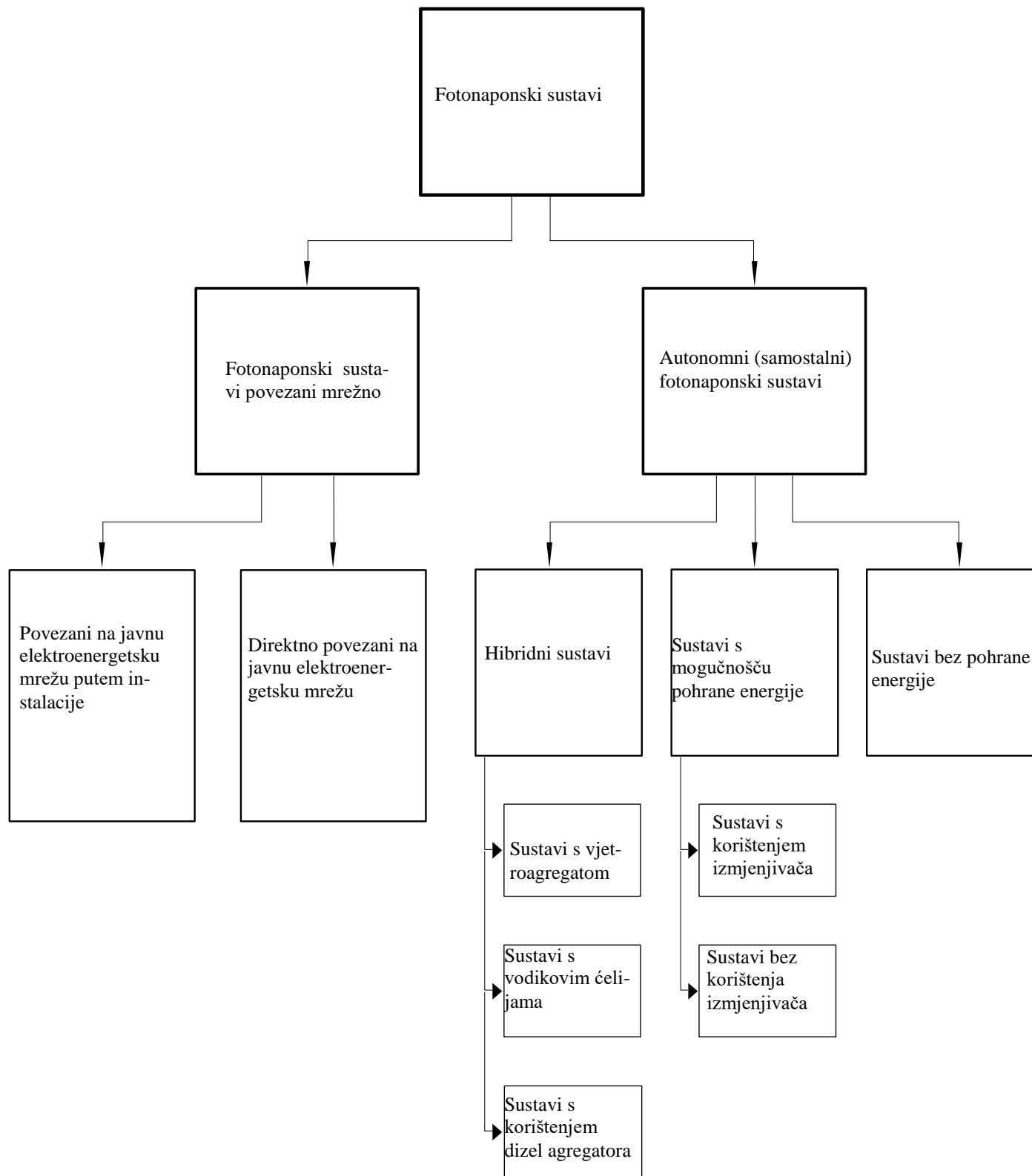
$f$  – frekvencija fotona varira obrnuto proporcionalno s valnom duljinom [15]

Kad fotoni udare u fotonaponsku ćeliju, mogu se odbiti, proći kroz nju ili mogu biti upijeni. Jedino upijeni fotoni oslobađaju energiju za stvaranje električne struje. Kad poluvodič upije dovoljnu količinu sunčevog svjetla, dolazi do izbacivanja elektrona iz atoma materijala. Posebna obrada površine omogućuje da se elektroni automatski kreću prema prednjoj strani fotonaponske ćelije. Na mjestima kojima su elektroni bili, stvaraju se praznine (šupljine). Elektroni se kreću k prednjoj strani fotonaponske ćelije, inducirajući nerazmjernost naboja između negativne i pozitivne strane, čime dolazi do stvaranja električnog potencijala. Kada se površine povežu provodnim materijalom, doći će do protoka struje. Fotonaponska elektrana uključuje sve uređaje, opremu i dijelove potrebne za rad fotonaponskih sustava. Postoje dvije vrste fotonaponskih elektrana u vezi s mrežnim spojem:

- mrežne (sustavi koji su spojeni mrežu)
- autonomne (samostalni sustavi koji nisu spojeni na mrežu) [15]

Na slici 4.1 prikazana je detaljna podjela fotonaponskih sustava.

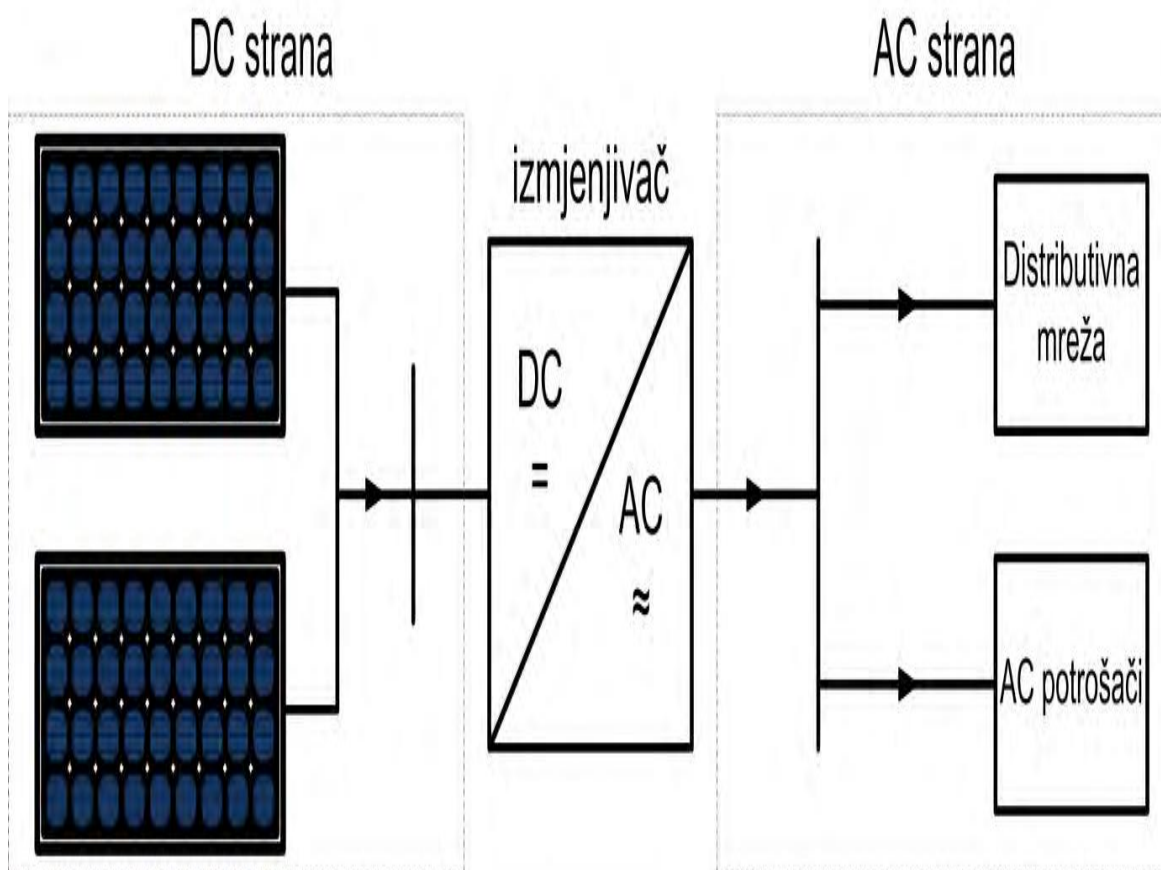




Slika 4.1. Vrste fotonaponskih sustava i njihova klasifikacija [15]

## 4.1. Mrežna fotonaponska elektrana

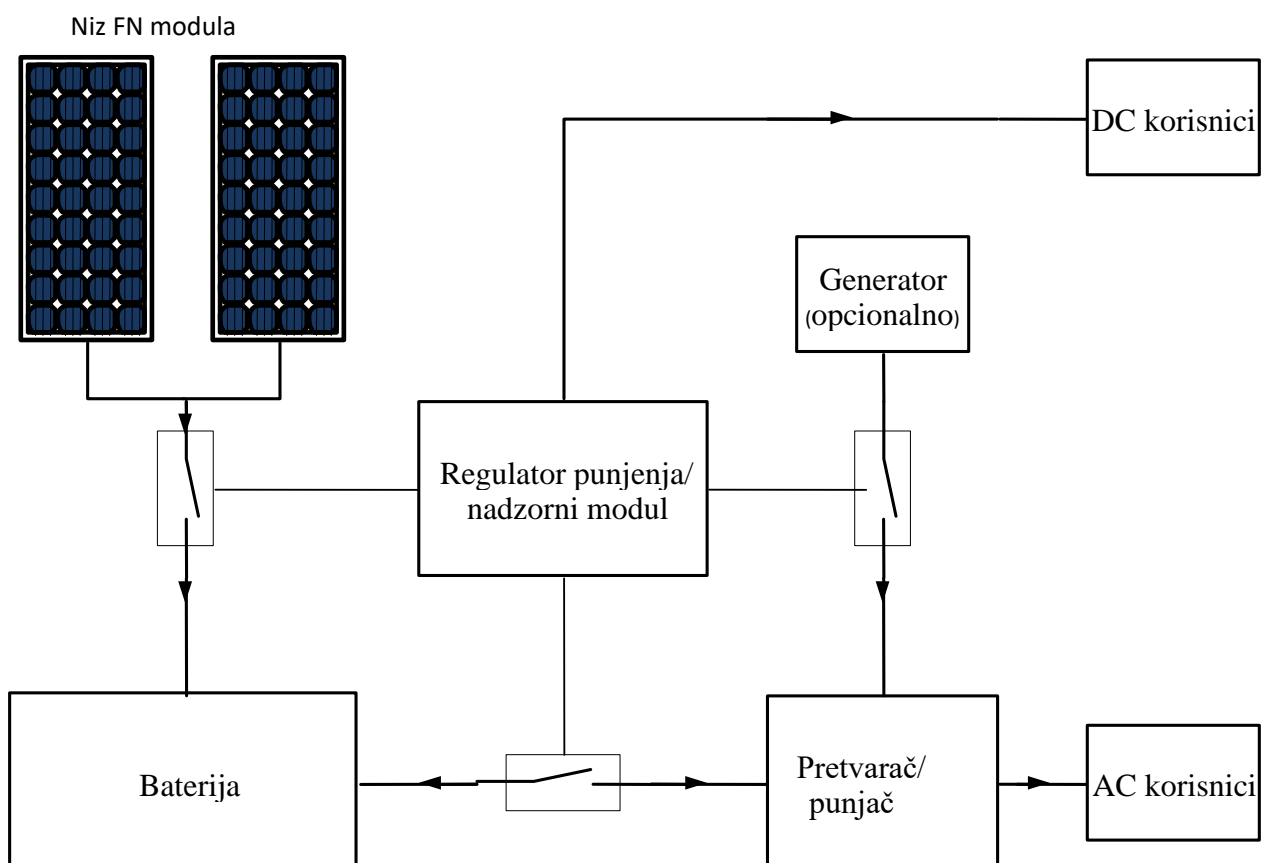
Mrežne fotonaponske elektrane su povezane s elektroenergetskom mrežom. U ovim mrežnim fotonaponskim elektranama, ne trebaju punjači niti baterije jer se električna energija koje je proizvedena upotrebljava na licu mjesta, a višak se isporučuje u elektroenergetsku mrežu a može se u nekim situacijama sva proizvedena električna energija predati u mrežu. Baterija je možda potrebna za mala kritična opterećenja, poput prvotnih kontrola i računala. Istosmjerna struja prvo se transformira u izmjeničnu putem pretvarača, onda se valni oblik filtrira i tek tada se struja koja je filtrirana pušta u mrežu. Na slici 4.2 prikazuje se shema mrežne fotonaponske elektrane.



Slika 4.2. Shema mrežnog fotonaponskog sustava [15]

## 4.2. Autonomna (samostalna) fotonaponska elektrana

Autonomne fotonaponske elektrane mogu samostalno opskrbljivati korisnike bez povezivanja na mrežu. Takve elektrane trebaju zadovoljiti sve zahtjeve korisnika za električnom energijom. Pošto je dotok sunčeve energije varijabilan te zavisi o prirodnim čimbenicima, te proizvodnja električne energije u fotonaponskim elektranama nije stalno u stanju ispunjavati zahtjeve za korisnike. Stoga, takve elektrane zahtijevaju baterije zato da bi se mogao višak proizvedene električne energije skladištiti kada proizvodnja nadmašuje potrošnju i koristiti se u slučajevima kada, na primjer, nedostaje sunčeve energije ili potrošnja nadmašuje proizvodnju. Autonomne fotonaponske elektrane nemoraju imati baterije, onda se autonomne fotonaponske elektrane upotrebljavaju za napajanje korisnika koji upotrebljavaju električnu energiju samo kada je raspoloživa. Na slici 4.3 se prikazuje se dijelovi autonomne (samostalne) fotonaponske elektrane.



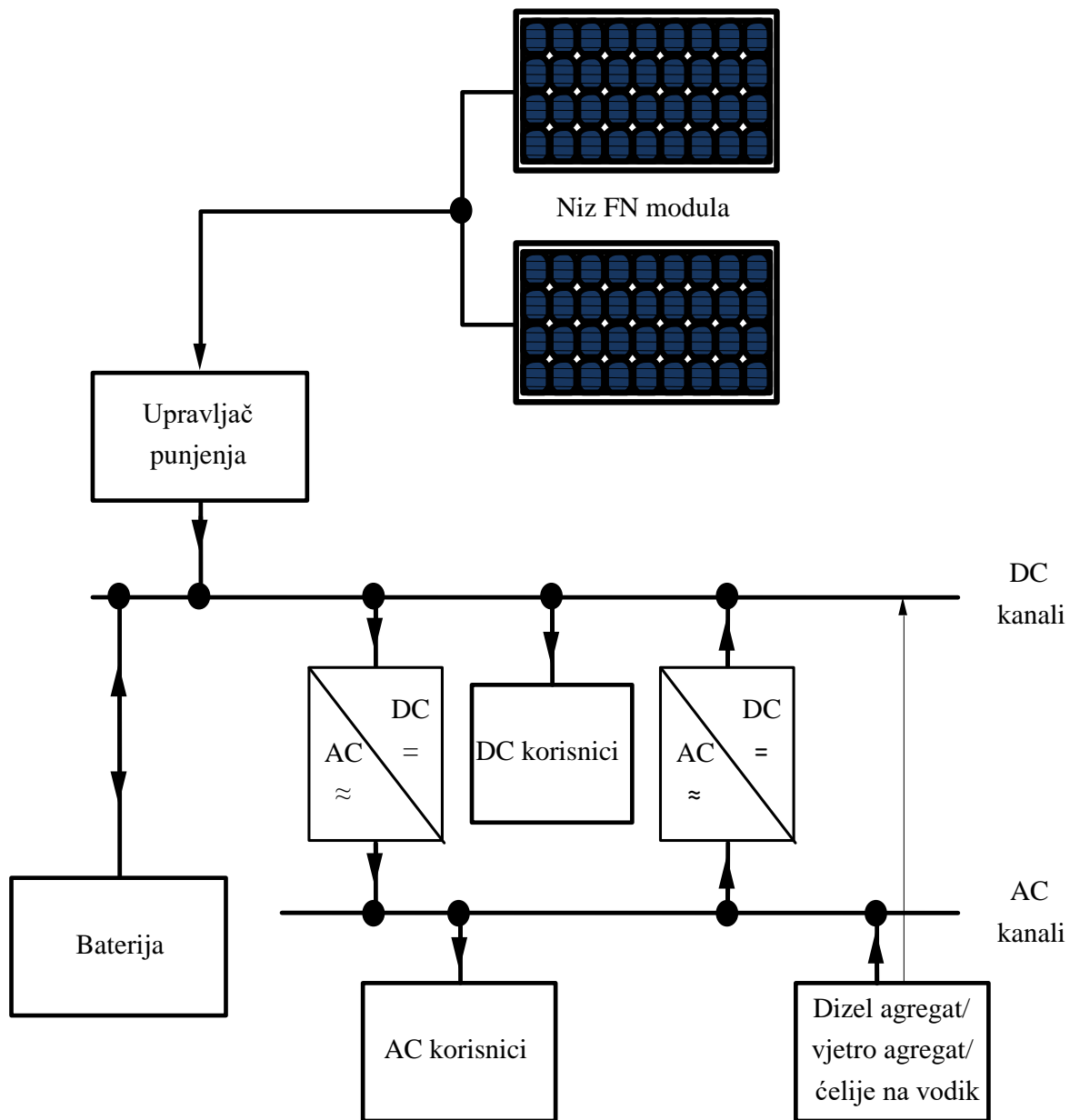
Slika 4.3. Shema autonomne fotonaponske elektrane [15]

Osnovne komponente autonomne (samostalne) fotonaponske elektrane su:

- Tragač maksimalne snage identificira trenutne izlaze napona i struje sustava i kontinuirano prilagođava radnu točku kako bi maksimalizirao izlaznu snagu u postojećim okolnostima. Izlaz sustava ide prema pretvaraču koji mijenja istosmjernu struju u izmjeničnu. Izlaz se može upotrijebiti i za napajanje baterija.
- Regulator punjenja uglavnom je istosmjerni (DC-DC) pretvarač. Ako nakon punjenja baterija ostane dodatna snaga, usmjerava se na neki oblik grijača, koji služe kao grijači prostora kod autonomnog sustava. Kad sunce nije prisutno, baterije se prazne preko pretvarača s ciljem da osiguraju napajanje korisnicima. Dioda baterije upotrebljava se za pražnjenje baterije kada je punjač isključen nakon punog punjenja ili iz različitih razloga. Dioda sustava izolira sustav od baterije, sprječavajući pražnjenje u toku noći.
- Nadzorni modul prikuplja ulazne podatke sustava, poput struje i napona sustava i baterije, prati status punjenja baterije bilježeći ampersate punjenja/pražnjenja i upravlja punjačem, pretvaračem pražnjenja, te upravlja punjačima prema potrebi.
- Modul upravljanja je centralni upravljač za cijeli sustav.

#### **4.2.1. Autonomna hibridna fotonaponska elektrana**

Budući da intenzitet sunčevog zračenja nema stalnu vrijednost i ovisi o godišnjem dobu, a noću ga nema, autonomne fotonaponske elektrane trebaju spremnik energije (baterija). S obzirom na visoku cijenu baterija, način za smanjivanje broja neophodnih baterija je ubacivanje dodatnog napajanja u autonomni sustav. U sklopu fotonaponsku elektranu, uglavnom se dodaju dizel-agregati ćelije na vodik i vjetroagregati kao dodatni izvori energije. Fotonaponske elektrane koje uključuju dodatni izvor napajanja uz fotonaponske module zovu se hibridnim fotonaponskim elektranama. Kod sustava s vjetroagregatima prednost je što tijekom noći, kada nema sunčeve svjetlosti, postoji mogućnost da će vjetar puhati i tako proizvoditi električnu energiju. Ako je energija proizvedena vjetroagregatom veća od potrošnje, može se pohraniti i koristiti tijekom noći, što nije moguće kod nehibridnih autonomnih fotonaponskih elektrana [15]. Na slici 4.4 prikazani su djelovi autonomne hibridne fotonaponske elektrane.

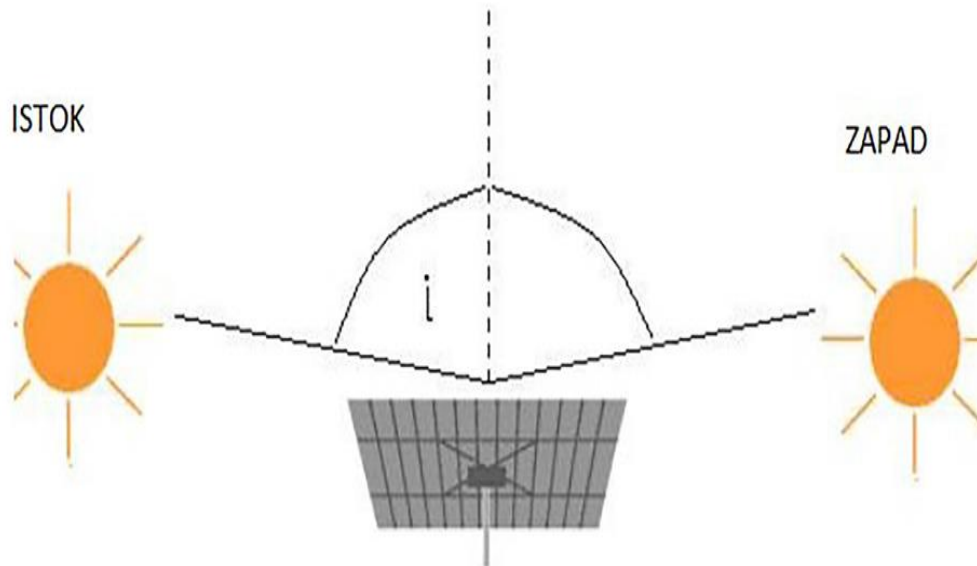


Slika 4.4. Autonomna hibridna fotonaponska elektrana [15]

## 5. FOTONAPONSKI SUSTAVI ZA PRAĆENJE SUNCA

### 5.1. Fiksni fotonaponski sustav za praćenje Sunca

Fiksni fotonaponski sustav nalazi se na odabranoj lokaciji pod kutom koji je optimalan bez opcije pomicanja funkcionalne površine, što ga čini stacionarnom točkom u usporedbi sa Suncem. Teoretski prikaz rotacije Sunca oko fotonaponskih modula prikazuje se na slici 5.1. Određivanje snage i energije kod fiksnog fotonaponskog sustava vrši se na temelju kuta pod kojim sunčeve zrake padaju na fotonaponski modul. Kako se upadni kut postaje sve veći, time i gubitci proizvedene snage također su veći. Fiksni fotonaponski sustav će imati gubitak od približno 14% u području  $\pm 30^\circ$  upadnog kuta. Gubitci brzo rastu kada upadni kut prelazi  $\pm 30^\circ$ , a pri kutu od  $\pm 75^\circ$  gubitci premašuju 75%. Zaključno, fiksni fotonaponski sustavi proizvedu otprilike 25% ukupne energije tijekom izlaska i zalaska sunca [25].



Slika 5.1. Prikaz fiksnog fotonaponskog sustava tokom dana [25]

## 5.2. Strategija praćenja Sunca

Fotonaponski sustav praćenja se oslanja na algoritme s zadanim parametrima koji su zasnovani na matematičkim proračunima o kretanju Sunca s ciljem da bi utvrdili poziciju Sunca u zadano vrijeme te usmjerili fotonaponske module prema njemu. Ovaj sustav ne koristi zatvorenu petlju (koja će biti objašnjena u kasnijem djelu rada) niti se koriste ikakvi senzori. Zbog toga je algoritam ključan za efikasno funkcioniranje sustava [26].

U radu [27] istražuje se praktična primjena praćenog paraboličnog koncentratora koji se oslanja na unaprijed izračunate azimutne i elevacijske kutove. Postiže temperaturu između 200–600 °C, dok su njegove statične verzije ostvarile između 80–200 °C. Otkrivanje pozicije sunca u ovom sustavu obavlja se kroz upotrebu mikroprocesora i elektrooptičkih senzora. Mikroprocesor prima signal o položaju sunca i koji daje uputstva za upravljanje motorima time se postiže precizno usmjeravanje koncentratora prema sunčevim zrakama.

U radu [28] razvijen je vrlo točan jednoosni fotonaponski sustav praćenja koji upotrebljava 3 fotosenzora, elektronički sklop i istosmjerni motor s prijenosnicima za redukciju. Fotosenzori služe pružaju ulazne informacije elektroničkom sklopu koji zatim upravlja istosmjernim motorom. Sustav funkcionira prema unaprijed zadanom algoritmu za praćenje kretanja Sunca. Također, dodatno su dodani senzori koji kontinuirano provjeravaju položaj Sunca i aktiviraju motore kako bi fotonaponski moduli bili precizno usmjereni prema Sunčevim zrakama.

## 5.3. Jednoosni fotonaponski sustav za praćenje Sunca

Jednoosni fotonaponski sustavi su sustavi koji koriste praćenje s jednom osi posjeduju jedan slobodni stupanj kretanja funkcionirajući kao rotacijska os. Rotacijska os tragača većinom je koordinirana s pravim sjevernim meridijanom [18]. U istraživanju prikazanom u radu [29] razvijen je sustav praćenja Sunca s poboljšanom primjenom fotonaponskih modula. Ovaj pristup koristi jednostavno praćenje Sunca putem fotonaponskog sustava s jednom os, koji se pokreće podsredstvom koračnog motora i senzora svjetla. Implementacijom ovog sustava postignuta je povećana učinkovitost dobivanja energije jer fotonaponski moduli uvijek ostaju pod optimalnim kutem prema sunčevim zrakama. Konkretno, povećanje snage sustava postignuto je za 30% u usporedbi s fiksnim horizontalnim postavljanjem fotonaponskim modulima. Na slici 5.2 je prikazan jednoosni fotonaponski sustav s horizontalnoj osi, te slika 5.3 prikazuje jednoosni fotonaponski sustav sa vertikalnoj osi.



Slika 5.2. Jednoosni fotonaponski sustav praćenje Sunca s horizontalnoj osi [30]

Jednoosni fotonaponski sustav praćenja s horizontalnom osi okreću se oko osi koja je u horizontalnom položaju u odnosu na zemlju. Mana takvog načina praćenja je unatrag praćenje prilikom računanja položaja fotonaponskog modula [31].

Jednoosni fotonaponski sustavi za praćenje Sunca s vertikalnom osi rotiraju se od istoka prema zapadu, za vrijeme dana. Ova tehnologija, poznata i kao azimutsko praćenje, omogućuje fotonaponskim modulima da dinamički prilagođavaju svoj položaj kako bi maksimizirali prijem sunčeve energije

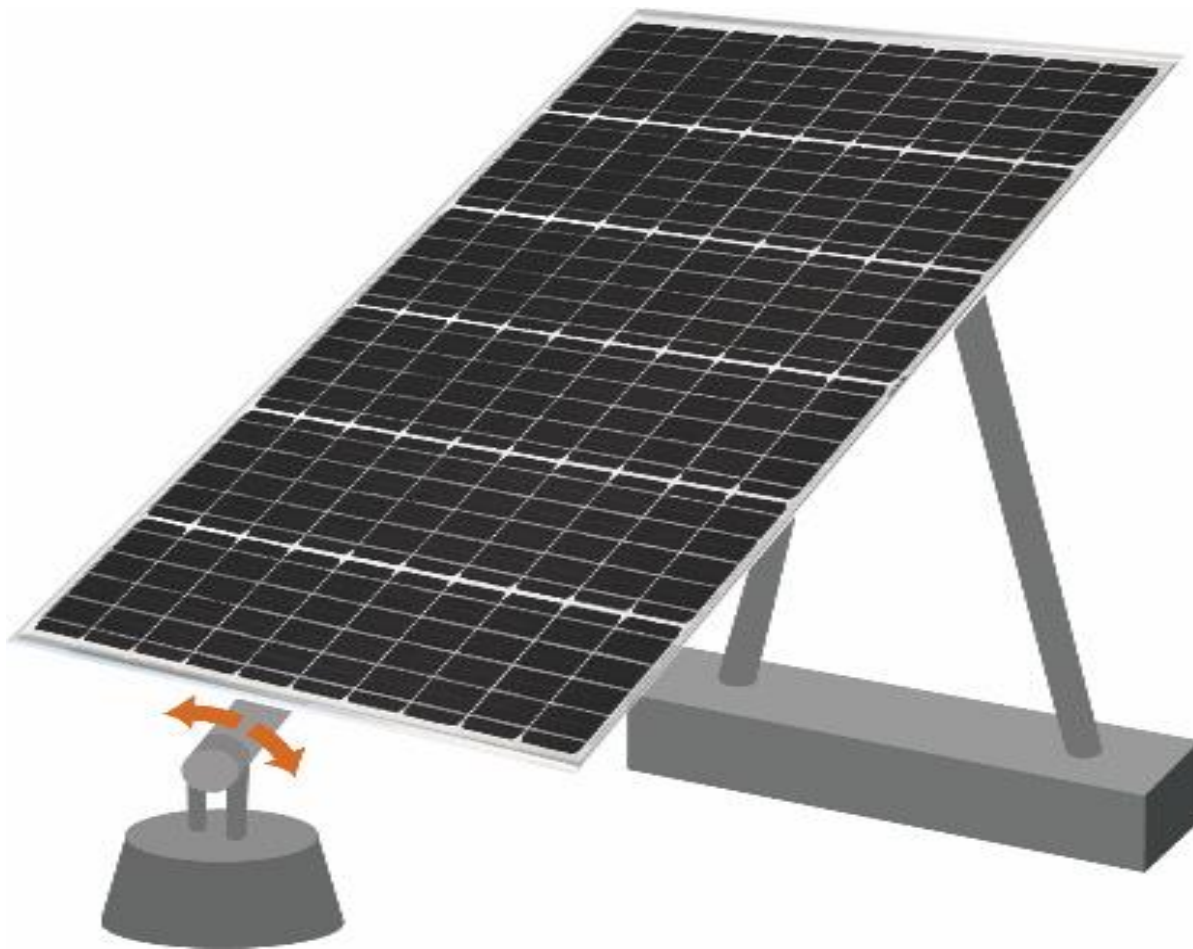


[18]. Prednost ovog sustava leži u sposobnosti povećanja proizvodnje energije za oko 40% više u usporedbi s fiksnim fotonaponskim modulima ta mjerenja su postignuta u radu [32].



Slika 5.3. Jednoosni fotonaponski sustav praćenje Sunca s vertikalnoj osi [30].

Kutovi nagiba fotonaponskih sustava za jednoosno praćenje često su reducirani radi smanjenja aerodinamičkog otpora i ukupne visine sustava. Tijekom praćenja, modul prelazi preko cilindrične strukture koja je rotacijski simetrična oko rotacijske osi [22]. Slika 5.4 prikazuje jednoosni fotonaponski sustav za praćenje Sunca s nagibnim kutom.

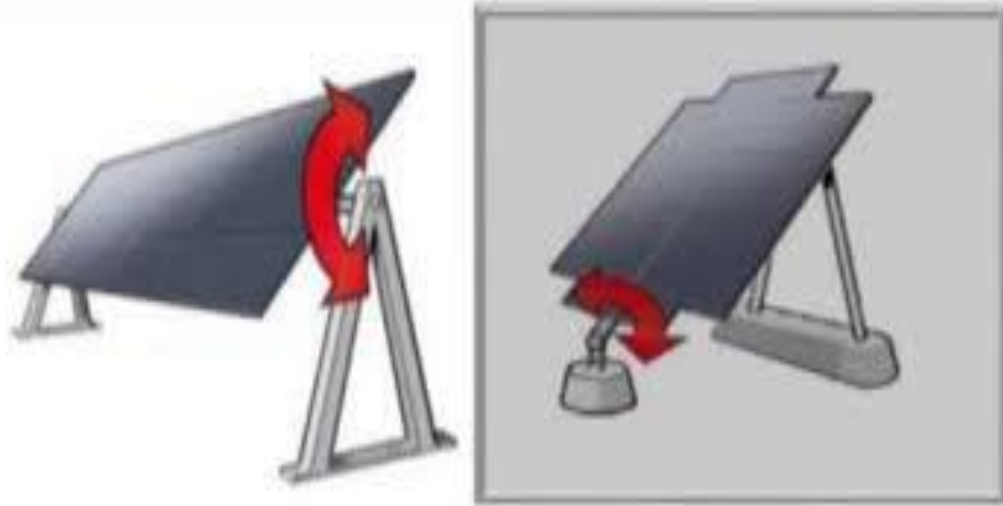


Slika 5.4. Jednoosni fotonaponski sustavi za praćenje s nagibnim kutom [30]

#### **5.4. Dvoosni fotonaponski sustav za praćenje Sunca**

Fotonaponski sustavi s dvoosnim praćenjem posjeduju dva stupnja slobode koje djeluju kao neovisne osi rotacije koje su međusobno okomite jedna na drugu. Primarna os je os koja je statična u odnosu na tlo, dok se sekundarna os pomiče odnosu na primarnu os [31].

Naziv dvoosnog praćenja sunca potječe od smještanja niza fotonaponskih modula na samom vrhu stupca. Tipično, kretanje od istoka prema zapadu ostvaruje se rotacijom niza oko vrha stupca. Vertikalna os azimuta je statična kako bi osigurala visoku fleksibilnost pri povezivanju opterećenja s opremom koja je postavljena na tlo, pri čemu kabel se neomotava oko stupca. Dvoosni fotonaponski sustavi za praćenje mogu smanjiti blokiranje od Sunčevih zraka i time povećati ukupnu akumuliranu snagu [33, 34, 35, 36, 37]. Na slici 5.5 prikazuje se horizontalni i vertikalni dvoosni fotonaponski sustav.



Slika 5.5. Dvoosni način praćenja s horizontalnom i vertikalnom prilagodbom [38]

## **5.5. Podjela fotonaponskih sustava za praćenje Sunca na temelju korištenja sustava upravljanja koji se upotrebljava**

### **5.5.1. Sustav praćenja zatvorene petlje**

Neovisno o načinu pogona fotonaponskog sustava za praćenje Sunca, neovisno o tome koristi li se pasivni sustav (koji je biti objašnjen u 5.6.1) ili prethodnom zadanom algoritmu, koji su zasnovani na matematičkim proračunima koji prate kretanje Sunca, postavljanjem senzora za utvrđivanje položaja Sunca omogućuje se sustavu da povratno prilagodi svoju orijentaciju. Kada se utvrdi položaj Sunca, informacija se vraća sustavu putem komparatora ili mikroprocesora koji analizira bilo kakvu pogrešku i daje signal motorima za korekciju orijentacije. Ovaj princip rada, gdje se sustav prilagođava prema stvarnom položaju Sunca putem povratne sprege, poznat je kao sustav zatvorene petlje kod fotonaponskih sustava za praćenje Sunca [26].

### **5.5.2. Sustav praćenja otvorene petlje**

Sustav praćenja otvorene petlje upotrebljava kontroler koji generira upravljački signal za motor samo na osnovi postojećih ulaznih podataka i ugrađenog algoritma sustava. Nema sposobnost praćenja i analize izlaznih podataka u odnosu na poželjeni izlaz. ovaj sustav je jeftiniji i praktičniji za provedbu u odnosu na sustav praćenja zatvorene petlje, s druge strane nema ugrađeni mehanizam za

ispravljanje pogrešaka, što znači da algoritam sam je potreban omogućiti postizanje željenih ciljeva [26].

## **5.6. Podjela fotonaponskih sustava za praćenje Sunca na temelju mehaničkog sustava koji se upotrebljava**

### **5.6.1. Pasivni sustav praćenja Sunca**

Ovaj sustav koristi tekućinu s malom točkom ključanja ili legure s formiranim pamćenjem kao aktuatora za orijentaciju fotonaponskih modula prema sunčevim zrakama, u zamjenu za mehanički pogon. Kada tekućina ili legura primi neusklađenu osvjetljenost, uzrokuje toplinsko proširenje u širećim plinovima ili metalnim legurama s formiranim pamćenjem, čime modul prolazi kroz rotacijsko kretanje s ciljem uspostave stabilnosti osvjetljenja. Ako jedna strana prikupi više toplinske energije za razliku od druge, dolazi do toga da plin počinje se širiti do druge strane praćenja, stvarajući nestabilnu gravitacijsku silu koja prisiljava fotonaponski modul da se savije dok se ne postigne stabilnost osvjetljenja. Unatoč manjoj složenosti i većem stupnju djelotvornosti pri većim temperaturama, ovaj sustav nije toliko djelotvoran pri nižim temperaturama [39].

### **5.6.2. Aktivni sustavi praćenja Sunca**

Aktivni sustavi praćenja Sunca upotrebljavaju električne pogone i mehaničke sustave prijenosa kako bi precizno orijentirali fotonaponske module okomito na Sunčeve zrake. Integriraju senzore, motore te i mikroprocesore za kontinuirano praćenje, što ih čini preciznijima i djelotvornijima od pasivnih sustava praćenja. Međutim, za njihov rad potrebno je kontinuirano napajanje energijom, što rezultira potrošnjom energije. Kada senzori detektiraju nejednako osvjetljenje zbog neujednačenog poravnjenja Suncu, formiraju diferencijalni signal koji komparator ili mikroprocesor koristi za određivanje smjera korekcije. Tada se signal šalje motorima kako bi se moduli usmjerili prema optimalnom položaju. Proces se prekida čim senzori registriraju jednako osvjetljenje [26].

Aktivni fotonaponski sustav upotrebljavao se u eksperimentima kako bi se popravila termička djelotvornost. Rezultati istraživanja pokazali su ukupni porast od 40% u prikupljenoj toplinskoj energiji u odnosu na fiksne fotonaponske sustave [40].

## **6. ANALIZA UTJECAJA SUSTAVA ZA PRAĆENJE SUNCA NA PERFORMANSE TIPSKOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA**

### **6.1. PV\*SOL premium program**

U ovom radu za analizu utjecaja sustava za praćenje Sunca koristio se PV\*SOL premium program. PV\*SOL premium služi kao vodeći alat u dizajniranju različitih fotonaponskih sustava. PV\*SOL premium omogućuje inženjerima, projektantima za izradu simulacije različitih vrsti fotonaponskih sustava. Bez obzira radi li se malim fotonaponskim sustavima koje se sastoje od nekoliko fotonaponskih modula, srednje velikim fotonaponskim sustavima na krovovima ili velikim fotonaponskim sustavima. Posebna značajka PV\*SOL premiuma je njegova napredna trodimenzionalna vizualizacija. Ova funkcionalnost omogućava detaljno prikazivanje svih uobičajnih vrsti u trodimenzionalnom prikazu, među kojima su fotonaponski moduli ugrađeni u krov, fotonaponski moduli postavljeni na krov, te fotonaponski moduli postavljeni na krovovima s malim nagibom, ogromnim industrijskim objektima ili velikim otvorenim površinama. Omogućuje dizajniranje sa do 7500 fotonaponskih modula koji su postavljeni na krovu te do 10000 fotonaponskih modula koji su paralelni s krovom, te izračun zasićenja koji se temelji na trodimenzionalnim objektima. Ova precizna procjena zasićenja izazvanog okolnim objektima omogućuje visoku točnost u predviđanju proizvodnje. PV\*SOL premium pruža korisnicima mogućnost da izračunaju koliko električne energije dobiveno iz fotonaponskih modula može biti iskorišteno direktno na mjestu potrošnje (samopotrošnja). PV\*SOL premium nudi alate za dizajn sustava za skladištenje električne energije. PV\*SOL premium omogućuje planiranje fotonaponskog sustava koji obuhvaća napajanje električnih vozila. Dodavanjem električnih vozila u fotonaponski sustav pruža korisnicima poboljšanje punjenja električnih vozila, što može znatno umanjiti energetske troškove i poboljšati održivost. PV\*SOL u svojoj bazi podataka sadrži više od 26000 fotonaponskih modula, te 7500 pretvarača i preko 5500 baterijskih sustava [41].

### **6.2. Postavke simulacijskih modela**

Provediti će se simulacija pomoću programa PV\*SOL premium kod fiksnog fotonaponskog sustava, jednoosnog fotonaponskog sustava s osi sjever-jug, jednoosni fotonaponski sustav s osi istok-zapad, jednoosni s vertikalnom rotirajućom os te simulacija dvoosnog fotonaponskog sustava. Prikazat će

se proizvedena električna energija u svakom mjesecu pri različitim konfiguracijama kuteva za svaki fotonaponski sustav kod FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 čija instalirana snaga iznosi 5670 W za sve načine praćenja, te za Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08(II) instalirana snaga iznosi 8910 W za sve načine praćenja Sunca. Pretvarač koji je korišten je SMA Solar Technology AG Sunny Boy 1.5-1VL-40

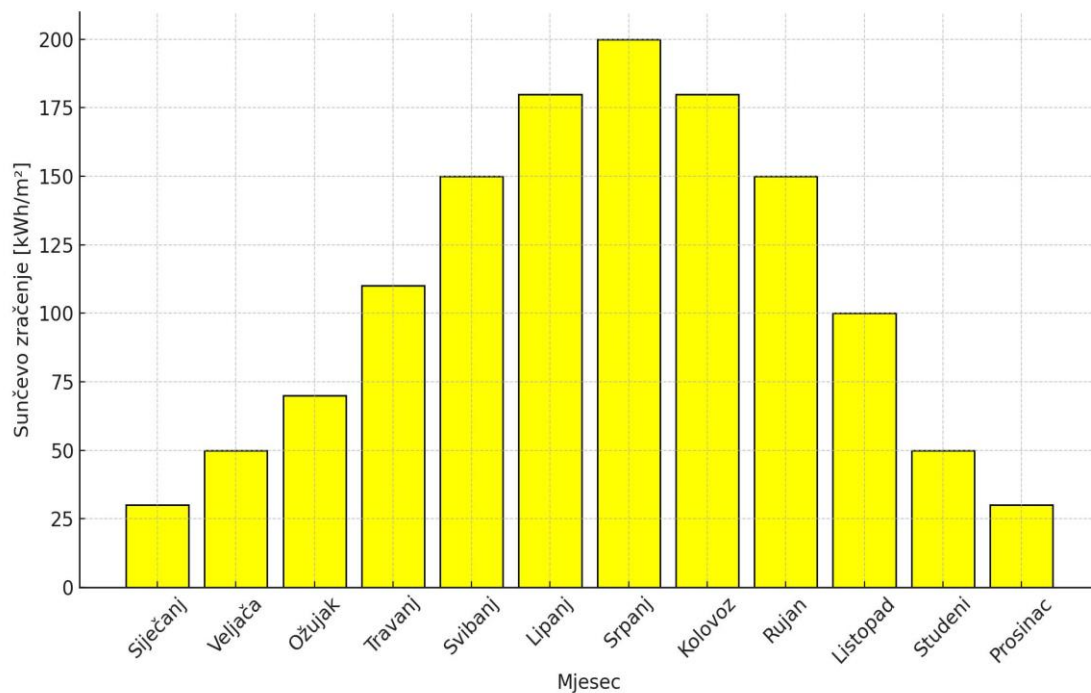
### 6.2.1. Podaci lokacije

Podaci lokacije su:

Lokacija: Pitomača, Hrvatska

- Geografska širina iznosi 45,88° N
- Geografska dužina iznosi 17,2° E

Slika 6.1 prikazuje količinu sunčevoga zračenja tijekom godine za lokaciju Pitomača:



Slika 6.1. Godišnja količina sunčevoga zračenja tijekom godine za lokaciju Pitomača

## 6.2.2. Podaci fotonaponskih modula i pretvarača

Tablice: 6.1 , 6.2 i 6.3 prikazuju podatke FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Tablica 6.1.  $I/U$  karakteristike pri standardnim testnim uvjetima STC za FN modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Napon u točki maksimalne snage [V]	54,8
Struja u točki maksimalne snage [A]	5,75
Napon u nepovezanom krugu [V]	65
Kratkospojna struja [A]	6,26
Nominalna snaga [W]	315
faktor ispune [ % ]	77,44
Stupanj djelovanja [ % ]	19,4

Tablica 6.2.  $I/U$  karakteristike pri slabom osvjetljenju za FN modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Snaga sunčevog zračenja [W/m <sup>2</sup> ]	200
Napon na točki maksimalne snage (slabo osvjetljenje) [V]	53,739
Struja na točki maksimalne snage (slabo osvjetljenje) [A]	1,196
Napon u nepovezanom krugu (slabo osvjetljenje) [V]	61,403
Kratkospojna struja (slabo osvjetljenje) [A]	1,252
Faktor ispune (slabo osvjetljenje) [ % ]	83,60
Relativni stupanj djelovanja (slabo svjetljenje) [ % ]	101,99

Tablica 6.3. Dimenzije za FN modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Raspon [mm]	800
Visina [mm]	2030
Površina [m <sup>2</sup> ]	1,62
Dubina [mm]	20
Raspon okvira [mm]	1
Masa [kg]	10

Tablice: 6.4 , 6.5 i 6.6 prikazuju podatke FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08(II)

Tablica 6.4. *I/U* karakteristike standardnim testnim uvjetima za FN modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08(II)

Napon u točki maksimalne snage [V]	42,6
Struja u točki maksimalne snage [A]	11,63
Napon u nepovezanom krugu [V]	51,5
Kratkospojna struja [A]	12,21
Nominalna snaga [W]	495
Faktor ispunje [ % ]	78,79
Stupanj djelovanja [ % ]	20,56

Tablica 6.5. *I/U* karakteristike pri slabom osvjetljenju za FN modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08(II)

Snaga sunčevog zračenja [W/m <sup>2</sup> ]	200
Napon u točki maksimalne snage (slabo osvjetljenje) [V]	41,998
Struja u točki maksimalne snage (slabo osvjetljenje) [A]	2,325
Napon u otvorenom krugu (slabo osvjetljenje) [V]	48,507
Struja kratkog spoja (slabo osvjetljenje) [A]	2,444
Faktor ispunje (slabo osvjetljenje) [%]	82,37
Relativna stupanj djelovanja (slabo osvjetljenje) [ % ]	98,54

Tablica 6.6. Dimenzije za FN modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08(II)

Raspon fmm]	1102
Visina [mm]	2187
Površina [m <sup>2</sup> ]	2,41
Dubina [mm]	35
Raspon okvira [mm]	35
Masa [kg]	26,5

Tablice: 6.7 , 6.8 i 6.9 prikazuju podatke jednog pretvarača SMA Solar Technology AG Sunny Boy 1.5-1VL-40., ali ukupno će se za FN polje od 5670 W koristiti 4 pretvarača, a za FN polje od 8910 W koristiti će se 6 pretvarača, te isto toliko će biti i tragača maksimalne snage.



Tablica 6.7. Podaci kod istosmjernog dijela za pretvarač SMA Solar Technology AG Sunny Boy 1.5-1VL-40

Istosmjerna nominalna snaga [kW]	1,6
Maksimalna istosmjerna snaga [kW]	3
Nominalni Istosmjerni napon [V]	360
Maksimalni dovodni napon [V]	600
Maksimalna dovodna struja u [A]	10
Maksimalna istosmjerna kratkospojena struja [A]	18
Broj istosmjernih priključaka	1

Tablica 6.8. Podaci kod izmjeničnoga dijela za pretvarač SMA Solar Technology AG Sunny Boy 1.5-1VL-40

Izmjenična nazivna snaga [kW]	1,5
Maksimalna izmjenična snaga [kVA]	1,5
Broj faza	1

Tablica 6.9. Tragač točke maksimalne snage za pretvarač SMA Solar Technology AG Sunny Boy 1.5-1VL-40

Raspon izlaza < 20% nazivnog napona [%]	100
Raspon izlaza > 20% nazivnog napona [%]	100
Paralelno djelovanje	Tragači točke maksimalne snage ne mogu biti međusobno povezani
Maksimalna dovodna struja po tragaču točke maksimalne snage [A]	10
Maksimalna kratkospojna struja po tragaču točke maksimalne snage [A]	18
Maksimalna dovodna snaga po tragaču točke maksimalne snage [kW]	3
Minimalni napon točke maksimalne snage [V]	50
Maksimalni napon točke maksimalne snage [V]	480

Svi podaci navedenih tablica u ovome potpoglavlju (6.2) su preuzeti iz PV\*SOL premium baze podataka.

## 6.3. Rezultati simulacije

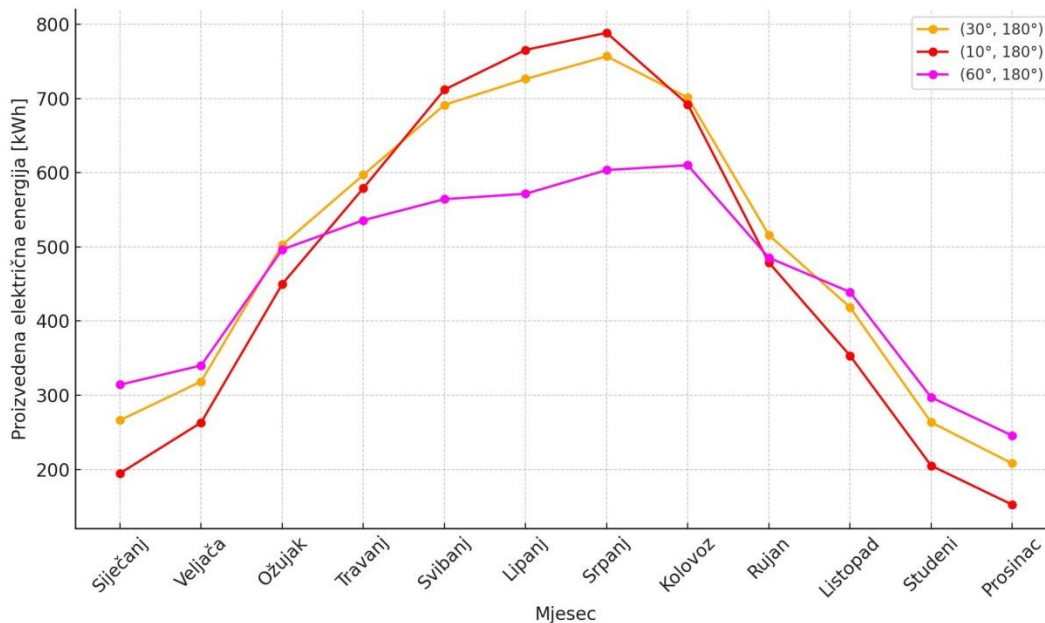
### 6.3.1. Simulacija fiksno fotonaponskog sustava

U ovoj konfiguraciji, moduli su nepomični, pričvršćeni pod određenim kutom nagiba prema tlu i orijentirani prema jugu kako bi maksimalno iskoristili sunčevu energiju. Parametri fiksno sustava za ovu simulaciju uključuju, nagibi panela: 30°, 10°, 60° i orijentaciju: Južna (azimut 180°). Ovi podaci vrijede za sva tri fotonaponska modula zato jer koriste isti kut nagiba od 30° i istu orijentaciju prema jugu, što je uobičajena postavka za maksimiziranje proizvodnje energije na lokacijama u sjevernoj hemisferi. Nagib fotonaponskog modula je kritičan za maksimalnu apsorpciju sunčeve energije. Ako je nagib premalen ili prevelik, performanse mogu biti značajno smanjene, posebno u zimskim ili ljetnim mjesecima.

Tablica 6.10 i slika 6.2 prikazuju iznos proizvedene energije fiksno FN sustava po mjesecima s korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 koji su fiksno postavljeni pri različitim konfiguracijama kuteva:

Tablica 6.10. Proizvodnja električne energije kod fiksno FN sustava s korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (10°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (60°, 180°) [kWh]
Siječanj	266,3	194,8	314,2
Veljača	318,5	263,2	340,1
Ožujak	502,7	449,8	496,4
Travanj	596,9	579,1	535,8
Svibanj	691,3	711,8	564,3
Lipanj	726,2	765,4	571,5
Srpanj	756,8	788,5	603,5
Kolovoz	701,1	691,9	610,0
Rujan	515,8	478,8	485,3
Listopad	418,6	353,4	439,1
Studeni	263,5	205,1	297,2
Prosinac	208,1	152,5	245,6
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	5965,8	5634,3	5505,3

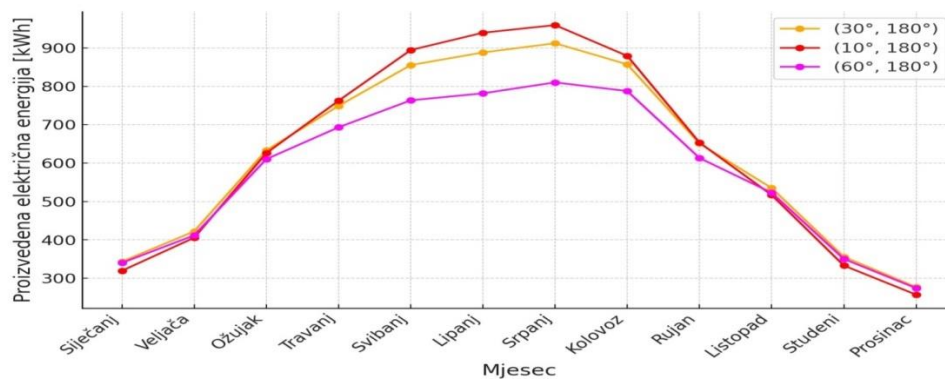


Slika 6.2. Proizvodnja električne energije kod Fiksni FN sustava s korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Tablica 6.11 i slika 6.3 prikazuju iznos proizvedene energije fiksnog FN sustava po mjesecima korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) pri različitim konfiguracijama kuteva.

Tablica 6.11. Proizvodnja električne energije kod fiksnih FN sustava s korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) s različitim konfiguracijama kuteva

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (10°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (60°, 180°) [kWh]
Siječanj	343,3	319,5	340
Veljača	422	405,4	411,6
Ožujak	633	625,8	610,2
Travanj	748,7	762,1	693
Svibanj	855,1	894,2	763,3
Lipanj	887,9	939,3	781,5
Srpanj	911,9	959,2	810
Kolovoz	857	879	787,4
Rujan	650,8	653,3	613,1
Listopad	534,9	516,7	522,7
Studeni	355,7	333	350,1
Prosinac	277,3	257,3	274,2
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	7477,6	7544,8	6957,1



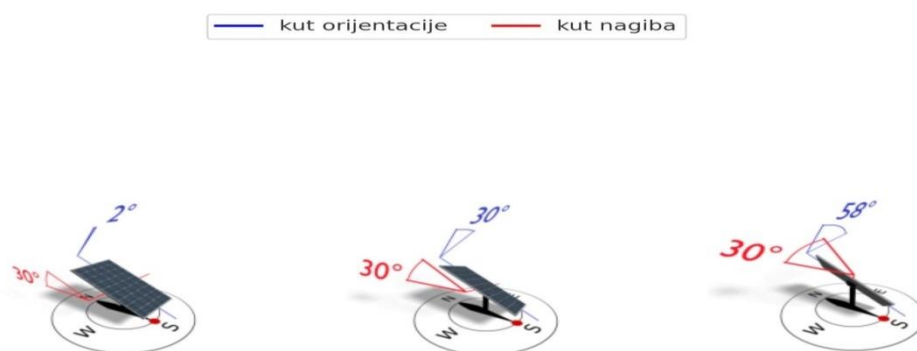
Slika 6.3. Proizvodnja električne energije kod fiksnih FN sustava s korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) s različitim konfiguracijama kuteva

Fotonaponski modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pokazuje različite razine proizvodnje električne energije ovisno o kutu instalacije. Za konfiguraciju kuta nagiba od  $30^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 5965,8 kWh. Kod konfiguracije kuta nagiba od  $10^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$ , godišnja proizvodnja je nešto niža, iznosi 5634,3 kWh. Za konfiguraciju kuta nagiba od  $60^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$ , proizvodnja je najmanja, ukupno 5505,3 kWh godišnje. Mjesečna proizvodnja varira, s najvišim vrijednostima u ljetnim mjesecima. U srpnju, primjerice, proizvodnja doseže 788,5 kWh za konfiguraciju ( $10^\circ$ ,  $180^\circ$ ), dok je za konfiguraciju ( $30^\circ$ ,  $180^\circ$ ) nešto niža, iznosi 756,8 kWh. Konfiguracija ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) u istom mjesecu proizvodi 603,5 kWh. U zimskim mjesecima, poput siječnja, proizvodnja je najviša kod konfiguracije ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) sa 314,2 kWh, dok konfiguracije ( $30^\circ$ ,  $180^\circ$ ) i ( $10^\circ$ ,  $180^\circ$ ) proizvode 266,3 kWh i 194,8 kWh, respektivno. Fotonaponski modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 vide se varijacije u proizvodnji ovisno o kutu instalacije. Kod konfiguracije kuta nagiba od  $30^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$ , godišnja proizvodnja je 7477,6 kWh. Konfiguracija kuta nagiba od  $10^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$  rezultira većom godišnjom proizvodnjom od 7544,8 kWh, dok konfiguracija kuta nagiba od  $60^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$  proizvodi 6957,1 kWh godišnje. Iz tablice se vidi da je modul najproduktivniji u ljetnim mjesecima, s najvišom proizvodnjom u srpnju od 959,2 kWh za konfiguraciju ( $10^\circ$ ,  $180^\circ$ ), za ( $30^\circ$ ,  $180^\circ$ ) je 911,9 kWh, i za ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) kWh. U siječnju, proizvodnja za konfiguraciju ( $30^\circ$ ,  $180^\circ$ ) je 343,3 kWh, a za konfiguraciju ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) je 340 kWh, a za ( $10^\circ$ ,  $180^\circ$ ) je 319,5 kWh.

### 6.3.2. Simulacija jednoosnog fotonaponskog sustava s os jug – sjever

Jednoosno praćenje sunca s osima jug-sjever koristi mehanizam koji omogućuje fotonaponskim modulima da se kreću u jednom smjeru, od istoka prema zapadu, prateći kretanje Sunca tijekom dana.

Sustav uključuje motor i kontrolni mehanizam koji pomiče module tijekom dana, a panele su montirane na strukturu koja im omogućuje rotaciju oko jedne osi koja je usmjerena prema sjeveru i jugu. Kut nagiba predstavlja kut fotonaponskog modula u odnosu na zemlju a kut orijentacije predstavlja horizontalni kut fotonaponskih modula od istoka prema zapadu. Kutevi koji će se testirati: Kut orijentacije (Horizontalni, nagib osi praćenja):  $160^\circ$  i  $120^\circ$ . Dok kut nagiba (vretikalni) će biti  $30^\circ$  i  $60^\circ$ . Slika 6.4 prikazuje jednoosni način praćenja s os jug-sjever. Tablica 6.12 i slika 6.5 prikazuju iznos proizvedene energije jednoosnog FN sustava s os jug-sjever po mjesecima, korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pri različitim konfiguracijama kuteva.

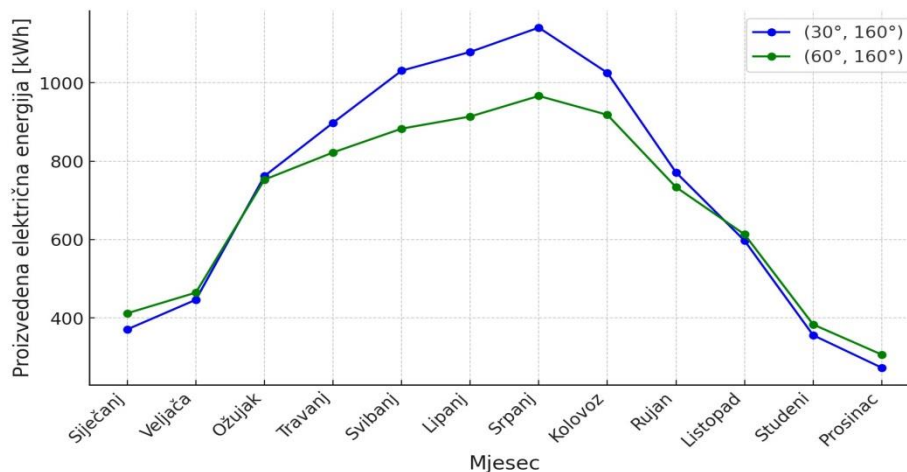


Slika 6.4. Jednoosni FN sustav s os jug-sjever

Tablica 6.12. Proizvodnja električne energije jednoosnog FN sustava s os jug-sjever korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji ( $30^\circ$ , $160^\circ$ )	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji ( $60^\circ$ , $160^\circ$ )	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji ( $30^\circ$ , $120^\circ$ )
Siječanj	370,9	412,0	370,9
Veljača	446,5	464,7	446,5
Ožujak	762,1	753,0	762,1
Travanj	898,1	822,4	898,1
Svibanj	1031,1	883,2	1031,1
Lipanj	1079,0	914,1	1079,1
Srpanj	1141,0	966,6	1141,0
Kolovoz	1025,7	918,4	1025,8
Rujan	771,6	733,9	771,6
Listopad	597,3	613,3	597,3
Studeni	356,0	383,4	356,0
Prosinac	273,0	306,5	273,0
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	8752,3	8171,5	8752,5

Iz tablice se vidi kako su vrijednosti kod konfiguracija (30°, 160°) i (30°, 120°) iste pa zbog bolje preglednosti na slici 6.5 konfiguracija (30°, 120°) nije prikazana.



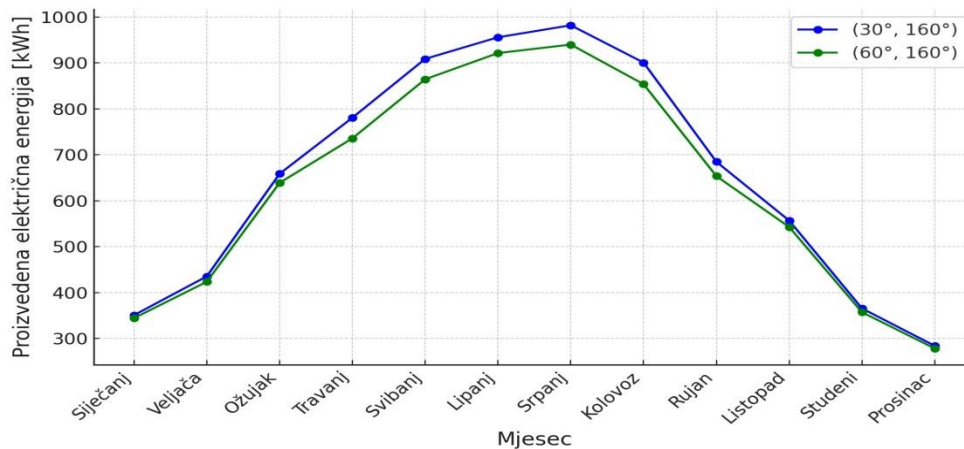
Slika 6.5. Proizvodnja električne energije jednoosnog FN sustava s os jug-sjever korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Tablica 6.13 i slika 6.6 prikazuju iznos proizvedene energije po mjesecima FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) s jednoosnim praćenjem jug-sjever pri različitim konfiguracijama kuteva.

Tablica 6.13. Proizvodnja električne energije kod jednoosnog FN sustava s os jug-sjever korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 160°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (60°, 160°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 120°) [kWh]
Siječanj	350,8	344,4	350,8
Veljača	435,3	423,5	435,4
Ožujak	658,6	638,9	658,7
Travanj	780,7	735,8	780,9
Svibanj	908,8	864,4	909
Lipanj	955,8	921,4	955,9
Srpanj	981,9	939,9	982,1
Kolovoz	900,7	853,6	900,9
Rujan	684,7	653,5	684,9
Listopad	556,7	542,7	556,8
Studeni	365,5	357,3	365,5
Prosinac	284	278,3	284
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	7863,5	7553,7	7864,9

Isto kao i u prošlom slučaju se vidi kako su vrijednosti kod konfiguracija  $(30^\circ, 160^\circ)$  i  $(30^\circ, 120^\circ)$  iste pa zbog bolje preglednosti na slici 6.6 konfiguracija  $(30^\circ, 120^\circ)$  nije prikazana.



Slika 6.6. Proizvodnja električne energije kod jednoosnog FN sustava s os jug-sjever korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Fotonaponski modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pokazuje različite razine proizvodnje električne energije ovisno o kutu instalacije. Za konfiguraciju kuta od  $30^\circ$  i azimuta  $160^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 8752,3 kWh. Kod konfiguracije kuta nagiba od  $60^\circ$  i kuta orijentacije od  $160^\circ$ , godišnja proizvodnja je nešto niža, iznosi 8171,5 kWh. Za konfiguraciju kuta nagiba od  $30^\circ$  i kuta orijentacije od  $120^\circ$ , proizvodnja je 8752,5 kWh godišnje, što je gotovo identično proizvodnji kod konfiguracije  $(30^\circ, 160^\circ)$ . Mjesečna proizvodnja varira, s najvišim vrijednostima u ljetnim mjesecima. U srpnju, primjerice, proizvodnja doseže 1141,0 kWh za konfiguracije  $(30^\circ, 160^\circ)$  i  $(30^\circ, 120^\circ)$ , dok je za konfiguraciju  $(60^\circ, 160^\circ)$  nešto niža, iznosi 966,6 kWh. U zimskim mjesecima, poput siječnja, proizvodnja je najviša kod konfiguracije  $(60^\circ, 160^\circ)$  sa 412,0 kWh, dok konfiguracije  $(30^\circ, 160^\circ)$  i  $(30^\circ, 120^\circ)$  proizvode 370,9 kWh. Fotonaponski modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) također pokazuje varijacije u proizvodnji ovisno o kutu instalacije. Kod konfiguracije kuta nagiba od  $30^\circ$  i kuta orijentacije od  $160^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 7863,5 kWh. Konfiguracija kuta nagiba od  $60^\circ$  i kuta orijentacije  $160^\circ$  rezultira godišnjom proizvodnjom od 7553,7 kWh, dok konfiguracija kuta nagiba od  $30^\circ$  i kuta orijentacije  $120^\circ$  proizvodi 7864,9 kWh godišnje. Mjesečne razlike u proizvodnji pokazuju da je modul najproduktivniji u ljetnim mjesecima, s najvišom proizvodnjom u srpnju od 982,1 kWh za konfiguraciju  $(30^\circ, 120^\circ)$ , za  $(30^\circ, 160^\circ)$  981,9 kWh te za  $(60^\circ, 160^\circ)$  je 939,9 kWh. U siječnju, proizvodnja za konfiguraciju  $(30^\circ, 160^\circ)$  iznosi 350,8 kWh, isto kao i kod konfiguracije  $(30^\circ, 120^\circ)$  dok je nešto niža za konfiguraciju  $(60^\circ, 160^\circ)$  s 344,4 kWh.

### 6.3.3. Izrada simulacije jednoosnog fotonaponskog sustava s os istok – zapad

Jednoosni sustav praćenja sunca s osi istok-zapad radi na principu rotacije fotonaponskih modula oko horizontalne osi koja se proteže u smjeru istok-zapad. Cilj ovog sustava je maksimalno iskoristiti sunčevu energiju tijekom cijelog dana, prateći putanju sunca na nebu. Nagibni kut odnosi se na kut između površine fotonaponskog modula i horizontalne ravnine. Kut orijentacije (horizontalni kut) odnosi se na kut rotacije fotonaponskih modula oko vertikalne osi u odnosu na pravac sjever-jug. Prva konfiguracija uključuje kutove ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ), gdje je nagibni kut od  $0^\circ$ , što znači da su moduli postavljeni horizontalno, dok je kut orijentacije od  $180^\circ$ . Druga konfiguracija obuhvaća kutove ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ), s kutom nagiba od  $60^\circ$ , pri čemu su moduli postavljeni pod nagibom od  $60^\circ$  prema horizontu, i kutom orijentacije od  $180^\circ$ . Treća konfiguracija razmatra kutove ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ), gdje je nagibni kut od  $0^\circ$ , što znači da su moduli postavljeni horizontalno, dok je kut orijentacije od  $120^\circ$ . Slika 6.7 prikazuje jednoosni FN sustav s os praćenja istok-zapad. Tablica 6.14 i slika 6.8 prikazuju iznos proizvedene energije jednoosnog FN sustava s os istok-zapad po mjesecima korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pri različitim konfiguracijama kuteva.



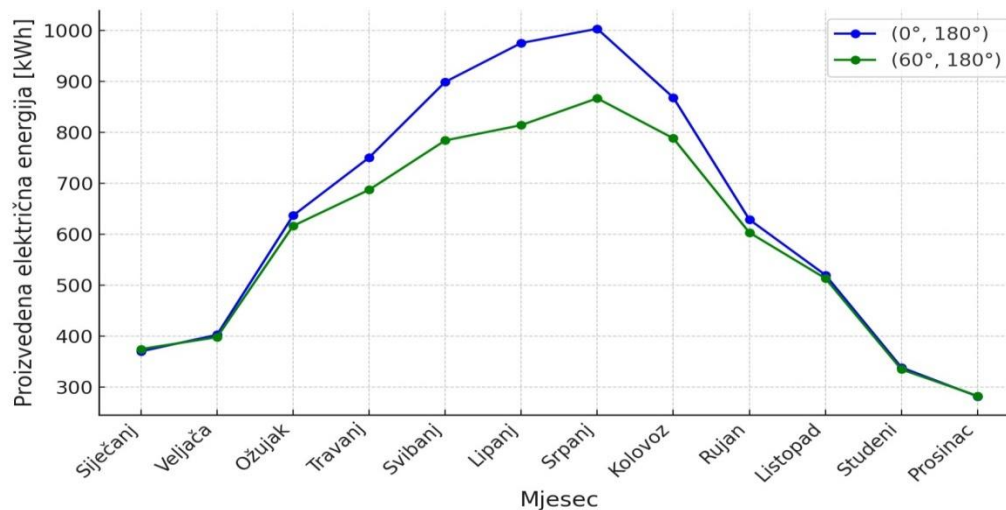
Slika 6.7. Jednoosni FN sustav s os istok-zapad



Tablica 6.14. Proizvodnja električne energije jednoosnog FN sustava s os istok-zapad korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (0°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (60°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (0°, 120°) [kWh]
Siječanj	370,1	374,7	368,8
Veljača	402,6	397,9	403,2
Ožujak	636,6	616,3	636,7
Travanj	750,5	687,2	750,5
Svibanj	898,8	784,0	898,9
Lipanj	975,3	814,1	975,4
Srpanj	1003,2	866,7	1003,2
Kolovoz	868,2	788,2	868,4
Rujan	628,8	603,2	628,8
Listopad	520,0	513,4	520,1
Studeni	338,6	334,6	339,0
Prosinac	281,7	282,8	281,5
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	7674,4	7063,1	7674,5

Zbog sličnosti podataka te zbog bolje preglednosti nije prikazana konfiguracija (0°, 120°) na slici 6.8.

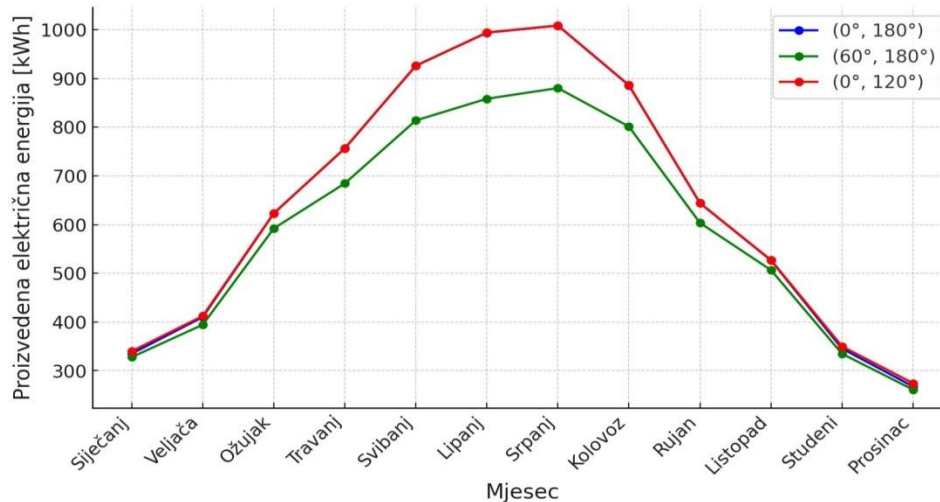


Slika 6.8. Proizvodnja električne energije kod jednoosnog FN sustava s os istok-zapad korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Tablica 6.15 i slika 6.9 prikazuju iznos proizvedene energije po mjesecima jednoosnog FN sustava s os istok-zapad korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||).

Tablica 6.15. Proizvodnja električne energije kod jednoosnog FN sustava s os istok-zapad korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (0°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (60°, 180°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (0°, 120°) [kWh]
Siječanj	335	327,9	340
Veljača	410,2	394,4	412,3
Ožujak	623	592,1	623,2
Travanj	756,5	684,5	756,6
Svibanj	926	813,8	926,2
Lipanj	993,9	858,3	994,2
Srpanj	1008,6	880,2	1008,7
Kolovoz	885,9	801,2	886,2
Rujan	644,1	603,4	644,1
Listopad	526,6	506,6	527,2
Studeni	345,5	334,8	350,1
Prosinac	267,7	261,2	274,2
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	7723,0	7058,4	7743,0



Slika 6.9. Proizvodnja električne energije jednoosnog FN sustava s os istok-zapad korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Fotonaponski modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pokazuje različite razine proizvodnje električne energije ovisno o kutu instalacije. Za konfiguraciju kuta od 0° i azimuta 180°, godišnja pro-

izvodnja iznosi 7674,4 kWh. Kod konfiguracije nagibnog kuta od  $60^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$ , godišnja proizvodnja je nešto niža, iznosi 7063,1 kWh. Za konfiguraciju nagibnog kuta od  $0^\circ$  i orijentacijskog kuta od  $120^\circ$ , godišnja proizvodnja je slična kao kod prve konfiguracije, iznosi 7674,5 kWh godišnje. Mjesečna proizvodnja varira, s najvišim vrijednostima u ljetnim mjesecima. U srpnju, primjerice, proizvodnja doseže 1003,2 kWh za konfiguracije ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ) i ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ), dok je za konfiguraciju ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) nešto niža, iznosi 866,7 kWh. U zimskim mjesecima, poput siječnja, proizvodnja je najviša kod konfiguracije ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) sa 374,7 kWh, dok konfiguracije ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ) i ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ) proizvode 370,1 kWh i 368,8 kWh, respektivno. Fotonaponski modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) također pokazuje varijacije u proizvodnji ovisno o kutu instalacije. Kod konfiguracije kuta nagiba od  $0^\circ$  i kuta orijentacije od  $180^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 7723,0 kWh. Konfiguracija kuta nagiba od  $60^\circ$  i kuta orijentacije  $180^\circ$  rezultira nižom godišnjom proizvodnjom od 7058,4 kWh, dok konfiguracija nagibnog kuta od  $0^\circ$  i orijentacijskog kuta od  $120^\circ$  proizvodi 7743,0 kWh godišnje. Mjesečne razlike u proizvodnji pokazuju da je modul najproduktivniji u ljetnim mjesecima s najvišom proizvodnjom u srpnju od 1008,7 kWh za konfiguraciju ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ), te ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ) iznosi 1008,6 kWh a za ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) iznosi 880,2 kWh. U siječnju, proizvodnja za konfiguraciju ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ) iznosi 335 kWh, dok je za konfiguraciju ( $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ) je 327,9 kWh, a kod konfiguracije ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ) je 340 kWh.

#### **6.3.4. Simulacija jednoosnog fotonaponskog sustava s rotirajućom vertikalnom os**

Kod jednoosnog praćenja vertikalnim načinom kod fotonaponskih ćelija, fotonaponski moduli su montirani na nosače koji se mogu okretati oko jedne osi, koja je vertikalno orijentirana. Ovaj sistem praćenja omogućava fotonaponskim modulima da prate kretanje Sunca tokom dana, povećavajući efikasnost i proizvodnju. Za fotonaponske module SunPower SPR-MAX3-AIR-315 i Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) analizirat će se konfiguracije s kutovima  $30^\circ$  nagiba i  $200^\circ$  orijentacijskog kuta,  $30^\circ$  nagiba i  $120^\circ$  orijentacijskog kuta, te  $90^\circ$  nagiba i  $200^\circ$  orijentacijskog kuta. Prva konfiguracija predstavlja postavljanje fotonaponskih modula pod blagim nagibom i specifičnim horizontalnim kutom. Druga konfiguracija također postavlja fotonaponske module pod blagim nagibom, ali s drugačijim horizontalnim kutom. Treća konfiguracija podrazumijeva da su fotonaponski moduli postavljeni vertikalno, zadržavajući prvi orijentacijski kut. Slika 6.10 prikazuje jednoosno praćenje FN sustava s rotirajućom vertikalnom os. Tablica 6.16 i slika 6.11 prikazuju iznos proizve-

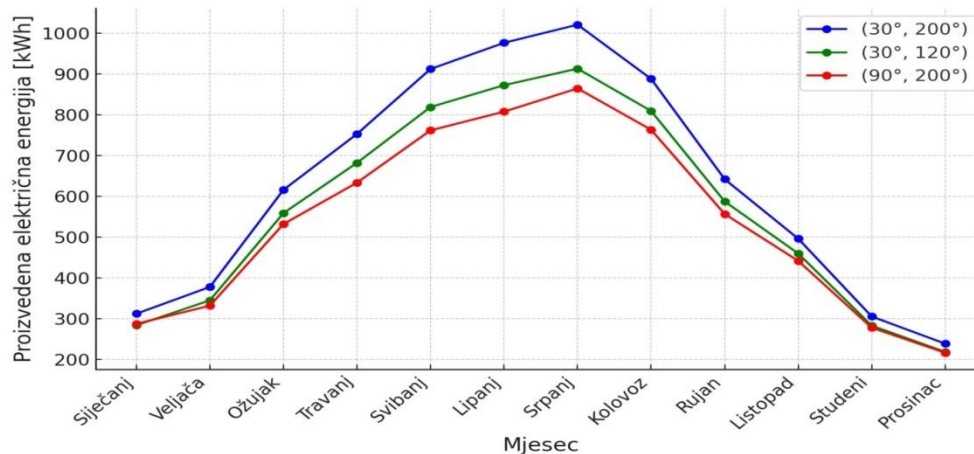
dene energije po mjesecima FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 s jednoosnim praćenjem s rotirajućom vertikalnom os pri različitim konfiguracijama kuteva.



Slika 6.10. Jednoosni FN sustav s rotirajućom vertikalnom os

Tablica 6.16. Proizvodnja električne energija FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 s jednoosnim praćenjem s rotirajućom vertikalnom os kod različitim konfiguraciji kuteva

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 200°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 120°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (90°, 200°) [kWh]
Siječanj	311,9	283,6	287,1
Veljača	377,6	344,8	331,7
Ožujak	615,6	558,5	531,7
Travanj	752,6	681,9	633,3
Svibanj	912,0	818,7	761,5
Lipanj	976,2	872,3	807,4
Srpanj	1020,7	912,9	864,4
Kolovoz	887,8	809,1	763,0
Rujan	641,8	587,3	556,4
Listopad	496,0	459,6	441,6
Studeni	305,1	282,6	277,7
Prosinac	238,4	218,3	216,1
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	7535,7	6829,6	6471,9

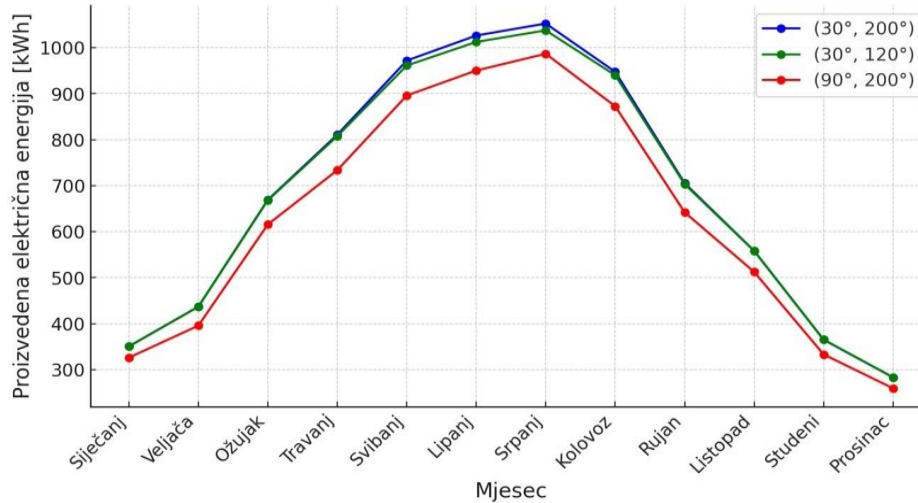


Slika 6.11. Proizvodnja električne energija FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 s jednoosnim praćenjem s rotirajućom vertikalnom os kod različiti konfiguraciji kuteva

Tablica 6.17 i slika 6.12 prikazuju iznos proizvedene energije jednoosnog FN sustava s rotirajućom vertikalnom os po mjesecima korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||).

Tablica 6.17. Proizvodnja električne energija jednoosnog FN sustava s rotirajućom vertikalnom os korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 200°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (30°, 120°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (90°, 200°) [kWh]
Siječanj	350,5	350,5	326,1
Veljača	436,9	436,9	395,7
Ožujak	669,3	668,4	615,7
Travanj	811	807,8	733,8
Svibanj	972,1	961,3	896,1
Lipanj	1026,5	1012,6	950,4
Srpanj	1052,6	1037,8	986,9
Kolovoz	947,6	940,2	872,7
Rujan	705,4	703,1	642,1
Listopad	558,3	558,1	512,5
Studeni	365,1	365,1	333,1
Prosinac	283,2	283,2	259,3
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	8178,5	8125	7524,4

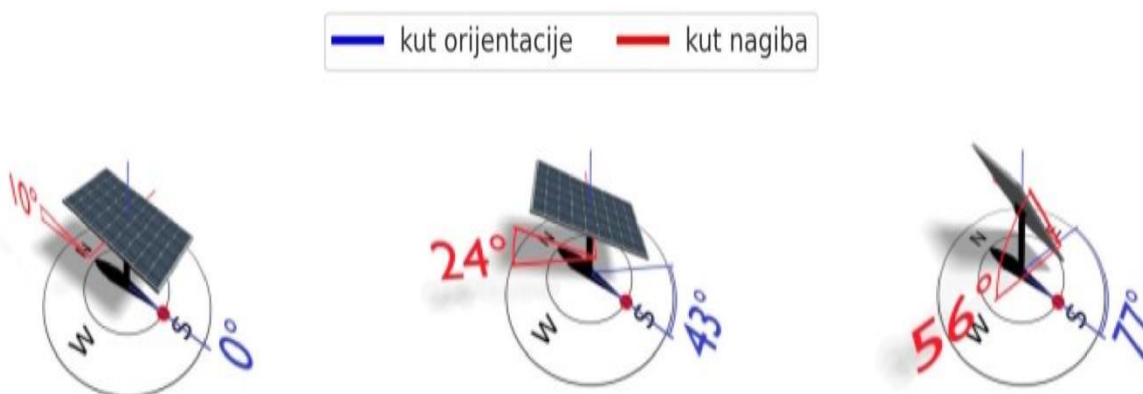


Slika 6.12. Proizvodnja električne energija jednoosnog FN sustava s rotirajućom vertikalnom os korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Fotonaponski modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pokazuje različite razine proizvodnje električne energije ovisno o kutu instalacije. Za konfiguraciju kuta od  $30^\circ$  i orijentacije  $200^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 7535,7 kWh. Kod konfiguracije kuta od  $30^\circ$  i kuta orijentacije od  $120^\circ$ , godišnja proizvodnja je nešto niža, iznosi 6829,6 kWh. Za konfiguraciju kuta od  $90^\circ$  i kuta orijentacije od  $200^\circ$ , proizvodnja je najmanja, ukupno 6471,9 kWh godišnje. Mjesečna proizvodnja varira, s najvišim vrijednostima u ljetnim mjesecima. U srpnju, primjerice, proizvodnja doseže 1020,7 kWh za konfiguraciju  $(30^\circ, 200^\circ)$ , dok je za konfiguraciju  $(30^\circ, 120^\circ)$  nešto niža, iznosi 912,9 kWh. Konfiguracija  $(90^\circ, 200^\circ)$  u istom mjesecu proizvodi 864,4 kWh. U zimskim mjesecima, poput siječnja, proizvodnja je najviša kod konfiguracije  $(30^\circ, 200^\circ)$  sa 311,9 kWh, dok konfiguracije  $(30^\circ, 120^\circ)$  i  $(90^\circ, 200^\circ)$  proizvode 283,6 kWh i 287,1 kWh, respektivno. Fotonaponski modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) također pokazuje varijacije u proizvodnji ovisno o kutu instalacije. Kod konfiguracije nagibnog kuta od  $30^\circ$  i orijentacijskog kuta od  $200^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 8178,5 kWh. Konfiguracija kuta nagiba od  $30^\circ$  i kuta orijentacije od  $120^\circ$  rezultira nižom godišnjom proizvodnjom od 8125,0 kWh, dok konfiguracija kuta nagiba od  $90^\circ$  i kuta orijentacije od  $200^\circ$  proizvodi 7524,4 kWh godišnje. Mjesečne razlike u proizvodnji pokazuju da je modul najproduktivniji u ljetnim mjesecima, s najvišom proizvodnjom u srpnju od 1052,6 kWh za konfiguraciju  $(30^\circ, 200^\circ)$ , te za  $(30^\circ, 120^\circ)$  iznosi 1037,8 kWh i za  $(90^\circ, 200^\circ)$  iznosi 986,9 kWh. U siječnju, proizvodnja za konfiguracije  $(30^\circ, 200^\circ)$  i  $(30^\circ, 120^\circ)$  iznosi 350,5 kWh, dok je nešto niža za konfiguraciju  $(90^\circ, 200^\circ)$  s 326,1 kWh.

### 6.3.5. Simulacija dvoosnog fotonaponskog sustava

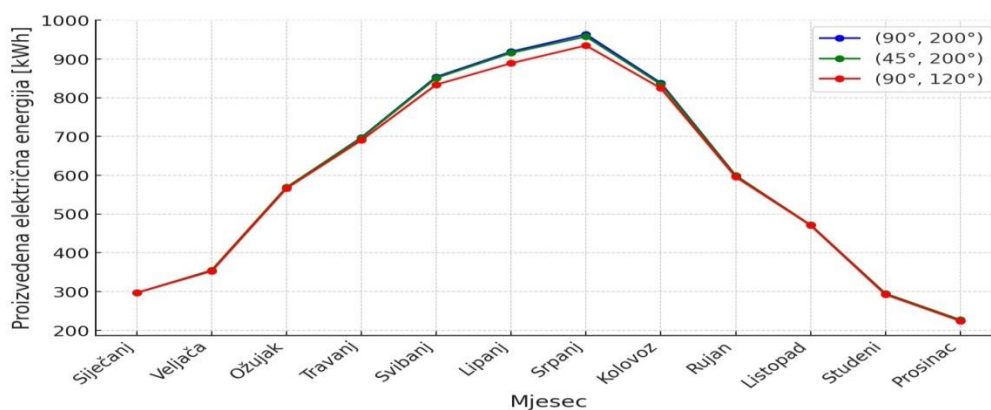
Dvoosni sustavi prilagođavaju i vertikalni i horizontalni kut modula, što omogućava optimalno pozicioniranje prema suncu tijekom cijelog dana i svih godišnjih doba. Time se značajno povećava učinkovitost proizvodnje električne energije, jer fotonaponski moduli mogu uhvatiti maksimalnu količinu sunčevih zraka. Za ovu simulaciju koristit će se tri različite konfiguracije kutova za dvoosno praćenje. Prva konfiguracija uključuje  $90^\circ$  nagibne fleksibilnosti i  $200^\circ$  orijentacijskog praćenja. Ova postavka omogućava panelima maksimalnu vertikalnu fleksibilnost, što bi moglo biti korisno za analizu proizvodnje energije u periodima kada je sunce visoko na nebu. Druga konfiguracija smanjuje nagibni kut na  $45^\circ$ , dok zadržava orijentacijski kut na  $200^\circ$ . Ova konfiguracija može pružiti uvid u performanse sustava u uvjetima kada je optimalna kombinacija između dnevnog i sezonskog praćenja. Treća konfiguracija uključuje  $90^\circ$  nagibne fleksibilnosti, ali manji orijentacijski kut od  $120^\circ$ . Ova postavka može biti korisna za analizu performansi u različitim vremenskim uvjetima i sezonskim promjenama. Slika 6.13 prikazuje dvoosni način praćenja. Tablica 6.18 i slika 6.14 prikazuju proizvodnju električne energije za FN module SunPower SPR-MAX3-AIR-315 s dvoosnim praćenjem.



Slika 6.13. Dvoosni FN sustav

Tablica 6.18. Proizvodnja električne energije kod dvoosnog FN sustava korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (90°, 200°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (45°, 200°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (90°, 120°) [kWh]
Siječanj	296,9	296,8	296,9
Veljača	353,0	355,1	352,9
Ožujak	568,0	569,0	566,3
Travanj	697,5	696,2	690,5
Svibanj	853,9	850,9	833,9
Lipanj	918,9	915,6	889,0
Srpanj	963,6	957,9	934,8
Kolovoz	838,0	834,7	824,6
Rujan	599,1	598,9	595,7
Listopad	471,3	472,0	471,0
Studeni	292,5	294,9	292,5
Prosinac	224,4	227,2	224,4
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	7076,1	7069,2	6972,5



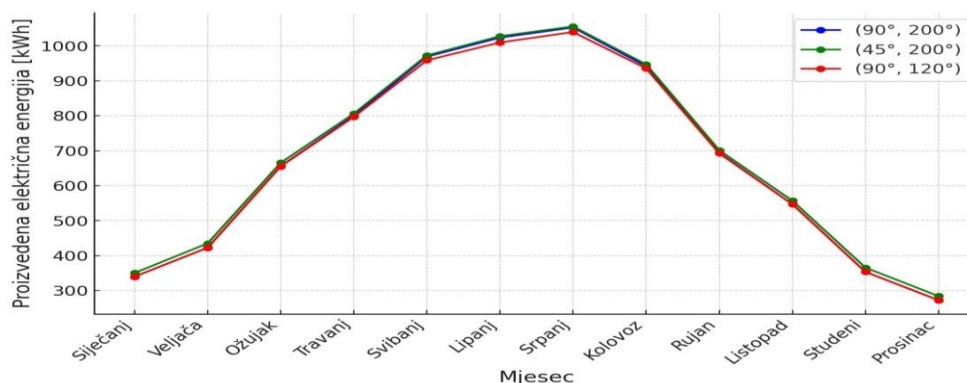
Slika 6.14. Proizvodnja električne energije kod dvoosnog FN sustava korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315

Tablica 6.19 i slika 6.15 prikazuju iznos proizvedene energije dvoosnog FN sustava po mjesecima korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||).



Tablica 6.19. Proizvodnja električne energije dvoosnog FN sustava korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Mjesec	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (90°, 200°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (45°, 200°) [kWh]	Proizvedena električna energija pri konfiguraciji (90°, 120°) [kWh]
Siječanj	339,9	350,5	339,9
Veljača	422,7	435	422,6
Ožujak	655,9	665,5	655,3
Travanj	800	806,2	796,8
Svibanj	969,1	972,8	958,6
Lipanj	1023,5	1027,6	1009,6
Srpanj	1052,5	1055,5	1039,4
Kolovoz	941,6	946,9	935,4
Rujan	694,2	701,2	692,4
Listopad	547,3	557	547,1
Studeni	353,4	365,6	353,4
Prosinac	272,5	284,1	272,5
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	8072,6	8167	8022,9



Slika 6.15. Proizvodnja električne energije dvoosnog FN sustava korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||)

Fotonaponski modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pokazuje različite razine proizvodnje električne energije ovisno o kutu instalacije kod dvoosnog praćenja. Za konfiguraciju kuta od 90° i orijentacije 200°, godišnja proizvodnja iznosi 7076,1 kWh. Kod konfiguracije kuta od 45° i orijentacije 200°, godišnja proizvodnja je nešto niža, iznosi 7069,2 kWh. Za konfiguraciju kuta od 90° i orijentacije 120°, proizvodnja je najmanja, ukupno 6972,5 kWh godišnje. Mjesečna proizvodnja varira, s najvišim vrijednostima u ljetnim mjesecima. U srpnju, primjerice, proizvodnja doseže 963,6 kWh za konfiguraciju (90°, 200°), dok je za konfiguraciju (45°, 200°) nešto niža, iznosi 957,9 kWh.

Konfiguracija ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ) u istom mjesecu proizvodi 934,8 kWh. U zimskim mjesecima, poput siječnja, proizvodnja je vrlo slična za sve tri konfiguracije, oko 296,9 kWh. Fotonaponski modul Tri-na Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) također pokazuje varijacije u proizvodnji ovisno o kutu instalacije kod dvoosnog praćenja. Kod konfiguracije kuta nagiba od  $90^\circ$  i kuta orijentacije od  $200^\circ$ , godišnja proizvodnja iznosi 8072,6 kWh. Konfiguracija kuta nagiba od  $45^\circ$  i kuta orijentacije od  $200^\circ$  rezultira nešto većom godišnjom proizvodnjom od 8167,0 kWh, dok konfiguracija kuta nagiba od  $90^\circ$  i kuta orijentacije od  $120^\circ$  proizvodi 8022,9 kWh godišnje. Mjesečne razlike u proizvodnji pokazuju da je modul najproduktivniji u ljetnim mjesecima, s najvišom proizvodnjom u srpnju od 1055,5 kWh za konfiguraciju ( $45^\circ$ ,  $200^\circ$ ) te za ( $90^\circ$ ,  $200^\circ$ ) je 1052,5 kWh i za ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ) je 1039,4 kWh. U siječnju, proizvodnja za konfiguracije ( $90^\circ$ ,  $200^\circ$ ) i ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ) iznosi 339,9 kWh, dok je nešto viša za konfiguraciju ( $45^\circ$ ,  $200^\circ$ ) s 350,5 kWh.

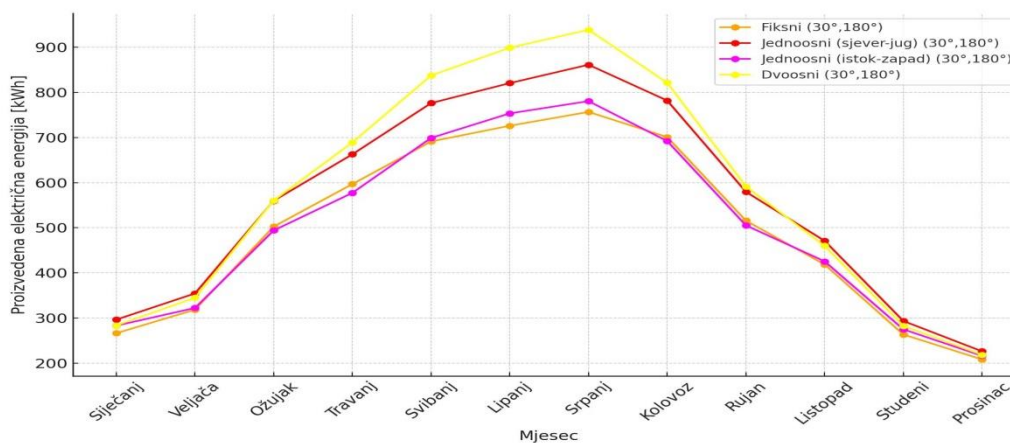
### **6.3.6. Usporedba proizvodnje električne energije za različite sustave praćenja**

Fiksni sustav postavlja fotonaponske module pod nagibnim kutom od  $30^\circ$  u odnosu na horizontalnu ravninu, te s orijentacijskim kutom od  $180^\circ$ , bez mogućnosti prilagođavanja smjera prema kretanju sunca. Ovo jednostavno rješenje koristi statički položaj modula. Jednoosni sustav praćenja s osi istok-zapad omogućuje modulima da se kreću horizontalno s orijentacijskim kutom od  $180^\circ$ , prateći putanju sunca tijekom dana. Modulima su postavljeni pod nagibnim kutom od  $30^\circ$  i rotiraju se kako bi optimizirali izloženost sunčevim zrakama. Jednoosni sustav praćenja s osi sjever-jug omogućuje modulima vertikalno kretanje, također s orijentacijskim kutom od  $180^\circ$ , kako bi se prilagodili sezonskim promjenama položaja sunca. Moduli su postavljeni pod nagibnim kutom od  $30^\circ$ , ali se njihova orijentacija mijenja kroz godinu. Jednoosni sustav s rotirajućom vertikalnom osi kombinira prednosti oba prethodna sustava, omogućujući modulima da se kreću i horizontalno i vertikalno. Ovaj sustav koristi kut nagiba od  $30^\circ$  i orijentacijski kut od  $180^\circ$ , a rotacijska os omogućava optimalnu prilagodbu suncu. Dvoosni sustav praćenja pruža maksimalnu fleksibilnost, omogućujući fotonaponskim modulima da se prilagođavaju i horizontalno i vertikalno, prateći sunčevu putanju s velikom preciznošću. Moduli su postavljeni pod nagibnim kutom od  $30^\circ$  i orijentacijskim kutom od  $180^\circ$ . Tablica 6.20, slika 6.16 prikazuju proizvodnju električne energije po mjesecima, a slika 6.17 prikazuje ukupnu proizvodnju električne enegrije za različite FN sustave korištenjem FN modula Sun-Power SPR-MAX3-AIR-315.

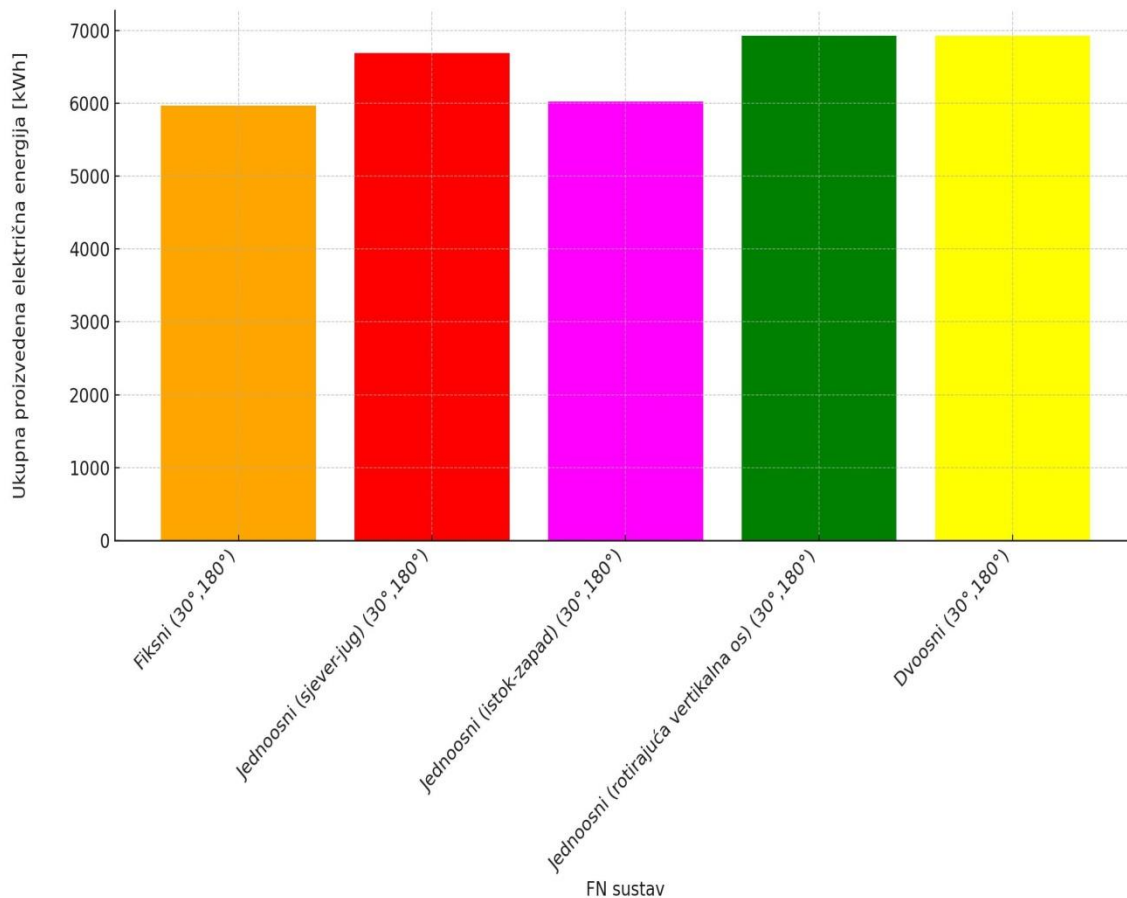
Tablica 6.20. Proizvodnja električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 s konfiguracijom (30°, 180°)

Mjesec	Proizvedena električna energija kod fiksnih sustava [kWh]	Proizvedena električna energija kod Jednoosnih sustava s os sjever-jug [kWh]	Proizvedena električna energija kod Jednoosnih sustava s os istok-zapad [kWh]	Proizvedena električna energija kod jednoosnih sustava s rotirajućom vertikalnom os [kWh]	Proizvedena električna energija kod dvoosnih sustava [kWh]
Siječanj	266,3	296,4	283,0	283,6	283,6
Veljača	318,5	354,5	322,3	344,9	344,9
Ožujak	502,7	560	494,1	560,4	560,4
Travanj	596,9	662,9	577,4	689,2	689,2
Svibanj	691,3	776,4	699,2	837,3	837,6
Lipanj	726,2	820,7	753,6	898,2	899,1
Srpanj	756,8	861,4	780,7	938,3	938,9
Kolovoz	701,1	782,0	692,2	821,4	821,5
Rujan	515,8	579,7	505,3	591,6	591,6
Listopad	418,6	471,0	425,6	459,9	459,9
Studeni	263,5	293,4	274,9	282,6	282,6
Prosinac	208,1	226,1	216,2	218,3	218,3
Ukupna proizvedena električna energija [kWh]	5965,8	6684,5	6024,5	6925,7	6927,6

Zbog bolje preglednosti na slici 6.16 i slici 6.17 nije prikazan jednoosni FN sustav s rotirajućom vertikalnom os zbog toga što su vrijednosti identične s dvoosnim sustavom.



Slika 6.16. Proizvodnja električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 s konfiguracijom (30°, 180°)



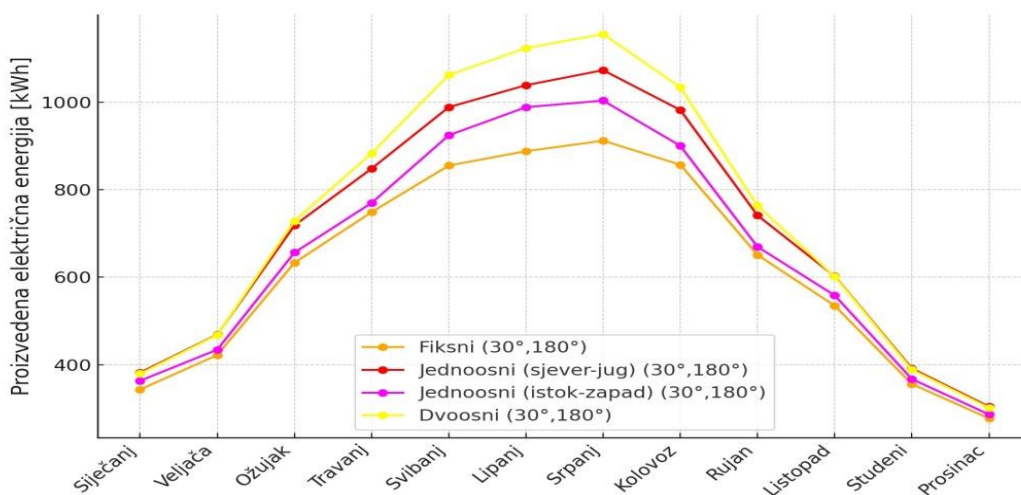
Slika 6.17. Stupčasti prikaz ukupne proizvodnje električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula Sun-Power SPR-MAX3-AIR-315 s konfiguracijom (30°, 180°)

Zbog bolje preglednosti na slici 6.16 i slici 6.17 nije prikazan jednoosni FN sustav s rotirajućom vertikalnom os zbog toga što su vrijednosti identične s dvoosnim sustavom.

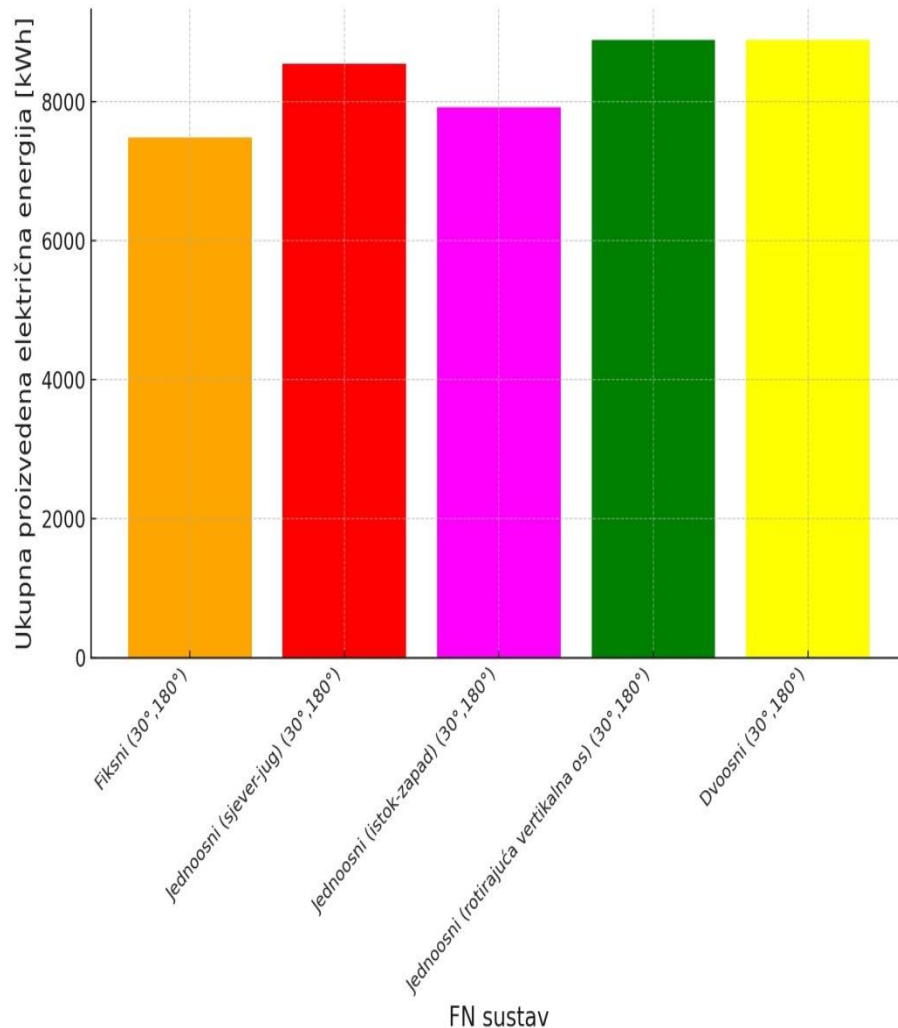
Tablica 6.21 te slika 6.18 prikazuju proizvodnju električne energije po mjesecima, dok slika 6.19 prikazuje stupčasti prikaz ukupne godišnje proizvodnje električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||).

Tablica 6.21. Proizvodnja električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) s konfiguracijom (30°, 180°)

Mjesec	Proizvedena električna energija kod fiksnih sustava [kWh]	Proizvedena električna energija kod Jednoosnih sustava s os sjever-jug [kWh]	Proizvedena električna energija kod Jednoosnog sustava s os istok-zapad [kWh]	Proizvedena električna energija kod jednoosnog sustava s rotirajućom vertikalnom os [kWh]	Proizvedena električna energija kod dvoosnog sustava [kWh]
Siječanj	343,3	381,8	363,3	379,3	379,3
Veljača	422,0	468,8	434,3	468,0	468,0
Ožujak	633,0	718,2	656,3	728,4	728,4
Travanj	748,7	848,1	769,7	883,0	883,0
Svibanj	855,1	988,5	924,3	1061,8	1062,1
Lipanj	887,9	1038,7	988,5	1122,7	1123,5
Srpanj	911,9	1073,0	1003,5	1154,9	1155,5
Kolovoz	857,0	982,0	900,2	1034,0	1034,0
Rujan	650,8	741,2	669,5	763,2	763,2
Listopad	534,9	602,4	558,4	601,5	601,5
Studeni	355,7	391,3	367,2	388,7	388,7
Prosinac	277,3	304,1	286,3	301,6	301,6
Ukupna proizvedena energija [kWh]	7477,6	8538,1	7920,5	8887,1	8888,8



Slika 6.18. Proizvodnja električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) s konfiguracijom (30°, 180°)



Slika 6.19. Stupčasti prikaz ukupne proizvodnje električne energije za različite FN sustave korištenjem FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) s konfiguracijom (30°, 180°)

Fotonaponski modul SunPower SPR-MAX3-AIR-315 pokazuje različite razine proizvodnje električne energije ovisno o vrsti sustava praćenja. Fiksni sustavi imaju godišnju proizvodnju od 5965,8 kWh. Jednoosni sustavi s os sjever-jug proizvode nešto manje, ukupno 6684,5 kWh godišnje. Jednoosni sustavi s os istok-zapad imaju još nižu proizvodnju, iznoseći 6024,5 kWh godišnje. Jednoosni sustavi s rotirajućom vertikalnom os proizvode 6925,7 kWh godišnje, dok dvoosni sustavi imaju sličnu proizvodnju od 6927,6 kWh godišnje. Najviša mjesečna proizvodnja kod fiksnih sustava zabilježena je u srpnju (756,8 kWh), dok je najniža u prosincu (208,1 kWh). Jednoosni sustavi s os sjever-jug također imaju najveću proizvodnju u srpnju (861,4 kWh) i najnižu u prosincu (226,1 kWh). Jednoosni sustavi s os istok-zapad pokazuju najveću proizvodnju u srpnju (780,7 kWh) i najnižu u prosincu (216,2 kWh). Jednoosni sustavi s rotirajućom vertikalnom os ima-

ju najveću proizvodnju u srpnju (938,3 kWh) i najnižu u prosincu (218,3 kWh). Dvoosni sustavi imaju slične trendove s najvećom proizvodnjom u srpnju (938,9 kWh) i najnižom u prosincu (218,3 kWh). Vidimo kako se kod ovoga FN modula SunPower SPR-MAX3-AIR-315 najbolje rezultate prikazuje dvoosni i jednoosni s rotirajućom vertikalnom os sustav. Fotonaponski modul Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 pokazuje veće razine proizvodnje električne energije za sve vrste sustava praćenja u usporedbi sa SunPower modulom. Fiksni sustavi imaju godišnju proizvodnju od 7477,6 kWh. Jednoosni sustavi s os sjever-jug proizvode znatno više, ukupno 8538,1 kWh godišnje. Jednoosni sustavi s os istok-zapad imaju proizvodnju od 7920,5 kWh godišnje. Jednoosni sustavi s rotirajućom vertikalnom os proizvode 8887,1 kWh godišnje, dok dvoosni sustavi imaju najveću proizvodnju od 8888,8 kWh godišnje. Najviša mjesečna proizvodnja kod fiksnih sustava zabilježena je u svibnju (855,1 kWh), dok je najniža u prosincu (277,3 kWh). Jednoosni sustavi s os sjever-jug imaju najveću proizvodnju u srpnju (1073,0 kWh) i najnižu u prosincu (304,1 kWh). Jednoosni sustavi s os istok-zapad pokazuju najveću proizvodnju u srpnju (1003,5 kWh) i najnižu u prosincu (286,3 kWh). Jednoosni sustavi s rotirajućom vertikalnom os imaju najveću proizvodnju u srpnju (1154,9 kWh) i najnižu u prosincu (301,6 kWh). Dvoosni sustavi pokazuju slične trendove s najvećom proizvodnjom u srpnju (1155,5 kWh) i najnižom u prosincu (301,6 kWh). Najbolje rezultate kod ovoga FN modula Trina Solar VERTEX TSM-495-DE18M.08 (||) pokazuje dvoosni sustav te jednoosni sustav s rotirajućom vertikalnom os.

## 7. ZAKLJUČAK

Fotonaponski sustavi za praćenje Sunca označavaju ključni napredak u tehnologiji obnovljivih izvora energije, naročito u kontekstu sunčeve energije. Ovi sustavi pružaju optimizaciju generiranja električne energije iz fotonaponskih ćelija slijedeći putanju Sunca tijekom dana, čime se maksimizira količina zračenja koje fotonaponski moduli primaju. Kroz analizu i primjenu različitih metoda praćenja, kao što su jednosmjerni (azimutni) i dvosmjerni (azimutni i elevacijski) sustavi, jasno je da sustavi za praćenje mogu povećati stupanj djelotvornosti i proizvodnju energije za značajan postotak u odnosu na fiksne sustave. Jedan od ključnih aspekata pri implementaciji sustava za praćenje Sunca jest ekonomska isplativost. Troškovi instalacije i održavanja sustava za praćenje moraju biti opravdani povećanjem proizvodnje energije. Iako su inicijalni troškovi veći, dugoročne koristi u smislu povećane energetske proizvodnje i smanjenih troškova za električnu energiju čine ove sustave atraktivnim rješenjem. Tehnološki napredak i smanjenje troškova komponenti, poput motora i senzora, dodatno pridonose ekonomskoj isplativosti sustava za praćenje. Integracija sustava za praćenje s fotonaponskim panelima također zahtijeva pažljivo planiranje i optimizaciju. Aspekti kao što su lokalni klimatski uvjeti, geografski položaj i specifikacije fotonaponskih ćelija igraju ključnu ulogu u dizajnu i implementaciji učinkovitog sustava. Studije pokazuju da u regijama s visokim brojem sunčanih sati sustavi za praćenje značajno povećavaju proizvodnju energije, dok u područjima s većom količinom oblačnih dana koristi mogu biti manje izražene. Ekološki aspekti fotonaponskih sustava za praćenje sunca također su značajni. Korištenjem ovih sustava smanjuje se ovisnost o fosilnim gorivima, smanjuju se emisije stakleničkih plinova i doprinosi se održivom razvoju. Održiva proizvodnja energije iz fotonaponskih sustava ima ključnu ulogu u borbi protiv klimatskih promjena i očuvanju okoliša. U zaključku, fotonaponski sustavi za praćenje Sunca predstavljaju tehnološki napredak koji značajno povećava učinkovitost i proizvodnju električne energije. Kombinacija ekonomske isplativosti, tehnološke optimizacije i ekoloških koristi čini ove sustave ključnim elementom u budućnosti obnovljivih izvora energije. Njihova implementacija zahtijeva pažljivo planiranje i optimizaciju, no dugoročne koristi čine ih vrijednom investicijom za održivu i čistu energiju.



## LITERATURA

- [1] R. Adib, A. Zervos, "Global Status Report on Renewable Energy 2023 – Energy Supply Module," REN21 Secretariat, pp. 1-126, 2023.
- [2] V. Tyagi, N.A. Rahim, N. Rahim, A. Jeyraj, L. Selvaraj. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013; 20(0):443–461.
- [3] M.K. El-Adawi, I.A. Al-Nuaim. The temperature functional dependence of VOC for a solar cell in relation to its efficiency: New approach. *Desalination* 2007; 209(0):91–96.
- [4] P. Singh, S.N. Singh, M. Lal, M. Husain. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2008; 92:1611–1616.
- [5] J. Siecker, K. Kusakana, B.P. Numbi. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017; 79(0):192–203.
- [6] J. Nijs, S. Sivoththaman, J. Szlufcik, K. De Clercq, F. Duerinckx, E. Van Kerschaever, R. Einhaus, J. Poortmans, T. Vermeulen, R. Mertens. Overview of solar cell technologies and results on high efficiency multicrystalline silicon substrates. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 1997; 48(0):199–217.
- [7] R.A. Beg, M.R.I. Sarker, R. Parvez. An experimental investigation on photovoltaic power output through single axis automatic controlled sun tracker. In *Proceedings of the 4th BSME-ASME, Dhaka, Bangladesh, 2008*, pp.27–29.
- [8] Z.M. Zhao, X.Y. Yuan, Y. Guo, F. Xu, Z.G. Li. Modelling and simulation of a two-axis tracking system. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.* 2010;224(0):125–137.
- [9] K.S. Karimov, M.A. Saqib, P. Akhter, M.M. Ahmed, J.A. Chattha, S.A. Yousafzai. A simple photovoltaic tracking system. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2005; 87:49–59.
- [10] T.T.N. Khatib, A. Mohamed, R.J. Khan, N. Amin. A novel active sun tracking controller for photovoltaic panels. *J.Appl.Sci.*2009;9:4050–4055.
- [11] F.R. Rubio, M.G. Ortega, F. Gordillo, M. Lopez-Martinez. Application of new control strategy for sun tracking. *Energy Convers. Manag.* 2007; 48:2174–2184.
- [12] Mateo Borčić, Igor Bonefačić. Fotonaponski sustav s dvoosnim praćenjem prividnog gibanja Sunca. *Politehnika: Časopis za tehnički odgoj i obrazovanje, Tehnički Fakultet, Sveučilište u Rijeci*, br. 1, vol. 2, pp 41-49, 2018.

- [13] H. Häberlin. Photovoltaics: System Design and Practice. Translated by H. Eppel. Thomson Digital, India, 2023.
- [14] Sunčeva energija, dostupno je na: <https://www.slideshare.net/valent/suneva-energija-zdeslav-mati> [11.5.2024.].
- [15] D. Šljivac i D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2018.
- [16] S.C.W. Krauter. Solar Electric Power Generation – Photovoltaic Energy Systems. Springer, Berlin, 2006.
- [17] Mitton, S. The Cambridge Encyclopedia of Astronomy. 1st ed. London: Prentice-Hall of Canada, 1977.
- [18] S. Racharla, K. Rajan. Solar tracking system – a review. Int. J. Sustainable Eng., 2017; 10(2):72-81.
- [19] Sproul, A. B. 2007. "Derivation of Solar Geometric Relationships Using Vector Analysis." Renewable Energy 32 (2007): 1187–1205.
- [20] H.W. Danny Li, Tony N.T. Lam. Determining the optimum tilt angle and orientation for solar energy collection based on measured solar radiance data. Int. J. Photo Energy, pp. 1–9, 2007.
- [21] Ibrahim Reda, Afshin Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications. Natl. Renewable Energy Lab. NREL/TP-560-34302, 2008; 40(3):1–40.
- [22] Rockwell Automation. Solar tracking application. A Rockwell Automation White Paper, pp.1–8, 2009.
- [23] M. Umihanić, N. Čehajić, N. Salihović. Usporedna analiza proizvodnje električne energije fiksnih fotonaponskih sustava u različitim dijelovima BiH, Technical Journal, br. 9, sv. 2, str. 128-135, 2015.
- [24] P., Axaopoulos, G., Pitsilis. Energy software program for educational use, Renewable Energy, 2007; 32(6):1045-1058.
- [25] T. Odak, I. Marković, T. Novak, Z. Meštrović, "Fotonaponski sustav s praćenjem pozicije sunca," Polytechnic & Design, no. 3, vol. 5, pp. 173-179, 2017.
- [26] A. Awasthi, A.K. Shukla, M. Manohar S.R., C. Dondariya, K.N. Shukla, D. Porwal, G. Richhariya, Review on sun tracking technology in solar PV system, Energy Reports, vol. 6, str. 392-405, 2020.

- [27] Nuwayhid, R.Y., Mrad, F., Abu-Said, R. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications. *Renew. Energy* 24, 207–222, 2001.
- [28] Kalogirou, Soteris A. Design and construction of one-axis Sun-Tracking system. *Sol. Energy*, 1996; 57 (6), 465–469.
- [29] J. Rizk, Y. Chaiko, *Solar Tracking System: More Efficient Use of Solar Panels*, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008; 17:313-315.
- [30] S. Seme, B. Štumberger, M. Hadžiselimović, and K. Sredenšek, "Solar Photovoltaic Tracking Systems for Electricity Generation: A Review," *Energies*, no. 4224, vol. 13, pp. 1-24, 2020.
- [31] L. Jacobson, A. Seaver, J. Tang, *AstroCalc4R: Software to Calculate Solar Zenith Angle; Time at Sunrise, Local Noon, and Sunset; and Photosynthetically Available Radiation Based on Date, Time, and Location*, Northeast Fisheries Science Center Reference Document, pp. 11-14, 2011.
- [32] Lorenzo, E., M. Perez, A. Ezpeleta, and J. Acedo. "Design of Tracking Photovoltaic Systems with a Single Vertical Axis." *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, 2002; 10: 533–543.
- [33] Al Mohamad, Ali. "Efficiency Improvements of Photo-Voltaic Panels Using a Sun-Tracking System." *Applied Energy*, 2004; 79 (3): 345–354.
- [34] Alata, Mohamad, M. A. Al-Nimr, and Y. Qaroush. "Developing a Multipurpose Sun Tracking System Using Fuzzy Control." *Energy Conversion & Management*, 2005; 46 (7): 1229–1245.
- [35] Al-Naima, F. M., and N. A. Yaghobian. "Design and Construction of a Solar Tracking System." *Solar Wind Technology*, 1990; 7 (5): 611–617.
- [36] Batayneh, W., A. Owais, and M. Nairoukh. "An Intelligent Fuzzy Based Tracking Controller for a Dual-axis Solar PV System." *Automatic in Construction*, 2013; 29 (2013): 100–106.
- [37] Mehleri, E., P. Zervas, H. Sarimveis, J. Palyvos, and N. Markatos. "Determining of the Optimal Tilt Angle and Orientation for Solar Photovoltaic Arrays." *Renewable Energy*, 2010; 35 (11): 2468–2475.
- [38] A. Zakariah, M. Faramarzi, J. J. Jamian, M. A. M. Yunus, Medium size dual-axis Solar tracking system with sunlight intensity comparison method and fuzzy logic implementation, *Jurnal Teknologi*, 2015; 77(17):145-157.
- [39] N.J. Parmar, A.N. Parmar, V.S. Gautam. Passive solar tracking system. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 2015; 5:138-145.

[40] M.A. Abdelghani-Idrissi, S. Khalfallaoui, D. Seguin, L. Vernieres-Hassimi, S. Leveneur. Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system. *Renew. Energy*, 2018;119:79-94.

[41] PV\*SOL premium dostupno na: [https://valentin\\_software.com/en/products/pvsol-premium](https://valentin_software.com/en/products/pvsol-premium)  
[15.7.2024.]

## SAŽETAK

Ovaj završni rad istražuje tehnološke aspekte i inovacije u području fotonaponskih sustava za praćenje Sunca, koji su ključni za optimizaciju proizvodnje električne energije iz sunčevog zračenja. Rad započinje pregledom literature i uvodom u osnovne pojmove sunčevog zračenja i fotonaponskih elektrana. Detaljno se analiziraju različite vrste sustava za praćenje Sunca, uključujući jednoosne i dvoosne sustave, te njihova primjena u različitim geografskim i klimatskim uvjetima. Fotonaponski sustavi za praćenje Sunca omogućuju optimalno usmjeravanje fotonaponskih modula prema položaju Sunca tijekom dana, što značajno povećava njihovu učinkovitost. Jednoosni sustavi praćenja prilagođeni su za dnevnu optimizaciju izlaza energije, dok dvoosni sustavi pružaju dodatne prednosti u regijama s većim varijacijama položaja Sunca tijekom godine. U radu se upotrebljava PV\*SOL premium program za simulaciju i analizu performansi različitih fotonaponskih sustava. Parametri simulacije uključuju različite konfiguracije sustava praćenja Sunca (fiksni, jednoosni s osima sjever-jug i istok-zapad, jednoosni s rotirajućom vertikalnom osi, te dvoosni sustavi) i njihov utjecaj na proizvodnju električne energije. Analiza rezultata simulacija pokazuje značajna poboljšanja u proizvodnji električne energije pri korištenju sustava za praćenje Sunca u usporedbi s fiksnim sustavima. Povećanje energetske prinosa varira između od 22% do 56%, ovisno o načinu upravljanja sustavom, stupnju automatizacije, slobodi kretanja panela i meteorološkim uvjetima. Zaključuje se da daljnji razvoj tehnologije praćenja Sunca igrati će ključnu ulogu u napredovanju obnovljivih izvora energije i postizanju globalnih ciljeva održivog razvoja.

**Ključne riječi:** fotonaponski sustavi, praćenje Sunca, proizvodnja energije, PV\*SOL premium, sunčeva energija

## **ABSTRACT**

This thesis explores technological aspects and innovations in the field of solar tracking photovoltaic systems, which are essential for optimizing the production of electrical energy from solar radiation. The work begins with a review of the literature and an introduction to the basic concepts of solar radiation and photovoltaic power plants. Different types of solar tracking systems, including single-axis and dual-axis systems, and their application in various geographical and climatic conditions are thoroughly analyzed. Solar tracking photovoltaic systems enable optimal orientation of photovoltaic modules towards the position of the sun throughout the day, significantly increasing their efficiency. Single-axis tracking systems are adapted for daily optimization of energy output, while dual-axis systems offer additional benefits in regions with greater variations in the sun's position throughout the year. The thesis utilizes the PV\*SOL premium program for simulation and analysis of the performance of various photovoltaic systems. Simulation parameters include different configurations of solar tracking systems (fixed, single-axis with north-south and east-west axes, single-axis with rotating vertical axis, and dual-axis systems) and their impact on electricity production. Analysis of the simulation results shows significant improvements in electrical energy production when using solar tracking systems compared to fixed systems. The increase in energy yield varies between 22% and 56%, depending on the management of the system, degree of automation, freedom of panel movement, and meteorological conditions. It concludes that further development of solar tracking technology plays a key role in advancing renewable energy sources and achieving global sustainable development goals.

**Key words:** photovoltaic systems, solar tracking, energy production, PV\*SOL premium, solar energy.

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Radanović, rođen je 18. Prosinca 2001. godine u Virovitici, poslije završene Osnovne škole Petar Preradović u Pitomači upisuje Tehničku školu u Virovitici, gdje je sudjelovao na županijskom natjecanju iz fizike, matematike i povjesti. Završetkom srednjoškolskog obrazovanja dobiva zvanje elektrotehničar. Nakon položene državne mature upisuje Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijske tehnologije u Osijeku. Trenutno je student treće godine na smjeru elektroenergetika.

---

Potpis autora