

# Analiza proizvodnje energije fotonaponske elektrane bez i sa jednoosnim ugođavanjem položaja

---

**Matić, Tomislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:200:996816>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*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 studij**

**ANALIZA PROIZVODNJE ENERGIJE  
FOTONAPONSKE ELEKTRANE BEZ I SA  
JEDNOOSNIM UGOĐAVANJEM POLOŽAJA**

**Završni rad**

**Tomislav Matić**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju****Osijek, 22.08.2023.****Odboru za završne i diplomske ispite****Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Tomislav Matić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4852, 29.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	90706520328
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Marinko Stojkov
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Analiza proizvodnje energije fotonaponske elektrane bez i sa jednoosnim ugođavanjem položaja
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Opis sustava fotonaponske elektrane nazivne snage 100 kW sa i bez ugođenja po jednoj osi. Analiza proizvodnje električne energije u oba slučaja. Zaključak. Tema rezervirana za studenta Tomislava Matića.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	22.08.2023.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	08.09.2023.
<b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 09.09.2023.

Ime i prezime studenta:	Tomislav Matić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4852, 29.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza proizvodnje energije fotonaponske elektrane bez i sa jednoosnim ugođavanjem položaja**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Marinko Stojkov

i sumentora,

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 studenta:

*Tomislav Matić*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. FOTONAPONSKA ELEKTRANA I NJEZIN RAD</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Osnovni način rada fotonaponske elektrane</b> .....	<b>2</b>
2.1.1. Povijest solarnih ćelija i njihov razvoj.....	2
2.1.2. Proces pretvorbe Sunčeva zračenja u električnu energiju.....	2
2.1.3. Izrada solarnih ćelija i vrste materijala koji se koriste.....	3
<b>2.2. Komponente fotonaponske elektrane</b> .....	<b>4</b>
2.2.1. Osnovna podjela fotonaponskih elektrana .....	4
2.2.2. Izmjenjivač .....	6
2.2.3. Regulator punjenja.....	7
2.2.4. Baterija .....	8
2.2.5. Električno brojilo .....	9
<b>2.3. Problematika proizvodnje električne energije uz pomoć fotonaponske elektrane</b> .....	<b>10</b>
<b>3. FOTONAPONSKI SUSTAV ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1. Vrste fotonaponskih elektrana s obzirom na način postavljanja solarnih panela</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2. Fotonaponske elektrane s fiksnim položajem</b> .....	<b>12</b>
<b>3.3. Fotonaponske elektrane s jednoosnim ugađanjem položaja</b> .....	<b>13</b>
<b>3.4. Fotonaponske elektrane s dvoosnim ugađanjem položaja</b> .....	<b>16</b>
<b>4. METODOLOGIJA</b> .....	<b>18</b>
<b>4.1. Opis fotonaponskih sustava</b> .....	<b>21</b>
<b>5. ANALIZA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE</b> .....	<b>24</b>
<b>5.1. Analiza proizvodnje električne energije fotonaponske elektrane s fiksnim položajem</b> .....	<b>24</b>
<b>5.1. Analiza proizvodnje električne energije fotonaponske elektrane s mogućnošću jednoosnog ugađanja položaja</b> .....	<b>27</b>
<b>5.2. Analiza rezultata fotonaponskih elektrana</b> .....	<b>31</b>
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>36</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>37</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>39</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>39</b>

# 1. UVOD

Jedna od glavnih ekonomskih i ekoloških tema današnjeg svijeta je energetika te njezina održivost i iskoristivost. Zbog sve većih cijena fosilnih goriva i smanjenja njihovih resursa ljudi se polako ali sigurno okreću obnovljivim izvorima energije. Uz vodu, vjetar i biomasu, Sunce je jedan od najčešće korištenih obnovljivih izvora energije. Kada govorimo o insolaciji odnosno broju sunčanih sati možemo reći da Hrvatska ima jako povoljan geografski položaj u vidu iskorištavanja sunca za proizvodnju električne energije.

Primjetna je sve veća upotreba fotonaponskih elektrana upravo zbog jednostavnosti pretvaranja Sunčevog zračenja u električnu energiju. Jednostavnost pretvorbe i jednostavna instalacija omogućili su korištenje fotonaponskih elektrana u kućanstvima što je uvelike pridonijelo popularnosti i razvoju ovog načina proizvodnje električne energije. Međutim uz sve prednosti korištenja fotonaponskih elektrana treba uzeti u obzir njihov glavni nedostatak a to je nejednaka osunčanost tijekom cijele godine odnosno nemogućnost kontinuiranog rada što samim time smanjuje njihovu ukupnu djelotvornost.

Zadatak ovog završnog rada je usporedba iskoristivosti fotonaponskih elektrana nazivnih snaga 100 kW koje imaju fiksni položaj te onih sa mogućnošću jednoosnog ugađanja položaja. Svaku od navedenih fotonaponskih elektrana ćemo posebno analizirati te ih na kraju usporediti kako bi dobili jasniju viziju o tome koja je od navedenih fotonaponskih elektrana učinkovitija što je i krajnji cilj ovog završnog rada.

Ovaj rad se sastoji od teorijskog dijela u kojem će se pobliže objasniti podjela te sam način funkcioniranja fotonaponskih elektrana i dijela gdje se analiziraju i uspoređuju dvije različite vrste fotonaponskih elektrana. Cijela analiza odnosno simulacija ovih fotonaponskih elektrana bit će odrađena u programskom paketu PVsyst koji će nam služiti za izračun insolacije i količine proizvedene električne energije u vremenskom periodu od jedne godine.

## **2. FOTONAPONSKA ELEKTRANA I NJEZIN RAD**

### **2.1. Osnovni način rada fotonaponske elektrane**

#### **2.1.1. Povijest solarnih ćelija i njihov razvoj**

Prvu solarnu ćeliju 1941. godine otkrio je Russell Ohl; ona nije bila najučinkovitija sa svojih 1% djelotvornosti pretvorbe, no desetak godina kasnije 1954. nekoliko istraživača prave solarnu ćeliju koja je imala 6% djelotvornosti. Nakon ćelije napravili su prvi solarni modul te su ga nazvali Bellova solarna baterija iz razloga jer su sve te ćelije kao i modul načinjeni u Bell Laboratories koji se nalazio u New Yorku u Sjedinjenim Američkim Državama, [1].

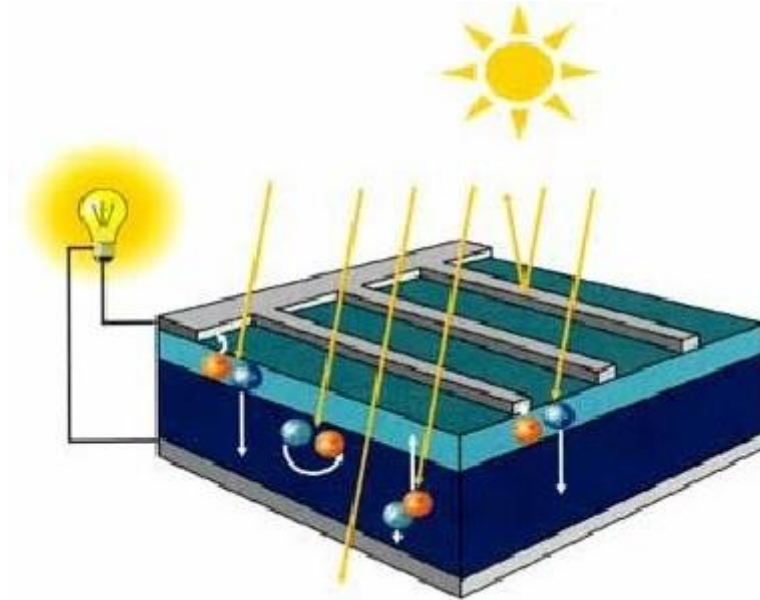
Usprkos tako znatnom otkriću, cijene proizvodnje solarnih ćelija bile su previsoke za komercijalne svrhe. Prva upotreba solarnih ćelija pojavljuje se za potrebe satelita za svemirska istraživanja iz razloga jer je cijena solarnih ćelija bila jako niska u odnosu na troškove svih ostalih dijelova satelita. Solarne ćelije ostaju isključivo u upotrebi u svemiru sve do 70-ih godina prošlog stoljeća kada se u svijetu javlja naftna kriza koja je poljuljala energetska stabilnost. Taj događaj naveo je na razmišljanje o novim istraživanjima za otkrivanje novih izvora energije koji će biti obnovljivi jer se uvidjelo da nafta kao i njoj slični izvori energije imaju ograničen rok trajanja te da se neće moći koristiti zauvijek, [1].

Danas kada govorimo o solarnoj energiji i dalje ne možemo reći da je najpristupačniji način dobivanja električne energije zbog konkurentnih cijena konvencionalnih izvora energije koji se danas u većini koriste. No ta se slika iz dana u dan mijenja zbog sve većih cijena fosilnih goriva i ostalih neobnovljivih resursa koji se koriste kao energenti te i zbog brojnih zakonskih restrikcija koje zemlje nalažu u svrhu smanjena zagađenja i smanjenja efekta staklenika koji doprinosi globalnom zatopljenju. Upravo iz tih razloga stavlja se naglasak na obnovljive izvore energije a posebno na solarnu energiju koja u posljednjem desetljeću postaje sve dominantnija.

#### **2.1.2. Proces pretvorbe Sunčeva zračenja u električnu energiju**

Fotonaponski efekt jedna je od glavnih razloga uspješne pretvorbe Sunčevog zračenja u električnu energiju. Osvjetljavanjem solarne ćelije pojavljuje se fotonaponski efekt odnosno na njezinim krajevima će se pojaviti elektromotorna sila ili napon. Da bi došlo do pretvorbe Sunčevog zračenja u električnu energiju potrebno je da solarna ćelija sadrži PN-sloj kao granični sloj te zasebno P-područje i N-područje. Prilikom osvjetljavanja takvog elementa fotoni stvaraju parove elektron-šupljina koji nadalje ako se nađu unutar PN-spoja bivaju razdvojeni od strane unutrašnjeg električnog polja. Nakon razdvajanja, elektroni se gibaju prema N-području dok šupljine odlaze u

P-područje i upravo zbog nakupljanja elektrona i šupljina na odgovarajućim suprotnim stranama doći će do pojave napona. Ako bismo krajeve spojili u strujni krug, naravno uz pretpostavku da je poluvodički element osvjetljen, dobili bismo istosmjernu struju te bi naš poluvodički element postao izvor električne energije, [2].



**Slika 2.1.** Pojednostavljeni prikaz djelovanja fotonaponskog efekta [3]

### **2.1.3. Izrada solarnih ćelija i vrste materijala koji se koriste**

Solarna ćelija ima znatno ubrzan tehnološki razvoj u vidu istraživanja novih materijala za izradu kao i pronalaženja novih koncepata za njihovu proizvodnju. Materijali koji se danas najčešće koriste u proizvodnji solarnih ćelija su: silicij (Si), bakar-indij-diselenid (CIS), telurid kadmija (CdTe) te organski polimeri i drugi organski materijali, [1].

Silicij danas zauzima gotovo cijelo tržište u proizvodnji solarnih ćelija s udjelom od oko 98%. Za proizvodnju solarnih ćelija danas se koristi monokristalni, polikristalni i amorfni silicij. Monokristalni silicij se dobiva rezanjem monokristala silicija čime dobivamo najefikasniji oblik silicija za izgradnju solarne ćelije. Iako ima najveću efikasnost i zauzima najmanje prostora, njegova upotreba je smanjena zbog visoke cijene proizvodnje. Međutim, kao zamjenu za monokristalni silicij imamo polikristalni silicij koji se dobiva na isti način rezanjem samo u ovom slučaju je u pitanju polikristal silicija kojemu su kristali u strukturi različito usmjereni. Amorfni silicij spada u skupinu tankoslojnih solarnih ćelija koje pripadaju trećoj generaciji solarnih ćelija.



Prednosti ovih ćelija su brži i jeftiniji način izrade te bolja apsorpcijska svojstva koja pomažu u vidu održivosti i povrata uložених sredstava no mana ovih ćelija je što je potrebno skoro dvostruko više površine da bi dobili istu količinu energije kao sa kristalnim silicijem.

Ćelije od tankog sloja CIS (eng. Copper Indium Gallium Selenide) koriste tanki sloj bakar-indij-diselenida kao dio aktivnog sloja. Ovakve solarne ćelije imaju veliku djelotvornost pri uvjetima smanjenog svjetla kao i bolje karakteristike prilikom izloženosti velikim temperaturama.

Solarne ćelije kadmijeva telurida (CdTe) (eng. cadmium telluride) pripadaju skupini tankoslojnih solarnih ćelija. Kao glavne karakteristike predstavljaju kemijsku jednostavnost, stabilnost, učinkovitost te niske troškove proizvodnje što omogućava relativno brzi povrat uložених sredstava.

Organske solarne ćelije koriste organske polimere i druge organske materijale kako bi apsorbirali Sunčevo zračenje. Iako ekološki jako prihvatljiva opcija za proizvodnju električne energije, javlja se problem u nedovoljnoj iskoristivosti ovih ćelija u odnosu na druge vrste solarnih ćelija. No ipak njihova velika prednost u odnosu na ostale oblike solarnih ćelija je jako niska cijena proizvodnje i fleksibilnost u njihovom dizajnu što ostavlja mnogo prostora za daljnja istraživanja i napredak ove vrste ćelija.

Također, uz navedene materijale postoje i mnogi drugi koji se koriste ali nisu toliko zastupljeni. Izbor materijala ovisi o mnogo faktora kao što su cijena, djelotvornost, dostupnost, primjena tako da u budućnosti postoji velika mogućnost unapređivanja postojećih ili čak otkrića novih materijala za koja trenutno nemamo nikakva saznanja.

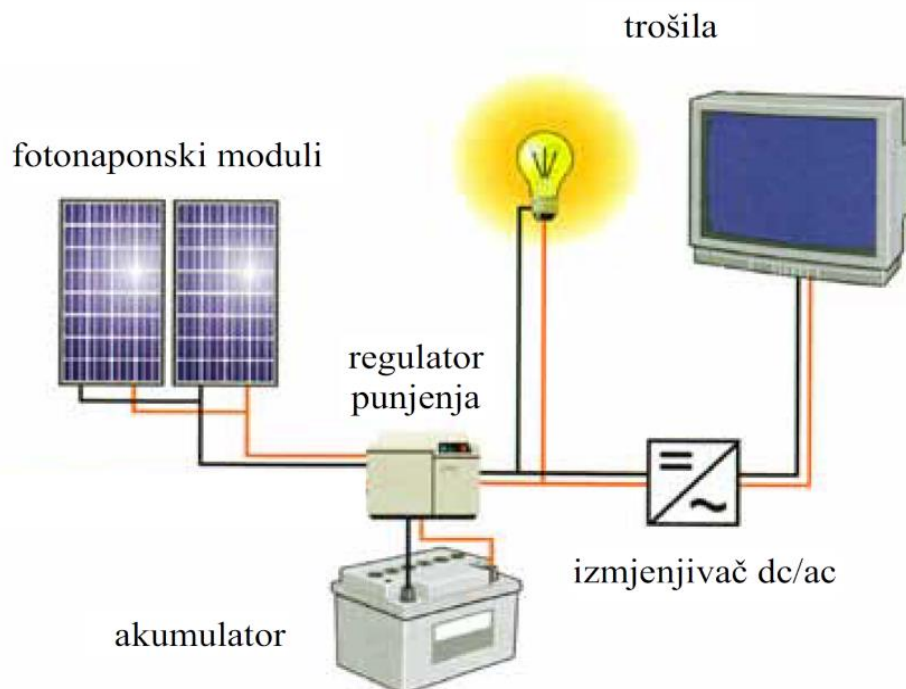
## **2.2. Komponente fotonaponske elektrane**

### **2.2.1. Osnovna podjela fotonaponskih elektrana**

Kada govorimo o osnovnoj podjeli fotonaponske elektrane tu ubrajamo fotonaponske elektrane koje nisu priključene u mrežu (samostalni ili off-grid system) i fotonaponske elektrane priključene na javnu energetska mrežu (on-grid system). Uz navedene dvije osnovne podjele postoji i hibridna fotonaponska elektrana koja uz fotonaponsku elektranu posjeduje uređaj koji nadopunjava sustav ukoliko dođe do manjka električne energije.

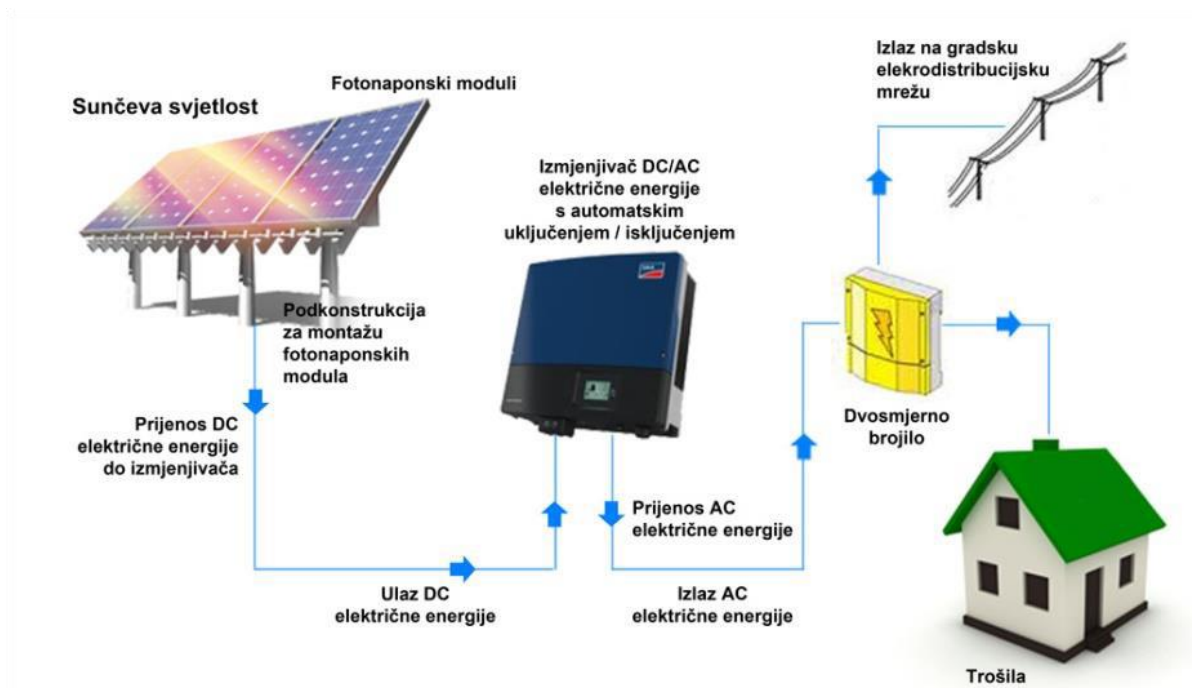
Kao što je rečeno, fotonaponske elektrane koje nisu spojene na mrežu nazivaju se i samostalnim ili otočnim fotonaponskim elektranama. Njihova glavna karakteristika je pohrana električne energije u baterijske spremnike ili mogu biti izvedeni kao hibridni sustavi koji uz sunčevu svjetlost

kao primarni izvor imaju i dodatni izvor napajanja u obliku vjetroagregata, gorivnih ćelija, kogeneracije, dizelskih agregata i slično. Osnovne komponente samostalne naponske elektrane su: fotonaponski modul, regulator punjenja, akumulator, trošila i izmjenjivač u slučaju da imamo trošila koja rade na izmjeničnu struju. Ovakva fotonaponska elektrana uglavnom obavlja dva karakteristična procesa a to su pretvaranje Sunčevog zračenja u električnu energiju i pretvaranje električne energije u kemijsku i obrnuto. Uz pomoć solarne ćelije odvija se prvi od navedenih procesa dok se drugi proces odvija u akumulatoru gdje dolazi prvotno do punjenja te zatim do pražnjenja samog akumulatora. Ovakav oblik sustava se uglavnom instalira na mjesta gdje nije dostupan pristup elektroenergetskoj mreži ili bi samo dovođenje mreže iziskivalo velike financijske izdatke.



**Slika 2.2.** Pojednostavljeni prikaz samostalnog fotonaponskog sustava [4]

U drugoj navedenoj metodi sustav je spojen na javnu elektroenergetsku mrežu izravno što uglavnom predstavlja sustav veće snage koji se sastoji od više fotonaponskih elemenata ili preko kućne instalacije. U slučaju kućne instalacije električna energija prvo se koristi za trošila u kućanstvu a zatim se predaje dalje u mrežu odnosno prodaje po cijeni koja je određena od strane distributera električne energije. Dijelovi ovog sustava su: fotonaponski modul, spojna kutija sa zaštitnom opremom, kabeli istosmjernog razvoda, glavna sklopka za odvajanje, izmjenjivač DC/AC, kabeli izmjeničnog razvoda, brojlara predane i preuzete električne energije, [1].



**Slika 2.3.** Pojednostavljeni prikaz mrežnog fotonaponskog sustava [5]

### 2.2.2. Izmjenjivač

Izmjenjivač je vrsta pretvarača te element fotonaponske elektrane kojemu je glavni zadatak pretvorba istosmjernog napona u izmjenični. Još jedna od bitnih karakteristika je održavanje poželjnih naponskih i frekvencijskih prilika čime je omogućen siguran rad i pouzdanost. Glavna podjela izmjenjivača dijeli se na one za samostalne fotonaponske sustave te one izmjenjivače za sustave koji su povezani s javno elektroenergetskom mrežom. Izmjenjivač korišten za samostalne sustave služi za napajanje trošila kao i samih baterija koje se nalaze u sustavu. Uglavnom su ti uređaji prilagođeni akumulatorskim naponima od 12 V do 48 V kao i davanju čistog sinusnog napona od 230 V pri frekvenciji od 50 Hz. Često objedinjuju funkcije izmjenjivača i regulatora punjenja no neki od njih imaju dvojnu mogućnost da u jednom režimu rada pretvaraju istosmjernu u izmjeničnu dok u drugome pretvaraju izmjeničnu u istosmjernu odnosno ponašaju se kao ispravljači. Izmjenjivači koji se koriste za sustave povezane s javnom mrežom direktno su povezani na solarne module dok su na izlazu povezani sa javnom mrežom te ne postoji potreba za baterijom. Također jedna od glavnih karakteristika ovog pretvarača je prilagođavanje željenog napona i frekvencije, [1].



**Slika 2.4.** Prikaz izmjenjivača [6]

### **2.2.3. Regulator punjenja**

Regulator punjenja je uređaj koji upravlja punjenjem baterije te time omogućava bolje optimalno korištenje i duži radni vijek a kontroliran je uz pomoć mikroprocesora koji je integriran u sam regulator. Neke od funkcija regulatora punjena su: kontrola stanja punjenja akumulatora, zaštita od prepunjenosti akumulatora, tamponsko punjenje, cikličko punjenje, zaštita od ispražnjenosti akumulatora itd. Također omogućava kontrolu parametara kao što su: napon jednog ili svih akumulatora, struju punjenja iz fotonaponskog modula, postotak njihove snage iskorišten pri punjenju akumulatora itd. Regulator punjena kontrolira rad baterije tako da ukoliko je baterija puna prekida struju punjenja i nakon što se nivo napunjenosti baterije spusti ispod dozvoljenog nivoa koji je prethodno zadan, ponovo će uključiti struju punjenja i nastaviti sa punjenjem. Osim kontrole napunjenosti, regulator služi za prilagođavanje napona modula na napon akumulatora uz uvjet da struja punjenja bude približna struji modula. Smanjivanjem napona dolazi do problema pojave gubitaka koji utiču na efikasnost samog punjenja. Kako bi se neutralizirali gubitci zbog smanjenja napona te održala najveća snaga, potrebno je povećati struju za postotak za koji je

smanjen napon odnosno povećati struju za 25% do 35%. Ukoliko regulator nije dobro izveden može uzrokovati i do 25% gubitaka kada govorimo o solarnim fotonaponskim sustavima, [1].



**Slika 2.5.** Prikaz regulatora punjenja [7]

#### 2.2.4. Baterija

Baterije ili akumulatori su dijelovi samostalnog ili hibridnog fotonaponskog sustava te služe za skladištenje viška električne energije koja se koristi u situacijama kada nema Sunca odnosno kada proizvodnja solarnih modula ne zadovoljava potrebe potrošnje. Rad baterije funkcionira na temelju reverzibilnih procesa pražnjenja i punjenja koje se odvija uz pomoć izvora istosmjerne struje pod naponom većim od napona baterije. Danas imamo najčešću upotrebu olovnih baterija zbog njihove pristupačne cijene. Iako jeftini spremnici energije, ove baterije posjeduju i negativne karakteristike kao što su velika masa, osjetljivost pri radu, kratak životni vijek te zauzimaju mnogo prostora. Kao zamjenu za olovne baterije danas na tržištu imamo litij-ionske baterije koje posjeduju puno bolje karakteristike od olovnih akumulatora ali njihova cijena predstavlja najveću prepreku u njihovom odabiru. No ta se situacija mijenja iz godine u godinu zbog razvoja ovog tipa baterija te im cijena pada što ih čini sve konkurentnijima na tržištu. Kapacitet baterije je najbitniji podatak pri odabiru odgovarajuće baterije a ovisi o brzini kojom se baterija prazni. Ukoliko imamo kraće vrijeme pražnjenja, imat ćemo i manji mogući kapacitet te je obavezno od strane proizvođača navesti

vrijeme pražnjenja koje se izražava u obliku 100 satnog pražnjenja a uz baterije visoke kvalitete imamo često navedeno 10 satno pražnjenje. Stalnim punjenjem i pražnjenjem skraćujemo životni vijek baterije, osobito ako se baterija prazni do kraja ili ispod preporučene razine odnosno što imamo veću dubinu pražnjenja naše baterije to će nam životni vijek biti kraći. Prosječni životni vijek baterije koja se koristi u fotonaponskom sustavu kreće se od 10 do 15 godina, [1].



**Slika 2.6.** Prikaz baterije [8]

### **2.2.5. Električno brojilo**

Električno brojilo je elektronički uređaj koji u slučaju fotonaponske elektrane prati količinu energije koja se izmjenjuje u sustavu. Također važno je napomenuti da ovakva brojila moraju biti dvosmjerna kako bi se mogla pratiti količina preuzete i predane energije u ili iz elektroenergetske mreže. Korisnicima fotonaponskih elektrane se na temelju očitavanja podataka sa brojila ispostavljaju mjesečni računi ili im se isplaćuje višak električne energije koju su predali u elektroenergetsku mrežu po ugovoru između korisnika i distributera električne energije.



Slika 2.7. Prikaz električnog brojila [9]

### **2.3. Problematika proizvodnje električne energije uz pomoć fotonaponske elektrane**

Fotonaponske elektrane su kao što je već navedeno jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije koji doprinosi smanjenju proizvodnje štetnih plinova i efektu staklenika. Međutim, unatoč svim navedenim prednostima postoje određeni izazovi i problemi koji prate proizvodnju električne energije uz pomoć fotonaponske elektrane.

Kao prvi glavni problem koji se javlja je cijena odnosno visoki troškovi instalacije fotonaponske elektrane. Osim samih solarnih modula za elektranu su potrebni i popratni dijelovi kao što su inverter, baterije i instalacije koji uvelike povećavaju cijenu samih elektrana. Kada ih usporedimo sa cijenama ostalih izvora energije možemo reći da trenutno nisu toliko konkurentni. Iako trenutno govorimo o visokim cijenama ovih elektrana, njihove cijene se svake godine smanjuju čemu doprinosi razvoj solarne energije kao i subvencije i poticaji države.

Sljedeći veliki problem koji je vezan uz fotonaponske elektrane je nekonzistentnost Sunčevog zračenja tijekom cijele godine pa tako i dana. Kao što je već rečeno, Sunce je glavni element za proizvodnju električne energije koji mi ne možemo kontrolirati odnosno uzimati kada i koliko je nama potrebno. Uvjeti osunčanosti samih solarnih modula ovisi o godišnjem dobu, dobu dana, vremenskim uvjetima i geografskom položaju. Ukoliko nema Sunčevog zračenja, proizvodnja električne energije naglo opada ili u potpunosti prestaje. Rješenje za takav problem danas krije se u povezanosti za javnom elektroenergetskom mrežom ili kao u samostalnim ili hibridnim

sustavima uz pomoć baterija. Iako su baterije jedno od rješenja za ovaj problem, jedan su od skupljih i ne tako pristupačnih načina za rješavanje ovoga problema.

Osim problema cijene i nekonzistentnog Sunčevog zračenja, postoji problem i sa potrebom za prostor fotonaponske elektrane kao i sa samim održavanjem i servisiranjem. Problem prostora se javlja iz razloga što su fotonaponske elektrane uglavnom većih dimenzija kako bi bile u mogućnosti pokriti potrebe korisnika. Ukoliko želimo fotonaponske elektrane većih snaga, to zahtijeva više prostora odnosno zemljišta koje je danas ograničeno i skupo posebno ako govorimo o urbanim sredinama. Također svaku fotonaponsku elektranu je potrebno održavati i servisirati. Redovito održavanje koje podrazumijeva osim popravaka i nadzora sustava, zahtijeva i čišćenje solarnih modula kako bi se uvijek osigurala maksimalna učinkovitost.

Uz navedene probleme koji se povaljuju kod zasebnih korisnika postoje i dva problema koja se tiču šireg društva a to su povezivanje sa javnom elektroenergetskom mrežom i potreba za resursima u proizvodnji solarnih modula. Povezivanje u javnu elektroenergetsku mrežu može predstavljati problem zbog već dimenzionirane mreže koja uz svoje standardne količine energije mora iskontrolirati dodatne količine električne energije koja se predaje u tu mrežu. Potreba za resursima podrazumijeva dobivanje sirovina poput silicija kako bi se napravili solarni moduli. Ekstrakcija tih sirovina često ima negativan utjecaj na okoliš te isto tako zahtijeva određene resurse poput energije, vode i kemikalija. Iako postoji negativan utjecaj prilikom ekstrakcije sirovina, ti utjecaji su skoro i zanemarivi u odnosu na prednosti koje donosi proizvodnja električne energije uz pomoć solarnih modula.



### 3. FOTONAPONSKI SUSTAV ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA

#### 3.1. Vrste fotonaponskih elektrana s obzirom na način postavljanja solarnih panela

Fotonaponske elektrane osim svoje podjele prema načinu povezanosti sa javnom elektroenergetskom mrežom dijele se isto tako i prema njihovom načinu postavljanja kako bi što efikasnije iskoristavali Sunčevo zračenje. Glavna podjela solarnih panela prema njihovom načinu postavljanja je na panele sa fiksnim položajem i panele sa mogućnošću praćenja Sunčevog kretanja.

#### 3.2. Fotonaponske elektrane s fiksnim položajem

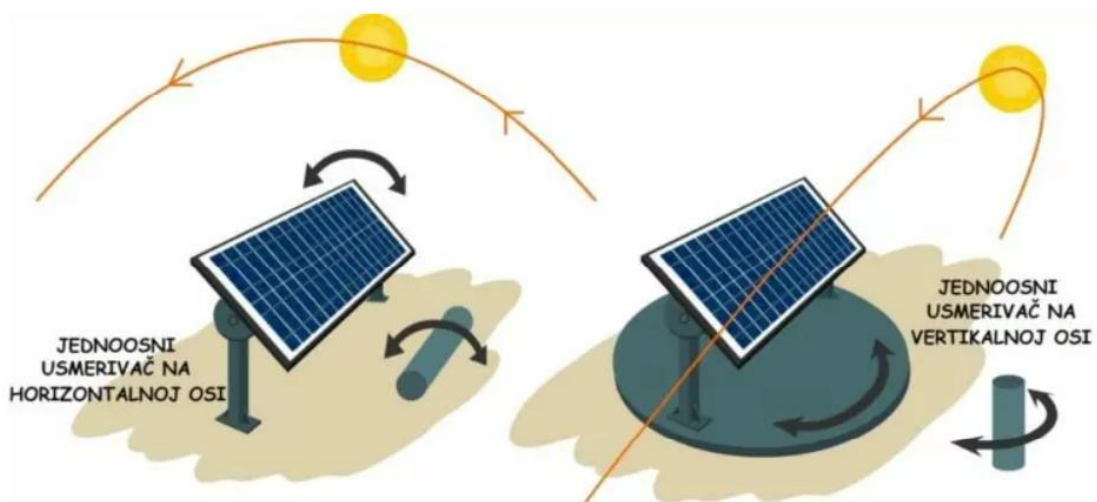
Fotonaponske elektrane sa fiksnim položajem trenutno su najpristupačnije i najjednostavnije rješenje za osobe ili poduzeća koja se žele okrenuti prema proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Solarni paneli sa fiksnim položajem uglavnom se postavljaju na kuće ili različite vrste objekata. Također, ukoliko se želi napraviti elektrana veće snage ili objekt nije povoljan za ugradnju, solarni paneli se montiraju na zemlji. Bitna stvar kod elektrana s fiksnim položajem je ta da se mora paziti da solarni paneli budu okrenuti prema jugu i pod optimalnim kutom jer tako najbolje iskoristavaju Sunčevo zračenje. Optimalan kut varira u odnosu na godišnje doba, stoga se uzima optimalni godišnji kut koji na području Hrvatske iznosi od 30° do 35°.



Slika 3.1. Prikaz fotonaponske elektrane s fiksnim položajem [10]

### 3.3. Fotonaponske elektrane s jednoosnim ugađanjem položaja

Zbog sve većeg razvoja fotonaponskih elektrana i želje za većim iskorištavanjem Sunčevog zračenja došlo je do uvođenja fotonaponskih elektrana s mogućnošću praćenja položaja Sunca. Osnovna podjela sustava za praćenje Sunca je na sustave s jednoosnim ugađanjem položaja i sustave sa dvoosnim ugađanjem položaja. Također, dijele se i prema načinu funkcioniranja na aktivne, pasivne i ručne. Aktivni sustavi su sami po sebi najsloženiji i najskuplji zbog svojih komponenti od kojih su sačinjeni i samog održavanja i servisiranja, ali u krajnjem slučaju imaju najveću djelotvornost. Gledajuću djelotvornost iza aktivnih dolaze pasivni sustavi koji funkcioniraju na principu topline odnosno zagrijavanjem tekućine ili plina koji se nalaze u konstrukciji pa dolazi do pomaka solarnog panela. Ručni sustavi su najjednostavniji jer ne postoje elektronički elementi automatskog upravljanja koji upravljaju položajima pa je samim time i cijena ovakvih sustava poprilično niska u usporedbi sa ostala dva sustava, [11].



**Slika 3.2.** Pojednostavljeni prikaz fotonaponske elektrane s jednoosnim ugađanjem položaja [17]

Jednoosni sustav za praćenje položaja Sunca trenutno je prema riječima proizvođača najbolja opcija kada se gleda proizvodnja električne energije i njegova cijena održavanja i ugradnje. Njihov pogon se sastoji od mogućnosti ugađanja položaja samo po jednoj osi. Ovisno o njihovom horizontalnom ili vertikalnom položaju smjer kretanja solarnih panela je u smjeru istok-zapad ili sjever-jug. Postoji mogućnost namještanja i druge osi ali to se obavlja ručno prilikom promjene godišnjeg doba kako bi se dobio što optimalniji kut. Kada uspoređujemo solarne panele s jednoosnim ugađanjem položaja i one sa fiksnim položajem moguće je dobiti i do 30% više

električne energije. Naravno postotak korisnosti uvelike ovisi o proizvođaču kao i samom geografskom položaju. Praćenje Sunca se odvija uz pomoć senzora za detekciju položaja Sunca ili uz pomoću astronomskih podataka koji se temelje na vremenu i geografskom položaju te je za njih potrebna odgovarajuća kontrolna jedinica, [11].

Kako bi bilo moguće odrediti točan položaj Sunca bez upotrebe senzora za detekciju položaja Sunca potrebna su nam tri podataka: GPS koordinate, visinski i azimutni kut.

Visinski kut je kut između horizonta i položaja nebeskog tijela na nebu, te se uglavnom označava slovom  $\alpha$ . Početna vrijednost visinskog kuta Sunca pri izlasku je nula, te postupno raste sve dok ne dosegne maksimalni kut u podnevnim satima. Nakon toga visinski kut počinje postupno opadati sve do samog zalaska Sunca. Matematički izraz za visinski kut je, prema [12]:

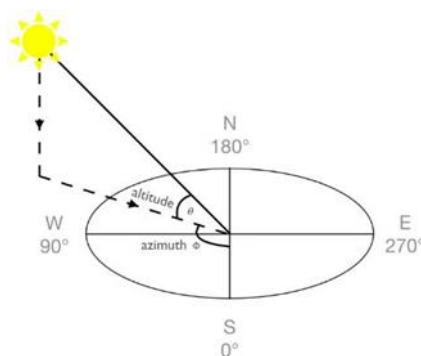
$$\sin(\text{visinski kut}) = \sin(\delta) \cdot \sin(G\check{S}) + \cos(\delta) \cdot \cos(SK) \cdot \cos(G\check{S})$$

Gdje su:

- $\delta$  - deklinacijski kut
- SK - satni kut
- GŠ - geografska širina

Azimutni kut je kut između referentnog smjera, obično sjevera, i smjera Sunčevog zračenja u smjeru kazaljke na satu. Mjera je za smjer ili položaj objekta na horizontalnoj ravnini. Matematički izraz za azimutni kut je, prema [12]:

$$\cos(\text{azimut}) = \frac{(\sin(\delta) \cdot \cos(G\check{S}) - (\cos(\delta) \cdot \sin(G\check{S}) \cdot \cos(SK)))}{\cos(\text{visinski kut})}$$



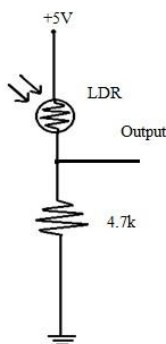
**Slika 3.3.** Prikaz visinskog kuta i azimuta [12]

Ukoliko pratimo položaj Sunca uz pomoć senzora, koristimo optičke senzore. Najčešće korišteni optički senzor je foto-otpornik ili poznatiji kao LDR. LDR (Light-Dependent Resistor) je načinjen kao poluvodič s velikim otporom. Njegova glavna karakteristika je smanjivanje ili povećanje njegovog otpora s obzirom na osvjetljenost. Osim kod solarnih sustava koristi se i u sustavima automatskog osvjetljenja, fotoaparata, elektronicima... Relacija između količine svjetlosti i količine otpora definira se kao, [13]:

$$R = \frac{500}{L}$$

gdje je:

- R – otpor [ $\Omega$ ]
- L - jakost svjetlosti [cd]



**Slika 3.4.** Shematski prikaz LDR-a [14]

Uz određivanje položaja Sunca i solarnih panela bitan je i elektromotor koji omogućuje promjenu položaja u aktivnim sustavima. Prilikom njihovog odabira važno je odabrati motor koji može biti izložen vanjskim utjecajima kao što su oluje, vjetar i visoke temperature. U današnjim solarnim sustavima se koriste sljedeći elektro motori: AC motori, koračni motori, PMDC i BLDC motori.

AC motori su asinkroni motori koji su se koristili u prvim sustavima za praćenje Sunčevog položaja jer su mogli biti napajani direktno iz javne mreže. Međutim, ove motore je teže upravljati pri malim brzinama u odnosu na ostale vrste motora, te koriste veće količine energije za svoje pokretanje što smanjuje djelotvornost samog fotonaponskog sustava. Zbog navedenih razloga se ovi motori sve više povlače iz upotrebe za ovu funkciju.

Koračni motor je motor bez četkica koji radi na osnovu istosmjerne struje, te mu je rotacija podijeljena u određeni broj koraka koji proizlaze iz konstrukcije motora. Prednosti koračnog motora su jednostavnost, preciznost i njegova relativno niska cijena. Od nedostataka se može navesti njegova maksimalna brzina od 400 okretaja u minuti, te velika količina energije koju koristi za svoje pokretanje.

PMDC su istosmjerni motori koji su trenutno najpopularniji motori, te se koriste u solarnim sustavima za praćenje Sunca zbog svoje djelotvornosti, jednostavnosti i lakog upravljanja. Jedini nedostatak ovih motora je četkica koja ograničava rad na 3000 do 5000 radnih sati nakon čega je potrebna zamjena.

BLDC su istosmjerni motori koji su jako slični PMDC motorima, te im je jedina razlika to što ne zahtijevaju četkice. Nedostatak četkica omogućuje ovim motorima veći radni vijek, te ih čini izrazito konkurentnima na tržištu sustava za praćenje Sunčeva položaja.

### **3.4. Fotonaponske elektrane s dvoosnim ugađanjem položaja**

Ovaj sustav praćenja položaja sunca trenutno je najsofisticiraniji oblik praćenja Sunčevog kretanja. Temelji se na dva pogona od kojih mu jedan omogućuje praćenje Sunca po azimutu dok omogućuje praćenje na osnovu kutne visine Sunca. Ovakav način praćenja omogućuje najveću moguću količinu prikupljanja Sunčevog zračenja tijekom jedne godine gdje se prednost ovog sustava najviše očituje u zimskom periodu godine.[15] Kompleksnost ovog sustava ovisi o zahtjevima kupaca kao i sama cijena koja je trenutno poprilično visoka. Unatoč velikoj efikasnosti, ovo je manje popularan sustav zbog svoje cijene i kompleksnosti sustava kojega je potrebno servisirati i održavati što dovodi u pitanje njihovu dugoročnu isplativost u odnosu na ostale sustave. Iako ne toliko trenutno povoljni za široku uporabu ovi sustavi kao i sustavi s jednoosnim ugađanjem imaju povećanu učinkovitost, bolje se prilagođavaju vremenskim uvjetima i bolje se integriraju u mrežu s obzirom na veću preciznost. Također, mogu se bolje uskladiti sa potrebama mreže kako bi osigurali stabilnu i ravnomjernu opskrbu električnom energijom. Stoga se može reći da su sustavi za praćenje položaja Sunca relativno novo područje koje zahtijeva još istraživanja i razvoja te da ima veliki potencijal u zauzimanju tržišta obnovljive energije u skorijoj budućnosti.

Prema orijentaciji osnovne osi u odnosu na tlo postoje dvije vrste fotonaponskih elektrana s dvoosnim ugađanjem položaja, a to su vršno nagnuti i azimut-visina sustavi za praćenje položaja Sunca. Vršno nagnuti sustavi su sustavi gdje su solarni moduli postavljeni na vrh stupa, te je kretanje omogućeno u smjeru istok-zapad rotiranjem oko vrha stupa. Na vrhu rotirajućeg ležaja nalazi se mehanizam u obliku slova T ili H koji omogućuje okomitu rotaciju panela i glavne

pričvrstne točke reda. Azimut-visina je sustav čija je primarna ili azimutna os okomita na tlo, a sekundarna os je uglavnom okomita na primarnu os. Iako vrlo sličan prethodnom sustavu, razlikuje se po tome što umjesto da se paneli okreću oko vrha stupa ovaj sustav koristi veliki prsten montiran na tlu s redom fotonaponskih panela montiranih na niz valjaka. Glavna prednost ovog sustava je raspodjela mase što omogućuje azimut-visina sustavu da podnese velike mase redova panela, [16].



**Slika 3.5.** Pojednostavljeni prikaz sustava s dvoosnim ugađanjem položaja [18]

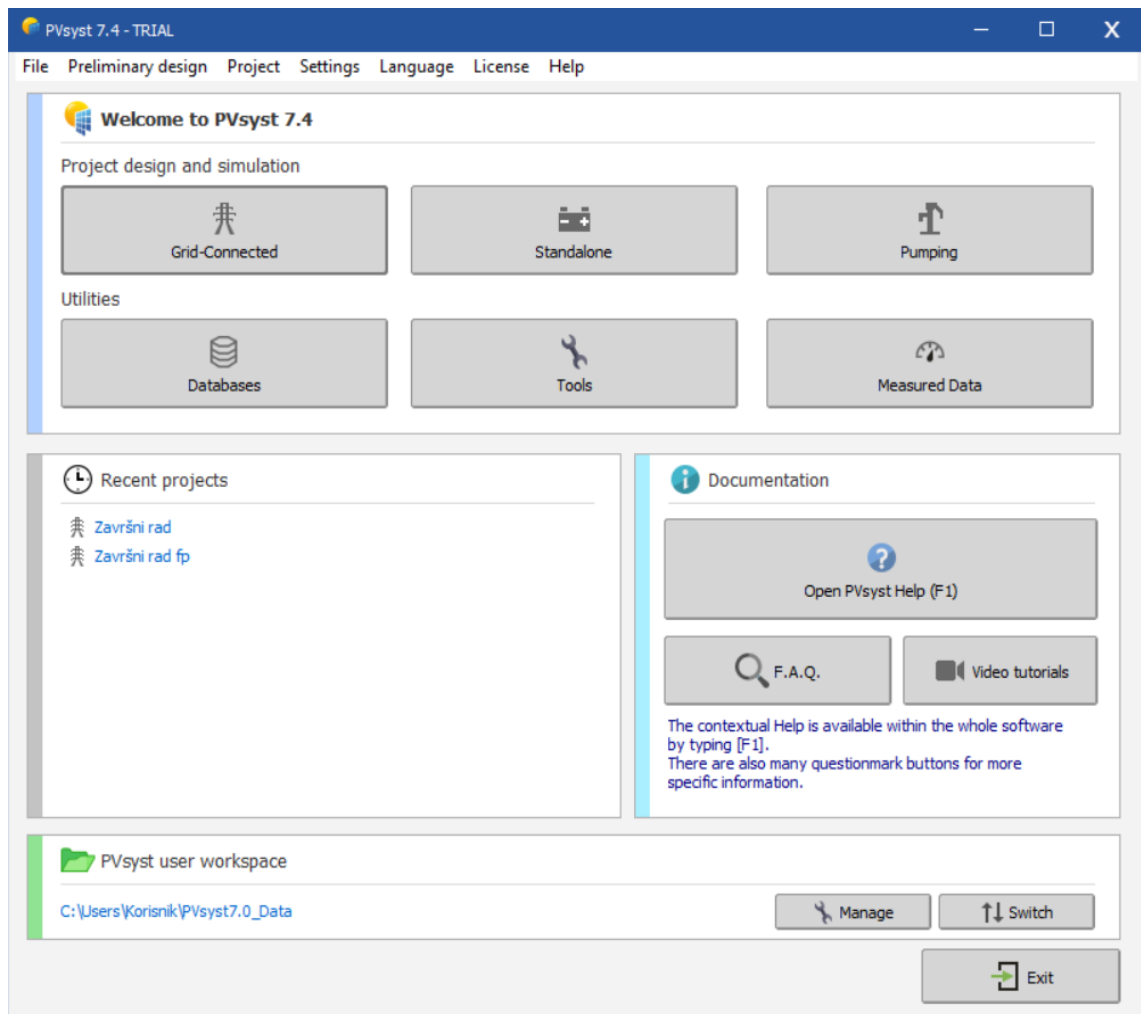
## 4. METODOLOGIJA

Kao što je već rečeno u uvodu, zadatak ovog završnog rada je usporediti fotonaponske sustave s fiksnim položajem i one s mogućnošću jednoosnog ugađanja položaja. Svaka od simulacija izvedena je za područje Slavenskog Broda koji se nalazi na  $45,16^{\circ}N$  geografske širine,  $18,02^{\circ}E$  geografske dužine te na 100 m nadmorske visine.

Objekti simulacije rađene su u programskom paketu PVsyst. PVsyst je programski paket specijaliziran za analizu i simulaciju fotonaponskih sustava. Neke od glavnih značajki su:

- Projektiranje fotonaponskog sustava – PVsyst omogućuje projektiranje fotonaponskih sustava s različitim vrstama modula, baterija, invertera, kabela i drugih komponenti. Također, omogućuje prilagođavanje parametara kao što su orijentacija, nagib modula, 2D i 3D prikaz sustava...
- Simulacije – PVsyst koristi algoritme za simuliranje karakteristika fotonaponskih sustava uz pomoć različitih čimbenika kao što su geografska lokacija, sunčevo zračenje, temperatura...
- Procjena proizvodnje električne energije – program omogućuje preciznu procjenu proizvodnje energije na temelju simulacija. Moguće je dobiti dnevne, mjesečne i godišnje podatke koji pomažu pri analiziranju karakteristika sustava.
- Analiza rezultata – PVsyst pruža alate za detaljnu analizu karakteristika fotonaponskih sustava. Osim podataka kao što su faktor korisnosti, utjecaj zasjenjenja i ukupni gubitci, omogućuje i usporedbu podataka s drugim simulacijama pa čak i onim koje nisu rađene u tom istom programu.
- Financijska analiza – program omogućuje i financijsku analizu fotonaponskog sustava gdje je moguće dobiti proračune kao što su povrat investicije (ROI - Return on investment), neto sadašnju vrijednost (NPV - Net present value) i internu stopu rentabilnosti (IRR - Internal rate of return). Svi ovi parametri služe u svrhu lakše i preciznije procjene ekonomske isplativosti projekta.

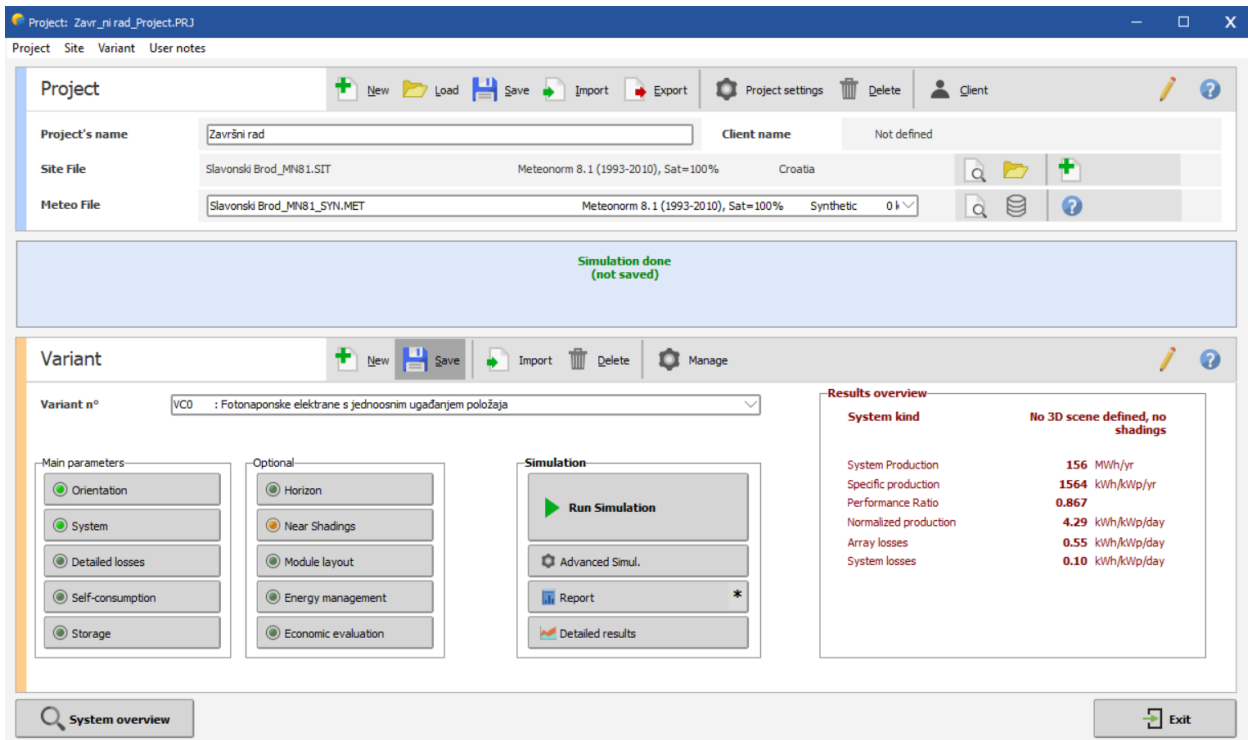
Prilikom izrade fotonaponskih sustava korištena je probna verzija PVsyst programa koja je dostupna u vremenskom periodu od 30 dana. Iako probna verzija, ona posjeduje sve mogućnosti i opcije koje nudi i puna verzija ovog programa. Nakon pokretanja programa otvara nam se početni izbornik u kojem imamo mogućnost stvaranja novog projekta, pokretanje starog i odabir sustava kojeg želimo projektirati.



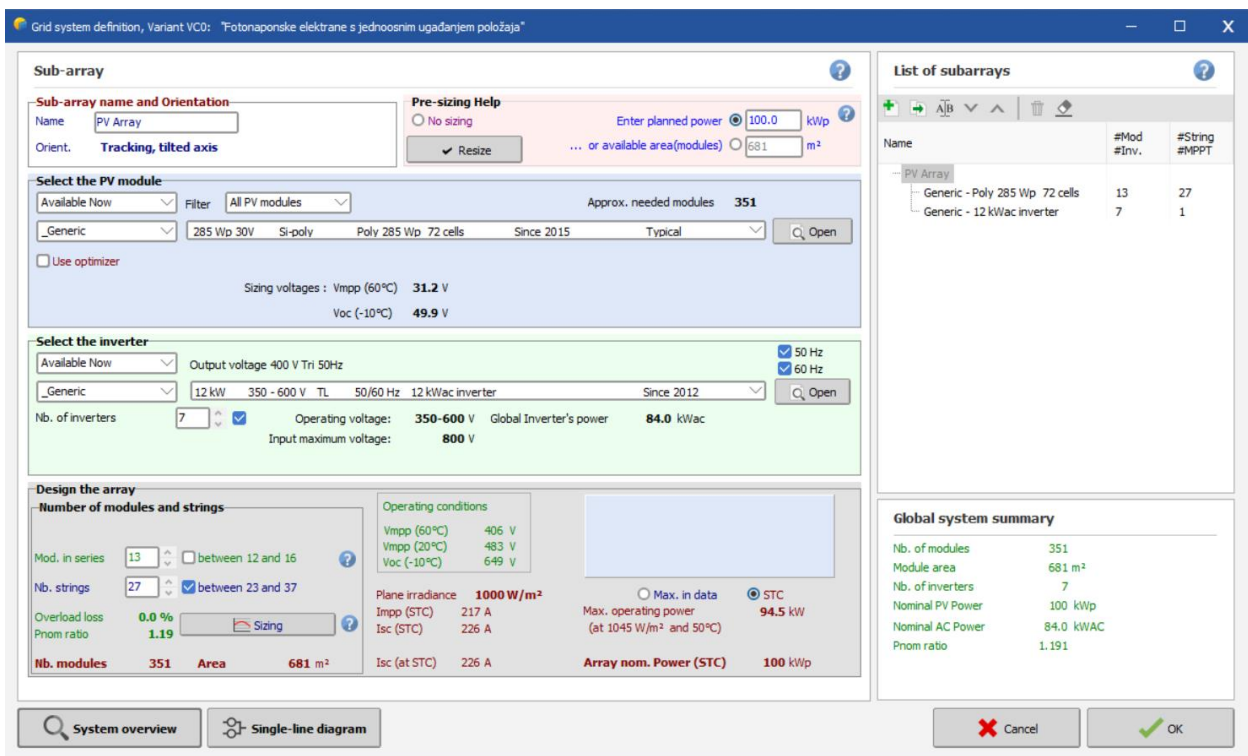
**Slika 4.1.** Odabir sustava i stvaranje projekta

Nakon odabira sustava koji želimo koristiti otvara nam se dio programa u kojem definiramo karakteristike kao što su ime projekta i mjesto odvijanja simulacije, te se nakon toga prelazi na definiranje parametara poput orijentacije, sustava, gubitaka, gubitaka, zasjenjenja...





Slika 4.2. Izbornik za definiranje različitih parametara



Slika 4.3. Izbornik za odabir modula i invertera

Na obje slike prikazani su izbornici u kojima su definirani parametri za fotonaponsku elektranu s jednoosnim ugađanjem položaja, no to je moguće učiniti i za fotonaponsku elektranu s fiksnim položajem ili bilo koji drugi sustav koji želimo definirati.

#### 4.1. Opis fotonaponskih sustava

Primarni fokus prilikom projektiranja sustava bio je napraviti sustave koji će posjedovati iste komponente s istim karakteristikama. Glavni razlog tome je kako bi se u usporedbi smanjio utjecaj komponenti, odnosno kako različite komponente u različitim sustavima ne bi imale utjecaj na konačne rezultate simulacija. U svakoj od simulacija korištene su komponente koje su generirane od samog programa, odnosno nije korišten nijedan komercijalni proizvođač.

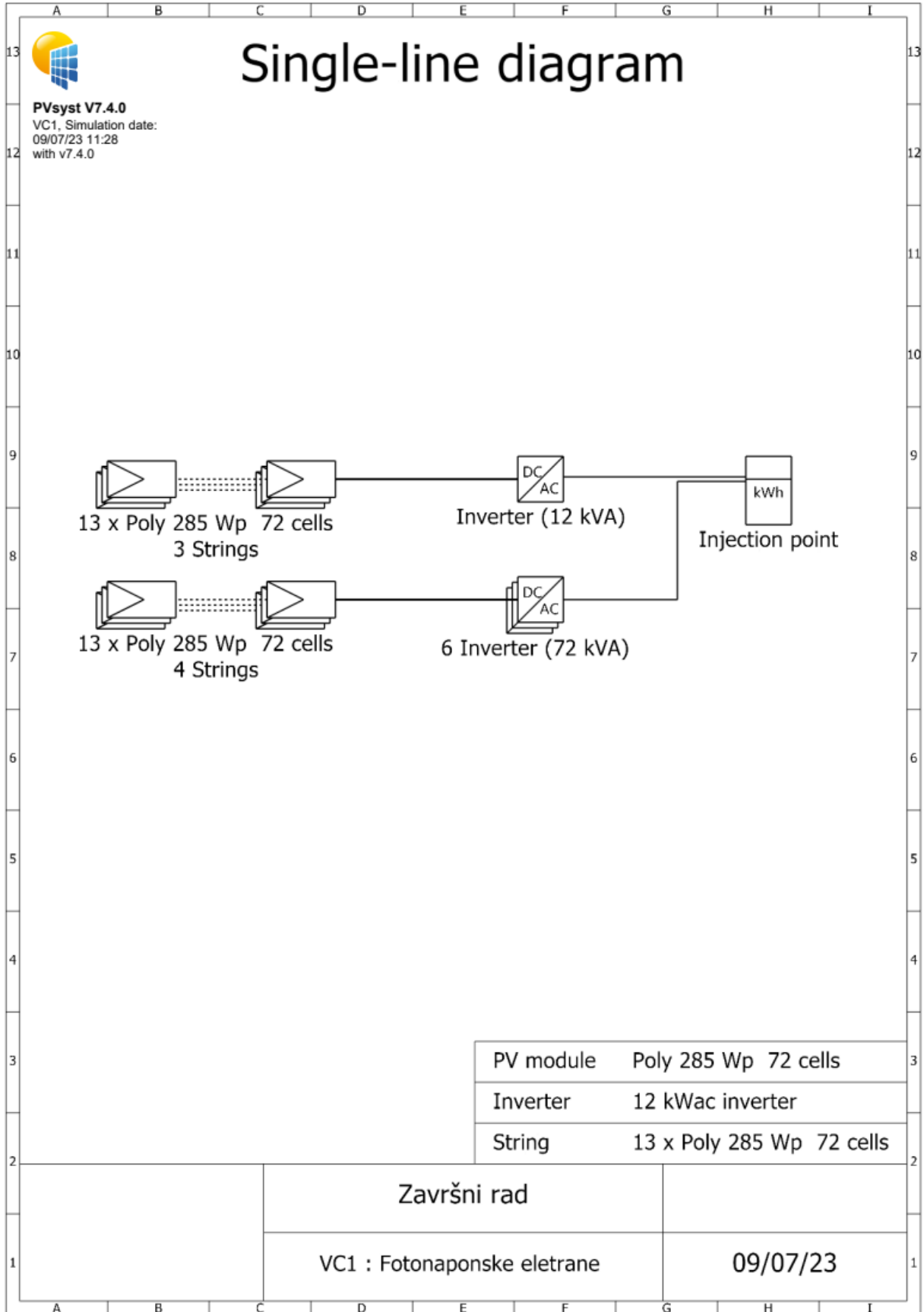
PV Array Characteristics			
<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	Poly 285 Wp 72 cells (Original PVsyst database)	Model	12 kWac inverter (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	285 Wp	Unit Nom. Power	12.0 kWac
Number of PV modules	351 units	Number of inverters	7 units
Nominal (STC)	100 kWp	Total power	84.0 kWac
Modules	27 Strings x 13 In series	Operating voltage	350-600 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Max. power (=>25°C)	14.0 kWac
Pmpp	90.6 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.19
U mpp	425 V		
I mpp	213 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	100 kWp	Total power	84 kWac
Total	351 modules	Max. power	98 kWac
Module area	681 m <sup>2</sup>	Number of inverters	7 units
Cell area	614 m <sup>2</sup>	Pnom ratio	1.19

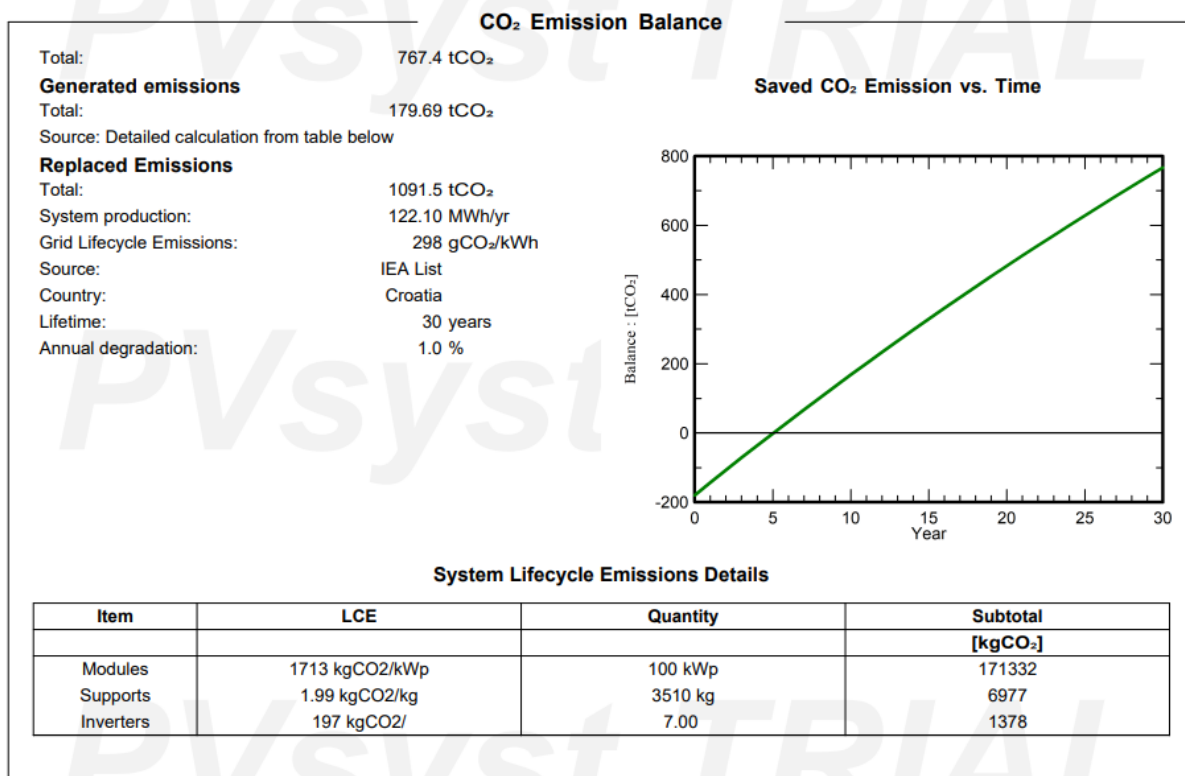
Array losses								
<b>Thermal Loss factor</b>		<b>DC wiring losses</b>						
Module temperature according to irradiance		Global array res.	33 mΩ					
Uc (const)	20.0 W/m <sup>2</sup> K	Loss Fraction	1.5 % at STC					
Uv (wind)	0.0 W/m <sup>2</sup> K/m/s							
<b>Module mismatch losses</b>		<b>Strings Mismatch loss</b>						
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %					
<b>IAM loss factor</b>								
Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526								
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.403	0.000

Slika 4.4. Karakteristike fotonaponskih modula i invertera generirane u programu PVsyst

Podatci prikazani na slici 4.1. prikazuju osnovne podatke vezane za fotonaponske module koji se koriste u ovoj simulaciji. Osim podataka o samim modulima nalaze se i podatci o količini modula i invertera, te samoj površini koju oni zauzimaju. Prikazani su i podatci i gubitcima, no o njima će se detaljnije govoriti u nastavku rada.



**Slika 4.5.** Blok dijagram fotonaponskih sustava



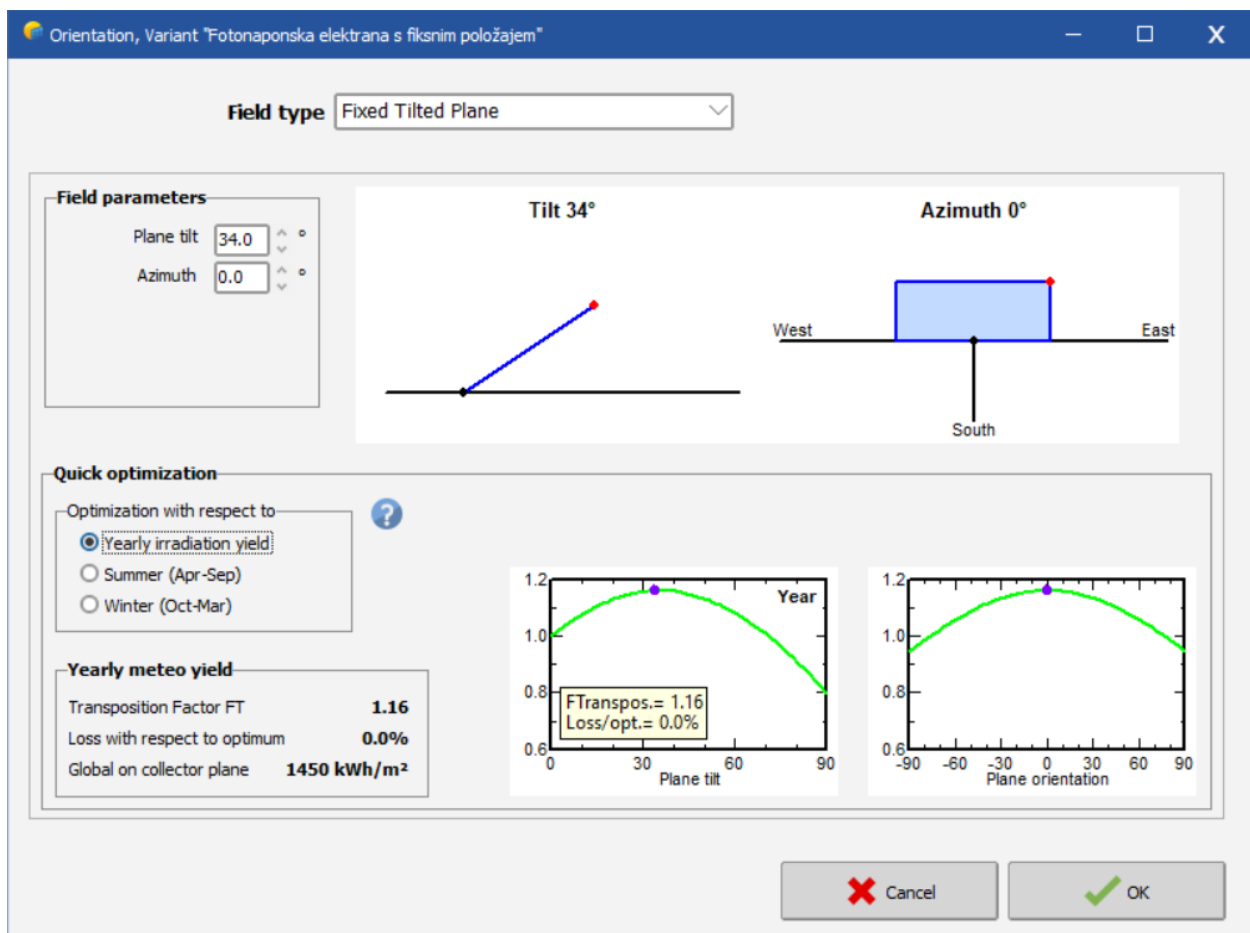
**Slika 4.6.** Količina uštede CO<sub>2</sub> u periodu od 30 godina

Na slikama 4.2. i 4.3. prikazani su blokovski dijagram sustava i količina uštede štetnih plinova. Podatci koji se nalaze na slikama kao i za prethodne karakteristike iste su za oba sustava koja promatramo.

## 5. ANALIZA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

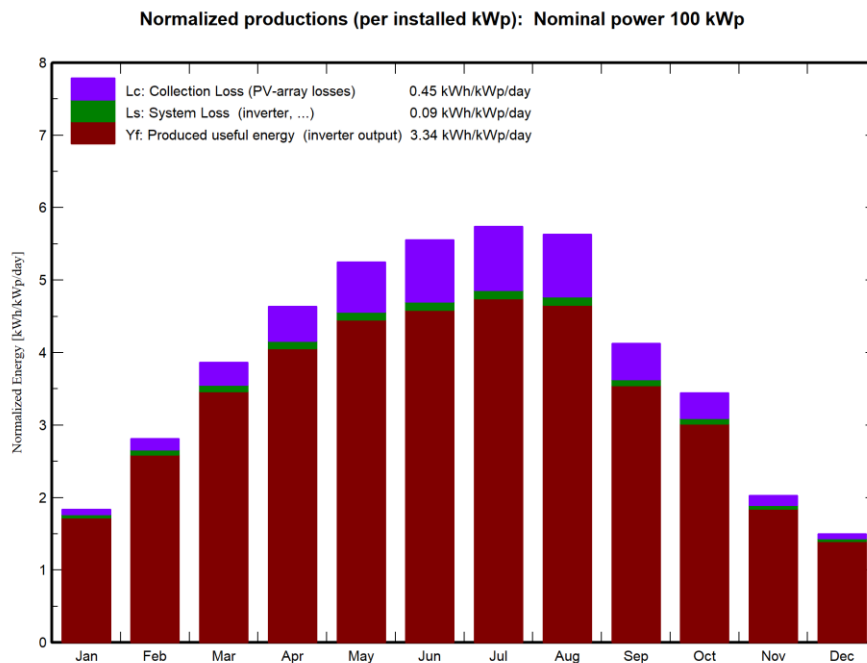
### 5.1. Analiza proizvodnje električne energije fotonaponske elektrane s fiksnim položajem

Prilikom projektiranja sustava bilo je važno odrediti optimalni godišnji kut pod kojim će se fotonaponski paneli postaviti kako bi kroz cijelu godinu imali najveću učinkovitost. Koristeći kalkulator za optimalni godišnji kut za područje Slavonskog Broda dobili smo kut od  $33,7^\circ$ . Zbog zaokruživanja vrijednosti kutova u samom programu za našu simulaciju odlučili smo koristiti optimalni godišnji kut od  $34^\circ$ . Paneli su orijentirani prema jugu gdje se Sunce kreće od istoka, gdje započinje svoje dnevno kretanje, do zapada gdje to isto kretanje završava, odnosno kut azimuta je jednak  $0^\circ$ .

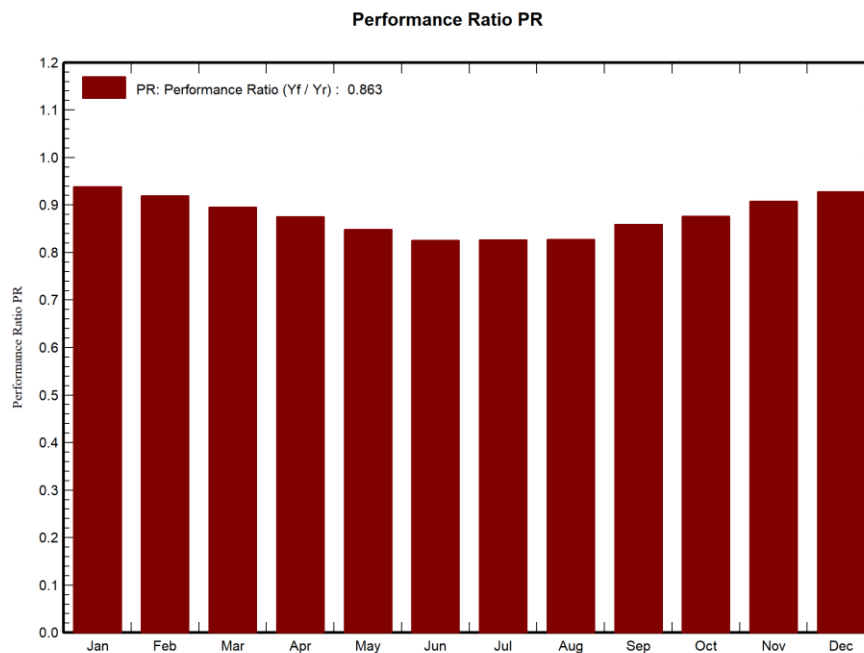


Slika 4.7. Orijentacija i kut fotonaponskih modula

Ukupna proizvodnja električne energije nakon što se oduzmu gubici prilikom proizvodnje iznosi 122097 kWh u vremenskom periodu od jedne godine. Uz sve postojeće gubitke i ostale uvjete rada djelotvornost fotonaponske elektrane na godišnjem nivou iznosi 86,29%.

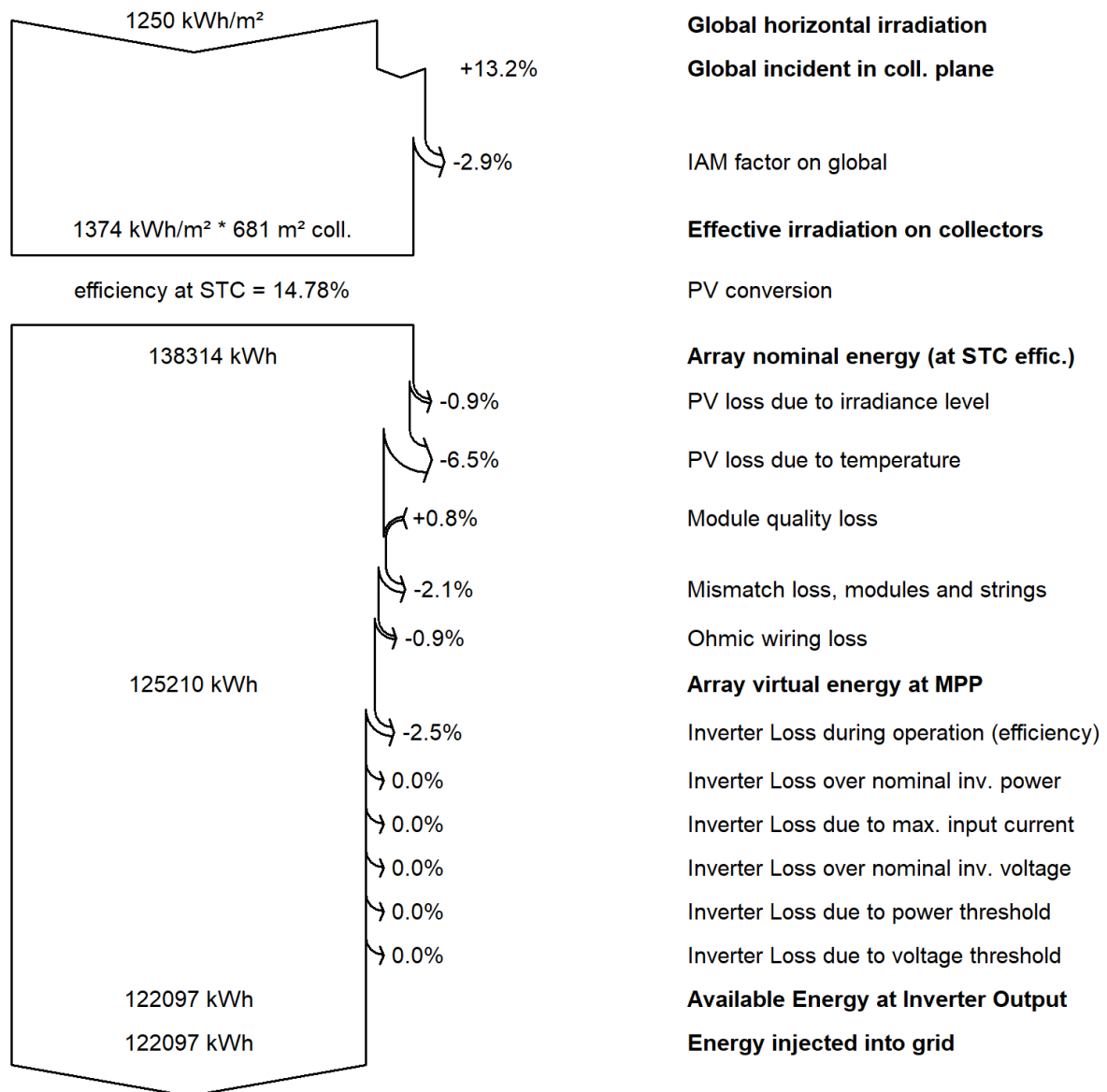


**Slika 4.8.** Proizvodnja električne energije po instaliranom kW snage



**Slika 4.9.** Stupanj korisnosti sustava

## Loss diagram for "Fotonaponska elektrana s fiksnim položajem" - year



Slika 4.10. Dijagram gubitaka u sustavu

Na slikama 4.8., 4.9. i 4.10. prikazani su glavni podatci za fotonaponski sustav s fiksnim položajem. Godišnja proizvodnja i gubitci prikazani su na slici 4.8. dok detaljni prikaz svih gubitaka imamo na slici 4.10.. Slika 4.9. prikazuje korisnost sustava za svaki mjesec u godini gdje možemo primijetiti da u zimskim mjesecima imamo veću djelotvornost sustava jer fotonaponski moduli imaju negativni temperaturni koeficijent, odnosno s povećanjem temperature njihova djelotvornost opada.

### Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	36.3	23.61	0.47	56.9	55.4	5487	5339	0.938
February	53.6	29.65	2.61	78.9	77.1	7447	7254	0.920
March	96.1	52.99	7.75	119.9	116.8	11016	10747	0.896
April	127.2	70.88	12.62	139.1	135.0	12476	12174	0.875
May	162.6	79.46	17.28	162.6	157.6	14150	13805	0.848
June	174.9	86.37	20.94	166.6	161.3	14112	13761	0.826
July	183.1	85.77	23.07	177.9	172.2	15074	14715	0.827
August	162.6	75.23	22.66	174.6	169.5	14803	14451	0.827
September	106.4	61.44	16.68	123.8	120.1	10902	10637	0.859
October	77.3	41.80	12.05	106.7	104.2	9600	9361	0.877
November	40.9	26.57	6.94	60.8	59.2	5682	5526	0.908
December	28.6	18.72	1.87	46.6	45.4	4461	4327	0.928
Year	1249.7	652.49	12.13	1414.5	1373.7	125210	122097	0.863

#### Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

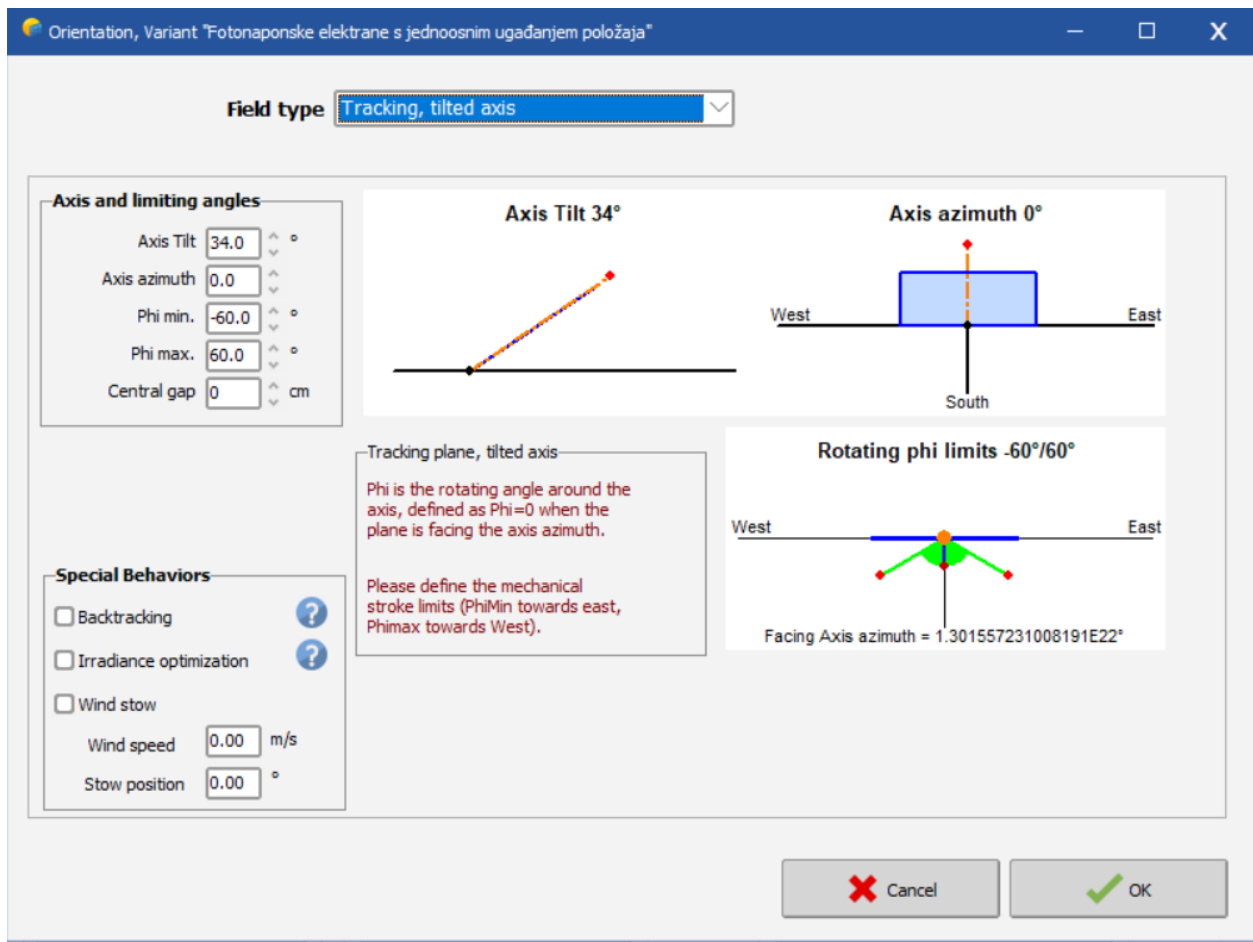
**Slika 4.11.** Vrijednosti konačnih rezultata

Slika 4.11. predstavlja detaljnu tablicu koja prikazuje vrijednosti za parametre koji su bitni prilikom analize sustava, a osim grafički prikazani su tablično radi lakšeg predočavanja rezultata i njihove same usporedbe.

### 5.1. Analiza proizvodnje električne energije fotonaponske elektrane s mogućnošću jednoosnog ugađanja položaja

Kao i za fotonaponsku elektranu s fiksnim položajem za lokaciju koristimo grad Slavonski Brod, te nam je optimalni godišnji kut zaokružen na vrijednost od 34°. S obzirom da se radi o fotonaponskoj elektrani s jednoosnim ugađanjem položaja potrebno je bilo odrediti granične vrijednosti u kojima će se jednoosni sustav kretati. U našem slučaju odabrano je područje kretanja od -60° do +60° po uzoru na iste ili slične fotonaponske elektrane koje se mogu pronaći na tržištu. Također, kut azimuta je 0°, odnosno cijeli sustav je okrenut prema jugu i prati kretanje Sunca od istoka prema zapadu.

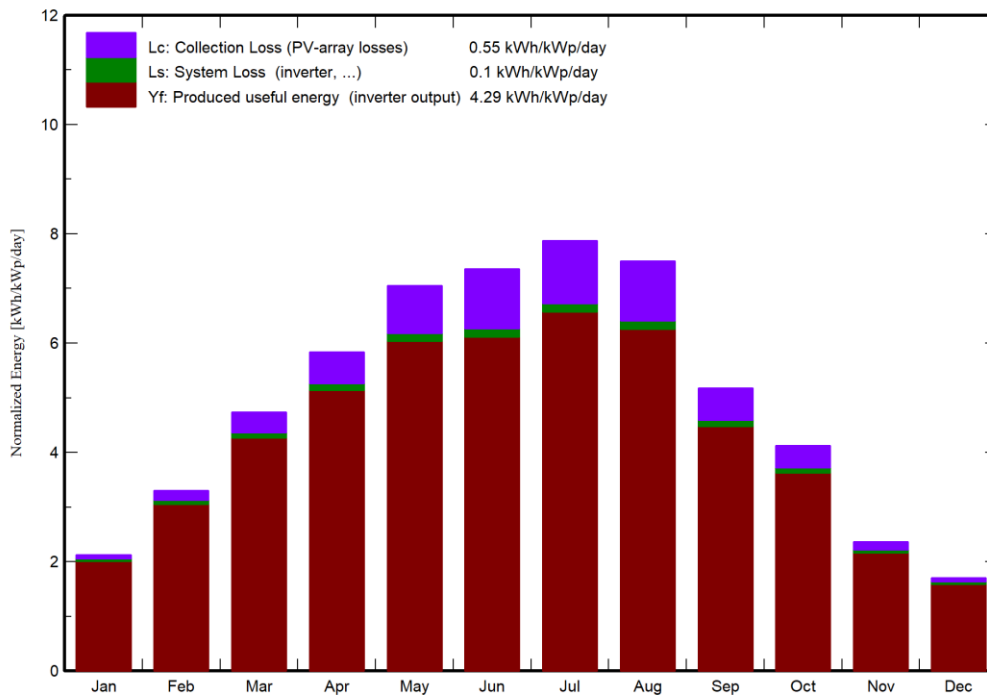




**Slika 4.12.** Orijentacija i kut fotonaponskih modula

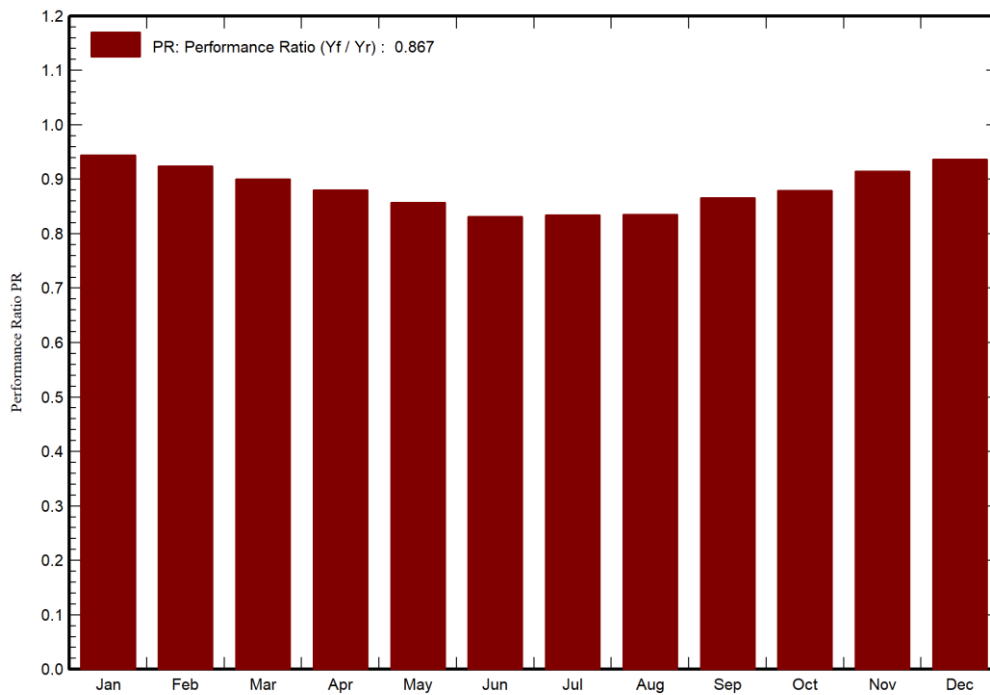
U slučaju fotonaponskih elektrana s jednoosnim ugađanjem položaja imamo očekivano povećanje, te vrijednost godišnje proizvodnje ovog sustava iznosi 156474 kWh u jednoj godini. Osim povećanja proizvodnje električne energije došlo je i do blagog povećanja korisnosti sustava koje sada iznosi 86,75%. Sve karakteristike bit će detaljno uspoređene u sljedećem poglavlju.

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 100 kWp



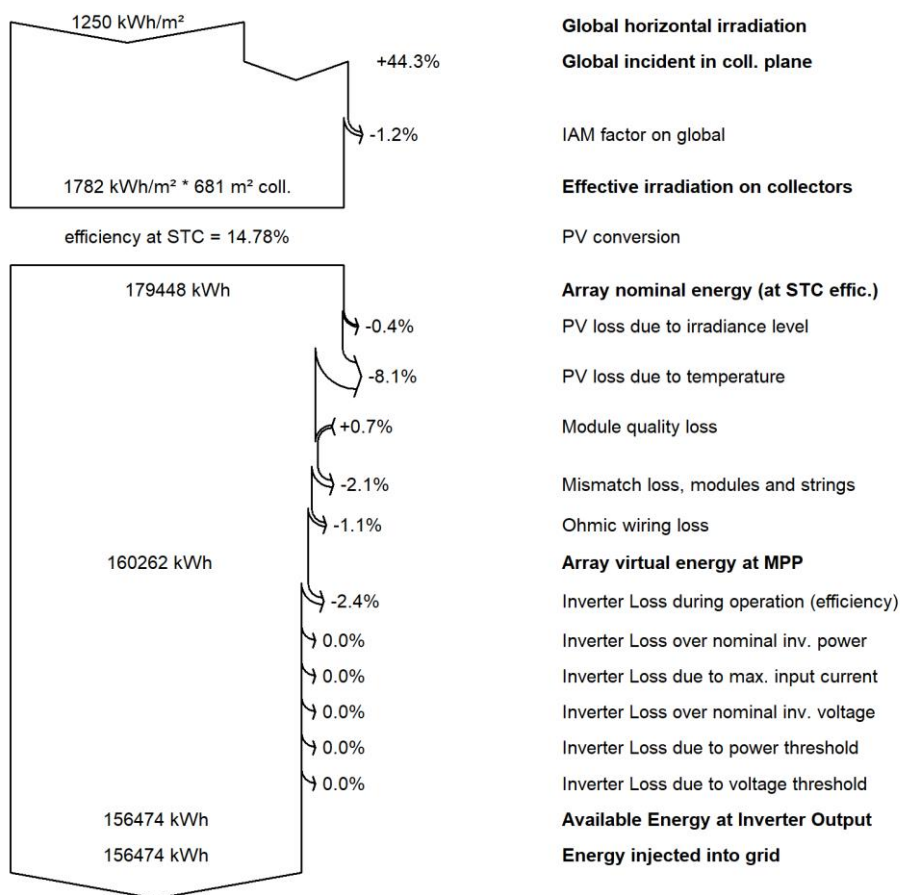
Slika 4.13. Proizvodnja električne energije po instaliranom kW snage

Performance Ratio PR



Slika 4.14. Stupanj korisnosti sustava

### Loss diagram for "Fotonaponske elektrane s jednoosnim ugađanjem položaja" - year



Slika 14.15. Dijagram gubitaka u sustavu

#### Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	36.3	23.61	0.47	65.9	65.1	6392	6227	0.944
February	53.6	29.65	2.61	92.5	91.5	8774	8559	0.925
March	96.1	52.99	7.75	146.9	145.2	13545	13226	0.900
April	127.2	70.88	12.62	175.2	173.1	15790	15421	0.880
May	162.6	79.46	17.28	218.5	216.0	19183	18739	0.857
June	174.9	86.37	20.94	220.6	217.9	18801	18358	0.832
July	183.1	85.77	23.07	244.1	241.4	20857	20385	0.835
August	162.6	75.23	22.66	232.5	230.2	19869	19420	0.835
September	106.4	61.44	16.68	155.3	153.4	13774	13453	0.866
October	77.3	41.80	12.05	128.0	126.5	11532	11257	0.879
November	40.9	26.57	6.94	70.8	69.9	6657	6484	0.915
December	28.6	18.72	1.87	52.8	52.0	5088	4944	0.937
Year	1249.7	652.48	12.13	1803.2	1782.2	160262	156474	0.867

#### Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

Slika 4.16. Vrijednosti konačnih rezultata

Na slikama 4.13., 4.14. i 4.15. grafički su prikazani isti parametri kao i u prethodnom sustavu, te se može primijetiti porast u vrijednostima i promjene u gubitcima u sustavu kao i identičan pad korisnosti sustava prilikom porasta temperature. Također, na slici 4.16. došlo je do promjena vrijednosti u tablici, no parametri su ostali isti.

## 5.2. Analiza rezultata fotonaponskih elektrana

Nakon obavljenih simulacija za obje fotonaponske elektrane dobiveni su rezultati koji će se detaljno usporediti u ovome poglavlju.

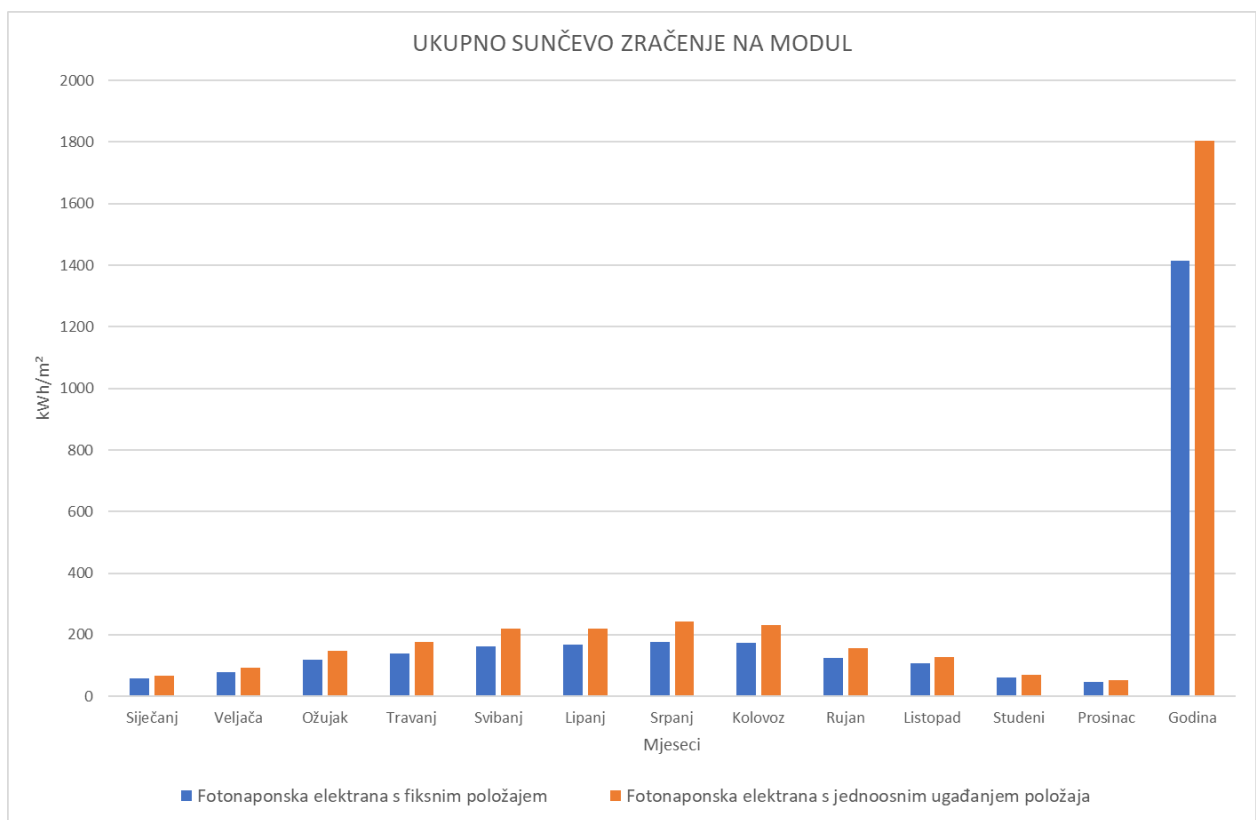
**Tablica 4.1.** Razlika rezultata mjerenja

Mjeseci	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	Earray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	%
Siječanj	0	0	0	9	9,7	905	888	0,006
Veljača	0	0	0	13,6	14,4	1327	1305	0,005
Ožujak	0	0	0	27	28,4	2529	2479	0,004
Travanj	0	0	0	36,1	38,1	3314	3247	0,005
Svibanj	0	0	0	55,9	58,4	5033	4934	0,009
Lipanj	0	0	0	54	56,6	4689	4597	0,006
Srpanj	0	0	0	66,2	69,2	5783	5670	0,008
Kolovoz	0	0	0	57,9	60,7	5066	4969	0,008
Rujan	0	0	0	31,5	33,3	2872	2816	0,007
Listopad	0	0	0	21,3	22,3	1932	4896	0,002
Studeni	0	0	0	10	10,7	975	958	0,007
Prosinac	0	0	0	6,2	6,6	627	617	0,009
Godina	0	0	0	388,7	408,4	35052	37376	0,004

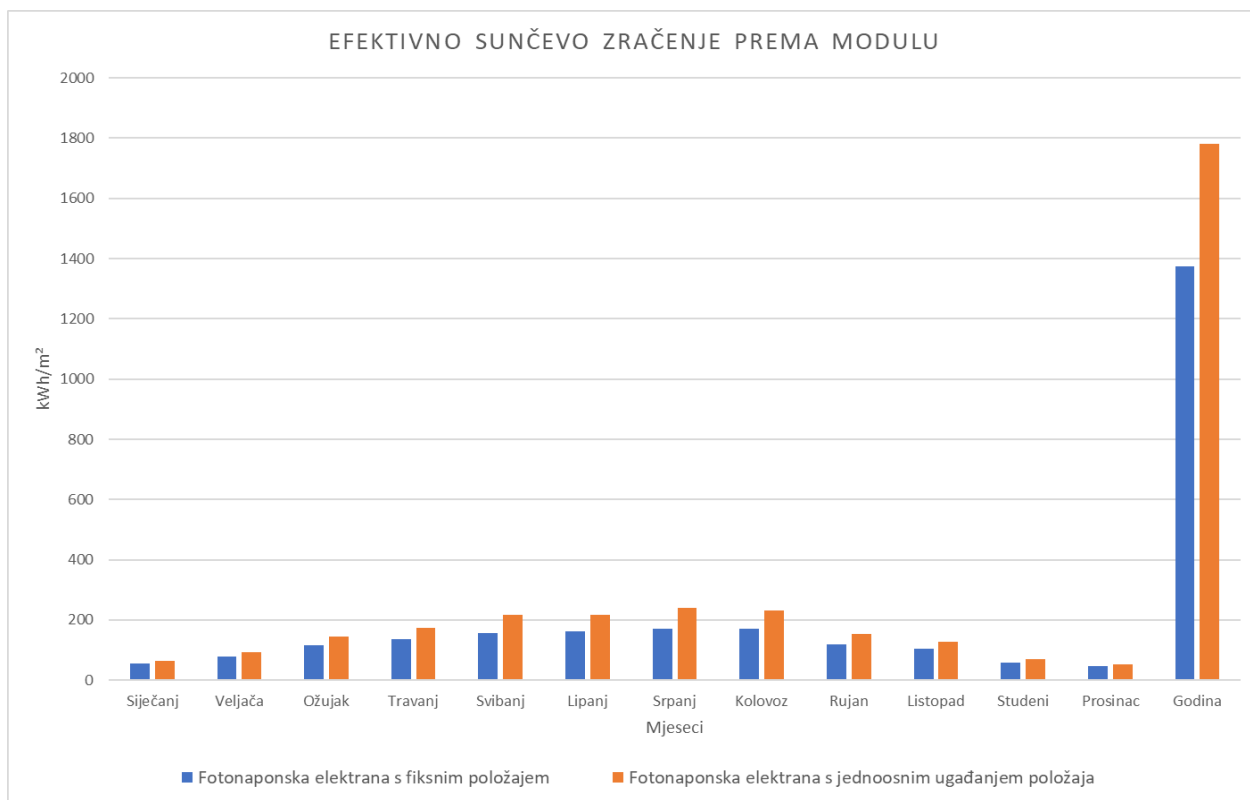
**Tablica 4.2.** Razlika rezultata mjerenja u postotcima

Mjeseci	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	%	%	%	%	%	%	%	%
Siječanj	0	0	0	13,66	14,9	14,16	14,26	0,64
Veljača	0	0	0	14,7	15,74	15,12	15,25	0,54
Ožujak	0	0	0	18,38	19,56	18,67	18,74	0,44
Travanj	0	0	0	20,61	22,01	20,99	21,06	0,57
Svibanj	0	0	0	25,58	27,04	26,24	26,33	1,05
Lipanj	0	0	0	24,48	25,98	24,94	25,04	0,72
Srpanj	0	0	0	27,12	28,67	27,73	27,81	0,96
Kolovoz	0	0	0	24,9	26,37	25,5	25,59	0,96
Rujan	0	0	0	20,28	21,71	20,85	20,93	0,81
Listopad	0	0	0	16,64	17,63	16,75	16,84	0,23
Studeni	0	0	0	14,12	15,31	14,65	14,77	0,77
Prosinac	0	0	0	11,74	12,69	12,32	12,48	0,96
Godina	0	0	0	21,56	22,92	21,87	21,97	0,46

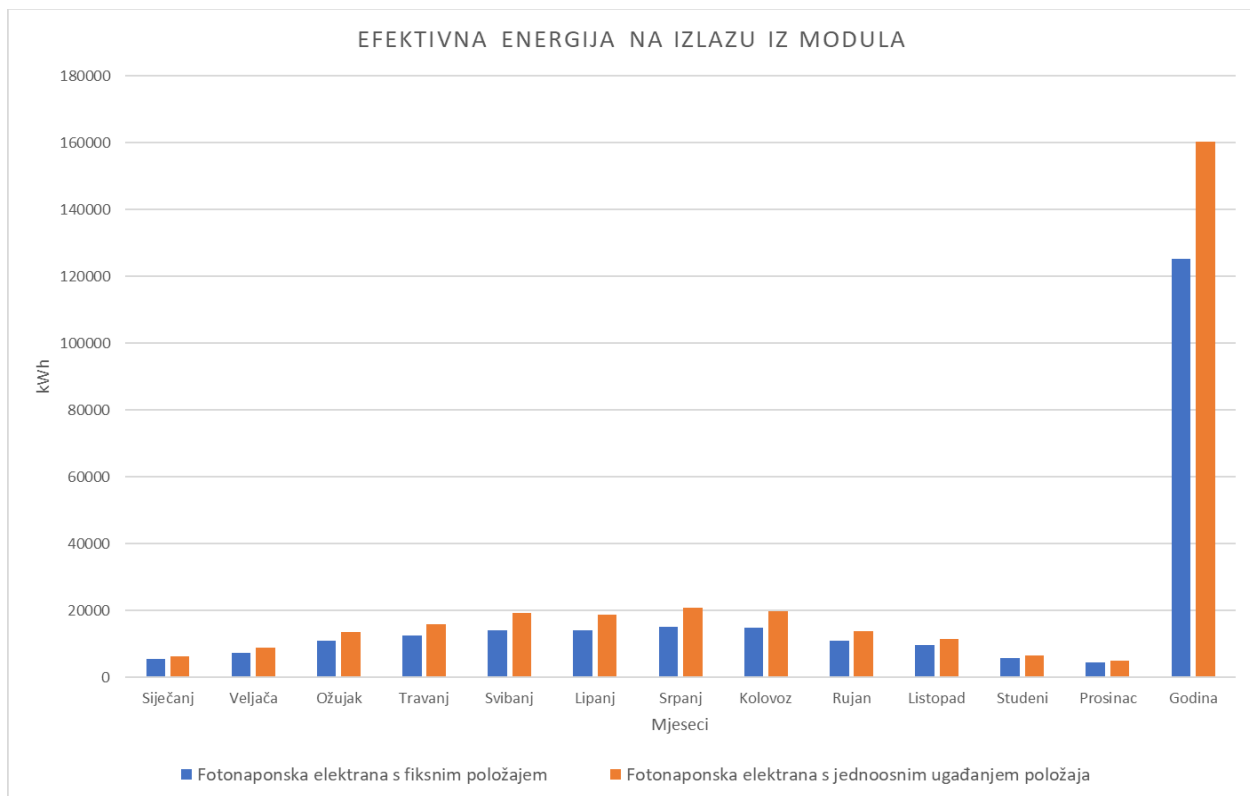
U tablicama 4.1. i 4.2. prikazane su razlike rezultata mjerenja fotonaponskih elektrana, odnosno povećanje osunčanosti i proizvodnje fotonaponske elektrane s jednoosnim ugađanjem položaja u odnosu na fotonaponsku elektranu s fiksnim položajem. Vrijednosti ukupnog Sunčevog zračenja, raspršenog Sunčevog zračenja i vanjske temperature su ostali isti jer se radi o istoj lokaciji. Promatrajući ostale karakteristike može se primijetiti porast ukupne učinkovitosti svake od predstavljenih karakteristika u iznosu od 21% do 23%. No gledajući po mjesecima najveći porast imamo u svibnju i srpnju gdje su vrijednosti porasle od 25% do skoro 28%. Jedina iznimka je korisnost sustava gdje imamo blagi porast od 0,46%.



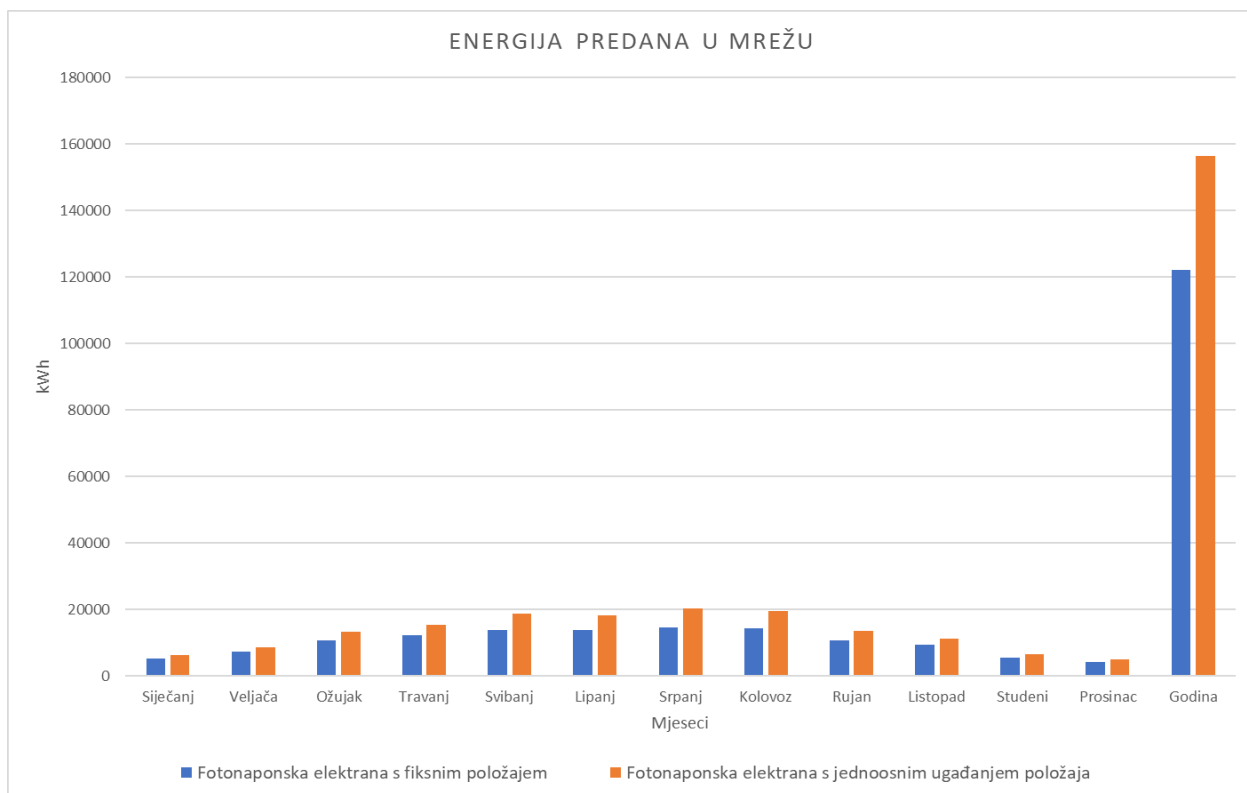
**Slika 4.17.** Grafički prikaz usporedbe ukupnog Sunčevog zračenja na modul



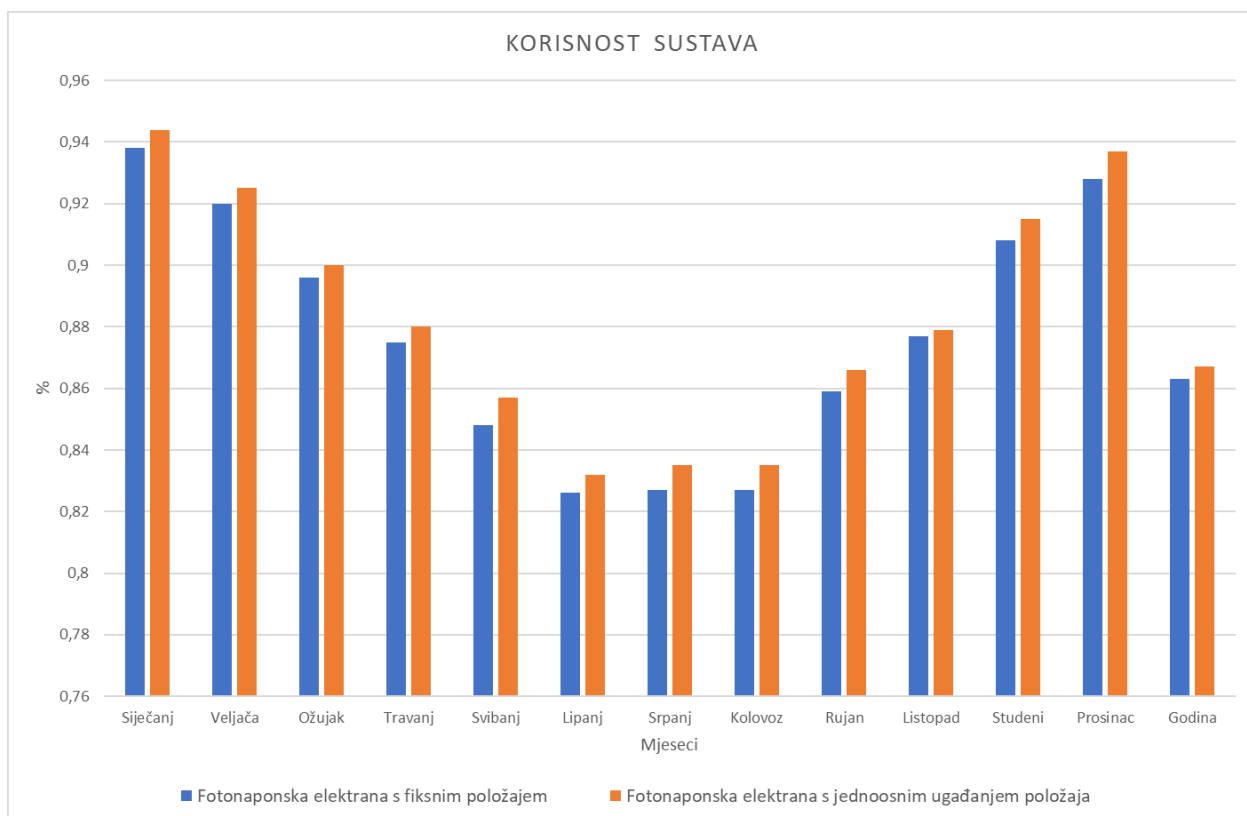
**Slika 4.18.** Grafički prikaz efektivnog Sunčevog zračenja prema modulu



**Slika 4.19.** Grafički prikaz efektivne energije na izlazu iz modula



**Slika 4.20.** Grafički prikaz energije predane u mrežu



**Slika 4.21.** Grafički prikaz korisnosti sustava

Na slikama 4.17., 4.18., 4.19., 4.20. i 4.21. imamo grafički prikaz usporedbe karakteristika oba fotonaponska sustava. Grafički prikaz služi radi lakše vizualne predodžbe razlike rezultata i njihove direktne usporedbe.



## 6. ZAKLJUČAK

Električna energija danas osim što predstavlja mogućnost, također predstavlja i izazov. Glavni izazov predstavlja njezina proizvodnja koja mora pratiti potražnju korisnika. Kao odgovor na ove izazove, naglasak je stavljen na istraživanje i razvoj obnovljivih izvora energije, pri čemu se solarna energija pokazuje kao najpristupačnije i najjednostavnije rješenje.

Razvoj fotonaponskih modula pokazuje se kao praktičan način proizvodnje električne energije, posebno za udaljene i nepristupačne lokacije. Njihova najveća prednost leži u korištenju čistog i obnovljivog izvora energije, što je od izuzetne važnosti u kontekstu suočavanja s klimatskim promjenama i smanjenjem štetnih plinova.

Korištenjem programa PVsyst dobili smo vrijednosti koje pokazuju da fotonaponski sustavi s jednoosnim ugađanjem položaja na godišnjem nivou proizvedu približno 22% više električne energije u odnosu na fotonaponske sustave s fiksnim položajem. Rezultati su očekivani i njihova vrijednost se može mijenjati korištenjem drugih komponenti ili druge lokacije. Gledajući dugoročno, fotonaponski sustavi s jednoosnim ugađanjem položaja su isplativiji i korisniji. Iako korisniji, ovi fotonaponski sustavi zahtijevaju mnogo više znanja i investiranja od sustava s fiksnim položajem. No, kako bismo se pripremili za budućnost potrebno je više ulagati u razvoj fotonaponskih sustava, posebno u same fotonaponske module koji su glavni čimbenik u pretvaranju Sunčevog zračenja u električnu energiju.

U konačnici, ulaganje u razvoj i primjenu fotonaponskih modula važno je za ostvarivanje održive i energetske neovisne budućnosti. Njihova široka primjena donosi korist ne samo za pojedince i kućanstva, već i za društvo u cjelini, čime se doprinosi smanjenju zagađenja očuvanju našeg okoliša za buduće generacije.

## LITERATURA

- [1] Lj., Majdandžić, „Solarni sustavi“; Graphis, Zagreb, (2010.)
- [2] B., Labudović, Osnove primjene fotonaponskih sustava, Energetika marketing., Zagreb 2011.
- [3] ] Lj., Majdandžić, Fotonaponski sustavi, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu Srednja škola Oroslavlje, dostupno na: <https://dokumen.tips/documents/fotonaponski-sustavi-ljubomir-majdandzic.html>
- [4] Pojednostavljeni prikaz samostalnog fotonaponskog sustava, dostupno na: <https://ekosustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/> [7.6.2023]
- [5] Pojednostavljeni prikaz mrežnog fotonaponskog sustava, dostupno na: <https://ekosustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/>[7.6.2023]
- [6] Prikaz izmjenjivača, Voltacon, dostupno na: <https://voltaconsolar.com/elios-5000w-solar-grid-tie-inverter.html>[8.6.2023]
- [7] Prikaz regulatora punjenja, Lumiax, dostupno na: <https://www.lumiax.com/product/detail/188> [8.6.2023]
- [8] Prikaz baterije, Littech, dostupno na: <https://www.ltc-energy.com/wall-battery-Lithium-Battery-48V-100Ah-200Ah-Wall-Mounted-Battery-4-8-9-6kWh-Lithium-Ion-Battery-pd549708998.html> [8.6,2023]
- [9] Prikaz električnog brojila, dostupno na: <https://www.iskraemeco.hr/proizvodi/> [10.8.2023]
- [10] Prikaz fotonaponske elektrane s fiksnim položajem, dostupno:<https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/913> [10.6.2023]
- [11] J. Francisco Alvarado, M. E. Betancur, A. Vel´asquez-Lopez, „Optimization of Single-Axis Discrete Solar Tracking“, *IEEE*
- [12] S. Ammach, A. Attia, „Design and Implementation of Autonomous Energy Efficient Solar Tracking System for PV Power Plants“, *IEEE*

- [13] R. Sakar, M. Uddin, J. Nahar, M. Rana, „Single Axis Solar Tracker for Maximizing Power Production and Sunlight Overlapping Removal on the Sensors of Tracker“, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/352664971\\_Single\\_Axis\\_Solar\\_Tracker\\_for\\_Maximizing\\_Power\\_Production\\_and\\_Sunlight\\_Overlapping\\_Removal\\_on\\_the\\_Sensors\\_of\\_Tracker](https://www.researchgate.net/publication/352664971_Single_Axis_Solar_Tracker_for_Maximizing_Power_Production_and_Sunlight_Overlapping_Removal_on_the_Sensors_of_Tracker) [11.6.2023]
- [14] E. Ei Aung, „Single Axis Solar Tracking System“, dostupno na: <https://ijsea.com/archive/volume8/issue8/IJSEA08081006.pdf>, [11.6.2023]
- [15] S. G. Mane, I. Korachagaon, M. R. Hans, „Simulation of Dual Axis Solar Tracking System“, *IEEE*
- [16] M. Borčić, I. Bonefačić, Fotonaponski sustav s dvoosnim praćenjem prividnog gibanja Sunca, Politehnika: Časopis za tehnički odgoj i obrazovanje, Volumen 2, Broj 1 (2018)
- [17] Pojednostavljeni prikaz sustava s jednoosnim ugađanjem položaja, dostupno na: <https://nasuncanojstrani.hr/oprema/napredne-tehnologije-solarne-elektrane/>, [11.6.2023]
- [18] Pojednostavljeni prikaz sustava s dvoosnim ugađanjem položaja, dostupno na: <https://nasuncanojstrani.hr/oprema/napredne-tehnologije-solarne-elektrane/> [11.6.2023]
- [19] Programski paket korišten u simulacijama PVsyst 7.4.0 , dostupno na: <https://www.pvsyst.com/> [4.7.2023]

## SAŽETAK

U ovom završnom radu opisana je proizvodnja električne energije uz pomoć fotonaponskih sustava, te njihova važnost u današnjem svijetu. U prvome dijelu opisani su početci fotonaponskih sustava kao i dijelovi od kojih su oni sačinjeni. U drugome dijelu detaljnije su opisani fotonaponski sustavi s fiksnim položajem i sustavi s jednoosnim ugađanjem položaja. Usporedba sustava je rađena u programskom paketu PVsyst koji je služio za izvođenje simulacija proizvodnje električne energije ova dva sustava u periodu od jedne godine. Nazivna snaga oba sustava iznosi 100 kW, te se u oba fotonaponska sustava koriste iste komponente radi preciznije usporedbe. Također, sustavi su postavljeni na istu lokaciju odnosno instalirani su na području grada Slavenskog Broda. U završnom dijelu rada je bilo potrebno dobivene rezultate usporediti grafički i tablično.

**Ključne riječi:** fotonaponski sustavi, fotonaponski moduli, fotonaponske elektrane s fiksnim položajem, fotonaponske elektrane s jednoosnim ugađanjem položaja, PVsyst.

## ABSTRACT

This final thesis describes the production of electric energy using photovoltaic systems and their significance in today's world. The first part discusses the beginnings of photovoltaic systems and the components they are composed of. The second part provides a more detailed description of photovoltaic systems with fixed tilt and single-axis tracking systems. A comparison of these systems was conducted using the PVsyst software, which was utilized to perform simulations of electricity production for both systems over a one-year period. The nominal power of both systems is 100 kW, and identical components were used in both photovoltaic systems to ensure a more accurate comparison. Additionally, both systems were installed in the same location, specifically in the city of Slavonski Brod. In the final part of the paper, the obtained results were compared graphically and in tabular form.

**Keywords:** photovoltaic systems, photovoltaic modules, fixed-tilt photovoltaic power plants, single-axis tracking photovoltaic power plants, PVsyst.