TEHNIČKO-EKONOMSKA ANALIZA OTOČNOG I MREŽNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA

Kulušić, Josip

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:228:221587

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of University Department of Professional Studies

SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

JOSIP KULUŠIĆ

Z A V R Š N I R A D

TEHNIČKO-EKONOMSKA ANALIZA OTOČNOG I MREŽNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA

Split, lipanj 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike

Predmet: Obnovljivi izvori energije

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Josip Kulušić

Naslov rada: Tehničko-ekonomska analiza otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava

Mentor: dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

Komentor: /

Split, lipanj 2021.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnike
Predmet: Obnovljivi izvori energije
Nastavnik: dr.sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

ZADATAK

Kandidat: Josip Kulušić

Zadatak: Tehničko-ekonomska analiza otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava

U radu je potrebno:

- u uvodnom teoretskom dijelu prikazati osnovne karakteristike, te usporediti otočni i mrežni fotonaponski sustav;
- definirati sve potrošače stvarne ili zamišljene obiteljske kuće, te procijeniti što je moguće realniju dnevnu potrebu obiteljske kuće za električnom energijom;
- definirati sve ulazne parametre potrebne za dimenzioniranje otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava, kao što su lokacija i orijentacija objekta, nagib krovne plohe, i tako dalje;
- na osnovu ulaznih parametara dimenzionirati otočni fotonaponski sustav sa svim pripadajućim elementima, troškovnikom opreme i radova, te procjenom investicijskog troška i cijene proizvedene električne energije;
- na osnovu ulaznih parametara dimenzionirati mrežni fotonaponski sustav sa svim pripadajućim elementima, troškovnikom opreme i radova, te procjenom investicijskog troška i cijene proizvedene električne energije;
- s obzirom na količine proizvedene i uporabljene električne energije, te s obzirom na investicijske troškove, prikazati pojednostavljenu tehničko-ekonomsku analizu usporedbe otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava;
- iznijeti zaključke;
- navesti literaturu i izvore podataka.

Sažetak

U završnom radu prikazana je podjela fotonaponskih sustava, te dimenzioniranje svakog sustava posebno. Prikazani su i opisani dijelovi cjelokupnog sustava, zajedno s proračunom procijenjene količine proizvedene električne energije. Na samom kraju dimenzioniranja svakog od sustava prikazana je i pojednostavljena ekonomska analiza, odnosno, procjena isplativosti pojedinog sustava. Nakon dimenzioniranja otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava napravljena je tehničko-ekonomska usporedba. U svrhu kvalitetnije usporedbe navedenih fotonaponskih sustava izvršena je dodatna analiza pri čemu je nazivna snaga otočnog fotonaponskog sustava usklađena s nazivnom snagom mrežnog fotonaponskog sustava.

Ključne riječi: fotonaponski modul, fotonaponski sustav, otočni sustav, mrežni sustav.

Summary (Technical-Economic Analysis of Off-Grid and Grid-Connected Photovoltaic System)

This final paper presents the division of photovoltaic systems and the sizing of each system separately. Parts of the entire system, along with the assumed electricity generation, are also shown and described. At the very end of the sizing each of the systems, the economic analysis, ie. the cost-effectiveness of that system, is presented. After sizing both systems, a technical and economic comparison was made. Since each system has a different energy produced from the photovoltaic module, a "new" island system was created with the same energy produced from the module as with the network system, and also compared with each other.

Keywords: photovoltaic module, photovoltaic system, off-grid system, grid-connected system.

SADRŽAJ

1. Uvod ... 1
2. Fotonaponski sustavi ... 2
2.1. Glavna podjela fotonaponskih sustava ... 3
2.2. Samostalni (engl. off-grid) ili otočni fotonaponski sustav ... 4
2.3. Mrežni FN sustav (engl. grid-connected) ... 5
3. Dnevna potreba za energijom ... 6
4. Dimenzioniranje fotonaponskog sustava ... 8
4.1. Dimenzioniranje otočnog fotonaponskog sustava ... 8
4.1.1. Odabir napona akumulatora i ostalih parametara FN sustava ... 8
4.1.2. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja ... 10
4.1.3 Odabir akumulatora ... 11
4.1.4. Proračun broja potrebnih fotonaponskih modula ... 13
4.1.5. Odabir lokacije i proračun očekivane proizvodnje energije u PVGIS-u ... 15
4.1.6. Odabir mrežnog izmjenjivača ... 21
4.1.7. Odabir bidirekcijskog pretvarača ... 24
4.1.8. Ekonomska analiza ... 27
4.2. Mrežni fotonaponski sustav ... 30
4.2.1 Dimenzioniranje mrežnog fotonaponskog sustava ... 30
4.2.2. Odabir i broj potrebih fotonaponskih modula ... 30
4.2.3. Proračun očekivane proizvodnje energije u PVGIS-u ... 32
4.2.4 Odabir mrežnog izmjenjivača ... 36
4.2.5. Ekonomska analiza ... 40
5. Usporedba otočnog i mrežnog fotonaposnkog sustava ... 41
5.1. Ekonomska usporedba ... 41
5.2. Preinaka otočnog sustava u svrhu kvalitetnije ekonomske usporedbe ... 42
5.3. Usporedba „novog“ otočnog s mrežnim fotonaponskim sustavom ... 48

6. Zaključak 49

Literatura 50

Popis slika

SLIKA 2.1.GLAVNA PODJELA FOTONAPONSKIH SUSTAVA [1] 3
SLIKA 2.2. OTOČNI FOTONAPONSKI SUSTAV [2] 4
SLIKA 2.3. MREŽNI FOTONAPONSKI SUSTAV [3] 5
SLIKA 4.1. SPOJ AKUMULATORA 12
SLIKA 4.2. IZGLED AKUMULATORA [4] 12
SLIKA 4.3. IZGLED FOTONAPONSKOG SUSTAVA [6] 13
SLIKA 4.4. IZGLED I DIMENZIJE FOTONAPONSKOG MODULA [8] 14
SLIKA 4.5. IZGLED DIZEL GENERATORA I NJEGOVE KARAKTERISTIKE [9] 15
SLIKA 4.6. ODABIR LOKACIJE U PVGIS-U [7] 16
SLIKA 4.7. PARAMETRI U PVGIS-U [7] 16
SLIKA 4.8. DIJAGRAM PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE PO MJESECIMA [7] 17
SLIKA 4.9. IZGLED MREŽNOG IZMJENJIVAČA [10] 22
SLIKA 4.10. IZGLED BIDIREKCIJSKOG PRETVARAČA [10] 25
SLIKA 4.11. KONAČNI IZGLED OTOČNOG SUSTAVA 27
SLIKA 4.12. IZGLED FOTONAPONSKOG MODULA [11] 31
SLIKA 4.13. DIMENZIJE FOTONAPONSKOG MODULA [11] 31
SLIKA 4.14. KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKOG MODULA [11] 32
SLIKA 4.15. ODABRANA LOKACIJA [7] 32
SLIKA 4.16. PARAMETRI U PVGIS-U [7] 33
SLIKA 4.17. DIJAGRAM PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE PO MJESECIMA [7] 33
SLIKA 4.18. IZGLED MREŽNOG IZMJENJIVAČA [12] 37
SLIKA 4.19. KARAKTERISTIKA MREŽNOG IZMJENJIVAČA [12] 38
SLIKA 4.20. KONAČNI IZGLED MREŽNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA 39
SLIKA 5.1. KONAČNI IZGLED "NOVOG" OTOČNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA 46

Popis tablica

TABLICA 3.1. MAKSIMALNA SNAGA POTROŠAČA I DNEVNE POTREBE ZA ENERGIJOM 6
TABLICA 4.1. ODABIR NAPONA AKUMULATORA 8
TABLICA 4.2. ODABIR OSNOVNIH PARAMETARA FOTONAPONSKOG SUSTAVA 9
TABLICA 4.3. SPECIFIKACIJE O FOTONAPONSKIM MODULIMA [8] 14
TABLICA 4.4. MJESEČNA/DNEVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE 17
TABLICA 4.5. OSTALI PODACI O LOKACIJI I FOTONAPONSKIM MODULIMA [7] 18
TABLICA 4.6. IZRAČUNATI PARAMETRI PO MJESECIMA 19
TABLICA 4.7. SATI UKLJUČENOSTI POMOĆNOG IZVORA ENERGIJE 19
TABLICA 4.8. SPECIFIKACIJE O MREŽNOM IZMJENJIVAČU [10] 23
TABLICA 4.9. SPECIFIKACIJE O BIDIREKCIJSKOM PRETVARAČU [10] 25
TABLICA 4.10. CIJENA OSNOVNIH KOMPONENTI SUSTAVA 28
TABLICA 4.11. MJESEČNA/DNEVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE [10] 34
TABLICA 4.12. OSTALI PODACI O LOKACIJI I FOTONAPONSKIM MODULIMA [7] 35
TABLICA 4.13. DNEVNE UŠTEDE 35
TABLICA 4.14. MJESEČNA UŠTEDA 36
TABLICA 4.15. SPECIFIKACIJE MREŽNOG IZMJENJIVAČA [12] 37
TABLICA 4.16. CIJENA OSNOVNIH KOMPONENTI SUSTAVA 39
TABLICA 5.1. USPOREDBA CIJENA OTOČNOG I MREŽNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA 41
TABLICA 5.2. PREDNOSTI I MANE FOTONAPONSKIH SUSTAVA 41
TABLICA 5.3. IZRAČUNATI PARAMETRI PO MJESECIMA 43
TABLICA 5.4. SATI UKLJUČENOSTI POMOĆNOG IZVORA ENERGIJE 43
TABLICA 5.5. CIJENA OSNOVNIH KOMPONENTI SUSTAVA 47
TABLICA 5.6. USPOREDBA CIJENA "NOVOG" OTOČNOG I MREŽNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA 48

1. Uvod

U današnje vrijeme, fotonaponski sustavi postali su sastavni dio energetskog sustava sa sve većim udjelom u ukupnoj proizvodnji električne energije. Sunce kao izvor energije može se iskoristiti za proizvodnju toplinske i električne energije, uz relativno zanemariv utjecaj na okoliš ako se uzmu u obzir drugi izvori energije. Općenito energija sunca spada u obnovljive izvore energije. Obnovljivi izvori postepeno postaju konkurenti u proizvodnji električne energije ako se usporede s klasičnim fosilnim gorivima. Kako bi se energija sunca pretvorila u električnu energiju koriste se fotonaponski moduli. Postoji više vrsta materijala od kojih se proizvode fotonaponski moduli, pri čemu se u ovom završnom radu koriste fotonaponski moduli izrađeni od monokristalnog silicija. Fotonaponski moduli izrađeni od monokristalnog silicija imaju najveću učinkovitost (od 16% do 25%), ali i višu cijenu.

U osnovne dvije vrste fotonaponskih sustava spadaju samostalni ili otočni sustavi, te mrežni sustavi. Samostalni/otočni sustavi koriste isključivo energiju koju su proizveli (direktno ili pohranjenu u akumulatorskim baterijama), dok mrežni sustavi mogu koristiti energiju koju su proizveli, ali također mogu predavati i preuzimati električnu energiju iz elektrodistribucijske mreže.

U zadnjih nekoliko godina sve više i više se ugrađuju fotonaponski sustavi na stambenim objektima najviše iz razloga kako bi zadovoljili vlastitu potrošnju električne energije. Europska unija omogućuje raznolike potpore odnosno sufinanciranja prilikom izgradnje fotonaponskih sustava, a u svrhu povećanja broja instaliranih sustava po povoljnijim ekonomskim uvjetima za konačne korisnike.

U ovom završnom radu izvršeno je dimenzioniranje otočnog i mrežnom fotonaponskog sustava za zadovoljavanje potreba jednog zamišljenog kućanstva. Po dimenzioniranju sustava i odabiru osnovnih komponenti koje čine otočni i mrežni fotonaponski sustav, izvršena je pojednostavljena ekonomska analiza u svrhu usporedbe specifičnog investicijskog troška pojedinog sustava, te u svrhu usporedbe specifične cijene proizvedene električne energije obaju sustava. U svrhu procijene proizvedene električne energije na odabranoj lokaciji postavljanja fotonaponskog sustava, korišten je javni internetski servis PVGIS (eng. Photovoltaic Geographical Information System).

2. Fotonaponski sustavi

Fotonaponski (FN) sustavi su sustavi koju pomoću fotonaponskog efekta pretvaraju sunčevu energiju u električnu. Fotonaponski sustav može napajati istosmjerna ili izmjenična trošila u slučaju kada je sastavni dio sustava prikladni izmjenjivač.

FN moduli se najčešće postavljaju u smjeru juga, s optimalnim godišnjim kutom insolacije karakterističnim za pojedinu lokaciju. Fotonaponski modul sastavljen je od solarnih ćelija, te da bi dobili neku određenu snagu modula moraju biti paralelno-serijski spojeni.

Snaga fotonaponskog sustava dobije se spajanjem više fotonaponskih modula koji se mogu spajati serijski, gdje je ukupni napon između polova jednak zbroju napona pojedinih modula, te paralelno, gdje je ukupni napon jednak naponu pojedinog modula, dok je ukupna struja jednaka zbroju pojedinih modula.

Fotonaponski efekt je pojava koja generira napon ili električnu struju nakon što se zadani materijal izloži svjetlu. Kada svjetlosni izvor (najčešće sunčeva svjetlost) obasja površinu materijala, elektroni koji se nalaze u valentnoj vrpci apsorbiraju energiju, te „skaču“ u vodljivu vrpcu i tada postaju slobodni elektroni.

Fotonaponski efekt otkrio je francuski fizičar A. E. Becquerel 1839. godine, zbog čega se i često naziva i Becquerelov efekt.

Fotonaponski sustavi mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine, te više manjih podskupina koje su prikazane u sljedećem poglavlju.

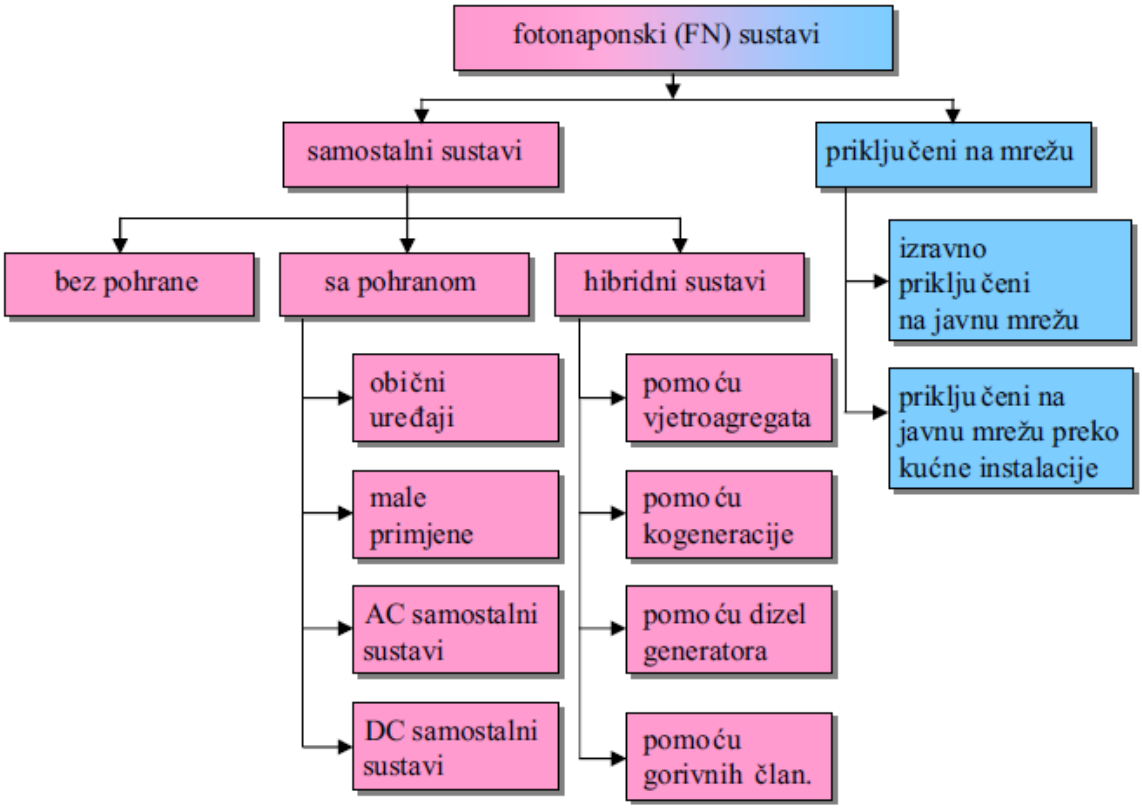
2.1. Glavna podjela fotonaponskih sustava

Fotonaponski sustavi (FN) dijele se na dvije osnovne skupine:

- Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (engl. off-grid) - samostalni ili otočni sustavi
- Fotonaponski sustavi koji su priključeni na mrežu (engl. grid-connected) - mrežni sustavi

Kod samostalnih sustava električna energija koja je proizvedena mora se skladištiti u akumulatorske baterije, dok kod mrežnih sustava nema potrebe za pohranom energije, već se proizvedena električna energija predaje elektroenergetskom sustavu, odnosno, koristi se za vlastite potrebe ili predaje distributeru električne energije.

Samostalni i mrežni sustavi mogu se detaljnije podijeliti kao što je prikazano na *Slici 2.1.*



Slika 2.1.Glavna podjela fotonaponskih sustava [1]

2.2. Samostalni (engl. off-grid) ili otočni fotonaponski sustav

Otočni fotonaponski sustavi nisu priključeni na mrežu već su samostalni (*Slika 2.2.*). Koriste se najčešće u područjima gdje nema mogućnosti priključenja na javnu elektroenergetsku mrežu. Prilikom dimenzioniranja ovakvog sustava potrebno je paziti da se zadovolji cjelokupna potreba za električnom energijom.

Fotonaponski sustav može biti manje nazivne snage pri čemu zadovoljava osnovne potrebe za električnom energijom jednog kućanstva, ali može biti i veći u obliku fotonaponske elektrane koja će osigurati dovoljno električne energije za napajanje i nekoliko kućanstava.

S obzirom da ovakav sustav nema uvijek mogućnost dobave potrebne električne energije u željenom trenutku ili dijelu dana, opremljen je sustavom pohrane električne energije i akumulatorskim baterijama. Upravo akumulatorske baterije predstavljaju najveći nedostatak ovakvih sustava jer povećavaju investicijske troškove ali i troškove rada sustava tijekom njegovog životnog vijeka jer ih je potrebno periodično zamijeniti s novim baterijama.

Jedna od mogućih izvedbi otočnog FN sustava uključuje slijedeće komponente:

- FN moduli,

- Baterije,

- Bidirekcijski pretvarač,

- Mrežni izmjenjivač, te

- Agregat na tekuće gorivo.



Slika 2.2. Otočni fotonaponski sustav [2]

2.3. Mrežni FN sustav (engl. grid-connected)

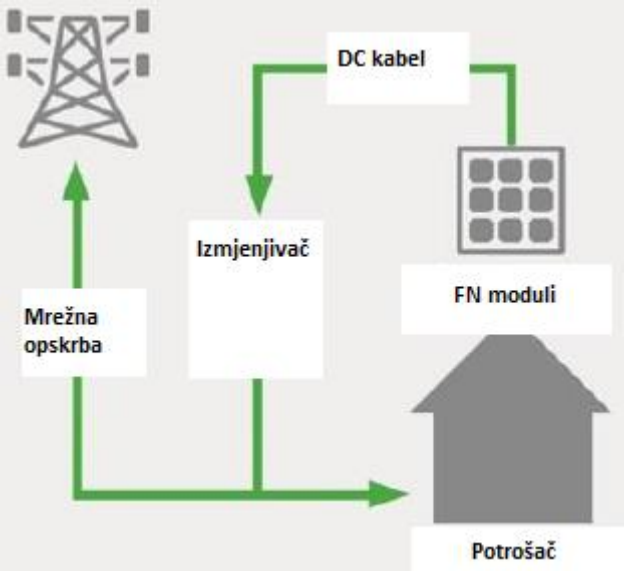
Mrežni FN sustav je sustav za koji ne trebaju baterije za pohranu električne energije već se električna energija predaje elektroenergetskom sustavu. Spajanje ovakvih sustava na mrežu radi se preko izmjenjivača kao što je prikazano na *Slika 2.3.* koji održava frekvenciju i napon cjelokupnog sustava.

Tijekom dana, kada je sunčano vrijeme, mogu se pojaviti viškovi u proizvodnji električne energije koji se predaju u mrežu, dok se tijekom noći i oblačnih dana iz mreže preuzima potrebna količina električne energije.

Glavna podjela mrežnih sustava je na one koji su:

- Izravno priključeni na javnu mrežu,

- Priključeni na javnu mrežu preko kućne instalacije.



Slika 2.3. Mrežni fotonaponski sustav [3]

3. Dnevna potreba za energijom

S obzirom da je u svrhu izrade završnog rada potrebno dimenzionirati otočni i mrežni fotonaponski sustav za zadovoljavanje potreba jednog zamišljenog kućanstva, u ovom poglavlju definirane su dnevne potrebe za energijom zamišljene obiteljske kuće. Pri tome je potrebno navesti sva trošila električne energije prisutna u kućanstvu, uz podatak njihove nazivne snage i procijenjenog vremena korištenja, odnosno, vremena rada trošila.

S obzirom da neki od definiranih potrošača (trošila) tijekom rada samo određeno vrijeme koristi nazivnu snagu, potrebno je još definirati i koeficijent od maksimalne do srednje snage. Tako na primjer perilica posuđa električni grijač koristi samo dio vremena tijekom cjelokupnog vremena rada.

S obzirom da je nazivna snaga perilice posuđa 1800 W, te da je prosječno vrijeme rada perilice posuđa 2 sata, proizlazi da bi tijekom svog rada perilica posuđa potrošila 3600 Wh (1800 W × 2 h). Navedena potrošnje električne energije nije realna i kao takva bi rezultirala krivom procjenom potrebe za električnom energijom. U tu svrhu korišten je na primjeru perilice posuđa koeficijent od maksimalne do srednje snage u iznosu od 0,6. Na taj način procijenjena potrošnja električne energije za rad perilice posuđa iznosi 2160 Wh (1800 W × 2 h × 0.6).

Tablica 3.1. Maksimalna snaga potrošača i dnevne potrebe za energijom

Trošila 230 V, 50 Hz	Snaga (W)	Vrijeme uključenosti (h/dan)	Koeficijent od maksimalne do srednje snage	Potrebna energija (Wh)
Rasvjeta	150	6	1	900
Hladnjak	180	24	0,1	432
TV	80	4	1	320
Perilica posuđa	1800	2	0,6	2160
Kuhinjska napa	150	1	1	150
Perilica rublja	1700	1	0,6	1020
Štednjak	1700	1	0,6	1020
Računalo	150	4	1	600
Mobitel	5	3	1	15
Usisavač	1200	0,5	0,6	360
Bojler	1500	1	0,6	900
Zamrzivač	300	24	0,1	720
UKUPNO	**8915**			**8597**

Na dnu tablice može se vidjeti da je ukupna dnevna potreba za energijom 8,597 kWh, dok je maksimalna snaga potrošača 8,915 kW. Također u tablici je još navedeno i vrijeme uključenosti pojedinog trošila u satima po danu, te pripadajući koeficijent od maksimalne do srednje snage.

Dnevna potrebna energija proizlazi iz umnoška snage [W], vremena uključenosti [h] i koeficijenta od maksimalne do srednje snage.

Navedeni potrošači možda ne uključuju još neke od standardnih trošila koja se nalaze u prosječnom kućanstvu, ali važno je napomenuti da ovdje nije bila svrha analizirati sve moguće potrošače, već definirati dnevnu potrebu za električnom energijom koju će biti potrebno zadovoljiti iz otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava.

4. Dimenzioniranje fotonaponskog sustava

4.1. Dimenzioniranje otočnog fotonaponskog sustava

Dimenzioniranje otočnog fotonaponskog sustava vrši se tako da se prilagodi potrebna snaga fotonaponskog sustava potrebnoj dnevnoj energiji koja je prikazana u *Tablica 3.1*. Najprije se treba izvršiti proračun pojedinih radnih parametara, te na temelju proračuna izvršiti odabir dijelova otočnog fotonaponskog sustava.

4.1.1. Odabir napona akumulatora i ostalih parametara FN sustava

Napon akumulatora odabrati će se prema ukupnoj snazi svih potrošača (8,915 kW), te prema ukupno potrebnoj dnevnoj količini električne energije (8,597 kWh).

Tablica 4.1. Odabir napona akumulatora

Nazivna snaga	Prosječna dnevna potrošnja	Akumulator
do 1.2kW	do 3kWh/dan	12V
od 1.2 do 5kW	od 3 do 6kWh/dan	24V
od 5 do 10kW	od 6 do 16kWh/dan	48V

Iz *Tablica 4.1.* proizlazi da se za potrebnu snagu i prosječnu dnevnu potrošnju odabire napon akumulatorskih baterija od 48V.

Uz odabir akumulatora potrebno je odabrati i ostale parametre koji su potrebni za dimenzioniranje sustava, kao što su:

- Koeficijent dubine pražnjenja akumulatora, t_z

- Stupanj korisnog djelovanja punjenja, n_{Ah}

- Trajanje autonomije sustava, n_A

- Trajanje potpunog oporavka sustava, n_E

- Koeficijent korištenja sustava, h_b

Tablica 4.2. Odabir osnovnih parametara fotonaponskog sustava

ODABIR OSNOVNIH PARAMETARA FN SUSTAVA	
Nazivna snaga [kW]	8,915
Dnevna potrošnja [kW]	8,597
NAPON BATERIJE U_s [V]	48
Koeficijenta dubine pražnjenja akumulatora t_z	0,5
Stupanj korisnog djelovanja punjenja n_{Ah}	0,9
Trajanje autonomije (dan) n_A	1
Trajanje potpunog oporavka sustava (dana) n_E	10
Koeficijent korištenja sustava h_b	1

Radi trajnosti akumulatora ne smiju se prazniti ispod određene razine jer sve promjene na njima su nepovratne i u krajnjem slučaju može doći do samog oštećenja akumulatora. Koeficijent dubine pražnjenja akumulatora uzima se iz tehničkih podataka o akumulatoru. Za potrebe ovog proračuna odabrana je vrijednost koeficijenta dubine pražnjenja akumulatora t_z = 0,5. To znači da se akumulator neće prazniti ispod 50% njegovog nazivnog kapaciteta što bi trebalo osigurati životni vijek akumulatora između 5 i 7 godina.

Prividna energija na akumulatorskim stezaljkama prilikom procesa punjenja se neće moći uskladištiti u cijelosti, pa je potrebno definirati stupanj korisnog djelovanja punjenja akumulatora. Stupanj korisnog djelovanja punjenja akumulatora se označava n_{Ah} , te u ovom slučaju odabrana je vrijednost od 0,9. Iz navedenog proizlazi da će 90% prividne energije uistinu biti uskladišteno u akumulator.

Trajanje autonomije sustava označava se oznakom n_A i izražava se u danima. Ona govori koliko će biti dana pokrivena potrošnja cjelokupnog sustava iz akumulatorskih baterija bez potrebe za dopunjavanje istih. To se događa u periodima kada je vrijeme oblačno ili se na primjer fotonaponski sustav ne može koristiti uslijed kvara. Vrijednost n_A uvelike utječe na potreban broj akumulatora.

Trajanje oporavka sustava označava se oznakom n_E i izražava se u danima. Na osnovu toga definira se potreban broj dana da se sustav oporavi do 100% napunjenosti od trenutka kada se ispraznio do dozvoljene razine akumulatora uz istovremenu projektiranu potrošnju. Ovaj broj n_E je vrlo bitan iz razloga što ima utjecaj na potreban broj fotonaponskih modula koji trebaju osigurati dodatno punjenje akumulatora, odnosno proizvoditi više energije nego što li je planirano dnevno potrošiti iz razloga da se sustav oporavi u nekoliko dana (u ovom slučaju 10 dana) uz projektiranu potrošnju i uz stupanj korisnog djelovanja punjenja akumulatora.

Koeficijent h_B je koeficijent korištenja sustava, kojim se definira da li se energija iz akumulatora koristi kontinuirano ili se koristi na primjer samo tijekom vikenda ili radnim danima u tjednu. Kada se sustav koristi kontinuirano tada je vrijednost koeficijenta 1, dok ako se koristi na primjer samo tijekom radnih dana u tjednu onda je 5/7 odnosno 0,714.

4.1.2. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja

U nastavku će biti prikazan proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja.

Projektirana dnevna potrošnja definira se kao (E_D):

$$E_D = h_B \cdot E_V = 1 \cdot 8597\ Wh = 8597\ \text{Wh} \tag{4.1}$$

Dnevna potrošnja (Q_D):

$$Q_D = \frac{E_D}{U_s} = \frac{8597\ \text{Wh}}{48\ \text{V}} = 179{,}1\ \text{Ah} \tag{4.2}$$

Kapacitet idealnog akumulatora (koji bi se praznio do 100%), K_N:

$$K_N = \frac{n_A \cdot E_V}{U_s} = \frac{1 \cdot 8597\ \text{Wh}}{48\ \text{V}} = 179{,}1\ \text{Ah} \tag{4.3}$$

Minimalni kapacitet realnog akumulatora K:

$$K = \frac{K_N}{t_Z} = \frac{179.1}{0.5} = 358{,}2 \text{ Ah} \quad (4.4)$$

Potrebno dnevno punjenje definira broj fotonaponskih modula Q_L:

$$Q_L = \frac{1}{\eta_{Ah}} \cdot \left(Q_D + \frac{K_N}{n_E}\right) = \frac{1}{0.9} \cdot \left(179{,}1 + \frac{179{,}1}{10}\right) = 218{,}9 \text{ Ah} \quad (4.5)$$

Iz formule o projektiranoj dnevnoj potrošnji E_d (4.1), i napona akumulatora može se definirati dnevno potrebne Ah koje osigurava akumulator, a to je prikazano u formuli (4.2).

U formuli (4.3) o kapacitetu idealnog akumulatora proizlazi da veliki utjecaj ima broj dana autonomije sustava, jer povećavanjem broja dana povećava se kapacitet akumulatora. Povećavanje kapaciteta akumulatora u konačnici povećava i cijenu cjelokupnog sustava, pa je iz tog razloga odabran jedan (1) dan autonomije sustava.

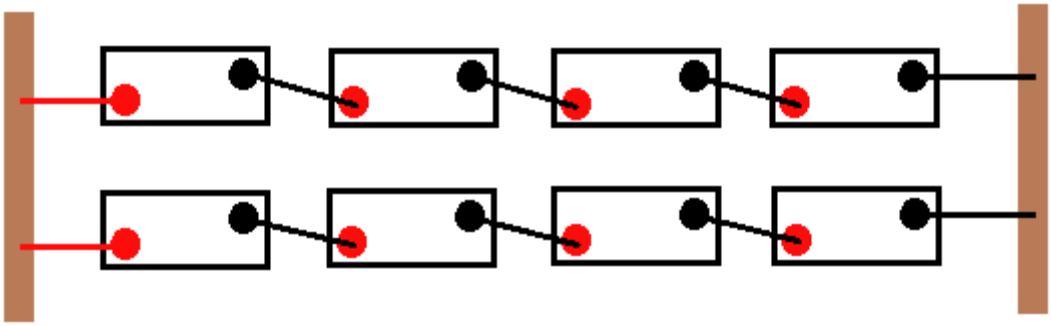
Formula (4.4) određuje minimalni kapacitet realnog akumulatora, gdje se kapacitet idealnog akumulatora dijeli s koeficijentom dubine pražnjenja s obzirom da se akumulator prazni do polovice nazivnog kapaciteta.

U formuli (4.5) prikazano je potrebno dnevno punjenje, odnosno dnevna energija u Ah koja mora doći na stezaljke akumulatora da bi se osigurala projektirana potrošnja iz akumulatora. Potrebno dnevno punjenje je bitno za daljnji proračun iz razloga što definira koliko energije je potrebno proizvesti iz fotonaponskih modula. Prema njemu će biti definiran broj fotonaponskih modula. U ovom primjeru proizlazi da na stezaljke akumulatora treba dovesti 218,9 Ah, da bi se iz akumulatora moglo „potrošiti“ 179,1 Ah [5].

4.1.3 Odabir akumulatora

S obzirom na prethodno izračunatu vrijednosti minimalnog kapaciteta akumulatora od 358,2 Ah i odabranog napona akumulatora od 48 V, proizlazi da je potrebno kombinacijom

serijskog i paralelnog spoja definirati baterijski slog koji će zadovoljiti potrebu. To će u konkretnom slučaju značiti da je na primjer potrebno 8 akumulatora od 12 V i 200 Ah, na osnovu kojih će se zadovoljiti potreba od 48 V i 400 Ah. Na *Slici 4.1* prikazan je način spajanja akumulatora od 12 V 200 Ah, dok je na *Slici 4.2* prikazan sami izgled akumulatora.



Slika 4.1. Spoj akumulatora

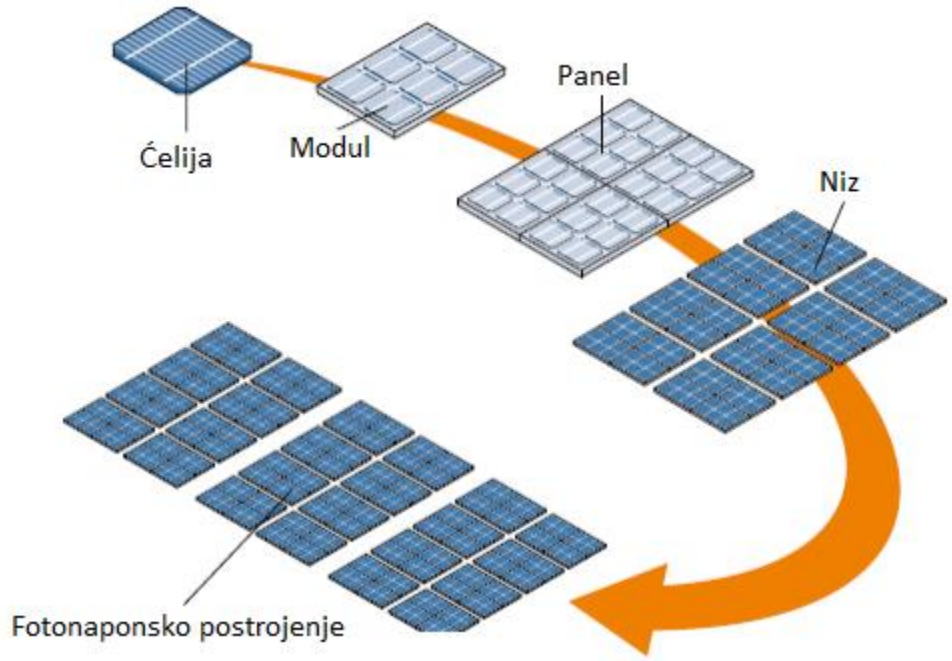


Slika 4.2. Izgled akumulatora [4]

4.1.4. Proračun broja potrebnih fotonaponskih modula

Kod proračuna broja potrebnog broja fotonaponskih modula koristiti će se vrijednosti definirane u prethodnim poglavljima. Općenito, spajanjem fotonaponskih modula u serijski spoj dobiva se niz modula, dok se niz modula još naziva i „string“. Kod serijskog spajanja fotonaponskih modula struja koja protječe kroz sve module ostaje ista, dok se naponi modula zbrajaju u napon niza. Maksimalnim dozvoljenim ulaznim naponom i maksimalnoj dozvoljenoj ulaznoj struji uređaja na koji se oni priključuju biti će određeno koliko se može spojiti modula u niz, te koliko nizova u paralelu. Spajanjem nizova u paralelu zbraja se struja nizova, dok napon niza ostaje isti.

Fotonaponski panel predstavlja spoj nekoliko modula u jednoj strukturi. Niz je definiran spajanjem nekoliko panela u seriju, dok se spajanjem nekoliko nizova u paralelu definira fotonaponsko postrojenje. Cijeli ciklus spajanja prikazan je na *Slici 4.3.*



Slika 4.3. Ciklus spajanja fotonaponskih modula [6]

S obzirom na izračunatu vrijednost potrebnog dnevnog punjenja Q_L = 218,9 Ah, odabrano je 11 fotonaponskih modula nazivne snage 250 Wp spojenih u seriju (engl. string), što rezultira snagom fotonaponskog polja od 2750 Wp. Odabrani fotonaponski moduli su proizvod Luxor, model EcoLine LX-250P, dok su tehnički podaci dani u *Tablici 4.3.*

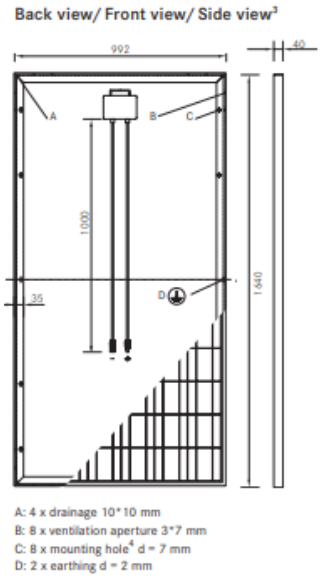
Tablica 4.3. Specifikacije o fotonaponskim modulima [8]

Electrical data	LX-250P
Rated power Pmpp [Wp]	250.00
Pmpp range from	250.00
Pmpp range to	256.49
Rated current Impp [A]	8.14
Rated voltage Vmpp [V]	30.75
Short-circuit current Isc [A]	8.59
Open-circuit voltage Uoc [V]	37.31
Efficiency at STC	15.38%
Efficiency at 200 W/m²	14.94%
NOCT [°C]	45 ± 2°C

Specification as per STC (Standard test conditions): irradiance 1000 W/m² | module temperature 25°C | AM = 1,5
NOCT (nominal operating cell temperature): irradiance 800 W/m² | wind speed 1 m/sec | temperature 20°C | AM = 1,5

Limiting values	LX-250P
Max. system voltage [V]	1000 V
Max. return current [I]	15 A
Temperature range	-40 to 85°C
Snow-load zone[2]	approval up to SLZ 3 (according to DIN 1055)
Max. pressure load (static)	5400 Pa

Na *Slici 4.4* prikazani su izgled i dimenzije fotonaponskog modula.



Slika 4.4. Izgled i dimenzije fotonaponskog modula [8]

S obzirom da je potrebno osigurati potrebnu količinu električne energije tijekom perioda kada fotonaponski sustav neće proizvoditi energiju (oblačni period), potrebno je predvidjeti i rad dodatnog izvora energije, kao što je na primjer dizel agregat/generator. U ovom radu predviđen je agregat proizvod Powermate, model PMD5000S, nazivne snage od 4200 W. Na *Slici 4.5*. prikazan je odabrani agregat zajedno sa svojim karakteristikama.

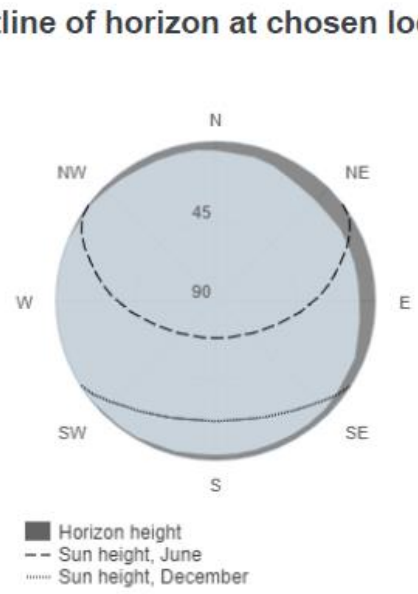


Nazivna snaga (W)	4.200
Maksimalna snaga (W)	4.950
Napon (V)	230
Spremnik (l)	16
Gorivo	dizel
Paljenje	električno
Vrijeme rada (h)	12
Dimenzije (mm)	920 x 520 x 700
Težina (kg)	165

Slika 4.5. Izgled dizel generatora i njegove karakteristike [9]

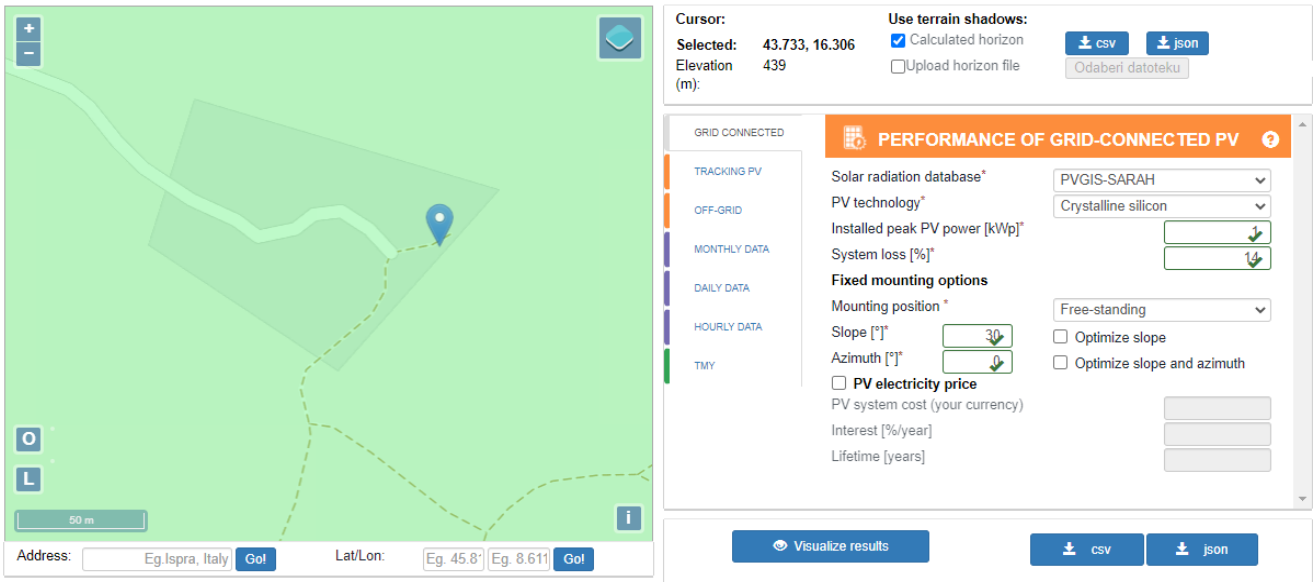
4.1.5. Odabir lokacije i proračun očekivane proizvodnje energije pomoću PVGIS-a

Lokacija gdje se postavljaju fotonaponski moduli je u Gornjem Vinovu na adresi Kulušići 7, s koordinatama (43.733, 16.306). Lokaciju je odabrana i u javnom servisu PVGIS, te je i prikazana na *Slikama 4.6 i 4.7*.



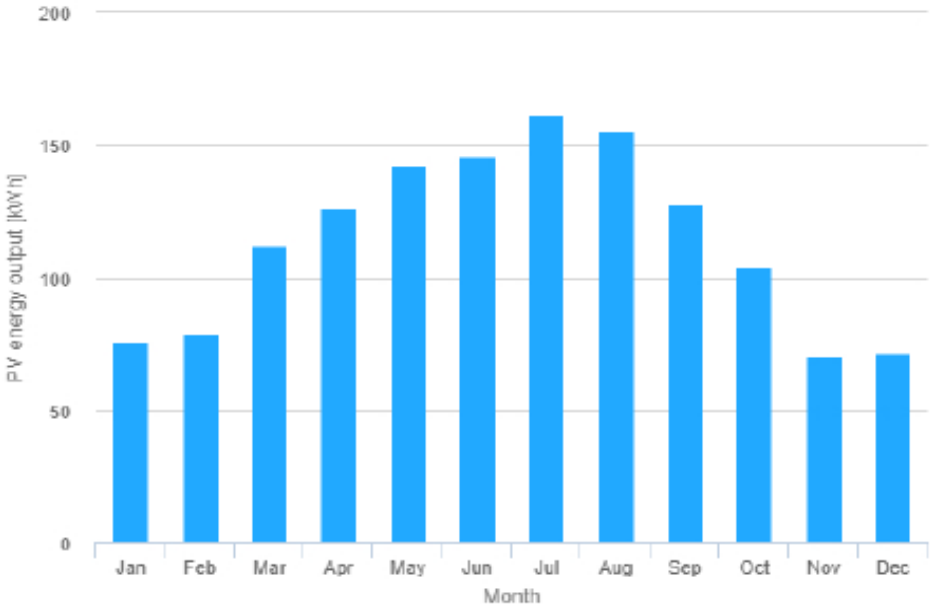
Slika 4.6. Odabir lokacije u PVGIS-u [7]

Nakon što je odabrana lokacija na koju se postavljaju fotonaponski moduli u PVGIS-u, potrebno je također i definirati ostale parametre za dobivanje potrebne mjesečne proizvodnje električne energije, što je prikazano na *Slici 4.7*. Tu se može vidjeti točno koja je orijentacija fotonaponskih modula, te njihove gubitke, vrstu ugradnje i sami materijali od kojih su izrađeni.



Slika 4.7. Parametri u PVGIS-u [7]

Nakon što su odabrani svi parametri potrebni za proračun, kao što je prikazano na *Slici 4.7*, može se prikazati dobivene rezultate, odnosno prikazati proizvodnju električne energije po mjesecima za sustav snage od 1 kWp.



Slika 4.8. Dijagram proizvodnje električne energije po mjesecima [7]

Na temelju *Slike 4.8* izrađena je *Tablica 4.4.* u kojoj je prikazana ukupna mjesečna proizvodnja električne energije posebno za svaki mjesec.

Tablica 4.4. Mjesečna/Dnevna proizvodnja električne energije

Mjesec	E_m	Broj dana	Dnevne vrijednosti
Siječanj	75,8	31	2,45 kWh/dan,1kWp
Veljača	79	28	2,82 kWh/dan,1kWp
Ožujak	112,1	31	3,62 kWh/dan,1kWp
Travanj	126,4	30	4,21 kWh/dan,1kWp
Svibanj	142,4	31	4,59 kWh/dan,1kWp
Lipanj	145,8	30	4,86 kWh/dan,1kWp
Srpanj	161,4	31	5,21 kWh/dan,1kWp
Kolovoz	155	31	5 kWh/dan,1kWp
Rujan	127,9	30	4,26 kWh/dan,1kWp
Listpoad	103,8	31	3,35 kWh/dan,1kWp
Studeni	70,6	30	2,35 kWh/dan,1kWp
Prosinac	71,5	31	2,31 kWh/dan,1kWp

Ovisno o broju dana u mjesecu, dobivena je i proizvodnja na dnevnoj bazi ali za definiranu snagu fotonaponskog sustava od 1 kWp. Ukupnu mjesečnu proizvodnju potrebno je podijeliti s brojem dana u mjesecu kako bi se definirala dnevna proizvodnja energije za svaki mjesec, kao što je prikazano u sljedećem izrazu:

$$\text{DNEVNA PROIZVODNJA} = \frac{\text{MJESEČNA PROIZVODNJA}}{\text{BROJ DANA}}$$

Također u *Tablici 4.5.* prikazani su i ostali potrebni podaci o samoj lokaciji i fotonaponskim modulima, gdje se vidi da su ukupni gubitci energije na cjelokupnom fotonaponskom sustavu 20,74 %, a koji se događaju u izmjenjivaču, kabelima, spojnicama, zbog temperature okoline, refleksije i slično.

Tablica 4.5. Ostali podaci o lokaciji i fotonaponskim modulima [7]

Provided inputs:		**Simulation outputs**	
Latitude/Longitude:	43.733, 16.306	Slope angle:	30 °
Horizon:	Calculated	Azimuth angle:	0 °
Database used:	PVGIS-SARAH	Yearly PV energy production:	1371.5 kWh
PV technology:	Crystalline silicon	Yearly in-plane irradiation:	1730.31 kWh/m²
PV installed:	1 kWp	Year to year variability:	85.28 kWh
System loss:	14 %	Changes in output due to:	
		Angle of incidence:	-2.81 %
		Spectral effects:	1.07 %
		Temperature and low irradiance:	-6.18 %
		Total loss:	-20.74 %

Na osnovu svih do sada izračunatih podataka u nastavku će biti prikazana *Tablica 4.6.* u okviru koje će se izvršiti analiza proizvodnje energije i zadovoljavanje energetskih potreba prema već definiranim potrebama. Pri proračunu je odabran i potreban broj sati rada generatora tijekom dana i tijekom cijele godine, a kako bi se zadovoljile potrebe za energijom u mjesecima kada fotonaponski sustav ne zadovoljava potrebe.

Tablica 4.6. Izračunati parametri po mjesecima

A	Odabrana snaga jednog fotonaponskog modula P_m (Wp)	250											
B	Napon baterije U_S (V)	48											
C	Broj modula u stringu n_{MS}	11											
1	Mjeseci	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac
2	Potrebno dnevno punjenje Q_L [Ah]	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9
3	Izvor pomoćne energije E_H [Wh]	4900	4000	1800	200	0	0	0	0	0	2500	5200	5300
4	Pomoćni izvor $Q_H=E_H/(1,1 \cdot U_S)$ [Ah]	92,8	75,8	34,1	3,8	0	0	0	0	0	47,3	98,5	100,4
5	Energija iz panela $Q_{PV}=Q_L-Q_H$ [Ah]	126,1	143,1	184,8	215,1	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	171,6	120,4	118,5
6	Energija iz 1Wp Y_F [Wh/Wp]	2,45	2,82	3,62	4,21	4,59	4,86	5,21	5	4,26	3,35	2,35	2,31
7	Energija iz stringa $E_{DC_S}=n_{MS} \cdot P_M \cdot Y_F$ [Wh]	6737,5	7755	9955	11577,5	12622,5	13365	14327,5	13750	11715	9212,5	6462,5	6352,5
8	Energija iz stringa $Q_S=E_{DC_S}/1,1 \cdot U_S$ [Ah]	127,6	146,88	188,54	219,27	239,06	253,13	271,35	260,42	221,88	174,48	122,4	120,31
9	Broj potrebnih paralelnih stringova $n_{SP}=Q_{PV}/Q_S$	0,99	0,97	0,98	0,98	0,92	0,86	0,81	0,84	0,99	0,98	0,98	0,98

Tablica 4.7. Sati uključenosti pomoćnog izvora energije

Izvor pomoćne energije sat/danu [h]	1,17	0,95	0,43	0,05	0	0	0	0	0	0,60	1,24	1,26
Izvor pomoćne energije mjesec [h]	36,17	26,67	13,29	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,45	37,14	39,12
Izvor pomoćne energije godišnje [h]	172,26											

Oznake i formule iz *Tablice 4.6.* :

A - Snaga modula P_m [Wp]

B - Napon akumulatora U_S [V]

C - Broj modula u „stringu“ (spoj u seriju)

1 - Mjeseci

2 - Potrebno dnevno punjenje Q_L [Ah]

3 - Izvor pomoćne energije E_H [Wh]

$$E_{H=}4200\ W \cdot sati\ uključenosti\ generatora \qquad (4.7)$$

4 - Pomoćni izvor energije Q_H [Ah]

$$Q_H = \frac{E_H}{1.1 \cdot U_s} \tag{4.8}$$

5 - Potrebna energija iz panela Q_{PV} [Ah]

$$Q_{PV} = Q_L - Q_H \tag{4.9}$$

6 - Energija iz 1 Wp Y_F [Wh/Wp]

7 - Energija iz „stringa“ $E_{DC\text{-}S}$ [Wh]

$$E_{DC-S} = n_{ms} \cdot P_M \cdot Y_F \tag{4.10}$$

8 - Energija iz „stringa“ Q_s [Ah]

$$Q_S = \frac{E_{DC-S}}{1.1 \cdot U_s} \tag{4.11}$$

9 - Broj potrebnih paralelnih „stringova“ n_{sp}

$$n_{SP} = \frac{Q_{PV}}{Q_s} \tag{4.12}$$

Iz *Tablica 4.6.* može se vidjeti da su neke veličine već od prije proračunate i odabrane te su kao takve upisane u tablicu, kao što su snaga fotonaponskog modula, napon akumulatora, potrebno dnevno punjenje i slično.

Sve ostale veličine izračunate su prema matematičkim izrazima koji su prikazani u prvom stupcu. Izvor pomoćne energije E_h [Wh] dobiva se umnoškom nazivne snage generatora

i brojem sati uključenosti generatora u danu za svaki mjesec posebno. Pomoćni izvor energije Q_H izražava se u Ah koji će biti dostavljeni akumulatorskim baterijama. Konačno, potrebno je vrijednost izvora pomoćne energije podijeliti s naponom akumulatora U_s, koji je uvećan za 10%, odnosno $1{,}1 \times U_s$, jer to odgovara stvarnom naponu punjenja akumulatora s obzirom da se on uvijek puni većim naponom od nazivnog napona akumulatora.

Q_{PV} je potrebna energija iz panela odnosno koliko Ah mora biti proizvedeno, a dobije se tako što se od potrebnog dnevnog punjenja akumulatora Q_L oduzme energija koja će biti proizvedena generatorom, odnosno pomoćnim izvorom energije Q_H.

Y_F je energija koja je proizašla iz proračuna pomoću PVGIS-a, odnosno to je energija dobivena iz 1 kWp, odnosno iz 1 Wp.

$E_{DC\text{-}S}$ je energija koju se može dobiti po danu iz jednog stringa koji sadrži n_{MS} fotonaponskih modula, dok je Q_S energija iz jednog stringa po danu prikazana u Ah.

n_{SP} koji je prikazan kao zadnja veličina u *Tablici 4.5* je broj potrebnih stringova iz koje proizlazi potreban broj paralelnih stringova, odnosno ukupan broj modula za zadovoljavanje energetskih potreba u pojedinom mjesecu.

Također iz *Tablice 4.6.* može se vidjeti da od svibnja do rujna potrebna energija je u potpunosti zadovoljena samo iz fotonaponskog sustava, dok je u ostalim mjesecima potrebno uključiti u sustav i generator, a kako bi vrijednost za n_{SP} bila jednaka ili nešto manja od 1.

Vrijeme uključenost generatora može se vidjeti u *Tablici 4.7.* gdje je točno prikazano koliko je sati uključen generator u pojedinim mjesecima, te njegovu ukupnu uključenost od 172,26 sati na godišnjoj bazi.

4.1.6. Odabir mrežnog izmjenjivača

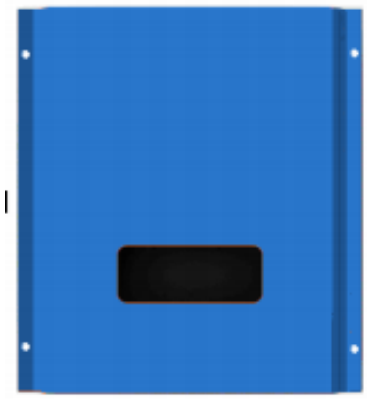
Mrežni izmjenjivač ili inverter je vrsta pretvarača koji istosmjernu struju pretvara u izmjeničnu. U ovom slučaju mrežni izmjenjivač ima ulogu pretvoriti energiju iz fotonaponskog sustava u reguliranu izmjeničnu električnu energiju stabilnog napona i frekvencije da bi mogle biti zadovoljene potrebe potrošača. Prethodno su definirana 11 fotonaponska modula spojena u

niz snage po 250 Wp, te akumulator od 48V i 400Ah, pa je prema tome potrebno odabrati i mrežni izmjenjivač.

Ukupna snaga fotonaponskih modula je 11 × 250 Wp što ukupno iznosi 2750 Wp. Iz toga proizlazi da je potrebno odabrati mrežni izmjenjivač veće snage od 2750 W. Napon otvorenog kruga fotonaponskog modula iznosi U_{0c} je 37,31 V, dok je struja kratkog spoja I_{sc} 8,59 A.

Ako bi se odabrao mrežni izmjenjivač puno veće snage od snage niza fotonaponskih modula onda bi učinkovitost pretvorbe energije bila niža, odnosno bio bi manji stupanj korisnog djelovanja. Također, napon niza mora biti manje vrijednosti od ulaznog napona mrežnog izmjenjivača, ali je isto tako poželjno da njegova vrijednost bude što bliža maksimalno dozvoljenoj vrijednosti ulaznog napona mrežnog izmjenjivača. Ne smije u niti jednom slučaju prijeći maksimalnu vrijednost jer izmjenjivač nema zaštitu od previsoke razine napona na ulazu pa može doći do oštećenja mrežnog izmjenjivača.

Konkretno, odabran je BlueSolar Grid Inverter nazivne snage od 2800 W, te maksimalne od 3000 W. Na *Slici 4.9* prikazan je izgled mrežnog izmjenjivača, dok su u *Tablici 4.8.* prikazane tehničke karakteristike mrežnog izmjenjivača.



Slika 4.9. Izgled mrežnog izmjenjivača [10]

Tablica 4.8. Specifikacije o mrežnom izmjenjivaču [10]

BlueSolar Grid Inverter	2800	
GRID OUTPUT (AC)		
Nominal output power	2800W	
Maximum output power	3000W	
Nominal output current	12A	
Maximum output current	13A	
Maximum fuse protection	16A	
Harmonic distortion of output current	<3% at nominal power	<5% at 50% power
Nominal AC output voltage	220V - 230V - 240V	
Power factor	>0,99% at nominal power	
Operating AC voltage range	190-260V	
Nominal AC frequency	50Hz	
Operating AC frequency range	45.5-54.5Hz	
Internal consumption at night	<0,1W	
Short circuit proof	Yes	
SOLAR INPUT (DC)		
Maximum Input voltage	500V	
Input Voltage MPPT range	110-480V	
Maximum input current	13A	
Maximum input power	3160W	
Number of MPPT trackers	1	
Number of strings	2	
Start-up power	7W	
Ground fault monitoring	RCMU (residual current monitoring unit)	
Reverse polarity protection	Yes, with short circuit diode	

Nakon odabira, potrebno je provjeriti usklađenost pojedinih veličina.

Kao što je već navedeno, odabrani fotonaponski moduli imaju sljedeće karakteristike:

- $P_n = 250$ Wp

- Ukupna snaga polja $11 \times 250 = 2750$ Wp

- Napon otvorenog kruga $U_{oc} = 37{,}31$ V

- Struja kratkog spoja $I_{sc} = 8{,}59$ A

Karakteristike mrežnog izmjenjivača su:

- Maksimalni ulazni napon = 500 V

- Maksimalna ulazna snaga = 3160 W

- Maksimalna ulazna struja = 13 A

⇒ Umnožak broja fotonaponskih modula s naponom otvorenog kruga treba biti manji od maksimalnog ulaznog napona mrežnog izmjenjivača.

Broj FN modula × U_{oc} = 11 × 37,41 = 411,51 V < 500 V

⇒ Struja kratkog spoja < Maksimalne ulazne struje

8,59 A < 13 A

⇒ Ukupna snaga polja < Maksimalna ulazna snaga

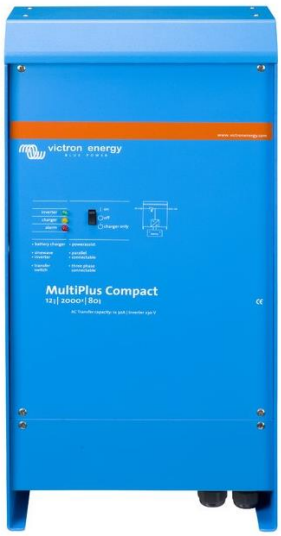
2750 Wp < 3160 W

Nakon što su provjerene sve potrebne veličine, može se zaključiti da odabrani mrežni izmjenjivač u potpunosti odgovara sustavu i potrebama.

4.1.7. Odabir bidirekcijskog pretvarača

Bidirekcijski pretvarač je elektronički uređaj koji se sastoji od ispravljača, regulator punjenja akumulatora, te izmjenjivača. Njegova glavna uloga je da formira i upravlja izmjeničnom mrežom, a najčešće se koristi gdje elektroenergetska mreža nije dostupna. On upravlja punjenjem i pražnjenjem akumulatora, te uključivanjem i isključivanjem dodatnih izvora napajanja.

S obzirom na prethodno odabrani istosmjerni napon akumulatora od 48 V odabran je bidirekcijski pretvarač Quattro MultiPlus 48/5000/70. Odabrani bidirekcijski pretvarač je namijenjen za priključak na akumulatorske baterije napona 48 V, konstantne izlazne snage 5000 VA, odnosno 4000 W, te struje punjenja od 70 A. Na *Slici 4.10* prikazan je izgled bidirekcijskog pretvarača, dok u *Tablici 4.9.* su prikazani njegovi tehnički podaci.



Slika 4.10. Izgled bidirekcijskog pretvarača [10]

Tablica 4.9. Specifikacije o bidirekcijskom pretvaraču [10]

Quattro	48/5000/70-100/100 120V		
PowerControl / PowerAssist	Yes		Yes
Integrated Transfer switch	Yes		Yes
AC inputs (2x)	Input voltage range: 90-140 VAC	Input frequency: 45 – 65 Hz	Power factor: 1
Maximum feed through current	2x 100 A		2x 100 A
INVERTER			
Input voltage range	38 – 66 V		
Output (1)	Output voltage: 120 VAC ± 2%	Frequency: 60 Hz ± 0,1%	
Cont. output power at 25°C (3)	5000 VA		
Cont. output power at 25°C	4000 W		
Cont. output power at 40°C	3700 W		
Cont. output power at 65°C	3000 W		
Peak power	10000 W		
Maximum efficiency	95 %		
Zero load power	35 W		
Zero load power in AES mode	30 W		
Zero load power in Search mode	15 W		
CHARGER			
Charge voltage 'absorption' (V DC)	57,6 V		
Charge voltage 'float' (V DC)	55,2 V		
Storage mode (V DC)	52,8 V		
Charge current house battery (A) (4)	70 A		
Charge current starter battery (A)	4 A (12V and 24V models only)		
Battery temperature sensor	Yes		

Nakon što je odabran bidirekcijski pretvarač, potrebno je provjeriti i usklađenost bidirekcijskog sustava s drugim komponentama sustava.

- Istosmjerni napon baterija je 48 V, a kapacitet 400 Ah - Usklađeno

- Istosmjerna struja punjenja 10-15 % od 400 Ah ➞ 40-60 A – Usklađeno

- Snaga punjača:

Napon punjenja za akumulatore od 48 V je 57,6 V, kao što je prikazano u *Tablica 4.8*

SNAGA PUNJAČA = NAPON PUNJENJA × STRUJA PUNJENJA

57,6 V × 70 A = 4032 W > 2750 Wp – Usklađeno

-Trajna snaga

Kao što je prikazano na početku rada, maksimalna snaga potrošača je 8915 W. Proizlazi da neće biti dovoljna snaga bidirekcijski pretvarač 4000W, pa će biti potrebno uključivanje preko transfer sklopke i generatora nazivne snage 4200 W. Pri tome ukupna snaga sustava proizlazi 8200 W, što je još uvijek niža snaga od ukupne snage svih potrošača. Proizlazi da će, ako se ne želi dodatno predimenzionirati sustav, budući korisnik ipak morati voditi računa o tome da ne uključuje sve potrošače u isto vrijeme.

Nakon što je odabran i provjerena usklađenost bidirekcijskog pretvarača, potrebno je još provjeriti usklađenost akumulatorskih baterija s bidirekcijskim pretvaračem. Snaga pretvarača uvelike utječe na životni vijek baterija, jer ako na akumulator priključimo „prejak“ izmjenjivač (koji je dio bidirekcijskog pretvarača) on će brzo prazniti baterije, te ih na taj način nepovratno trošiti i smanjiti njihov vijek trajanja. Ako na bateriju priključimo „preslab“ izmjenjivač onda u trajnom radu neće se moći zadovoljiti potrebe potrošača.

Za provjeru usklađenosti baterija i bidirekcijskog pretvarača koristi se slijedeći izraz za trajni rad sustava:

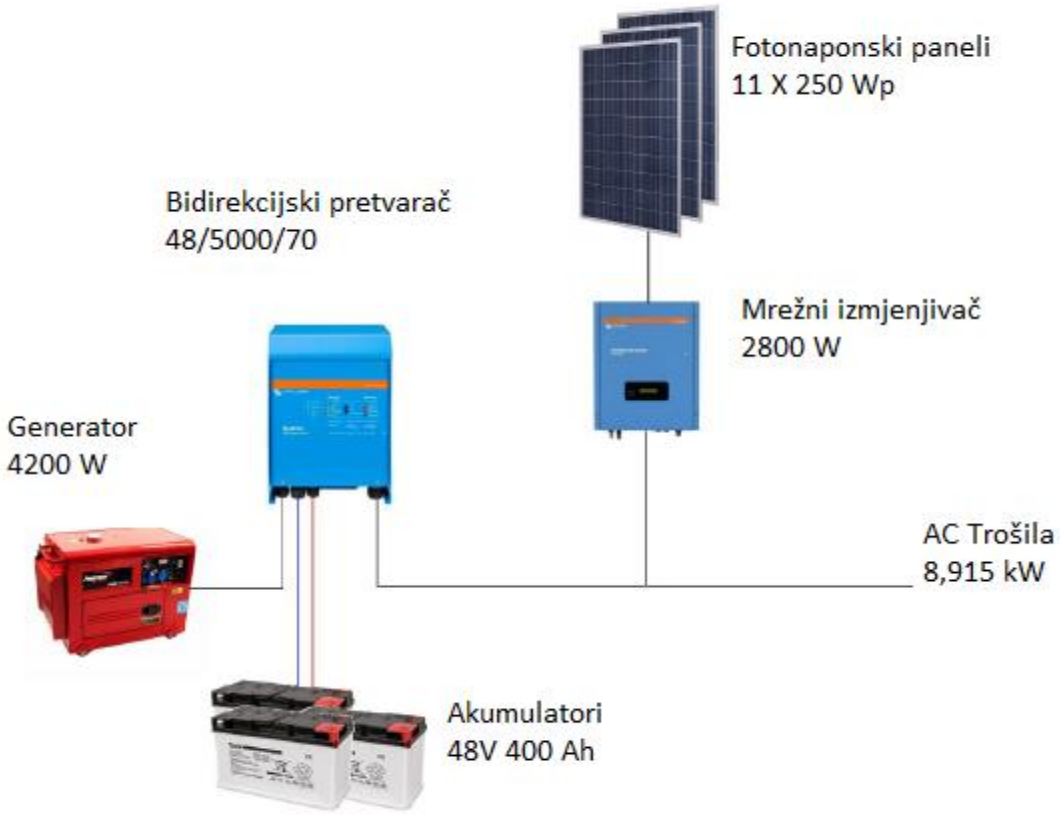
$$\text{KAPACITET AKUMULATORA} > 5\ \text{h} * \frac{\text{SNAGA IZMJENJIVAČA}}{\text{NAPON AKUMULATORA}}$$

$$400\text{Ah} > 5\ \text{h} * \frac{3800}{48}$$

400 Ah > 395,83 Ah

Iz gore prikazane provjere bilo je potrebno dodatno ograničiti snagu na izmjenjivaču bidirekcijskog pretvarača na 3800 W (umjesto 4000 W) iz razloga kako izmjenjivač ne bi prebrzo praznio baterije.

Konačno, odabrani su svi osnovni elementi fotonaponskog sustava, te je na *Slici 4.11.* ilustriran konačni izgled sustava sa svim elementima.



Slika 4.11. Konačni izgled otočnog sustava

4.1.8. Ekonomska analiza

Nakon što su odabrani svi elementi, u nastavku će biti prikazana pojednostavljena ekonomska analiza na osnovu koje će biti definiran specifični investicijski trošak te specifična cijena proizvedenog kWh električne energije. Cijena izgradnje sustava, odnosno početni investicijski trošak prikazan je u *Tablici 4.10.*

Tablica 4.10. Cijena osnovnih komponenti sustava

Oprema	**Komada**	**Jedinična cijena**	**Ukupno**
		[kn]	**[kn]**
FN moduli	11	982,00	10.802,00
Mrežni izmjenjivač	1	10.000,00	10.000,00
Bidirekcijski pretvarač	1	22.900,00	22.900,00
Akumulatorske baterije	8	1.690,00	13.520,00
Generator	1	17.299,00	17.299,00
Ožičenje, izvedba, materijal, …	paušalno	10.000,00	10.000,00
Ukupno			**84.521,00**

Iz *Tablica 4.10.* proizlazi da početni investicijski trošak iznosi 84.521,00 kn. Specifični investicijski trošak potrebno je izraziti po instaliranom Wp fotonaponskog sustava tako da se ukupni investicijski trošak podijeli s ukupnom snagom fotonaponskog sustava:

84.521 kn / 2750 Wp =30,73 kn/Wp (~ 4 €/Wp)

Kako bi se odredio specifični trošak proizvedenog kWh električne energije potrebno je uzeti u obzir vijek trajanja sustava, troškove održavanja, potrošnju goriva generatora, izmjenu akumulatorskih baterija, i slično, a sve tijekom perioda trajanja sustava.

Ako se pretpostavi vijek trajanja sustava oko 20 godina, te uz pretpostavku vijeka trajanja upotrebe akumulatorskih baterije od 5 godina, proizlazi da će se tijekom upotrebe sustava akumulatorski baterije trebati zamijeniti 3 puta. Izmjena baterija zahtijevati će dodatne troškove u iznosu od 3 × 13.520 kn = 40.560 kn.

Za potrebe procijene svih troškova rada sustava tijekom 20 godina potrebno je uključiti i troškove nabave goriva za rad agregata, i to prema slijedećem proračunu:

- Cijena dizel goriva iznosi 10 kn/l

- Broj sati rada generatora godišnje iznosi 172,26 h/god

- Potrošnja goriva tijekom 1 sata rada agregata iznosi 0,7 l/h

- Troškovi za nabavu goriva:

10 kn/l × 172,26 h/god × 0.7 l/h × 20 godina = 24.116,40 kn

Tijekom 20 godina upotrebe sustava predviđeni su i troškovi održavanja sustava u iznosu od 10.000 kn.

Iz svega navedenog proizlaze ukupni troškovi tijekom životnog vijeka sustava u iznosu od:

84.521,00 + 40.560,00 + 24.116,40 + 10.000,00 = 159.197,40 kn

Ukupno proizvedena energija sustava tijekom životnog vijeka iznosi:

8,597 kWh/dan × 365 dana/god × 20 god = 62,758 MWh

Na osnovu prikazanih proračuna može se odrediti specifična cijena proizvedenog kWh električne energije kao:

159.197,40 kn / 62758,1 kWh = 2,53 kn/kWh (~ 0,33 €/kWh)

Kao što se moglo i očekivati, specifična cijena proizvedene električne energije otočnog fotonaponskog sustava višeg je iznosa od cijene električne energije koja se dobavlja iz elektrodistribucijske mreže.

U nastavku će biti izvršeno dimenzioniranje mrežnog fotonaponskog sustava.

4.2. Mrežni fotonaponski sustav

4.2.1 Dimenzioniranje mrežnog fotonaponskog sustava

Dimenzioniranje mrežnog fotonaponskog sustava biti će izvršeno u skladu s dnevnom potrebom za električnom energijom zamišljenog kućanstva koja je prikazana u *Tablici 3.1*., i to u iznosu od 8,597 kWh, dok je ukupna snaga potrošača 8,915 kW. Najprije će biti izvršen proračun broja potrebnih fotonaponskih modula za već odabranu lokaciju kao i za otočni fotonaponski sustav, te zatim dimenzioniranje i odabir osnovnih dijelova mrežnog fotonaponskog sustava.

Za razliku od otočnog fotonaponskog sustava, mrežni fotonaponski sustav ne pohranjuje proizvedenu energiju u akumulatorske baterije već je predaje u elektrodistribucijsku mrežu. Osim akumulatorskih baterija mrežni sustav ne zahtijeva ni upotrebu bidirekcijskog pretvarača te dodatnog izvora energije, kao što je agregat.

Međutim, da bi se proizvedena električna energija mogla predati u elektrodistribucijsku mrežu potrebno je instalirati dvosmjerno brojilo koje će odvojeno mjeriti potrošenu i predanu električnu energiju. Dvosmjerno brojilo ugrađuje ovlašteni distributer električne energije, odnosno HEP ODS, koji prilikom sklapanja ugovora o korištenju mreže navodi i cijenu po kojoj će se otkupljivati proizvedeni kWh električne energije, te naknadu za ugradnju dvosmjernog brojila. Za potrebe ovog rada predviđena je otkupna cijena od 0,35 kn za 1 kWh proizvedene električne energije. Predviđena je i naknada za ugradnju dvosmjernog brojila u iznosu od 3.500,00 kn.

4.2.2. Odabir i broj potrebnih fotonaponskih modula

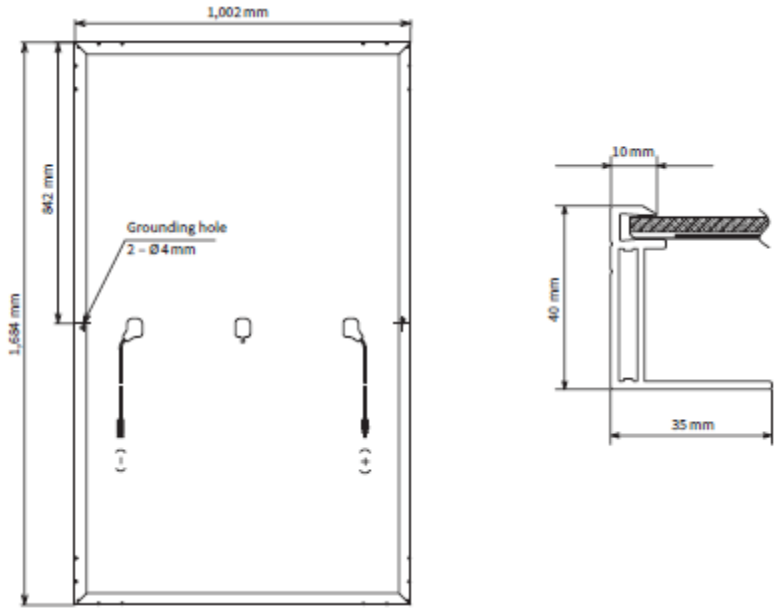
Sukladno prethodno izračunatim dnevnim potrebama energije odabrani su fotonaponski moduli proizvod Sharp, modela NU-JC 330, nazivne snage 330 Wp, te je za potrebe ovog proračuna odabrano 12 fotonaponskih modula vezanih u jedan „string“, odnosno niz.

Spajanjem 12 modula od 330 Wp u niz proizlazi fotonaponski sustav ukupne snage 3.960 Wp.

Izgled fotonaponskog modula prikazan je na *Slici 4.12.*, podaci o geometriji modula na *Slici 4.13.*, a tehničke karakteristike na *Slici 4.14.*



Slika 4.12. Izgled fotonaponskog modula [11]



Slika 4.13. Dimenzije fotonaponskog modula [11]

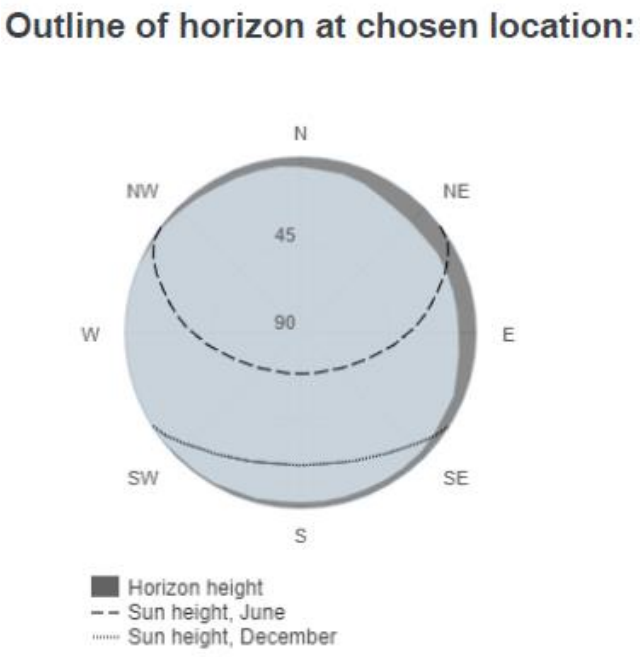
Electrical data (NMOT)			
		NU-JC330	
Maximum power	P_{max}	245.57	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	39.16	V
Short-circuit current	I_{sc}	8.39	A
Voltage at point of maximum power	V_{mpp}	31.81	V
Current at point of maximum power	I_{mpp}	7.72	A

NMOT = Nominal Module Operating Temperature: 45 °C, irradiance 800 W/m², air temperature of 20 °C, wind speed of 1 m/s.

Slika 4.14. Karakteristike fotonaponskog modula [11]

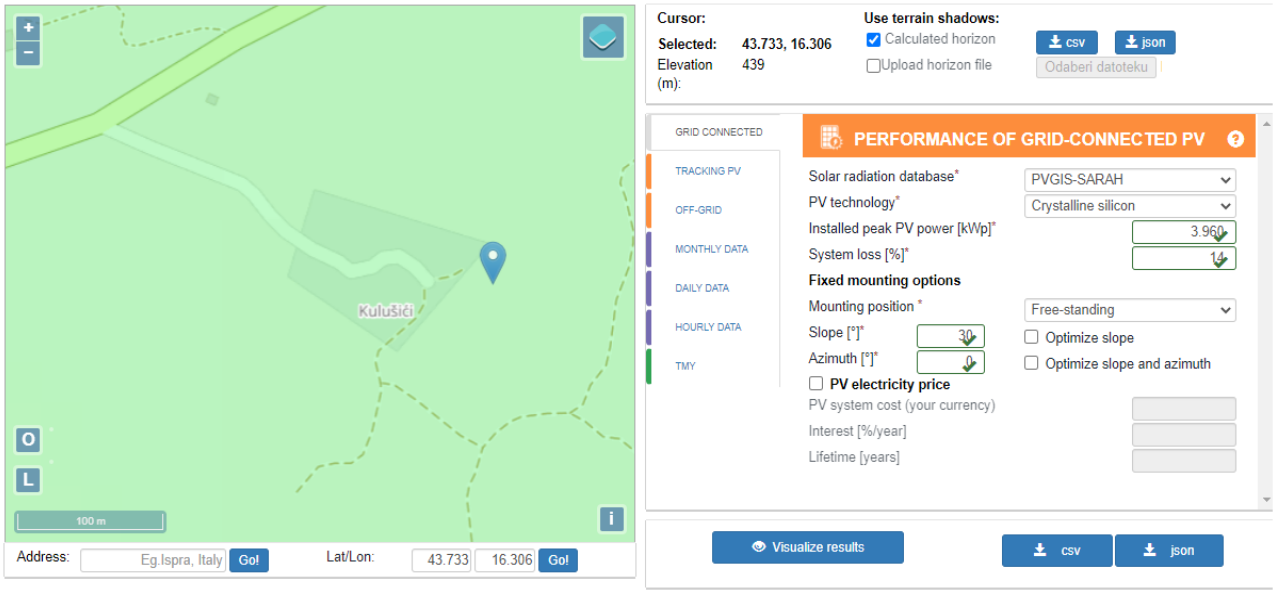
4.2.3. Proračun očekivane proizvodnje energije u PVGIS-u

Lokacija za koju se vrši proračun očekivane proizvodnje električne energije u PVGIS-u je ista kao i za proračun otočnog fotonaponskog sustava, u Gornjem Vinovu na adresi Kulušići 7 s koordinatama (43.733, 16.306) prikazanim *Slikama 4.15 i 4.16.*

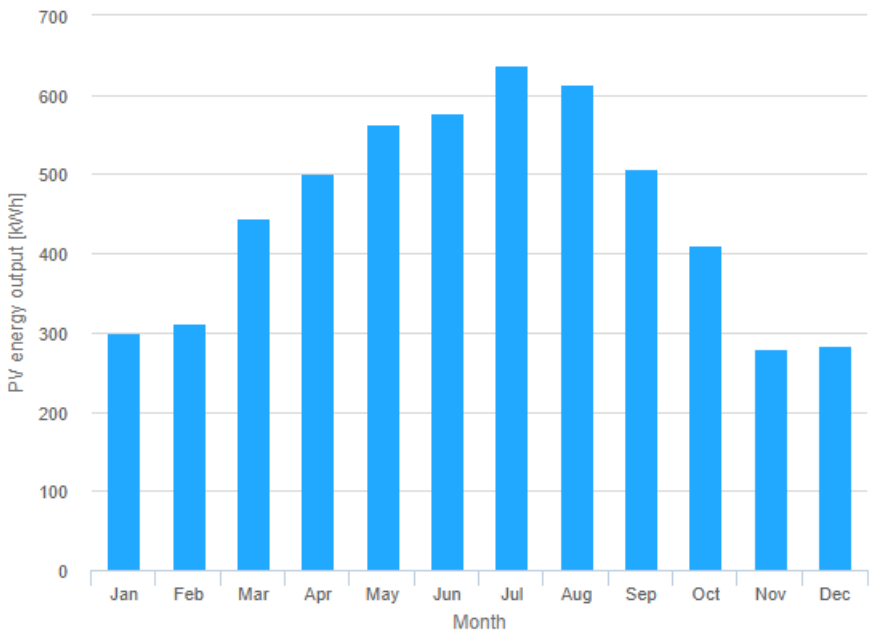


Slika 4.15. Odabrana lokacija [7]

U PVGIS platformi definirani su i svi ostali parametri potrebni za proračun mjesečne proizvodnje električne energije, kao što je prikazano na *Slici 4.16.* Neki od parametara uključuju orijentaciju fotonaponskih modula u prostoru, energetske gubitke, vrstu ugradnje i vrstu materijala od kojih su izrađeni fotonaponski moduli. Rezultati proračuna, odnosno, procijenjena proizvodnja električne energije po mjesecima za sustav snage 3.960 Wp prikazana je na *Slici 4.17.*



Slika 4.16. Parametri u PVGIS-u [7]



Slika 4.17. Dijagram proizvodnje električne energije po mjesecima [7]

Na temelju podataka prikazanih na *Slici 4.17.*, izrađena je *Tablica 4.11.* u kojoj su prikazane vrijednosti mjesečne proizvodnje električne energije, te vrijednosti prosječne dnevne proizvodnje električne energije po mjesecima.

Tablica 4.11. Mjesečna/Dnevna proizvodnja električne energije [10]

	Em [kWh]	Dan	Dnevne vrijednosti[kWh/dan]
Siječanj	300,21	31	9,68
Veljača	312,64	28	11,17
Ožujak	443,85	31	14,32
Travanj	500,69	30	16,69
Svibanj	564	31	18,19
Lipanj	577,44	30	19,25
Srpanj	638,16	31	20,59
Kolovoz	613,82	31	19,8
Rujan	506,44	30	16,88
Listpoad	411,1	31	13,26
Studeni	279,66	30	9,32
Prosinac	283,12	31	9,13

Ukupna mjesečna proizvodnja prikazana je u stupcu Em u kWh, dok je u stupcu „Dan“ prikazan broj dana u određenom mjesecu. Ovisno o broju dana u mjesecu dobivena je i prosječna proizvodnja energije po danu, prikazano u stupcu „Dnevne vrijednosti“:

$$\text{DNEVNA PROIZVODNJA} = \frac{\text{MJESEČNA PROIZVODNJA}}{\text{BROJ DANA}}$$

Također u *Tablici 4.12.* prikazani su i ostali potrebni podaci o samoj lokaciji i fotonaponskim modulima, iz kojih proizlaze ukupni gubitci fotonaponskog sustava od 20,74 %, a koji su rezultat pretvorbe energije izmjenjivača, te gubicima u kablovima, spojnicama, uslijed zagrijavanja fotonaponskih modula, refleksije i slično.

S obzirom da su definirane prosječne dnevne količine proizvedene energije, može se izvršiti proračun koliko se energije može predati u elektrodistribucijsku mrežu prosječno po danima za svaki karakteristični mjesec (*Tablica 4.13).*

Tablica 4.12. Ostali podaci o lokaciji i fotonaponskim modulima [7]

Provided inputs:		**Simulation outputs**	
Latitude/Longitude:	43.733, 16.306	Slope angle:	30 °
Horizon:	Calculated	Azimuth angle:	0 °
Database used:	PVGIS-SARAH	Yearly PV energy production:	5431.13 kWh
PV technology:	Crystalline silicon	Yearly in-plane irradiation:	1730.31 kWh/m²
PV installed:	3.96 kWp	Year-to-year variability:	337.72 kWh
System loss:	14 %	Changes in output due to:	
		Angle of incidence:	-2.81 %
		Spectral effects:	1.07 %
		Temperature and low irradiance:	-6.18 %
		Total loss:	-20.74 %

„Dnevne uštede“ (*Tablica 4.13*) proizlaze iz razlike između proizvedene dnevne količine električne energije i potrebne dnevne količine energije, te množenjem dobivene vrijednosti s otkupnom cijenom od 0,35 kn/kWh:

Dnevna ušteda=(Proizvedene dn. vr. - Potrebne dn. vr.) * 0,35

Tablica 4.13. Dnevne uštede

	Proizvedene dnevne vrijednosti [kWh/dan]	Potrebne dnevne vrijednosti [kWh/dan]	Dnevne uštede [kn]
Siječanj	9,680	8,597	0,379
Veljača	11,170	8,597	0,901
Ožujak	14,320	8,597	2,003
Travanj	16,690	8,597	2,833
Svibanj	18,190	8,597	3,358
Lipanj	19,250	8,597	3,729
Srpanj	20,590	8,597	4,198
Kolovoz	19,800	8,597	3,921
Rujan	16,880	8,597	2,899
Listpoad	13,260	8,597	1,632
Studeni	9,320	8,597	0,253
Prosinac	9,130	8,597	0,187

Mjesečne uštede proizlaze iz produkta „Dnevnih ušteda“ u kunama s brojem dana u pojedinom mjesecu, dok je ukupna godišnja ušteda zbroj svih mjesečnih ušteda (*Tablica 4.14*).

Tablica 4.14. Mjesečna ušteda

	Dan	Dnevne uštede [kn]	Mjesečna ušteda [Kn]
Siječanj	31	0,379	11,751
Veljača	28	0,901	25,215
Ožujak	31	2,003	62,095
Travanj	30	2,833	84,977
Svibanj	31	3,358	104,084
Lipanj	30	3,729	111,857
Srpanj	31	4,198	130,124
Kolovoz	31	3,921	121,553
Rujan	30	2,899	86,972
Listpoad	31	1,632	50,594
Studeni	30	0,253	7,592
Prosinac	31	0,187	5,783
Ukupna godišnja ušteda			802,59

4.2.4 Odabir mrežnog izmjenjivača

Nakon što su odabrani fotonaponski moduli, i određen broj potrebnih fotonaponskih modula, slijedi odabir mrežnog izmjenjivača. Mrežni izmjenjivač koristi istosmjernu struju (DC), dobivenu od fotonaponskih modula, i pretvara je u izmjeničnu struju (AC) napona 230 V i frekvencije 50 Hz (za monofazne sustave).

S obzirom da su odabrana 12 fotonaponska modula snage 330Wp, proizlazi ukupna snaga sustava 3.960 Wp (12 × 330 Wp), dok mrežni izmjenjivač treba imati višu nazivnu snagu od snage fotonaponskog sustava.

U nastavku su navedeni svi važniji parametri fotonaponskih modul:

- Napon otvorenog kruga U_{0c} koji iznosi 41,32 V.

- Struja kratkog spoja I_{sc} koja iznosi 10,32 A.

Kao što je već navedeno za otočni fotonaponski sustav, odabir mrežnog izmjenjivača puno veće snage od snage niza fotonaponskih modula smanjilo bi stupanj korisnog djelovanja pretvorbe energije. Također, napon niza mora biti manji od ulaznog napona mrežnog izmjenjivača, te isto vrijedi u za ulaznu struju.

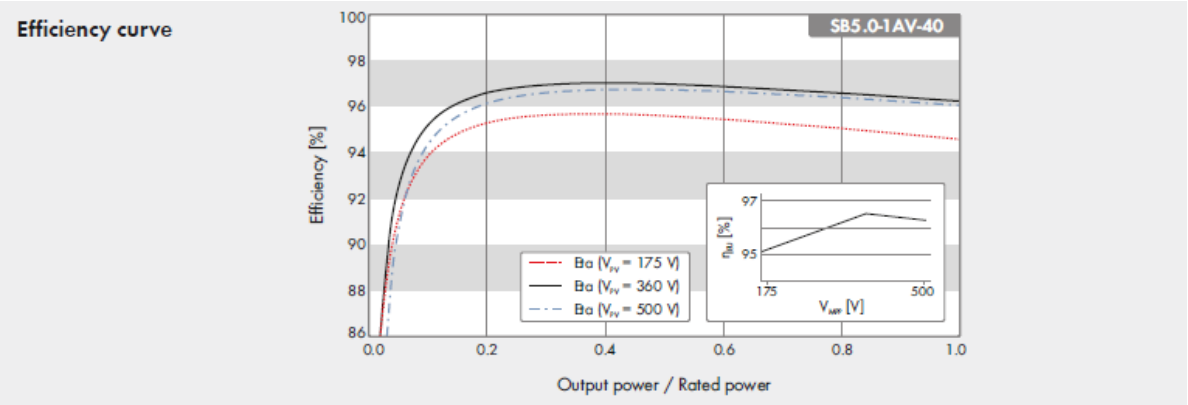
Odabran je mrežni izmjenjivač proizvod SMA Sunny Boy 4.0, nazivne snage 4.000 W, pri čemu *Slika 4.18.* prikazuje njegov izgled, a *Tablica 4.15.* daje njegove tehničke podatke. Na *Slici 4.19.* prikazane su i tri krivulje za napone od 175 V, 360 V i 500 V kojima se demonstrira vrijednost efikasnosti u ovisnosti o povećavanju izlazne snage, odnosno nazivne snage.



Slika 4.18. Izgled mrežnog izmjenjivača [12]

Tablica 4.15. Specifikacije mrežnog izmjenjivača [12]

Technical data	Sunny Boy 3.0	Sunny Boy 3.6	Sunny Boy 4.0	Sunny Boy 5.0
Input (DC)				
Max. DC power (at cos φ =1)	3200 W	3880 W	4200 W	5250 W[1]
Max. input voltage	600 V			
MPP voltage range	110 V to 500 V	130 V to 500 V	140 V to 500 V	175 V to 500 V
Rated input voltage	365 V			
Min. input voltage / initial input voltage	100 V / 125 V			
Max. input current input A / input B	15 A / 15 A			
Max. input current per string input A / input B	15 A / 15 A			
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:2; B:2			
Output (AC)				
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	3000 W	3680 W	4000 W	5000 W[2]
Max. apparent AC power	3000 VA	3680 VA	4000 VA	5000 VA[2]
Nominal AC voltage / range	220 V, 230 V, 240 V / 180 V to 280 V			
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / −5 Hz to +5 Hz			
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V			
Max. output current	16 A	16 A	22 A[3]	22 A[3]
Power factor at rated power	1			
Adjustable displacement power factor	0.8 overexcited to 0.8 underexcited			
Feed-in phases / connection phases	1 / 1			
Efficiency				
Max. efficiency / European efficiency	97% / 96.4%	97% / 96.5%	97% / 96.5%	97% / 96.5%



Slika 4.19. Karakteristika mrežnog izmjenjivača [12]

Nakon odabira mrežnog izmjenjivača, potrebno je provjeriti usklađenost pojedinih veličina s veličinama fotonaponskog polja.

Odabrani fotonaponski moduli imaju sljedeće karakteristike:

- P_n = 330 Wp

- Ukupna snaga polja 12 × 330 = 3.960 Wp

- Napon otvorenog kruga U_{oc} = 41,32 V

- Struja kratkog spoja I_{sc} = 10,32 A

Odabrani mrežni izmjenjivač ima slijedeće karakteristike:

- Maksimalni ulazni napon = 600 V

- Maksimalna ulazna snaga = 4.200 W

- Maksimalna ulazna struja = 22 A

⇒ Umnožak broja fotonaponskih modula s naponom otvorenog kruga treba biti manji od maksimalnog ulaznog napona mrežnog izmjenjivača:

$$\text{Broj FN modula} \times U_{oc} = 12 \times 41{,}32 = 495{,}84 \text{ V} < 600 \text{ V}$$

⇒ Struja kratkog spoja < Maksimalne ulazne struje

10,32 A < 22 A

⇒ Ukupna snaga polja < Maksimalna ulazna snaga

3.960 Wp < 4.200 W

Na osnovu gore prikazane provjere može se zaključiti da odabrani mrežni izmjenjivač u potpunosti odgovara definiranom fotonaponskom sustavu. Konačni izgled otočnog fotonaponskog sustava prikazan je *Slikom 4.20.*



Slika 4.20. Konačni izgled mrežnog fotonaponskog sustava

Tablica 4.16. Cijena osnovnih komponenti sustava

Oprema	Komad	Jedinična cijena [kn]	Ukupno [kn]
FN moduli	12	1.100,00	13.200,00
Mrežni izmjenjivač	1	7.343,00	7.343,00
Trofazno dvosmjerno brojilo	1	2.800,00	2.800,00
Nosači panela za kosi krov s crijepom	1	5.100,00	5.100,00
Potrošni materijal: Ormar, kabeli, spojnice	1	3.300,00	3.300,00
Montažni i el.radovi	1	6.000,00	6.000,00
Ispitivanje instalacije i atest		1.000,00	1.000,00
Ukupno			38.743,00
Ukupno s PDV-om			48.429,00

4.2.5. Ekonomska analiza

Nakon što su odabrani osnovni elementi mrežnog fotonaponskog sustava može se izračunati investicijski trošak za cjelokupni sustav, kao što je prikazano u *Tablici 4.16.*

Iz *Tablica 4.16.* može se vidjeti da investicijski trošak iznosi 48.429,00 kn. Specifični investicijski trošak dobije se podjelom početnog investicijskog troška s ukupnom snagom fotonaponskog polja koja iznosi 3.960 Wp:

48.429,00 kn / 3.960 Wp = 12,22 kn/Wp (~ 1,63 €/Wp)

S obzirom da je predviđen životni vijek rada sustava od 20 godina, u ekonomsku analizu potrebno je predvidjeti i troškove održavanja sustava u iznosu od 15.000,00 kn. Proizlazi ukupni trošak rada sustava od 63.429,00 kn.

Isto tako u ekonomsku analizu potrebno je predvidjeti i naknade za proizvedenu električnu energiju koja će biti predana u elektrodistribucijski sustav. Prethodno je definirana ušteda od 802,60 kn godišnje, a što u periodu od 20 godina iznosi 16.052,00 kn.

Proizlazi da će za korištenje sustava tijekom 20 godina ukupni troškovi iznositi:

63.429,00 – 16.052,00 = 47.377,00 kn.

U svrhu izračuna specifične cijene proizvedene električne energije koristi se podatak o ukupnoj proizvedenoj energiji tijekom 20 godina u iznosu od 62,758 MWh, te proizlazi:

47.377,00 kn / 62.758,1 kWh = 0,75 kn/kWh (~ 0,10 €/kWh)

Izračunati specifični trošak proizvodnje energije iz mrežnog sustava od 0,75 kn po kWh konkurentan je cijeni električne energije iz elektrodistribucijske mreže koja se najčešće navodi za kućanstva, u iznosu od oko 1 kn/kWh (za višu tarifu - dnevna tarifa).

5. Usporedba otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava

5.1. Ekonomska usporedba

Nakon dimenzioniranja otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava može se izvršiti pojednostavljena ekonomska usporedba. Otočni fotonaponski sustav je složeniji za izgradnju u odnosu na mrežni sustav iz razloga što ima više komponenti, dok je i tijekom rada sustava potrebno više pažnje posvetiti održavanju. Njegovo redovito održavanje zahtjeva izmjene akumulatora svakih pet godina, te redovito održavanje agregata i dobavu goriva. S aspekta održavanja mrežni sustav je značajno jednostavniji za upotrebu. Velika razlika proizlazi i u investicijskom trošku, kao i u specifičnoj vrijednosti. Otočni sustav zahtjeva skoro dvostruko veći investicijski trošak jer sadrži i puno više komponenti kao što su agregat, baterije i bidirekcijski pretvarač.

Analizom ukupnih troškova tijekom vijeka upotrebe sustava može se zaključiti da otočni sustav zahtjeva oko 3 puta više sredstava u odnosu na mrežni sustav, što utječe i na specifičnu cijenu proizvedenog kWh električne energije, koja iznosi 2,54 kn/kWh za otočni sustav i 0,75 kn/kWh za mrežni sustav. Svi troškovi sumirani su u *Tablici 5.1.*

Tablica 5.1. Usporedba cijena otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava

	Početni trošak [kn]	Održavanje i troškovi u 20 god. [kn]	Ukupna utrošeno u 20 god. [kn]	Cijena u kn po kWh
Otočni fotonaponski sustav	84.521,00	74.676,40	159.197,40	2,54
Mrežni fotonaponski sustav	48.429,00	15.000,00	47.377,00	0,75

Otočni fotonaponski sustav ima jednu veliku prednost, a to je da se može koristiti na lokacijama gdje distributer električne energije nije izgradio mrežu. Mrežni fotonaponski sustav proizlazi konkurentan energiji preuzetoj iz elektrodistribucijske mreže, pogotovo uz mogućnost predaje viškova proizvedene električne energije u mrežu. Prednosti i nedostatci prikazani su u *Tablici 5.2.*

Tablica 5.2. Prednosti i mane fotonaponskih sustava

	Otočni FN sustav	Mrežni FN sustav
Prednosti	Može se sagraditi bilo gdje	Jeftinija izgradnja i održavanje
		Manja cijena po kWh čak od cijene od opskrbljivača
Nedostatci	Skupa izgradnja i održvanje	Ne može se sagraditi bilo gdje
	Duplo veća cijena po kWh nego što je u opskrbljivača	

5.2. Preinaka otočnog sustava u svrhu kvalitetnije ekonomske usporedbe

S obzirom da je otočni fotonaponski sustav dimenzioniran uz pretpostavku upotrebe agregata za nadopunjavanje manjkova u proizvodnji električne energije, iz čega je proizašla potrebna snaga fotonaponskog polja od 2.750 Wp, ista se razlikuje od snage mrežnog sustava u iznosu od 3.960 Wp. Kako bi se mogla izvršiti ravnopravnija usporedba i ekonomska analiza obaju sustava, u nastavku je izvršena preinaka otočnog fotonaponskog sustava tako da oba sustava imaju fotonaponsko polje približne snage.

Prilikom dimenzioniranja „novog“ otočnog fotonaponskog sustava osnovni parametri koji su prikazani u *Tablici 4.2.* će ostati isti, zajedno s vrijednostima proračuna kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja, koji su prikazani u poglavlju *4.1.2.* Kako su sve potrebne vrijednosti za odabir akumulatora ostale iste, ostati će i isti odabir samog akumulatora odnosno iste proizvoda koji je odabran u poglavlju *4.1.3.*

S obzirom da „novi“ otočni sustav treba imati približno jednaku snagu kao i mrežni sustav, potrebno je povećati broj fotonaponskih modula s 11 na 16, što ima za rezultat ukupnu snagu otočnog sustava od 4000 Wp (16 × 250 Wp). I u ovom slučaju korišteni su isti fotonaponski moduli kao što je prikazano u poglavlju *4.1.4.*

Izvor pomoćne energije, odnosno agregat će također ostati isti, nazivne snage od 4.200 W, prikazan na *Slici 4.5.*

Lokacija postavljanja „novog“ otočnog sustava je također ista, u Gornjem Vinovu (Kulušići 7), pa će i dijagram proizvodnje električne energije po mjesecima ostati isti kao i mjesečna/dnevna proizvodnja električne energije proračunata i prikazana u *Tablici 4.4.*

S obzirom da je povećan broj fotonaponskih modula smanjiti će se vrijeme rada agregata, dok će u nekim mjesecima biti proizvedeni viškovi energije koji neće moći biti pohranjeni u baterije.

Nakon što je povećan broj fotonaponskih modula potrebno je izraditi novi proračun kao što je bio prikazan u *Tablici 4.6.,* u kojoj su izračunati parametri po mjesecima. Novi proračun prikazan je u *Tablici 5.3.*

Tablica 5.3. Izračunati parametri po mjesecima

A	Odabrana snaga jednog fotonaponskog modula P_m (Wp)	250											
B	Napon baterije U_S (V)	48											
C	Broj modula u stringu n_{MS}	16											
1	Mjeseci	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac
2	Potrebno dnevno punjenje Q_L [Ah]	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9
3	Izvor pomoćne energije E_H [Wh]	1900	400	0	0	0	0	0	0	0	0	2250	2400
4	Pomoćni izvor $Q_H=E_H/(1,1 \cdot U_S)$ [Ah]	36	7,6	0	0	0	0	0	0	0	0	42,6	45,5
5	Energija iz panela $Q_{PV}=Q_L-Q_H$ [Ah]	182,9	211,3	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	218,9	176,3	173,4
6	Energija iz 1Wp Y_F [Wh/Wp]	2,45	2,82	3,62	4,21	4,59	4,86	5,21	5	4,26	3,35	2,35	2,31
7	Energija iz stringa $E_{DC_S}=n_{MS} \cdot P_M \cdot Y_F$ [Wh]	9800	11280	14480	16840	18360	19440	20840	20000	17040	13400	9400	9240
8	Energija iz stringa $Q_S=E_{DC_S}/1,1 \cdot U_S$ [Ah]	185,61	213,64	274,24	318,94	347,73	368,18	394,7	378,79	322,73	253,79	178,03	175
9	Broj potrebnih paralelnih stringova $n_{SP}=Q_{PV}/Q_S$	0,99	0,99	0,8	0,69	0,63	0,59	0,55	0,58	0,68	0,86	0,99	0,99

Tablica 5.4. Sati uključenosti pomoćnog izvora energije

Izvor pomoćne energije sat/danu [h]	0,45	0,10	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0,00	0,54	0,57
Izvor pomoćne energije mjesec [h]	14,02	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,07	17,71
Izvor pomoćne energije godišnje [h]	50,48											

Iz *Tablice 5.3.* proizlazi da izvor pomoćne energije ima manji utjecaj u proizvodnji električne energije za razliku od prethodno dimenzioniranog otočnog sustava, dok su u ljetnim mjesecima evidentni viškovi energije. Iz *Tablice 5.4.* može se vidjeti da su sati uključenosti pomoćnog izvora energije smanjeni za više od tri puta, te iznose oko 50 sati godišnje.

Oznake sa formulama iz *Tablice 5.3.* i *Tablice 5.4.* prikazane su i objašnjenje u prethodnom poglavlju *4.1.5.*

Iz razloga što se povećala snaga fotonaponskih modula doći će do izmjene i samog mrežnog izmjenjivača.

S obzirom da je ukupna snaga fotonaponskih modula 4.000 Wp, odabran je novi mrežni izmjenjivač isti kao i u slučaju mrežnog fotonaponskog sustava, proizvod SMA Sunny Boy 4.0, nazivne snage od 4.000 W, pri čemu je maksimalna ulazna snaga 4.200 W. Njegove specifikacije, karakteristike i izgled prikazani su u poglavlju *4.2.4.*

U nastavku je prikazana provjera usklađenosti mrežnog izmjenjivača s fotonaponskim modulima.

Karakteristike odabranih fotonaponskih modula:

- $P_n = 250$ Wp

- Ukupna snaga polja 16×250 Wp= 4.000 Wp

- Napon otvorenog kruga $U_{oc} = 37{,}31$ V

- Struja kratkog spoja $I_{sc} = 8{,}59$ A

Karakteristike odabranog mrežnog izmjenjivača:

- Maksimalni ulazni napon = 600 V

- Maksimalna ulazna snaga = 4.200 W

- Maksimalna ulazna struja = 22 A

$\Rightarrow$ Umnožak broja fotonaponskih modula s naponom otvorenog kruga treba biti manji od maksimalnog ulaznog napona mrežnog izmjenjivača:

$$\text{Broj FN modula} \times U_{oc} = 16 \times 37{,}31 = 598{,}56 \text{ V} < 600 \text{ V}$$

$\Rightarrow$ Struja kratkog spoja < Maksimalne ulazne struje

$$8{,}61 \text{ A} < 22 \text{ A}$$

$\Rightarrow$ Ukupna snaga polja < Maksimalna ulazna snaga

$$4.000 \text{ Wp} < 4.200 \text{ W}$$

Iz gore prikazanog proizlazi da mrežni izmjenjivač u potpunosti odgovara „novom“ otočnom sustavu.

Posljednja komponenta „novog“ fotonaponskog sustava koju je potrebno odabrati je bidirekcijski pretvarač. Bidirekcijski pretvarač će biti isti kao što je odabran prilikom dimenzioniranja prvog otočnog sustava, proizvod Quattro MultiPlus 48/5000/70. Odabrani bidirekcijski pretvarač se povezuje s baterijama napona 48 V, ima konstantnu izlaznu snagu od

5000 VA, te struju punjenja od 70 A. Njegove specifikacije i izgled može se vidjeti u poglavlju *4.1.7.*

I bidirekcijski pretvarač je potrebno provjeriti s obzirom na usklađenost s cjelokupnim sustavom, kao što je prikazano u sljedećim koracima:

- Istosmjerni napon baterija je 48 V - Usklađeno

- Istosmjerna struja punjenja 10-15 % od 400 Ah ➞ 40-60 A – Usklađeno

- Snaga punjača:

Napon punjenja za akumulatore od 48 V je 57,6 V, kao što je prikazano u *Tablici 4.8*

SNAGA PUNJAČA = NAPON PUNJENJA × STRUJA PUNJENJA

57,6 V × 70 A = 4.032 W > 4.000 Wp

-Trajna snaga:

Kao što je prikazano na početku rada, maksimalna snaga potrošača je 8.915 W, stoga neće biti dovoljna snaga bidirekcijskog pretvarača od 5.000 VA (4.000W), pa će se preko transfer sklopke bidirekcijskog pretvarača uključiti još i generator nazivne snage 4.200 W, što ukupno daje snagu od 8.200 W. Međutim to što ni u tom slučaju neće biti zadovoljene maksimalne potrebe potrošača upućuje na potrebu planiranja upotrebe svih potrošača od strane korisnika fotonaponskog sustava tako da ne uključuje sve potrošače u isto vrijeme.

Potrebno je još provjeriti usklađenost akumulatora i bidirekcijskog pretvarača, i to u trajnom radu sustava, prema izrazu:

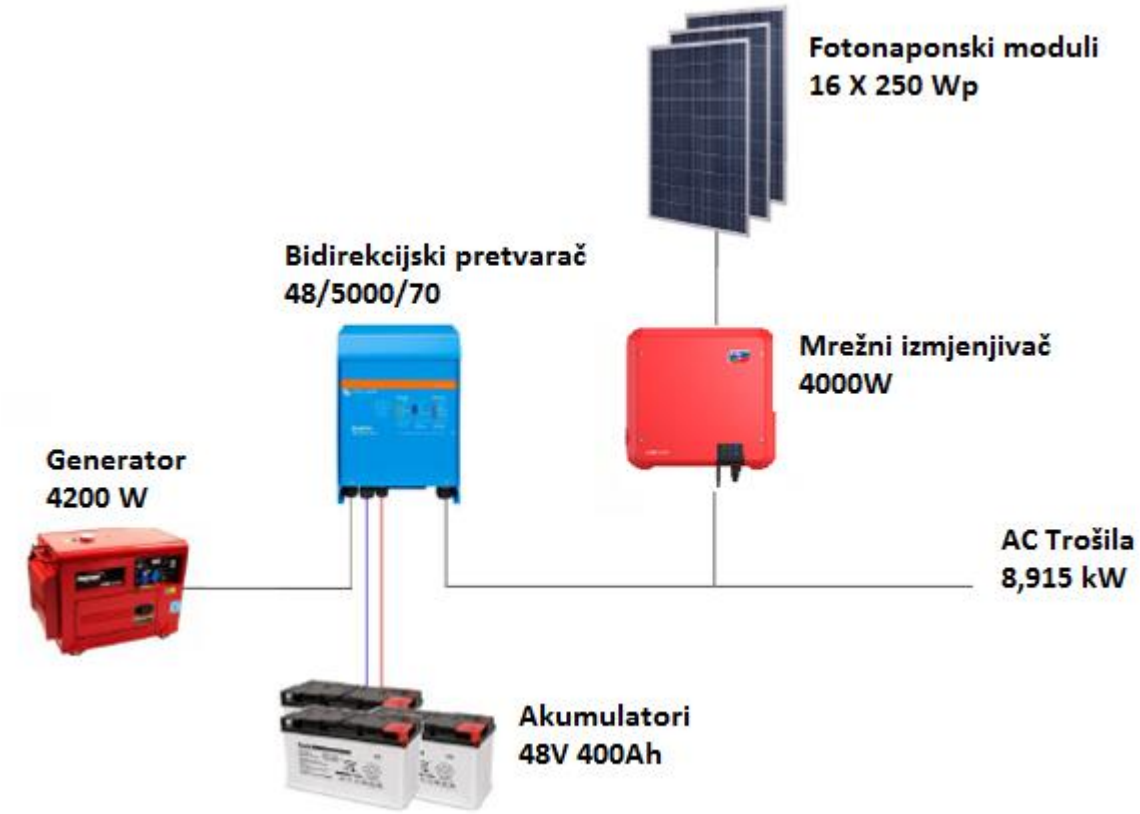
$$\text{KAPACITET AKUMULATORA} > 5\ \text{h} * \frac{\text{SNAGA IZMJENJIVAČA}}{\text{NAPON AKUMULATORA}}$$

$$400\text{Ah} > 5\ \text{h} * \frac{3800}{48}$$

400Ah > 395,83 Ah

Snagu izmjenjivača je ograničena na 3.800 W iz razloga ako bi izmjenjivač trajno „hranio“ trošila s 4.000 W došlo bi do ubrzanog pražnjenja akumulatora i kraćeg vijeka trajanje istih.

Konačni izgled „novog“ otočnog fotonaponskog sustava prikazan je *Slikom 5.1.*



Slika 5.1. Konačni izgled "novog" otočnog fotonaponskog sustava

Nakon što su odabrani sve osnovni elementi „novog“ otočnog sustava, potrebno je izvršiti ekonomsku analizu cjelokupnog sustava.

Iz *Tablica 5.5.* može se vidjeti da investicijski trošak izgradnje sustava iznosi 86.774,00 kn, odnosno da je specifični investicijski trošak:

86.774,00 / 4.000 Wp =21,69 kn/Wp (~ 2,89 €/Wp)

Tablica 5.5. Cijena osnovnih komponenti sustava

Oprema	Komad	Jedinična cijena	Ukupno
		[kn]	[kn]
FN moduli	16	982,00	15.712,00
Mrežni izmjenjivač	1	7.343,00	7.343,00
Bidirekcijski pretvarač	1	22.900,00	22.900,00
Akumulatorske baterije	8	1.690,00	13.520,00
Generator	1	17.299,00	17.299,00
Ožičenje + izvedba, ugradnja...			10.000,00
Ukupno			86.774,00

Konačno, potrebno je izračunati i specifični trošak proizvedene električne energije, koa što je već demonstrirano za prijašnji otočni fotonaponski sustav uz vijek trajanja sustava od 20 godina.

Izmjena baterija 3 puta u 20 godina zahtijevala bi dodatne troškove u iznosu od 3 × 13.520 kn = 40.560 kn.

Trošak nabave goriva potrebnog za rad agregata iznosio bi:

- Cijena dizela je 10 kn/l

- Broj sati rada generatora godišnje iznosi 50,48 h/god

- Potrošnja goriva tijekom 1 h rada agregata iznosi 0,7 l/h

$$10 \text{ kn/l} \times 50{,}48 \text{ h/god} \times 0{,}7 \text{ l/h} \times 20 \text{ godina} = 7.067{,}20 \text{ kn}$$

Iz prikazane procjene troškova rada sustava tijekom 20 godina rada, te uz pretpostavku dodatnih troškova za održavanje sustava u iznosu od 10.000 kn, proizlaze ukupni troškovi od:

$$7.067{,}20 + 40.560{,}00 + 86.774{,}00 + 10.000{,}00 = 144.401{,}20 \text{ kn}$$

Ako se uzme u obzir ukupna proizvedene energije sustava tijekom 20 godina u iznosu od 62.758,1 kWh, slijedi specifična cijena proizvedenog kWh električne energije od:

$$144.401{,}20 \text{ kn} / 62.758{,}1 \text{ kWh} = 2{,}30 \text{ kn/kWh} (\sim 0{,}30 \text{ €/kWh})$$

5.3. Usporedba „novog“ otočnog s mrežnim fotonaponskim sustavom

U nastavku će biti prikazana usporedba otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava jednake nazivne snage fotonaponskog polja.

Tablica 5.6. Usporedba cijena "novog" otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava

	Početni trošak [kn]	Održavanje i troškovi u 20 god. [kn]	Ukupna utrošeno u 20 god. [kn]	Cijena u kn po kWh
"Novi" otočni fotonaponski sustav	86.774,00	57.627,20	144.401,20	2,3
Mrežni fotonaponski sustav	48.429,00	15.000,00	47.377,00	0,75

Početni trošak kod „novog“ otočnog fotonaponskog sustava je jako sličan prethodno dimenzioniranom otočnom sustavu, ali je i dalje skoro dvostruko veći od mrežnog sustava. Održavanje i troškovi su nešto niži nego u prijašnjoj analizi jer je predviđen manji broj sati rada agregata.

Novi iznos specifičnog troška proizvedenog kWh električne energije za „novi“ otočni sustav je nešto povoljniji u odnosu na prije dimenzioniran otočni sustav, ali i dalje u skladu s očekivanjima za tri puta viši u odnosu na mrežni fotonaponski sustav.

6. Zaključak

U završnom radu prikazana je tehničko ekonomska analiza otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava jednake nazivne snage, pri čemu oba sustava trebaju zadovoljiti potrebe za električnom energijom zamišljenog kućanstva.

Iako svaki od navedenih sustava ima svoju namjenu, bilo je interesantno usporediti ih sa stanovišta investicijskog troška, specifičnog investicijskog troška izraženog u kn/Wp instalirane snage, te specifične cijene proizvedene električne energije (kn/kWh) uzimajući u obzir životni vijek upotrebe sustava.

Pri analizi investicijskog troška i specifičnog investicijskog troška proizašli su slijedeći odnosi:

- otočni sustav snage 2.750 Wp – 84.521,00 kn, te 30,73 kn/Wp (~ 4 €/Wp)
- otočni sustav snage 4.000 Wp – 86.774,00 kn, te 21,69 kn/Wp (~ 2,89 €/Wp)
- mrežni sustav snage 3.960 Wp – 48.429,00 kn, te 12,22 kn/Wp (~ 1,63 €/Wp)

Analiza specifičnog troška proizvedenog kWh električne energije tijekom perioda korištenja sustava (20 godina) dala je slijedeće odnose:

- otočni sustav snage 2.750 Wp – 2,53 kn/kWh (~ 0,33 €/kWh)
- otočni sustav snage 4.000 Wp – 2,30 kn/kWh (~ 0,30 €/kWh)
- mrežni sustav snage 3.960 Wp – 0,75 kn/kWh (~ 0,10 €/kWh)

Iz prikazanih analiza proizlazi da otočni fotonaponski sustav, kao što je i očekivano, ima veći investicijski trošak i višu cijenu proizvedenog kWh električne energije. Isto tako proizlazi da je potrebno posvetiti dodatnu pažnju optimiziranju omjera snage fotonaponskog sustava i snage pomoćnog izvora energije u svrhu postizanja ekonomski prihvatljivijeg rješenja.

Mrežni fotonaponski sustav pokazao se konkurentnim u proizvodnji električne energije u odnosu na električnu energiju raspoloživu iz elektrodistribucijske mreže, pogotovo s obzirom na mogućnost predaje viškova proizvedene energije uz adekvatnu naknadu. Dodatna analiza mogla bi uključiti mrežni sustav veće snage od predviđene, te utjecaj iste na ukupnu ekonomsku analizu i cijenu proizvedenog kWh električne energije. U svakom slučaju proizlazi opravdanost poticanja izgradnje mrežnih fotonaponskih sustava u svrhu proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora pri čemu se pozitivno utječe na očuvanje okoliša.

Literatura

[1] doc.dr.sc. Ljubomir Majdandžić- „Fotonaponski sustavi“

[2] Solarprojekt- http://solarprojekt.hr

[3] Solarwindme- http://www.solarwindme.com

[4] Solarno - https://www.solarno.hr

[5] dr.sc. Zlatko Jankoski - „Obnovljivi izvori energije“-

[6] ABB, Technical Application Papers, No.10, Photovoltaic plants, str. 5-47, lipanj 2014.

[7] PVGIS- https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis

[8] Krannich-solar- https://krannich-solar.com/

[9] Alati Milić- https://www.alatimilic.hr/

[10] Victor Energy-https://www.victronenergy.com/

[11] Sharp- https://www.sharp.co.uk/

[12] SMA Sunny Boy- https://www.sma.de/