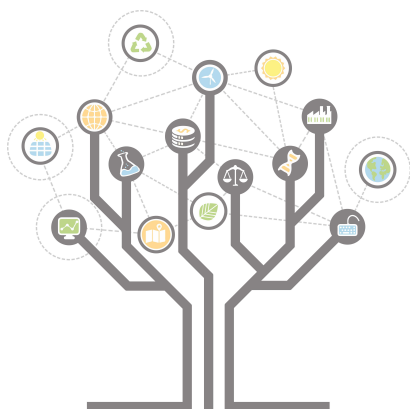


Svetec, Erica

2017

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:370533>

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering -
Theses and Dissertations](#)



Dimenzioniranje autonomnih fotonaponskih sustava za kućanstva

Svetec, Erica

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:370533>

Rights / Prava: [In copyright](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ERICA SVETEC

DIMENZIONIRANJE AUTONOMNIH FOTONAPONSKIH SUSTAVA
ZA KUĆANSTVA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

DIMENZIONIRANJE AUTONOMNIH FOTONAPONSKIH SUSTAVA
ZA KUĆANSTVA

KANDIDATKINJA:

ERICA SVETEC

MENTOR:

doc.dr.sc. ROBERT PAŠIČKO

VARAŽDIN, 2017.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: ERICA SVETEC

Matični broj: 2522 – 2014./2015.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

DIMENZIONIRANJE AUTONOMNIH FOTONAPONSKIH
SUSTAVA ZA KUĆANSTVA

Rad treba sadržati: 1. Uvod

2. Potencijal Sunčeve energije u Hrvatskoj
3. Aktivno i pasivno iskorištenje Sunčeve energije
4. Autonomni fotonaponski sustav
5. Dimenzioniranje autonomnog FN sustava
6. Analiza troškova
7. Ekološka analiza
8. Opis simulacijskog programa HOMER
9. Primjer postavljenih FN sustava u ruralnim područjima Hrvatske
10. Zaključak
11. Literatura
12. Popis kratica i pojmova
13. Popis oznaka i mjernih jedinica
14. Popis slika
15. Popis tablica

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 04.04.2017.

Rok predaje: 08.09.2017.

Mentor:

Doc.dr.sc. Robert Pašičko



Predsjednik Odbora za nastavu:

Doc.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom „Dimenzioniranje autonomnih fotonaponskih sustava za kućanstva, rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc.Roberta Pašička.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 05. 09. 2017.

Erica Svetec



Sažetak

Erica Svetec, Dimenzioniranje autonomnih fotonaponskih sustava za kućanstva

U radu je opisan princip rada autonomnog fotonaponskog sustava za kućanstva. U prvom dijelu opisan je potencijal i način iskorištavanja Sunčeve energije u Hrvatskoj koja je potrebna za rad FN sustava. Drugi dio opisuje princip rada autonomnog FN sustava zajedno sa svim komponentama uključujući i funkcionalnost samog sustava. Dimenzioniranje sustava objašnjeno je pomoću metoda za izračun potrošnje u kućanstvu, broja potrebnih panela i kapaciteta akumulatora. Kako bi sustav bio optimiziran, opisan je primjer provjere usklađenosti komponenata, te izrađena simulacija FN sustava za kućanstva ruralnih područja bez pristupa električnoj mreži. Ekonomski faktor, kao bitan utjecaj za izračun isplativosti sustava, uzet je u obzir. Na kraju je provedena i ekološka analiza u kojoj se razmatra zbrinjavanje otpadnog materijala nakon što istekne rok trajanja sustava.

Ključne riječi: dimenzioniranje, autonomni, fotonaponski sustavi, obnovljivi izvor energije, ruralna područja

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Potencijal Sunčeve energije u Hrvatskoj	2
3. Aktivno i pasivno iskorištenje Sunčeve energije	5
4. Autonomni fotonaponski sustavi	6
5. Dimenzioniranje autonomnog FN sustava	10
5.1. Konfiguracija sustava	11
5.2. Definiranje potrošnje električne energije	14
5.3. Osnovni parametri sustava	17
5.4. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja	18
5.5. Proračun snage i broja potrebnih modula	24
5.6. Provjera usklađenosti komponenata	31
6. Analiza troškova	33
7. Ekološka analiza	37
8. Opis simulacijskog programa HOMER	39
9. Primjer postavljenih FN sustava u ruralnim područjima Hrvatske	44
10. Zaključak	45
11. Literatura	47
12. Popis kratica i pojmova	54
13. Popis oznaka i mjernih jedinica	55
14. Popis slika	59
15. Popis tablica	60

1. Uvod

Poneka naselja s malim brojem stanovnika i gustoćom naseljenosti još uvijek nemaju pristup električnoj energiji, naročito ona u kojima je elektroenergetska mreža srušena za vrijeme rata. S obzirom da se radi o malom broju stanovništva, troškovi izgradnje i održavanje elektroenergetske mreže su vrlo visoki, a postoji i mogućnost da je teren nepristupačan i ima slabo razvijenu strukturu. U takvim situacijama optimalno rješenje pružaju autonomni energetske sustavi, odnosno sustavi koji ne trebaju elektroenergetsku mrežu kako bi doveli električnu struju u kućanstva.

Zbog još uvijek visoke cijene baterija i relativno kratkog radnog vijeka, najčešće se koriste hibridni sustavi u kombinaciji sa obnovljivim izvorima ili dizel generatorom. Postavljanjem takvih sustava povećava se kvaliteta života i dobiva se mogućnost da stanovništvo sudjeluje u proizvodnji i skladištenju raznih dobara.

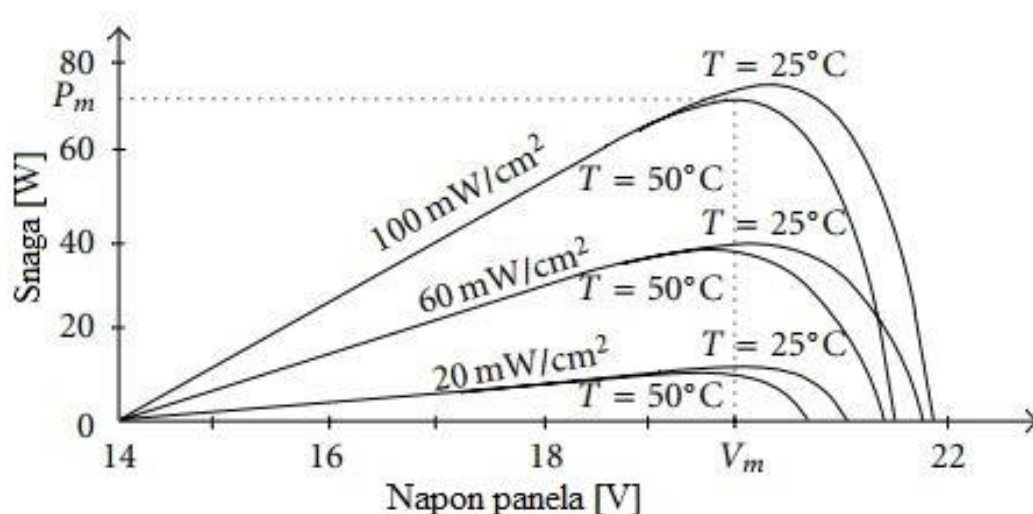
S obzirom da svako kućanstvo ima drugačije potrebe za električnom energijom, od ukućana se prikupе potrebni podaci o potrošnji energije i visini investicije, te se provede dimenzioniranje odgovarajućeg FN sustava. Dobije se veličina sustava, broj potrebnih FN panela i broj baterijskih jedinica koje zadovoljavaju potrebe korisnika. Osim što se električna energija isporučі kućanstvima, smanji se i ispuštena količina CO₂ zaslužna za klimatske promjene.

Svrha ovog rada je ukazati na potencijal Sunčeve energije u Hrvatskoj, način na koji se iz nje može dobiti električna energija i prikazati model autonomnog fotonaponskog sustava zajedno sa svim njegovim komponentama. Pokazat će se način na koji se dimenzioniraju pojedine komponente i sustav u cjelini, uključujući troškove, te će se provesti simulacija na primjeru.

2. Potencijal Sunčeve energije u Hrvatskoj

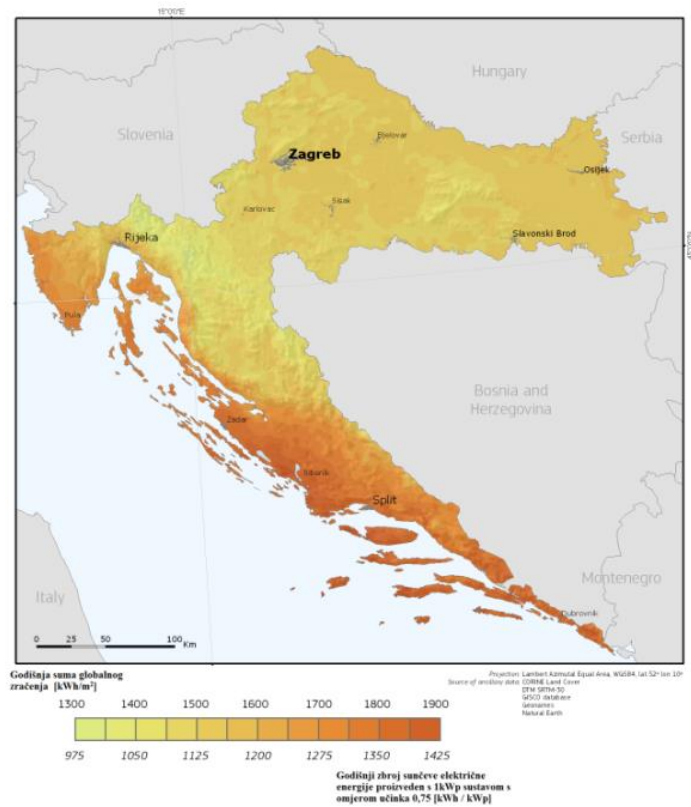
Hrvatska zbog svojeg geografskog položaja ima povoljne uvjete za iskorištavanje Sunčeve energije. Ruralna područja u Hrvatskoj (prema podacima iz 2012.) obuhvaćaju 80% ukupnog teritorija i u njima živi oko 56,7 % stanovništva Hrvatske [1]. Poznavanjem srednje vrijednosti ukupnog zračenja¹ koje pada na vodoravnu plohu i srednje temperature zraka za svaki mjesec u godini, može se predvidjeti količina dobivene električne energije iz FN sustava potrebne za određeno vremensko razdoblje [2].

Karakteristike temperaturne ovisnosti napona i struje uvjetuju odabir materijala i fotonaponsku tehnologiju, a time i efikasnost sustava. Slika 1 prikazuje ovisnost snage FN panela o promjeni ozračenosti i temperaturi uz određeni napon [3].

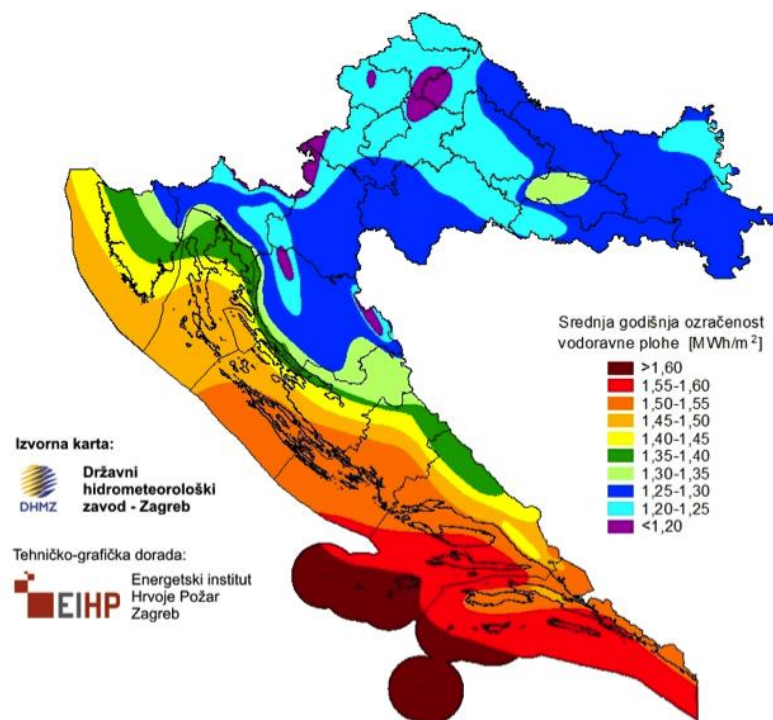


Slika 1. P-U krivulja FN panela u ovisnosti o ozračenosti i temperaturi [3]

¹ **Ozračenje (iradijancija)** je gustoća energetskog toka Sunčevog zračenja, jednaka je omjeru energetskog toka Sunčevog zračenja i površine plohe okomite na smjer tog zračenja. Jedinica za ozračenje je vat po četvornom metru (W/m^2). Prema tome, ozračenost predstavlja gustoću dozračene energije koja u promatranom vremenu upadne na jediničnu površinu plohe. Jedinica za ozračenost je vat sat po četvornom metru (Wh/m^2) ili džul po četvornom metru (J/m^2). Ovisno o promatranom vremenskom intervalu ozračenost se često naziva satna, dnevna, mjesečna ili godišnja suma zračenja [12].



a)



b)

Slika 2. a) Solarni potencijal za proizvodnju električne energije na području Republike Hrvatske; b) srednja godišnja ozračenost horizontalne ravnine i solarni potencijal [2,4]

Prema slici 2 može se zaključiti da je kontinentalni dio Hrvatske manje ozračen od priobalja i otoka, pa time ima i manji potencijal za postavljanje FN sustava. U južnom dijelu Hrvatske godišnja proizvodnja klasičnog fotonaponskog sustava iznosi 1100 do 1330 kWh po instaliranom kWp snage, dok u kontinentalnom dijelu Hrvatske ona iznosi nešto manje, od 1000 do 1100 kWh po instaliranom kWp snage [2]. Sunčevo zračenje obično se mjeri u kWh/m², iako se koristi i broj vršnih sunčanih sati, *PSH* (eng. *daily Peak Sun Hours*) koji je ekvivalentan broju sati iskorištenog Sunčevog zračenja, a mjeri se u kW/m² [6]. Na primjer, za lokaciju koja prima 8 kWh/m² Sunčeva zračenja dnevno, može se reći da je primilo 8 sati sunca na dan pri 1 kW/m² [42]. *PSH* je prema tome mjerilo trajanja upotrebljivog Sunčevog zračenja.

Azimut² određuje orijentaciju FN sustava u odnosu na smjer sjevera, a ovisi o orijentaciji krova ako je odabrana instalacija na krovu objekta [5]. FN module idealno je postaviti na južnu stranu krova i to pod kutom od oko 45°, uz izbjegavanje sjena kako bi učinkovitost dobivanja energije bila veća [7]. S obzirom da postavljanje sustava na idealnu stranu i kut najčešće nije moguće, potrebno je pronaći što bolje mjesto za postavljanje FN modula, te provesti izračune kako bi iskoristivost solarne energije bila što veća [5]. Kut nagiba FN modula je zakrenutost modula u odnosu na horizontalnu ravninu, a optimalni kut za cijelo područje Hrvatske kreće se od 32° do 38° [3,5]. Sunčeva energija je efikasna bez obzira na lokaciju, samo je pitanje u kojoj količini i na koji način. Osim za proizvodnju električne energije i dobivanje tople vode, u arhitekturi se sve više iskorištava u smislu zadržavanja topline. Više o načinu iskorištavanja Sunčeve energije opisano je u sljedećem poglavlju.

² **Azimut** Sunca je kut između projekcije Sunčeve zrake na vodoravnu plohu i smjera sjever-jug u vodoravnoj ravnini [12]

3. Aktivno i pasivno iskorištenje Sunčeve energije

Sunčeva energija može se iskorištavati na dva načina, aktivno i pasivno. Aktivno iskorištavanje Sunčeve energije odnosi se na korištenje toplinskih i fotonaponskih pretvornika Sunčeve energije, što će biti opisano u daljnjem tekstu. Međutim, pasivna primjena Sunčeve energije odnosi se na primjenu u arhitekturi. Ono podrazumijeva geometrijski oblik, veličinu i visinu, te orijentaciju zgrada, toplinski kapacitet zidova i prostorija, ostakljenost, zaštitu od vjetra, kiše, vlage, te kvalitetu građenja u energetskom smislu [8]. Tako izgrađena zgrada troši značajno manje energije za grijanje u odnosu na klasično građene zgrade. Pri izgradnji takvih građevina potrebno je planirati da su prostorije u kojima se najviše boravi orijentirane prema jugu, a one u kojima se manje boravi budu orijentirane na sjevernu stranu. Na taj način može se dobro iskoristiti energija Sunčeva zračenja, te zimi ostvariti značajne toplinske dobitke. Svrha pasivnog korištenja solarne energije jest da prilikom izgradnje sve stavke integriramo u jednu i razmatramo građevinu kao cjelinu [7]. Kombinacijom aktivnog i pasivnog iskorištenja Sunčeve energije možemo izgraditi niskoenergetske i energetski učinkovite kuće koje maksimalno iskorištavaju prirodnu, već postojeću energiju, u svrhu dobivanja električne i toplinske energije.

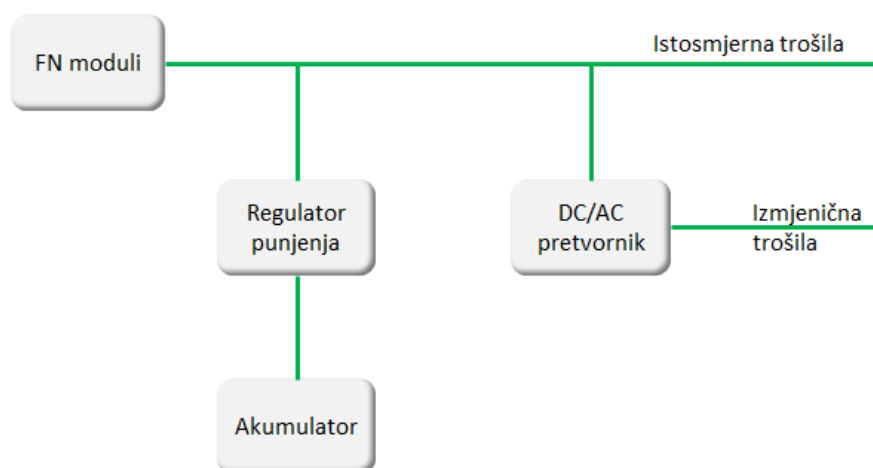
4. Autonomni fotonaponski sustavi

Autonomni ili otočni (eng. *off-grid, stand-alone systems*) sustavi koriste obnovljive izvore energije koje karakterizira nestalnost proizvodnje električne energije (ovisno o vremenskim uvjetima). Ne zahtijevaju priključak na elektroenergetsku mrežu, a dobivena energija se akumulira u baterijama, odnosno akumulatorima.

Takvi sustavi osiguravaju potrebnu količinu energije za pojedinačne objekte različitih namjena kao što su razne vrste signalizacija i upozorenja, telekomunikacijski sustavi, rasvjeta, svjetionici itd., te za udaljene potrošače kao što su ruralna naselja, vikendice, mobilne jedinice (kamperi i plovila) i općenito izolirana naselja van dohvata elektroenergetske mreže [8].

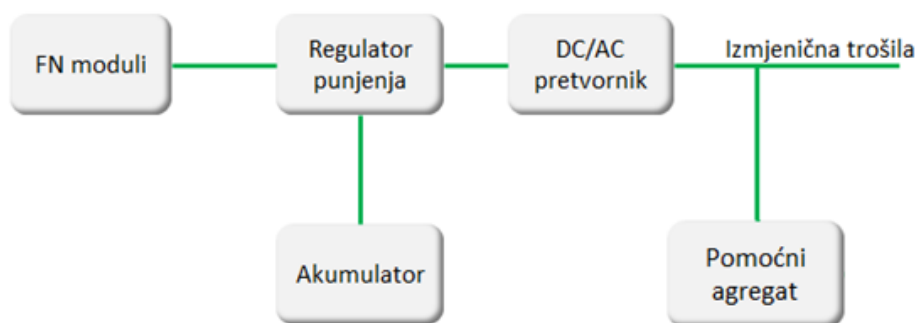
S obzirom na primjenu razlikujemo dvije vrste autonomnih sustava:

- 1) Autonomni sustav sa spremnikom energije – prilagođen varijacijama između prevelike i nedovoljne proizvedene energije za potrebe kućanstva.



Slika 3. Samostalni FN sustav za istosmjerna i izmjenična trošila [8]

- 2) Hibridni autonomni sustav sa spremnikom energije – sustav koji osim fotonaponskog modula koristi i druge obnovljive izvore (vjetroturbina ili hidrogenerator) ili električni generator (benzinski ili dizelski agregat).



Slika 4. Hibridni FN sustav za istosmjerna i izmjenična trošila [8]

Za objekte kojima je potreban veći stupanj sigurnosti energije i bolja iskoristivost koristi se hibridni otočni sustav sa spremnikom energije.

Autonomni hibridni FN sustav najpraktičnije i ekonomski najisplativije se postavlja kada:

- Priključak stambenog objekta nije moguć na vod niskog napona (NN 0,4 kV) zbog prevelikih gubitaka koji nastaju kao posljedica dužine voda (veća od 500m).
- Priključak objekta moguć je samo uz izgradnju nove srednje naponske mreže (sastavljene od više nisko naponskih vodova, SN 10kV), uz dodatak vlastitog transformatora, i predstavlja milijunsku investiciju [5].

Princip rada jednostavnog autonomnog FN sustava

Osnovne komponente autonomnog fotonaponskog sustava:

- 1) Fotonaponski moduli (obično spojeni paralelno ili serijski-paralelno) [11]
- 2) Solarni akumulator (baterija)
- 3) Inverter/izmjenjivač (ako trošila rade na izmjeničnu struju)
- 4) Ispravljač (punjač baterije) / bidirekcijski ispravljač
- 5) Pomoćni agregat [5]
- 6) Trošila

Za fotonaponski sustav koji se sastoji od gore navedenih komponenata, karakteristična su dva osnovna procesa koja uključuju pretvorbu Sunčeva zračenja u električnu energiju, te pretvorbu električne energije u kemijsku i, obrnuto, kemijske u električnu (FN-akumulator-potrošač). Kada se fotonaponska ćelija osvijetli, odnosno kada apsorbira Sunčevo zračenje, fotonaponskim se efektom na njezinim krajevima pojavljuje elektromotorna sila (napon) i tako solarna ćelija postaje izvorom električne energije [11]. Fotonaponske ćelije malih dimenzija (od 1 do 15cm) imaju malu snagu od 1 do 2 W zbog čega se povezuju u veće cjeline, module, kako bi ostvarili veću izlaznu snagu. Sa ciljem dobivanja većih snaga, moduli se po istom principu povezuju u fotonaponske panele, čije snage idu i do reda MW³ [12, 13]. Tako povezani moduli spajaju se u fotonaponski sustav (eng. *photovoltaic systems*) zajedno sa ostalim komponentama [8].

Energija koja se proizvede tokom dana iz FN modula treba se akumulirati, kako bi u razdobljima s manjim Sunčevim zračenjem, ili tokom noći, omogućili sistemu nesmetano napajanje potrošača [14]. Tako dobivena energija se pohranjuje preko regulatora punjenja u akumulatore. Regulator punjenja ima funkciju kontrole punjenja i pražnjenja baterije [5]. U najjednostavnijem slučaju, FN ćelije opskrbljuju samo

³ 1 MW = 1000 kW

istosmjerna trošila. Takav sustav može osigurati električnu energiju za punjenje baterija ili pogona crpke za navodnjavanje poljoprivrednih površina. Ako se FN izvoru doda inverter istosmjernog napona (12 ili 24V) u izmjenični napon (230V/ 50Hz), takav sustav može osiguravati električnu energiju za sva izmjenična trošila poput kućanskih aparata [8]. S druge strane, ispravljač pretvara izmjenični napon u istosmjerni, a ima kontrolu punjenja akumulatora iz smjera agregata u hibridnom sustavu. Potreba za ispravljačem, odnosno bidirekcijskim pretvaračem koji je kombinirani uređaj izmjenjivač/punjač, ovisiti će o odabranoj konfiguraciji sustava [5].

5. Dimenzioniranje autonomnog FN sustava

Svaki autonomni sustav specifičan je po pitanju potrošnje energije. Prilikom dimenzioniranja sustava potrebno je obratiti pažnju na poziciju i orijentaciju objekta, njegovoj lokaciji, definirati potrošnju objekta i vrijeme korištenja sustava kroz dan (1h, 5h, 12h ...), utvrditi osnovne parametre sustava, proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja akumulatora, broja FN modula, provjeriti usklađenost komponenata i vrijeme autonomije sistema [14, 15].

Postoje četiri glavna problema koje treba uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja FN sustava:

- 1) Opterećenje (snaga) koju sustav mora isporučiti nije stalan tijekom jednog dana
- 2) Dnevna potrošnja energije varira tijekom godine
- 3) Raspoloživa energija iz fotonaponskog polja može varirati od vremena do vremena tijekom dana
- 4) Raspoloživa energija iz FN polja može varirati od dana do dana tijekom godine [6]

Prema tome, dimenzioniranje glavnih komponenata FN sustava (FN polje, baterija, inverter, itd.) nije izravno s obzirom da postoji nepredvidljivi izvor energije sa nepoznatim ili neizvjesnim zahtjevima opterećenja. Uz to, sustav mora biti pouzdan i ekonomski prihvatljiv. Metode za optimalno dimenzioniranje autonomnih FN sustava temelje se na simulaciji energetske stabilnosti i optimizaciji putem numeričkih ili analitičkih pristupa [16].

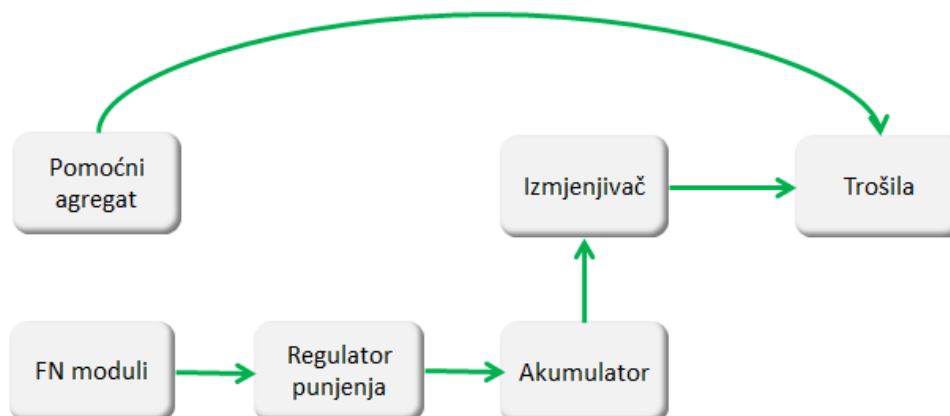
Uzevši sve u obzir, dimenzioniranje se provodi u pet koraka:

- 1) Određivanje potrošnje objekta, odnosno električnih potreba korisnika
- 2) Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja
- 3) Proračun broja potrebnih FN modula i unosa energije iz drugih izvora (npr. generator)
- 4) Provjera usklađenosti komponenata
- 5) Procjena investicije [6]

5.1. Konfiguracija sustava

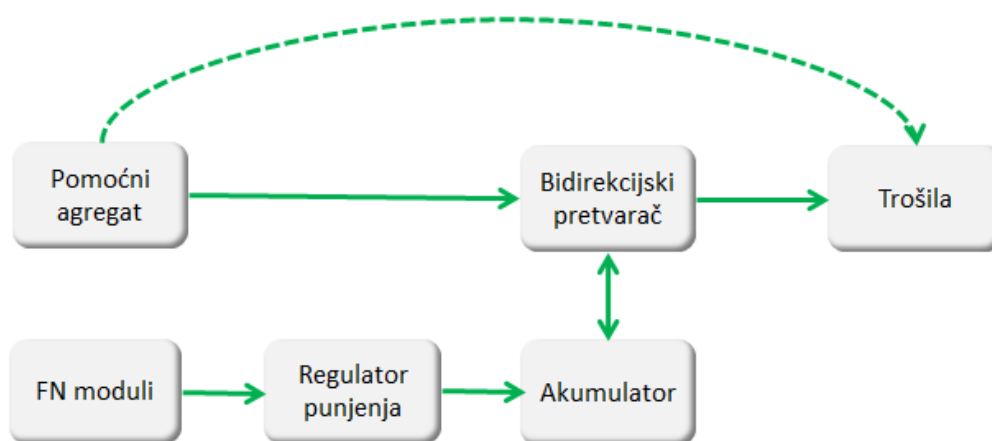
Ovisno o svrsi i investiciji, razlikujemo tri konfiguracije autonomnog FN sustava:

- 1) Konfiguracija sustava bez bidirekcijskog izmjenjivača, u kojem je punjenje baterije omogućeno isključivo iz FN modula. Kada je baterija ispražnjena do dozvoljene granice potrebno je uključiti pomoćni agregat kako bi potrošnja bila zadovoljena. Ovo je najjeftinija i tehnički najmanje zahtjevna varijanta.



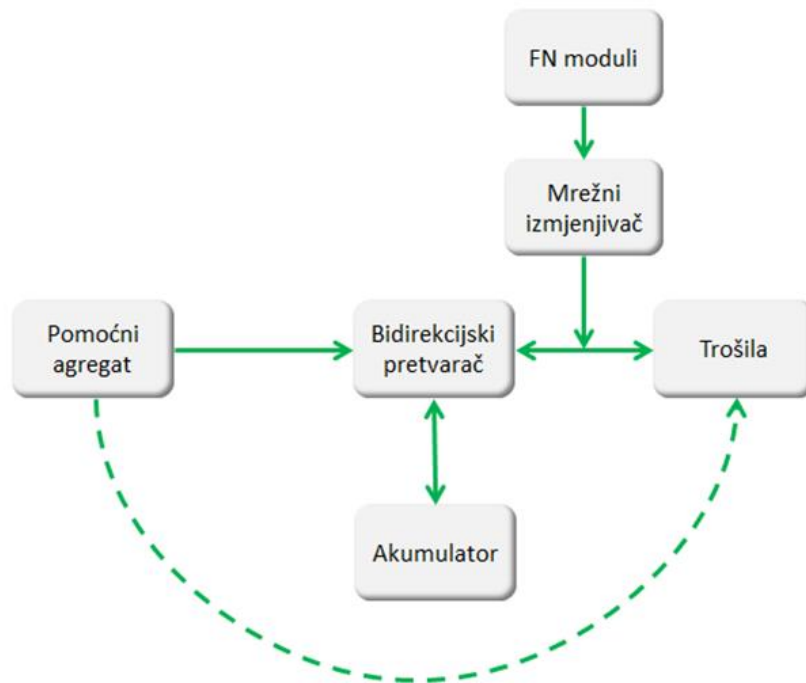
Slika 5. Konfiguracija sustava bez bidirekcijskog pretvarača [5]

- 2) U konfiguraciji sustava s bidirekcijskim pretvaračem omogućeno je punjenje baterije pomoćnim agregatom. Agregat je podređen bateriji i osigurava optimalne cikluse punjenja i pražnjenja. Životni vijek baterije u ovoj konfiguraciji je dulji u odnosu na prethodnu. Premosni spoj agregata i trošila omogućava napajanje kućanstva energijom iz agregata bez opterećivanja baterije ili kada je neka od komponenti sustava u kvaru. Potrebno je omogućiti komunikaciju bidirekcijskog pretvarača i agregata, a ove automatski upravljane komponente povisuju investicijski trošak sustava.



Slika 6. Konfiguracija sustava s bidirekcijskim pretvaračem [5]

- 3) Konfiguracija s mrežnim izmjenjivačem omogućuje optimalno iskorištavanje provedene električne energije iz FN modula i dodatno produljuje životni vijek baterije, ali zahtjeva postojeću stabilnu vezu prema trošilima.



Slika 7. Konfiguracija sustava s mrežnim izmjenjivačem [5]

Razumijevanjem funkcioniranja svih komponenta FN sustava mogu se postaviti modeli i izabrati metoda kojom će se takav sustav dimenzionirati.

5.2. Definiranje potrošnje električne energije

Parametri koji omogućuju dimenzioniranje električnih potreba korisnika dani su u tablici 1, a odnose se na:

- Ciljane potrošače koji su grupirani u različite korisničke klase. Takve klase su definirane prema činjenici da potrošači unutar klase pokazuju slično ponašanje potražnje
- Klasifikaciju električnih aparata prema potrošnji
- Ukupno dnevno vrijeme kada je svaki uređaj u upotrebi, odnosno vrijeme funkcioniranja (h_{ij})
- Svaki uređaj je modeliran nazivnom snagom, a njegovo funkcioniranje je modelirano po principu on-off s obzirom na minimalni kontinuirani radni ciklus (d_{ij})

Tablica 1. Popis parametara koji omogućuju dimenzioniranje električnih potreba korisnika [16]

i	Vrsta električnih uređaja (npr. TV, radio, žarulja, punjač..)
J	Korisnička klasa (npr. kućanstvo, škola, klinika..)
N_j	Broj korisnika unutar pojedine korisničke klase
n_{ij}	Broj uređaja unutar svake klase
P_{ij}	Snaga uređaja (W)
d_{ij}	Radni ciklus, tj. neprekidno vrijeme rada uređaja kada je uključen (h)
η_i	Koeficijent: od maksimalne do srednje snage
h_{ij}	Ukupno vrijeme funkcioniranja (h)

Nakon što se odrede ovi parametri može se izračunati:

- Dnevna potreba za električnom energijom svake korisničke klase
- Teoretska maksimalna nazivna (nominalna)⁴ snaga za svaku korisničku klasu
- Faktor opterećenja za svaku korisničku klasu koji se odnosi na maksimalnu nazivnu snagu i ukupne potrebne dnevne električne energije

Pomoću navedenih određenih i izračunatih parametara određuje se dnevno opterećenje sustava, koje predstavlja potrebne osnovne zahtjeve za dimenzioniranje FN profila u ruralnim područjima [16]. Kako projektiranje uvijek kreće od želja i potreba investitora, radi se proračun potrošnje energije kroz dan. Energija potrebna trošilu u radu (Wh) umnožak je snage trošila (W) i vremena uključenosti trošila (h). Primjer nekih trošila i vrijeme njihove predviđene uključenosti dane su u tablici 2. Više o uređajima korištenih u kućanstvu i energiji koju troše može se pronaći u [17].

Određena trošila, na primjer perilica, imaju snažan grijač koji nije uključen stalno, već se povremeno uključuje, stoga je potrebno u proračun uvrstiti koeficijent „od maksimalne do srednje snage“ i tako odrediti stvarnu potrošnju sličnih uređaja. Potrebno je obratiti pažnju na to da izmjenični motori mogu kratkotrajno povući višestruku nazivnu struju. Ako je u sustavu instaliran bidirekcijski pretvarač, to ne predstavlja poteškoću jer on može kratkotrajno osigurati i dvostruku nazivnu snagu. Nazivna snaga u sustavu je ona snaga koju bidirekcijski pretvarač može davati trajno. S obzirom da pojedini motor nije nužno i najveći potrošač objekta, mora biti osigurana kratkotrajno potrebna višestruka struja, odnosno snaga za pokretanje motora. Sumiranjem snaga svih trošila dobije se maksimalna snaga koju objekt može u nekom trenutku zahtijevati, a da sva trošila rade istovremeno, odnosno, dobije se ukupna energija koja je potrebna za jedan dan rada objekta [15].

⁴ Najveća snaga nekog trošila na koje to trošilo može biti kontinuirano priključeno bez oštećenja naziva se **nazivna** ili **nominalna snaga**.

Tablica 2. Primjer definiranja potrebne energije tijekom dana [15]

AC	Trošila 230V, 50Hz	Snaga uređaja, P_{ij} (W)	Vrijeme uključenosti trošila u danu, h_{ij} (h)	Koeficijent: od maksimalne do srednje snage, η_{ij}	Potrebna energija, E_v (Wh)
1	Perilica posuđa	1200	3	0,7	2520
1	Kuhinjska napa	150	1	1	150
1	Hladnjak	100	24	0,1	240
1	Radio	40	1	1	40
1	TV	70	1	1	70
1	Perilica rublja	1700	2	0,2	680
1	Klima	2000	3	0,4	2400
1	Ostala rasvjeta 230V	500	4	1	2000
1	Ostalo na 230 VAC	200	5	1	1000
	Maksimalna snaga (W)	6710		Ukupna energija (Wh)	9175

5.3. Osnovni parametri sustava

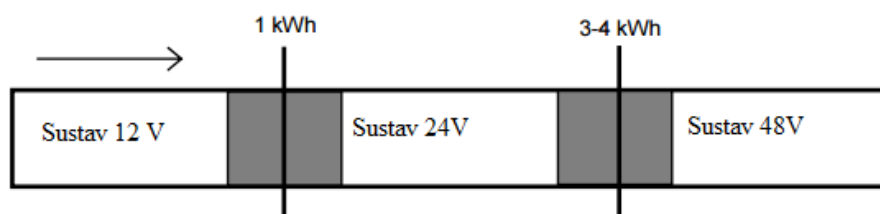
Kada se odredi maksimalna snaga i potrebna energija za jedan dan rada objekta, slijedi odabir osnovnih parametara sustava prikazani u tablici 3. Također je proveden i izračun navedenih parametara za veći, manji i mikro sustav kućanstva. Detaljnije objašnjenje pojedinih parametara biti će opisano u daljnjem tekstu [15].

Tablica 3. Osnovni parametri sustava [5, 15]

	Oznaka	Jedinica	Veći sustav	Manji sustav	Mikro sustav
Potrebna energija u danu	E_V	Wh	4070	1874	1400
Napon baterije	U_s	V	24	24	24
Koeficijent dubine pražnjenja akumulatora	t_z	-	0,5	0,5	0,5
Stupanj korisnog djelovanja punjenja	η_{AH}	-	0,9	0,9	0,9
Trajanje autonomije	n_A	d	3	3	3
Koeficijent korištenja sustava	h_B	-	1	1	1
Potpuni oporavak sustava	n_E	d	10		

Naponi sustava su općenito postavljeni na 12V, 24V ili 48V. Stvarni napon određen je zahtjevima sustava, na primjer, ako su baterije i pretvarač daleko od izvora energije, tada je potreban viši napon kako bi se smanjio gubitak snage u kablovima [6]. Što je veći napon akumulatora to su manje struje u sustavu. Uz manje struje potreban je

i manji presjek kabela [15]. U većim sustavima može napon može biti i 120V ili 240V, ali takvi naponi se ne koriste u kućanstvima. Općenito, preporučeni napon sustava povećava se sa povećanjem ukupnog opterećenja (slika 8) [6].



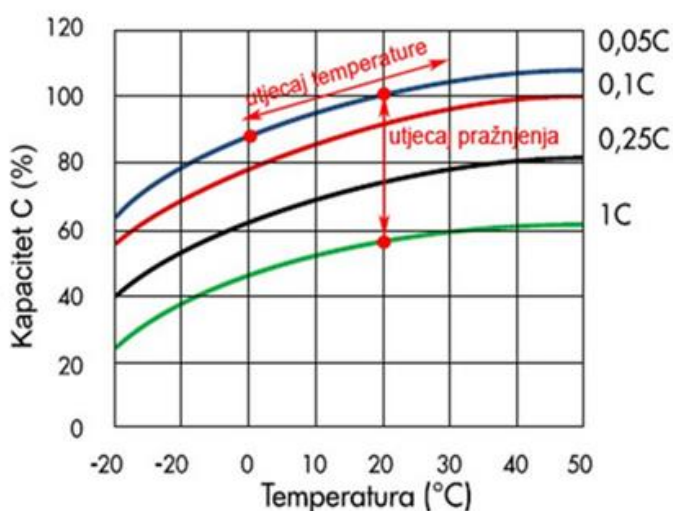
Slika 8. Preporučeni napon sustava u ovisnosti o dnevnom opterećenju [6]

5.4. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja

Izbor akumulatora je najvažniji dio prilikom projektiranja autonomnog sustava. S obzirom da FN paneli nisu priključeni na elektroenergetsku mrežu, akumulator obavlja posao punjenja, skladištenja i prenošenja energije na potrošače. Potrebno je dobiti dovoljan sustav za opskrbu svih potreba, ali također i dovoljno malen da ga struja iz FN panela može napuniti [18].

Za sunčanih dana s viškom električne energije akumulatori se pune, a u noći i kada je Sunčevo zračenje nisko baterije se prazne i predaju akumuliranu energiju. U otočnim FN sustavima se zbog najboljeg omjera cijene i učinkovitosti najčešće koriste olovne (Pb) akumulatorske baterije. U sustavima namijenjenim radu na niskim temperaturama, koriste se nikal-kadmij (NiCd) baterije, dok su litij-ionske (Li-ion) baterije za ovakve aplikacije još uvijek preskupe. Više pojedinačnih akumulatorskih baterija spojenih u seriju i/ili paralelu nazivamo akumulatorskom bankom [19].

U prethodnom potpoglavlju definirana je dnevna potreba za energijom izraženom u Wh. Ona se svodi preko napona akumulatora na dnevno potrebne ampersate, Ah, koje mora osigurati akumulator [15]. Kapacitet baterije definira se s dvije oznake, količinom spremljene energije kada je baterija puna, izraženo u ampersatima (Ah), i brojem C , (u engleskoj literaturi označen kao *DOD*, eng. *Depth Of Discharge*) brojem koji označava za koliko će se sati baterija potpuno isprazniti u ovisnosti o struji pražnjenja [5, 20]. Uobičajeno se kapacitet akumulatora navodi kao 100Ah C20, 100Ah C10, itd. Iako imaju isti kapacitet od 100Ah, daju ga u različitim uvjetima pražnjenja. Tako na primjer, C20 znači da će se 100Ah isprazniti za 20h, odnosno da se baterija prazni sa 5A kroz 20h (kako je 5A ujedno 5% brojčane vrijednosti kapaciteta baterije 100Ah, kaže se da se baterija prazni s 0,05C). Pražnjenje i kapacitet akumulatora ovisi o temperaturi, a prikazan je na slici 9 [21].



Slika 9. Ovisnost kapaciteta o struji pražnjenja i temperaturi [21]

Za projektiranje fotonaponskih otočnih sustava bitno je da regulator punjenja baterije podržava tip baterije u sustavu i da može osigurati do 0,2C struju punjenja. Sva ostala briga oko procesa punjenja baterije je zapravo ugrađena u regulatore punjenja i nije zadatak projektanta sustava [21].

Parametri koji se odnose na energetske potrebe akumulatora dani su u tablici 4.

Tablica 4. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja za veći, srednji i manji sustav [5]

	Oznaka	Jedinica	PV3000	PV1500	PV1000
Dnevna potrošnja	$E_D = h_B \times E_V$	Wh	4070	1874	1400
Dnevna potrošnja	$Q_D = \frac{E_D}{U_S}$	Ah	170	78	58
Kapacitet idealnog akumulatora	$K_N = n_A \times \frac{E_V}{U_s}$	Ah	509	234	175
Maksimalni kapacitet realnog akumulatora	$K = \frac{K_N}{t_Z}$	Ah	848	390	292
Dnevno punjenje	$Q_L = \frac{Q_D}{\eta_{Ah}}$	Ah	188	87	65

Kako bi se odredio kapacitet akumulatora, potrebno je odrediti broj dana autonomije, C_s , potreban za rad bez generiranja energije. Broj dana autonomije, C_s je povezan sa kapacitetom baterije C_n :

$$C_n = C_s \frac{L}{DOD_{max}} \quad (1)$$

Gdje je:

DOD_{max} maksimalna dopuštena vrijednost dubine pražnjenja akumulatora
(eng. *Depth of discharge*) (%)

C_n kapacitet akumulatora (Ah)

C_s broj dana autonomije (d)

L srednje dnevno opterećenje (kWh/dan)

Ova jednadžba predstavlja grubu procjenu i ne uključuje skladištenje energije.

Autonomija sustava je vremenski period u kojem sustav može zadovoljavati potrebe kućanstva za električnom energijom iz energije pohranjene u baterijama, kada zbog vremenskih uvjeta ili drugih razloga nije moguća proizvodnja električne energije iz FN sustava. Autonomija otočnog sustava odnosi se na raspoloživ kapacitet baterije za pohranu električne energije. Da bi se postigla autonomija, koristi se sljedeća formula:

$$N_{bat} = \frac{L_{prim,sr} \times A_{bat} \times 24h/dan}{V_n Q_n t_z} \quad (2)$$

Gdje je:

N_{bat}	broj potrebnih povezanih baterijskih jedinica
A_{bat}	predviđena autonomija baterije (h)
V_n	nazivni napon baterijskog sloga (V)
t_z	koeficijent dubine pražnjenja (%)
$L_{prim,sr}$	srednje dnevno opterećenje (kWh/dan)
Q_n	nazivni kapacitet baterijske jedinice (Ah)

Za dimenzioniranje sustava, pretpostavlja se minimalni period autonomije od 48 sati (2 dana) za sustav PV1000, te autonomija od 72 sata (3 dana) za sustave PV1500 i PV3000. Upotrebom navedene formule (2) za izračun osigurane autonomije sustava uz poznate komponente sustava (12 V nazivni napon baterijske jedinice, 220 Ah nazivni kapacitet baterijske jedinice, 60% dozvoljena dubina pražnjenja, te pretpostavljene dnevne potrošnje za tri tipa kućanstva, za koja su predviđena tri tipska sustava PV1000, PV1500 i PV3000, s parnim brojem baterijskih jedinica kako bi se zadovoljili zahtjevi na voltažu sustava i trajanje autonomije (za sustave redom 2, 4 i 8 baterijskih jedinica)) izračunato je trajanje autonomije, te prikazano u tablici 5 [5].

Tablica 5. Trajanje autonomije za različite FN sustave [5]

PV1000	1400 Wh/dan	2 x 12 V x 220 Ah x 60%	54 sata
PV1500	1874 Wh/dan	4 x 12 V x 220 Ah x 60%	81 sat
PV3000	4070 Wh/dan	8 x 12 V x 220 Ah x 60%	75 sati

Prema modeliranoj prosječnoj dnevnoj potrošnji, autonomija sustava je 2-3 dana za osunčanija područja, 3-5 dana za oblačna područja [22]. Ako želimo veliku autonomiju sustava, moramo povećati kapacitet akumulatora, što u konačnici znači i povećanje cijene sustava. Kapacitet akumulatora je bitan faktor za projektiranje FN sustava, no dozvoljeni stupanj pražnjenja akumulatora je faktor na koji je potrebno obratiti najviše pozornosti. To je vrijednost koja se ne smije prekoračiti kako ne bi došlo do trajnog oštećenja ćelija baterije i smanjenja životnog vijeka. Koeficijent dubine pražnjenja $t_Z=0,2$ označava da se akumulator smije prazniti do 20% svog kapaciteta. Pri dimenzioniranju komponenti najčešće se postavlja $t_Z=0,6$. Pražnjenje akumulatora do 60% kapaciteta osigurava njegov životni vijek od minimalno 5 do 7 godina. Maksimalni životni vijek akumulatora je do 10 godina. Efikasnost akumulatora se odnosi na kružne pretvorbe električne energije DC-skladištenje-DC, odnosno koliki udio energije pohranjen u akumulatoru se može povratiti. Efikasnost pretvorbe η_{Ah} je oko 90%, a varira u ovisnosti o tipu i naponu baterije. Koeficijent korištenja sustava pokazuje da li se električna energija iz akumulatora koristi svakodnevno ($h_B=1$) ili, primjerice, samo preko vikenda ($h_B=2/7$). Karakteristični naponi baterija prikazani su u tablici 6 [5].

Tablica 6. Karakteristični naponi GEL VRLA olovnih solarnih baterija [21]

Baterija	12V	24V	48V
100% napunjena baterija nakon 2h punjenja	12,8-13V	25,6-26V	51,2-52V
50% napunjena baterija	12,5V	25V	50V
Potpuno ispražnjena baterija	11,7V	23,4V	46,8V
Napon punjenja	14,2-14,4V	28,4-28,8V	56,8-58V

Ciklički način rada, neizbježan u solarnim sustavima, skraćuje životni vijek baterije. Zato je najvažniji zahtjev za akumulatore u solarnim sustavima povećana izdržljivost u cikličkom režimu. Drugi bitan zahtjev je što veći stupanj djelovanja, odnosno da je što manja razlika između dobivene energije iz baterije tijekom pražnjenja i utrošene energije tijekom punjenja. Akumulatori koji ispunjavaju ova dva uvjeta nose oznaku SOLAR i nazivaju se solarne baterije [9].

U tablici 2 pretpostavljena je dnevna potrošnja električne energije u kućanstvu, uz uvjete da je napon baterije $U_s=24V$, koeficijent dubine pražnjenja akumulatora $t_z=0,5$, stupanj korisnog djelovanja punjenja $\eta_{AH}=0,9$, broj dana autonomije je 1, oporavak sustava $n_E=10$ dana i koeficijent korištenja sustava $h_B=1$. Uz iste uvjete dobije se i veličina kapaciteta akumulatora i dnevno punjenje za konkretni slučaj, prikazan u tablici 7.

Tablica 7. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja [15]

Projektirana dnevna potrošnja $E_D = h_B \times E_V$	10000
Dnevna potrošnja $U_D = E_D / U_S$	417
Kapacitet idealnog akumulatora $K_N = n_A \times (E_V) / U_S$	417
Minimalni kapacitet realnog akumulatora $K = K_N / t_z$	833
Potrebno dnevno punjenje $Q_L = (1/n_{Ah}) \times (Q_D + K_N/n_E)$	509

Uz uvjet da akumulator zbog održanja životnog vijeka želimo prazniti samo do polovice kapaciteta, kapacitet realnog akumulatora je tako došao do 833 Ah. To će u konkretnom slučaju značiti 4 baterijska sloga po 24V, 220Ah u paralelu, dakle ukupno 24V, 880Ah. Dalje se definira dnevno punjenje Q_L , odnosno energija u Ah koja mora dnevno doći do stezaljki akumulatora da bi se osigurala projektirana potrošnja iz akumulatora. Q_L je ključan podatak u proračunu jer definira koliko energije moramo dobiti iz fotonaponskih modula i prema njemu se u konačnici definira i broj modula. Za prikazani slučaj, na stezaljke akumulatora mora se dovesti 509 Ah dnevno, da bi se iz njega moglo „potrošiti“ 417 Ah [15].

5.5. Proračun snage i broja potrebnih modula

Broj potrebnih FN modula dobiva se iz podataka dnevnog opterećenja sustava i isporučene energije. Postavlja se energetska bilanca, gdje je prvi parametar očekivana proizvodnja energije dobivene FN modulima. Određena je Sunčevim zračenjem na određenoj lokaciji, a može se pojednostaviti kao broj sunčanih sati. Ovisno o primjeni, koristi se prosječna vrijednost PSH za cijelu godinu ili za dio godine. PSH vrijednost treba odgovarati kritičnom razdoblju rada sustava, odnosno vrijednostima kada je Sunčevo zračenje najmanje ili u mjesecima kada je sustav najviše opterećen. Drugi parametar predstavlja dnevnu potrebu za opterećenjem, odnosno, razmatra se količina

energije potrošena u jednom danu. Vrijednosti PSH i srednje dnevno opterećenje L , određuju prosječnu dnevnu ravnotežu između opskrbe energijom i potrebnom snagom FN modula:

$$P_0 = \frac{PSH}{L} \quad (3)$$

Gdje je:

P_0	omjer broja sunčanih sati i srednjeg dnevnog opterećenja
L	srednje dnevno opterećenje (kWh/d)
PSH	broj sunčanih sati (eng. <i>Peak Solar Hours</i>) (h)

Poznavajući vrijednost P_0 , možemo dobiti konačan broj FN modula, N :

$$N = \frac{P_0}{P_{mod}} \quad (4)$$

Gdje je:

N	broj potrebnih modula
P_{mod}	snaga proizvedena pomoću jednog modula unutar standardnih uvjeta, pri čemu vrijedi da je $P_{mod} = P_{max} = P_{ef.}$, vrijedi za sustave bez praćenja Sunčevog zračenja i naponom akumulatora V_{bat} postavljenom na 12V ili 24V

Nakon što je specificiran radni DC napon, ovaj postupak dimenzioniranja daje konfiguraciju modula, ovisno o tome da li će se moduli spajati paralelno ili serijski [23]. Serijskim spajanjem FN modula nastaje niz, a paralelnim spojem nizova nastaje fotonaponsko polje. Spajanjem modula u seriju zbrajaju se naponi modula u napon niza, uz zadržavanje iste struje koja protječe kroz sve module [5].

Serijsko spajanje konačnog broja FN modula N_s dobiva se iz sljedeće jednadžbe:

$$N_s = \frac{V_{DC}}{V_{bat}} \quad (5)$$

Gdje je:

V_{DC} nazivni napon modula (V)

V_{bat} napon baterije (V)

Spajanjem nizova u paralelu napon niza ostaje konstantan, a zbraja se struja nizova [5].

Konačan broj paralelno spojenih FN modula N_p [23]:

$$N_p = SF \frac{I_{DC}}{I_{sc}} \quad (6)$$

Gdje je:

SF sigurnosni faktor; predstavlja dodatne gubitke uzrokovane nakupljenom prašinom na modulima ili predstavlja način povećanja rada sustava

I_{DC} jakost istosmjerne struje (A), računa se po formuli $I_{DC} = \frac{L (Wh)}{PSH \times V_{DC}}$

I_{sc} struja kratkog spoja jednog modula (A)

Broj modula spojenih serijski i paralelno bit će određen maksimalnim dozvoljenim ulaznim naponom te maksimalnom ulaznom strujom regulatora punjenja, na koji se priključuju.

U tablici 8 prikazan je proračun potrebne snage, odnosno broja potrebnih FN modula, za sustave PV3000, PV1500 i PV1000 [5].

Tablica 8. Proračun broja potrebnih modula [5]

	Oznaka	Jedinica	PV3000	PV1500	PV1000
Snaga modula	P_M	W	250	250	250
Napon baterije	U_S	V	24	24	24
Broj instaliranih FN modula	N	-	10	5	4

Očekivana dnevna i mjesečna proizvodnja energije iz 1kWh za svaki mjesec u godini dana je u tablici 9, dobivena iz servisa PVGIS [4]. Sve jedinice za energiju su na dnevnoj razini. Energija iz pomoćnog izvora (agregata) koristi se za pokrivanje manjka iz FN modula u potrebnom dnevnom punjenju baterije. Pri proračunu se uzima 10% veći napon baterije ($1,1 U_S$) koji odgovara stvarnom stanju gdje se akumulator uvijek puni na višem naponu od nazivnog.

Energija potrebna is sustava FN modula dobiva se po formulama [5]:

$$E_{DC-S} = N \times P_M \times Y_F \quad (7)$$

$$Q_S = \frac{E_{DC-S}}{1,1 \times U_S} \quad (8)$$

Gdje je:

E_{DC-S} energija iz sustava FN modula (Wh)

N broj instaliranih modula (1)

P_M snaga modula (W)

Y_F energija iz 1Wp (Wh/Wp) [4]

Q_S energija iz sustava FN modula (Ah)

U_S napon baterije (V)

Energija dobivena iz pomoćnog izvora (agregata) [5]:

$$Q_H = \frac{E_H}{I, I \times U_S} \quad (9)$$

Gdje je:

E_H energija iz pomoćnog izvora (agregata) (Wh)

Q_H energija iz pomoćnog izvora (agregata) (Ah)

Faktor veličine sustava [5]:

$$n_F = \frac{Q_{FN}}{Q_S} \quad (10)$$

Gdje je:

n_F Faktor veličine sustava

Q_{FN} Energija potrebna iz FN modula, računa se kao $Q_{FN} = Q_L - Q_H$ (Ah)

Q_S Energija iz sustava FN modula (Ah)

Tablica 9. Očekivana dnevna proizvodnja energije iz 1 kWp FN modula za lokaciju Žunići, Vinjerac (44°14'55" N, 15°28'8" E, 124nmv) prikazano po mjesecima, prema podacima iz [4].

Inklinacija=30°; Orijentacija: 0°				
Mjesec	E_d	E_m	H_d	H_m
Siječanj	1,71	53,0	2,12	65,7
Veljača	2,66	74,5	3,31	92,7
Ožujak	3,56	110	4,59	142
Travanj	3,93	118	5,21	156
Svibanj	4,35	135	5,88	182
Lipanj	4,60	138	6,37	191
Srpanj	4,88	151	6,83	212
Kolovoz	4,59	142	6,43	199
Rujan	3,80	114	5,16	155
Listopad	2,85	88,2	3,73	116
Studen	1,80	53,9	2,27	68,2
Prosinac	1,56	48,4	1,93	59,8
Godišnji prosjek	3,36	102	4,49	137
Ukupno za godinu	1230		1640	

Gdje je:

E_d Očekivana dnevna proizvodnja za predmetni sustav (kWh)

E_m Očekivana mjesečna proizvodnja za predmetni sustav (kWh)

H_d Prosječno dnevno osunčanje sustava primljeno po kvadratnom metru modula (kWh/m²)

H_m Prosječno mjesečno osunčanje sustava primljeno po kvadratnom metru modula (kWh/m²)

Podaci uz koje je rađen proračun:

1. Orijentacija objekta: sjeveroistok-jugozapad, 30 stupnjeva otklonjeno od juga, nagib modula 0 stupnjeva.
2. Baza korištena za proračun dobivene električne energije: PVGIS-CMSAF.
3. Nazivna snaga fotonaponskog postrojenja: 1 kWp.
4. Očekivani, pretpostavljeni, gubici rezultirani utjecajem temperature okoline: 10,1%.
5. Očekivani, pretpostavljeni, gubici zbog refleksije površina: 2.8%.
6. Ostali, pretpostavljeni gubici (kabeli, spojnice, izmjenjivač): 14.0%.
7. Pretpostavljeni zbirno očekivani gubici na kompletnom fotonaponskom sustavu: 24.9%. [4, 15]

Zbog navedenih gubitaka na FN sustavu, učinkovitost sustava varira od 60 do 75,1%, ovisno o razdoblju u godini, vremenskim prilikama i ispravnosti sustava. Učinkovitost izmjenjivača (prema navedenim podacima) iznosi 86%, a učinkovitost akumulatora ovisi o vrsti i veličini, koja u danom primjeru nije navedena, već se smatra samo kao spremište akumulirane energije. Kako bi se mogla odrediti učinkovitost FN modula, potrebno je poznavati snagu i dimenzije modula. U simulaciji je navedena nazivna snaga FN modula od 1kWp, odnosno 1kWh, a dimenzije se mogu odrediti preko poznatih podataka za module od 250W. Površina modula od 250W (npr. Solarni panel SOLE 250W, Sundragon i250-60P i dr.) iznosi $1,62\text{m}^2$. Snaga modula u ovom slučaju je 1000W, što znači da je 4 modula od 250W spojeno i njihova površina iznosi $6,48\text{m}^2$. Prema tome, učinkovitost modula iznosi 15,43%.

5.6. Provjera usklađenosti komponenata

Definiran je broj potrebnih FN modula i kapacitet baterije, te sada preostaje još samo odabrati odgovarajući regulator punjenja, inverter i ispravljač (punjač baterije) [5, 15]. Ako se pretpostavi da je snaga modula 2500Wp, tada optimalni inverter ima 2500-3000 VA. Da bi se odredila veličinu invertera (pretvarača), mora se pronaći nazivno opterećenje ili maksimalnu snagu korištenu u kućanstvu. To se pojednostavljeno postiže tako da se svi električni uređaji uključe istovremeno. Njihov zbroj daje veličinu koja određuje veličinu pretvarača. Na primjer, soba sa dvije žarulje od 60W i stolnim računalom od 300W daje snagu pretvarača od 420W, jer je $60W \times 2 + 300W = 420W$ [24].

Inverter mora biti u mogućnosti podnijeti najviše kontinuirano opterećenje. Osim kontinuiranog opterećenja, ponekad postoje i opterećenja prenapona⁵ poput pokretanja električnog motora ili crpke (primjer perilice u poglavlju 5.2.). Takva opterećenja mogu biti 2-5 puta veća od kontinuiranog opterećenja, a inverter mora imati dodatni kapacitet za pokretanje [22]. Inverter (DC/AC pretvorba) provodi energiju u smjeru od akumulatora prema trošilima. Izborom invertera premale izlazne snage neće biti moguće zadovoljiti potrošnju kućanstva, no nije dobro uzeti ni preveliku snagu u odnosu na snagu FN polja jer se time smanjuje stupanj korisnog djelovanja sustava. Napon niza mora biti manji od ulaznog napona invertera. Za to se koriste podaci FN modula i provjerava se napon pri najvećem osunčanju i pri najnižoj temperaturi modula u radu. Za izabrani 250W modul uz maksimalno osunčanje i minimalnu radnu temperaturu, napon po modulu neće prijeći 40V, a time i napon niza od 10 modula neće prijeći 400V.

⁵**Prenapon** je razlika između ravnotežnog potencijala elektrode i potencijala koji omogućuje određenu jakost struje koja teče kroz elektrodu. Ukoliko nije reguliran, može doći do razornog pražnjenja, uzrokovati smetnje ili kvarove u sustavu.

Slijedi izbor bidirekcijskog pretvarača. Bidirekcijski pretvarač mora biti izabran prema istosmjernom naponu akumulatorske banke (u navedenom primjeru iznosi 24 V DC). U sebi objedinjuje i punjač baterija i izmjenjivač. Punjač bidirekcijskog pretvarača mora osigurati potrebnu istosmjernu struju punjenja akumulatora, a to je negdje od 10 do 15% svojeg kapaciteta. Za navedeni primjer, mora osigurati istosmjernu struju punjenja od 90 do 140A. S obzirom da energija ne može biti predana generatoru, bidirekcijski pretvarač mora kroz sebe propustiti cjelokupnu snagu FN polja kada u objektu trošila nisu aktivna, a baterija je prazna. Kao što je već spomenuto, ukoliko dođe do potezanja maksimalne snage trošila (motor perilice), sustav će sam uključiti generator ako pretvarač nije dovoljan da ispunji zahtjeve. Bidirekcijski pretvarač ima u sebi transfer sklopku⁶ koja omogućava u ovom slučaju predavanje pune snage generatora prema trošilima uz istovremeno predavanje energije iz baterija.

Kao posljednja provjera sustava gleda se usklađenost akumulatora i bidirekcijskog pretvarača sa radom izmjenjivača. Ako se na akumulator priključi prejak izmjenjivač, on će se ubrzano trošiti i „stariti“ bateriju. Ako se na bateriju priključi preslabi izmjenjivač onda se možda u trajnom radu neće moći pokriti sve potrebe trošila. Potrebno je ograničiti potrošnju iz akumulatora kako bi se spriječilo uništavanje baterije. Dakle, ukoliko je potrebna veća snaga, izmjenjivač se podešava tako da se generator automatski uključuje i dostavlja energiju potrošaču [15].

⁶ „brza“ sklopka za prebacivanje napajanja

6. Analiza troškova

Troškovi sustava ovise o potrebama električne energije, kvaliteti komponenata sustava i održavanju. Trošak FN modula sadrži cijenu nabave i trošak montaže; bidirekcijski pretvarač i solarni akumulator sadrže i trošak zamjene, a trošak agregata sadrži cijenu nabave i troškove održavanja i goriva. U tablici 10 dana je orijentacijska cijena pojedinih komponenata, dok se u tablici 11 nalazi cijena komponenata koje smo koristili u navedenim primjerima.

Tablica 10. Orijentacijska cijena komponenata autonomnog FN sustava [19]

Komponente	Jedinična cijena po W instalirane snage
FN modul	3-4€/W
FN inverter	0,3-0,5 €/W
FN usmjerivač	0,3-0,5 €/W
Olovni solarni akumulator	300€/kWh
Projektiranje	15% investicije
Električna oprema i montaža	25% investicije
Ukupno	6-10 €/W

Tablica 11. Cijena komponenata autonomnog FN sustava korištenih primjera [15]

Komponente sustava	Cijena
FN moduli 250W, 10 kom.	1800,00€
Nadzornik baterija i Digital Control Panel	150,00€
Bidirekcijski pretvarač 24V/5000VA/120A	2300,00€
Mrežni inverter 2500 VA	1400,00€
Gel baterija 24V, 220Ah, Ca20, 8 komada	2400,00€
Generator 3 kVA	3000,00€
Ukupno	11050,00€ (~84643kn)

Sustav također ima i ciklus životnih troškova, *LCC* (engl. *Life Cycle Costs*) u koji se ubraja održavanje sustava i zamjena određenih komponenata. Postoji mogućnost za dodatnim troškovima koji ovise o načinu korištenja sustava i njegovoj trajnosti.

Metoda optimizacije temeljena na pouzdanosti sustava i cijeni

Ovom metodom određuje se energetska ravnoteža između proizvedene energije, potrošene energije i energije koja se pohranjuje u akumulatorima. U većini literature i raznim simulacijskim programima koristi se ova metoda, a promatra se kroz određeno vremensko razdoblje, odnosno kroz period od godinu dana (8760 h). Pomoću dobivene ravnoteže može se odrediti potrebna snaga FN polja i kapacitet baterije. Parametri *LLP* i *NPC* predstavljaju komponente pomoću koji se izvršava optimizacija.

Provodi se na sljedeći način:

- Za svaki vremenski korak izvodi se ravnoteža između proizvedene i potrebne energije
- Višak energije se akumulira u bateriji, pri čemu se određuje stanje punjenja baterije, *SOC* (eng. *State Of Charge*), zajedno sa gubitkom opterećenja *LLP* (eng. *Loss of Load Probability*) koji se pojavljuje ako je napunjenost baterije minimalna [16].

Iz ovoga se može zaključiti da osim jednostavne metode dimenzioniranja sustava, bitna je i stavka troškova i pouzdanosti sustava. Pouzdanost sustava proporcionalna je troškovima sustava, što znači da je sustav pouzdaniji što je skuplji i obrnuto. Dakle, sustav je potrebno optimizirati na način da se pronađe kompromis u odnosu pouzdanosti i cijene.

Pouzdanost sustava može se odrediti pomoću vjerojatnosti gubitka opterećenja (LLP), kada potražnja za električnom energijom (E_D) nije ispunjena u određenom vremenskom razdoblju (t). Prema tome LLP se izračunava kao:

$$LLP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} LL(t)}{E_D} \quad (10)$$

Gdje je:

$LL(t)$ gubitak opterećenja u određenom vremenu (kWh/dan)

E_D ukupna potrošnja energije za jednu godinu (Wh)

S obzirom na životni vijek sustava procijenjen u godinama i troškove koji se pojavljuju kroz cijeli vijek (LCC), ukupni trošak sustava, NPC (eng. *Net Present Cost*) se dobiva iz jednadžbe:

$$NPC = \sum_{y=1}^{LT} \frac{Inv(y) + O\&M(y)}{(1+r)^y} \quad (11)$$

Gdje je:

y broj godina

$Inv(y)$ ulog i troškovi zamjene komponente sustava (za određen broj godina) (€)

$O\&M(y)$ troškovi rada i održavanja (za određen broj godina) (€)

$(1+r)^y$ kamatna stopa (%) [16, 25]

Pouzdanost sustava je na prvom mjestu, stoga se traži maksimalna vrijednost LLP -a koja se tolerira od potrošača. Tada se proces optimizacije obično sastoji u traženju kombinacije veličina komponenti sustava (broj FN modula (veličina polja) i kapacitet baterije) koje imaju minimalni NPC , a istovremeno ispunjavaju prihvatljivo stanje LLP -a. S obzirom da se stvarna potrošnja električne energije ne može konkretno izračunati (jer se konzumira prema potrebama), već pretpostaviti, dimenzija točne pouzdanosti sustava još je uvijek otvorena tema u literaturi. Ipak, postoje detaljniji

proračuni koji u obzir uzimaju trošak dobivene i izgubljene energije, prethodno dobivene vrijednosti zbog upotrebe različitih generatora za dobivanje električne struje, okolišnu temperaturu i temperaturu FN modula, vrijeme crpljenja energije i drugih bitnih parametara koje se mogu pronaći u [25].

7. Ekološka analiza

Rastom industrije solarne energije dolazi do pitanja kako će se zbrinuti fotonaponski paneli nakon što im istekne rok trajanja. S obzirom da oni spadaju u relativno novu tehnologiju, većina zemalja odgovor na to pitanje još uvijek nema.

Recikliranje solarnih panela relativno je složen zadatak jer su građeni od različitih vrsta materijala. Ploče se sastoje od metala poput olova, bakra, galija i kadmija, sintetičkog materijala koji obuhvaća silicij, silikonskih solarnih ćelija i aluminijskog okvira. Teški metali, poput kadmija i olova, vrlo su štetni za okoliš, a rijetke elemente, kao što su galij i indij, potrebno je sačuvati i ponovno upotrijebiti. Sve navedene komponente potrebno je odvojiti i na pravilan način zbrinuti.

Direktiva Europske unije o otpadu i recikliranju opisuje načelo produžene odgovornosti proizvođača (*EPR*, eng. *Extended Producer Responsibility*), prema kojem proizvođač preuzima odgovornost za proizvode nakon isteka roka trajanja (npr. SUNGEN paneli, akumulatori). Drugi primjeri europskog zakonodavstva su EU Direktive o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi (*WEEE*, eng. *Waste Electrical and Electronic Equipment*) i ograničavanju opasnih tvari (*RoHS*, eng. *Restriction of Hazardous Substances*) uspostavljene 2003. godine kako bi se smanjila količina elektroničkog otpada za odlaganje na odlagališta i spaljivanje. RoHS ograničava upotrebu određenih tvari, dok *WEEE* regulira prikupljanje, obradu i odlaganje proizvoda, te ograničava njihovo oblikovanje. Ovo su regulative koje su postavljene općenito za uređaje, iako konkretno za solarne panele ne moraju vrijediti.

Europska udruga za recikliranje solarnih panela PV Cycle, osnovana 2007. razvila je proces mehaničkog i toplinskog pročišćavanja koji postiže 96% stopu oporavka fotonaponskih ploča na bazi silicija. Preostalih 4 posto koristi se u procesu oporabe⁷ energije, koristeći tehnologiju otpada na energiju. Solarni paneli na bazi silicija mogu imati stopu povrata do 98%. Kompanija je u mogućnosti prikupiti istrošene FN module u bilo kojoj zemlji Europske unije, kao i zemljama članicama EFTA-e⁸ (Švicarska,

⁷ **Oporaba** je svaki postupak ponovne obrade otpada radi njegova korištenja u materijalne i energetske svrhe

⁸ **EFTA** (eng. The European free trade association) – Europsko udruženje slobodne trgovine

Norveška, Lihtenštajn i Island). Nakon prikupljanja, PV Cycle isporučuje module na daljnju obradu tvrtkama za recikliranje s kojima je u partnerstvu. Tvrtke-partneri koje recikliraju FN module nalaze se u Njemačkoj, Španjolskoj i Belgiji. PV Cycle je jedina udruga koja se bavi prikupljanjem istrošenih panela, te tvrtke s kojima surađuje su malog kapaciteta, što znači da napretkom i većom uporabom solarnih panela, pitanje zbrinjavanja panela i akumulatora se mora riješiti [26, 27, 28, 29, 30].

Osim što FN sustavi služe za dobivanje i upotrebu električne energije, također sudjeluju u smanjenju emisije CO₂. Samo jedan kWh električne energije dobivene iz Sunca smanjuje emisiju CO₂ za 1 kg [2]. Hrvatska je ulaskom u Europsku uniju usvojila tzv. energetske-klimatski paket zakona koji bi do 2020. godine trebali rezultirati s:

- 20 % manjim emisijama stakleničkih plinova u usporedbi s 1990. godinom;
- 20 % udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj energetskej potrošnji;
- 20 % manjom potrošnjom energije (u odnosu na onu koja se do 2020. očekuje u slučaju neprovođenja posebnih mjera) [32].

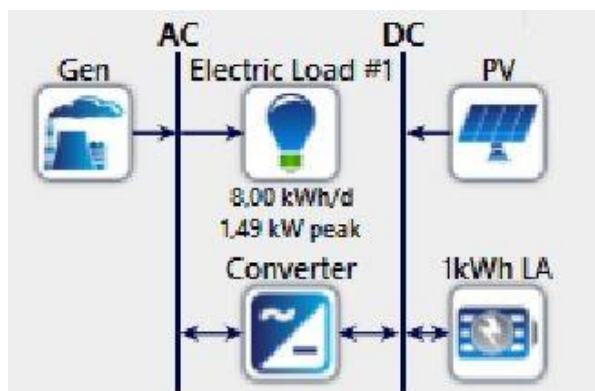
S obzirom da se 2020.godina približava, a udio obnovljivih izvora energije se sve više povećava, u izradi je i Strategija niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine, s pogledom na 2050. godinu, koja između ostalog uključuje i povećanje upotrebe FN sustava, kako on-grid, tako i off-grid. Više o Niskougljičnoj strategiji može se naći na [31].

8. Opis simulacijskog programa HOMER

HOMER (eng. *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) je računalni simulacijski program, koji pojednostavljuje optimiziranje samostalnih sustava i sustava povezanih s elektroenergetskom mrežom (sastavljena od obnovljivih i neobnovljivih izvora) u raznolikim primjenama. HOMER proračunava energetske bilance za svaku konfiguraciju sustava koja se želi razmotriti, određuje da li je konfiguracija ostvariva, odnosno, da li može udovoljiti zahtjevima korisnika, procjenjuje cijenu instaliranja, rada i održavanja sustava u životnom vijeku projekta. Troškovi obuhvaćaju cijene kao na primjer investiciju, zamjene, upravljanje i održavanje, te cijenu goriva i kamata. Nakon što simulira sve moguće konfiguracije sustava, daje se lista konfiguracija, sortiranih prema troškovima, koje se mogu iskoristiti za usporedbu izbora dizajniranih sustava [33]. Simulacije za hibridni autonomni FN sustav provedene su u programu HOMERPro i prikazane su u nastavku.

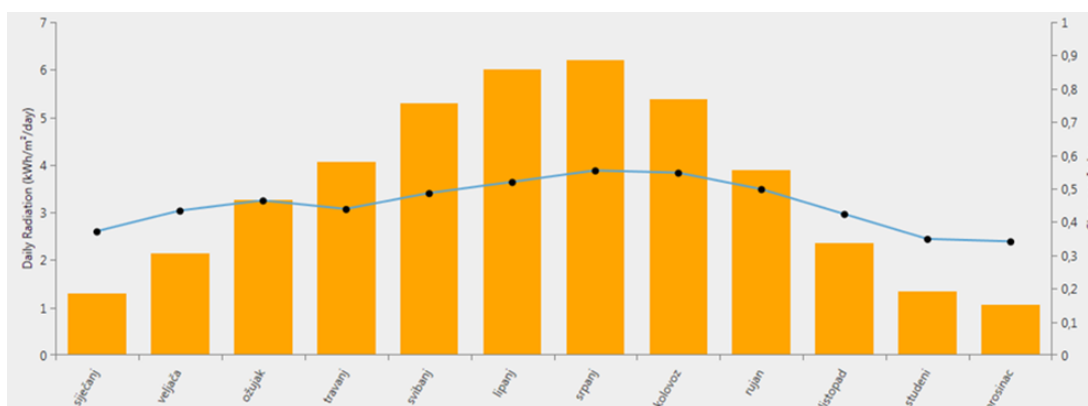
Simulacija optimizacije sustava i usporedba sa on-grid sustavom

Za provedbu simulacije sustava modeliran je solarni fotonaponski sustav za obiteljsku kuću bez priključka na elektonenergetsku mrežu (eng. *Stand-alone Power System (SAPS)*), s pomoćnim agregatom (eng. *Solar Hybrid Power System*, hibridni otočni sustav), uz pretpostavljenu srednju godišnju potrošnju električne energije od 8kWh/d. Kao početna investicija uzeta je cijena od maksimalno 55000kn, uz uvjet da je minimalno 70% udjela obnovljivog izvora u proizvodnji električne energije. Shematski prikaz sustava prikazan je slikom 10.



Slika 10. Shematski prikaz FN sustava

Odabrana mikrolokacija za simulaciju sustava je mjesto Žunići, Vinjerac sa koordinatama $44^{\circ}14'55''$ N, $15^{\circ}28'8''$ E i nadmorske visine 124m. Ozračenost na horizontalnu plohu i indeks prozirnosti prikazani su slikom 11. Rezultati dobivene simulacije prikazani su u tablici 12.



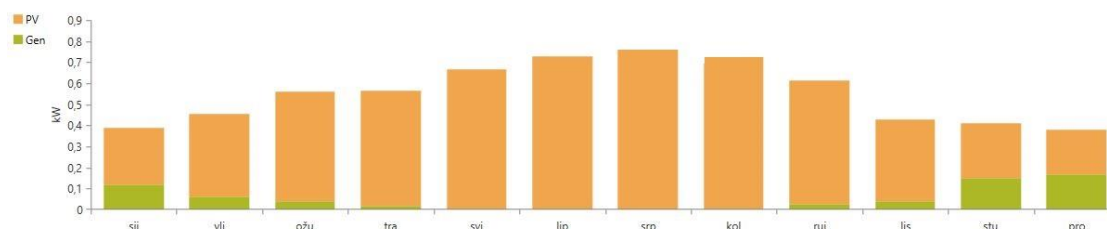
Slika 11. Ozračenost na horizontalnu plohu

Tablica 12. Rezultati simulacije optimizacije FN sustava na kućanstvo

Grad	Žunići, Vinjerac
Srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe (kWh/m ² /d)	3,52
FN paneli (instalirana snaga) (kW)	4
Pretvarač (kW)	3
Baterije (kW)	18
Diesel agregat (kW)	1,5
COE (prosječna cijena po kWh) (kn)	2,78
NPC (neto sadašnja vrijednost) (kn)	104940
Trošak pogona i održavanja sustava godišnje (Operating cost) (kn)	4197,60
Početna investicija (Initial capital) (kn)	52400
Udio iz OIE u ukupnoj proizvodnji (Renewable fraction) (%)	84,3
Manjak el. energije (Capacity shortage) (%)	15,7
FN proizvodnja (PV production) (kWh)	4420
U kojem mjesecu se najviše koristi agregat kako bi se zadovoljila potrošnja kućanstva? (slika 12.)	Prosinac
Autonomija sustava (sati)	34,2

Instalirana snaga FN panela iznosi 4kW, što znači da godišnja proizvodnja iznosi 4420kWh/god. Za pohranu dobivene energije korišten je 1kWh olovni solarni akumulator 12V, sa 18 paralelno spojenih ćelija, od čega je 11,4kWh upotrebljiv nominalni kapacitet. FN paneli ukupno proizvode 84,3% električne energije, dok se ostalih 15,7% pokriva dizel agregatorom. Na slici 12 se vidi da je najveća potreba za agregatorom u prosincu, gdje osigurava gotovo 50% energije. Procijenjena potrošnja goriva iznosi 224 L na godinu. Cijena dizela iznosi 8,51kn (prema cjeniku INA-e), što znači da godišnji trošak za dizel gorivo iznosi 1906,24kn u što se još trebaju uračunati i troškovi dopreme goriva do lokacije. Za usporedbu, kada bi se električna energija dobivala isključivo iz dizel generatora, potrošnja goriva bi iznosila 0,487L/kWh,

odnosno 2152,5 L na godinu, a godišnji trošak bi tada iznosio 18317,76kn za dizel, te dodatne troškove za dopremu goriva do lokacije.

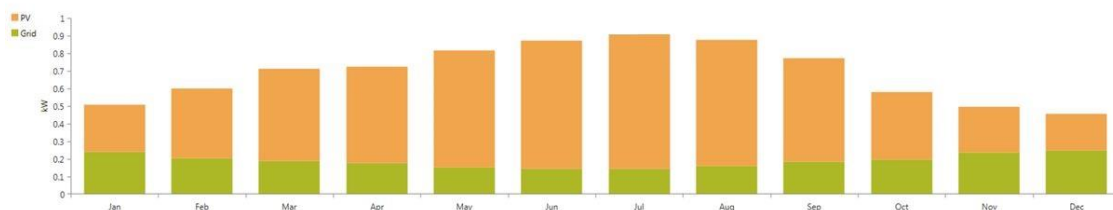


Slika 12. Prosječna mjesečna proizvodnja električne energije pomoću FN panela i generatora

Investicijski trošak podrazumijeva troškove nabave i montiranja svih komponenti sustava, a iznosi 52400kn. Uz pretpostavljen životni vijek od 25 godina, trošak životnog ciklusa sustava (*NPC*) iznosi 104940kn, a uključuje troškove rada i održavanja sustava, zamjenu komponenata, troškove goriva i ostale troškove poput cijene CO₂ na tržištu. Dakle, za autonomni FN sustav ukupni trošak iznosi 157340kn (investicijski trošak i *NPC* zajedno sa cijenom goriva za generator). Ako se za isto razdoblje od 25 godina električna energija proizvede samo iz dizel generatora, investicijski trošak bi iznosio između 2000-20000kn za generator, te trošak dizela 457944kn u što se još trebaju uračunati i troškovi dopreme goriva do lokacije. Prema svemu navedenom, instalacija autonomnog FN sustava je tri puta isplativija od korištenja samo dizel generatora.

Ako se pretpostavi da je ovaj sustav priključen na elektroenergetsku mrežu, dobit ćemo manje troškove za održavanje sustava i mogućnosti prodaje viška električne energije natrag u mrežu. Za dani primjer, 1657kWh energije se kupuje iz mreže za potrebe kada se ne proizvodi dovoljno energije, a 2927kWh energije je višak za vrijeme najsunčanijih dana i može se prodati u mrežu. Ako je sustav priključen na mrežu, sva potrebna energija se nadoknađuje iz mreže, što znači da nema potrebe za generatorom,

ali ni akumulatorom ako se FN paneli koriste samo za vrijeme sunčanih dana, a kroz noć se struja crpi iz mreže. Prikaz proizvodnje energije pomoću FN panela i one iz elektroenergetske mreže dan je na slici 13.



Slika 13. Prosječna mjesečna proizvodnja električne energije pomoću FN panela i elektroenergetske mreže

Treba napomenuti da su rezultati dobiveni programom informativnog karaktera i prikazuju približne vrijednosti. Iako uzima u obzir početni kapital, željeni udio korištenih obnovljivih izvora energije i srednju godišnju potrošnju električne energije, ne računa sa stvarnim podacima i potrebama korisnika. Zbog toga vrijednosti koje su dobivene mogu varirati.

9. Primjer postavljenih FN sustava u ruralnim područjima Hrvatske

Program ujedinjenih naroda za razvoj u Hrvatskoj (UNDP), u suradnji s Fondom za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, Visokom školom za informacijske tehnologije i uz podršku županija i općina provodi projekt Ruralne elektrifikacije. Cilj projekta je osigurati električnu energiju obiteljima koje žive u udaljenim ruralnim područjima na isplativ i ekološki prihvatljiv način, te stvoriti preduvjete za daljnji razvoj „zelenih“ ruralnih tvrtki uz smanjenje emisije stakleničkih plinova, prilagodbi klimatskim promjenama te očuvanju i zaštiti prirode. Do kraja 2016.godine je na krovovima (ili u dvorištima) kuća postavljeno 45 solarnih sustava za kućanstva bez pristupa mreži. Prije instalacije FN sustava, obitelji su živjele bez električne energije ili one dobivene samo pomoću dizelskih agregata. Postavljanjem takvih sustava, korisnici su dobili pristup električnoj energiji, a lokalno stanovništvo je dobilo mogućnost zapošljavanja na montaži sustava. Rezultati ovog projekta pokazali su kako je elektrifikacija ruralnih područja korištenjem solarnih sustava ekonomski, društveno i ekološki povoljan. Cijena instalacije je tri puta manja nego što bi bila cijena uobičajenog ponovnog priključka na elektroenergetsku mrežu [34].



Slika 14. Primjer postavljenog FN sustava [2]

10. Zaključak

Autonomni fotonaponski sustavi korišteni su za napajanje u područjima bez pristupa na javnu elektroenergetsku mrežu i osiguravanje besprekidnog napajanja u umreženim sustavima. Projektiranje otočnog fotonaponskog sustava zahtjeva dobro poznavanje fotonaponske tehnologije, klimatskih uvjeta lokacije i želja korisnika. Glavni problem kod optimiziranja otočnih fotonaponskih sustava u Hrvatskoj su razlike u ozračenosti između zimskih i ljetnih mjeseci, što poskupljuje sam sustav. Za postizanje autonomije potrebno je koristiti hibridni fotonaponski sustav, odnosno kombinaciju fotonapona i generatora. Time dobivamo optimalno korištenje akumulatorske banke, i generatora pri čemu se ujedno smanjuje i ukupna početna investicija. Unatoč povećanju proizvodnje, fotonaponska tehnologija nije toliko zastupljena u odnosu na konvencionalne izvore energije. Ekonomski gledano, fotonaponski sustavi spojeni direktno i korišteni na licu mjesta nisu toliko skupi kao sustavi sa baterijama u kojima se mora voditi računa i o spremanju energije, no zasigurno su jeftiniji od gradnje novih vodova i transformatora, ili prijevoza dizela za agregate.

U stvarnom autonomnom FN sustavu obnovljivi izvori energije i baterije pokrivaju manja opterećenja (rasvjeta, TV, računalo, i sl.), dok je agregat priključen na sabirnice većih potrošača (pumpa za vodu, električni bojler). Računalni simulacijski program *HOMER* korišten je za prikaz ovisnosti sustava o dizel agregatu i akumulatorima, kao i za prikaz ukupnog troška kroz životni vijek sustava. Stvarno ponašanje sustava je moguće predvidjeti i matematički modelirati. Može se reći kako je *HOMER* koristan program kod ovakvog tipa modeliranja sustava jer na temelju nekoliko poznatih podataka može prikazati rezultate i pružiti orijentaciju za daljnje analiziranje nekog projekta.

Za mjesta udaljena od elektroenergetske mreže, kao i za plovila, mobilne kuće, te općenito neka manja kućanstva, odabir autonomnog FN sustava daje mogućnost korištenja električne energije više no što bi to pružio samo dizel agregat. Takvi sustavi zahtijevaju određenu brigu kako bi se investicija isplatila. To podrazumijeva prilagodbu u pogledu korištenja električne energije, upotrebi energetske efikasne uređaja, žarulja i drugih trošila. Kako bi se sustav očuvao, potrebno je pripaziti da se akumulator nikada ne isprazni više od dopuštene vrijednosti. Električna grijala se umjesto energijom iz FN sustava mogu opskrbljivati toplom vodom preko solarnih kolektora, a orijentacijom objekta prema jugu može se pridonijeti zagrijavanju prostora. Ovakvi sustavi su skupi, ali daju potpunu neovisnost o javnom energetsom sustavu i pridonose očuvanju okoliša. Za veća kućanstva, proizvodne pogone i mjesta na kojima postoji mrežni sustav, isplativije je koristiti energiju dobivenu pomoću FN panela sa korištenjem energije iz mreže. Također je potrebno uzeti u obzir zbrinjavanje fotonaponskih sustava i njihovih dijelova nakon isteka roka trajanja, kako bi se adekvatno mogli riješiti te vrste otpada. Stoga je potrebno odabrati proizvođača koji ima riješen taj sustav ili eventualno pronaći adekvatno reciklažno dvorište.

Više o dimenzioniranju autonomnih FN sustava u ruralnim područjima i plovilima može se pronaći u [36, 40, 41]. Detaljniji račun optimiziranja sustava pomoću već spomenutih potrebnih parametara prikazan je u [35, 38, 39], a primjer upotrebe generatora na biomasu umjesto dizel generatora dan je u [37].

11. Literatura

- [1] Ministarstvo poljoprivrede, Uprava za upravljanje EU fondom za ruralni razvoj, EU i međunarodnu suradnju, Program ruralnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje 2014. – 2020. , str. 13
Dostupno na: <http://www.mps.hr/ipard/default.aspx?id=129>
[Datum pristupa: 16.03.2017.]

- [2] Solvis, Sunčevo zračenje na području Hrvatske
Dostupno na: <http://www.solvis.hr/hr/advice/suncevo-zracenje-na-podrucju-hrvatske/>
[Datum pristupa: 16.03.2017.]

- [3] Šimić, Z., Karakteriziranje fotonaponskog potencijala Hrvatske, SUMA; 2015 (3), str. 46-48

- [4] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)
Dostupno na: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
[Datum pristupa: 16.03.2017.]

- [5] Program Ujedinjenih naroda za razvoj u Hrvatskoj Elektrifikacija ruralnih krajeva korištenjem obnovljivih izvora energije; Metodologija za optimizaciju sustava
Dostupno na:
<http://www.hr.undp.org/content/dam/croatia/docs/Research%20and%20publications/Metodologija%20za%20modeliranje%20optimalnog%20tehnickog%20sustava.pdf>
[Datum pristupa: 11.04.2017.]

- [6] Sustainable Energy Industry Association of the Pacific, Pacific Power Association; Off grid PV power systems-system design guidelines, 2012 (1)
Dostupno na:
https://www.irena.org/DocumentDownloads/events/2013/March/Palau/8_OffGrid_DesignGuidelines.pdf
[Datum pristupa: 06.05.2017.]
- [7] Centar energije d.o.o., Projektiranje autonomnih (otočnih) fotonaponskih sustava
Dostupno na: <http://www.centar-energije.com/projektiranje-autonomnih-otocnih-fotonaponskih-sustava> [Datum pristupa: 23.04.2017.]
- [8] Labudović, B. Obnovljivi izvori energije, Zagreb: Energetika marketing d.d; 2002
- [9] Centar energije d.o.o., Načini aktivnog i pasivnog korištenja Sunčeve energije
Dostupno na: <http://www.centar-energije.com/nacini-aktivnog-i-pasivnog-koristenja-energije-sunca>
[Datum pristupa: 23.04.2017.]
- [10] Solar projekt Hrvatska, Otočni (stand alone) FN sustavi
Dostupno na: <http://solarprojekt.hr/usluge/fotonaponski-sustavi/otocni-fn-sustavi-2/>
[Datum pristupa: 28.03.2017.]
- [11] Majdandžić, Lj. Fotonaponski sustavi - priručnik
Dostupno na: http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf
[Datum pristupa: 01.03.2017.]

- [12] Cvrk, I. Optimiranje korištenja solarne energije fotonaponskom pretvorbom; Diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva; 2011.
Dostupno na: http://www.ieee.hr/_download/repository/DR08ICvrk.pdf/
[Datum pristupa: 28.03.2017.]
- [13] Schrack technik; Osnove o fotonaponskoj ćeliji i fotonaponskom modulu
Dostupno na: <https://www.schrack.hr/alternativni-izvori/photovoltaik/osnove-ofn-celiji-i-modulu/>
[Datum pristupa: 17.05.2017.]
- [14] http://www.bazgin.hr/autonomni_otocni_fotonaponski_solarni_sistemi.html
[Datum pristupa: 01.03.2017.]
- [15] Zdenković, J. Prikaz slučaja projektiranja otočnog fotonaponskog sustava; SUMA, 2015; (3), str. 32-41
- [16] Mandelli, S, Brivio, C., Colombo, E, Merlo, M. Effect of load profile uncertainty on the optimum sizing of off-grid PV systems for rural electrification ; Sustainable Energy Technologies and Assessments; Politecnico di Milano, Department of Energy, 2016 (18), p.34-47
- [17] <http://www.affordable-solar.com/solar-tools/off-grid-estimator/>
[Datum pristupa: 16.05.2017.]
- [18] Solar direct, Solar Electric System Sizing
<http://solardirect.com/pv/systems/gts/gts-sizing-battery.html>
[Datum pristupa: 16.05.2017.]

- [19] Oreški, G. Otočni fotonaponski sustav; Diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva; 2008.
Dostupno na: http://www.ieee.hr/_download/repository/DR08GOreski.pdf
[Datum pristupa: 07.03.2017.]
- [20] Basics about PV off-grid systems,
Dostupno na: <http://pvshop.eu/offgrid>
[Datum pristupa: 08.03.2017.]
- [21] Schrack technik, Baterija u otočnom fotonaponskom sustavu
Dostupno na: <http://www.schrack.hr/alternativni-izvori/baterije/>
[Datum pristupa: 09.06.2017.]
- [22] Off-grid system sizing,
Dostupno na: <http://www.affordable-solar.com/learning-center/solar-basics/off-grid-system-sizing/>
[Datum pristupa: 16.05.2017.]
- [23] McEvoy , A, Markvart, T, Castaner, L. Practical Handbook of Photovoltaics, Fundamentals and Applications; Review of System Design and Sizing Tools Santiago Silvestre; Elsevier, 2012, ch. IIA-4, p. 673-692
- [24] DIY Solar Jon, How to size your Off-grid Solar batteries
Dostupno na: <http://www.instructables.com/id/How-to-Size-Your-Off-Grid-Solar-Batteries-1/>
[Datum pristupa: 09.06.2017.]
- [25] Merlo, M, Colombo, E, Brivio, C, Mandelli, S. A sizing methodology based on Levelized Cost of Supplied and Lost, Energy for off-grid rural electrification, Renewable Energy An International Journal, 2016. (89), p.475-488

- [26] Larsen, K. End-of-life PV: then what? - Recycling solar PV panels, 2009
Dostupno na: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/end-of-life-pv-then-what-recycling-solar-pv-panels/>
[Datum pristupa: 08.04.2017.]
- [27] Lozanova, S. Are Solar panels recyclable?, 2017
Dostupno na: <http://earth911.com/eco-tech/recycle-solar-panels/>
[Datum pristupa: 08.04.2017.]
- [28] <http://www.pvcycle.org/>
[Datum pristupa: 08.04.2017.]
- [29] Zelenko, I., Prvih 1000 tona istrošenih FN modula prikupljeno za recikliranje, 2011
Dostupno na: <http://www.obnovljivi.com/svijet/860-prvih-1000-tona-istrosenih-fn-modula-prikupljeno-za-recikliranje>
[Datum pristupa: 08.04.2017.]
- [30] SUNGEN Power GmbH, Zašto tankoslojni a-Si moduli?, 2013
Dostupno na:
<http://www.zelenaenergija.org/clanak/zasto-tankoslojni-a-si-moduli/5277>
[Datum pristupa: 07.03.2017.]
- [31] Jelavić, V, Delija Ružić, V, Herenčić, L, Tomšić, Ž, Rajš, I, Pukšec, T, Saftić, B, Golubić, J. Projekt izrade stručnih podloga za Strategiju niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine, s pogledom na 2050. godinu, Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, 2015
Dostupno na:
http://www.mzoip.hr/doc/pristup_izradi_i_djelomicni_rezultati_u_podrucju_energetike.pdf
[Datum pristupa: 09.06.2017.]

- [32] <https://www.enu.hr/ee-u-hrvatskoj>
[Datum pristupa: 15.03.2017.]

- [33] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/HOMER,_upute.pdf
[Datum pristupa: 04.04.2017.]

- [34] <http://www.hr.undp.org/content/croatia/hr/home/>
[Datum pristupa: 11.04.2017.]

- [35] Mohammadi, M. Ga-based optimal sizing of PV under pay as bid and uniform power market pricing considering uncertainty of solar radiation, Technical Gazette 20, 2013 (3), p.511-518

- [36] Castaner, L, Bermejo, S, Markvart, T, Fragaki, K., Practical Handbook of Photovoltaics; Fundamentals and Application Energy Balance in Stand- Alone Systems, Elsevier, 2012, ch. IIA-3, p. 659-670

- [37] Rajbongshi, R, Borgohain, D, Mahapatra, S., Energy; Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER, 2017 (126), p.461-474

- [38] Zubi, G, Dufo-Lopez, R, Pasaoglu, G, Pardo, N. Applied Energy; Techno-economic assessment of an off-grid PV system for developing regions to provide electricity for basic domestic needs: A 2020-2040 scenario, 2016, (176), p.309- 319

- [39] Petrović, I, Šegrt, I, Petrović, Z. Technical journal; Quality of basic parameters calculation for photovoltaic modul, Electrical model using module nominal dana, 2015 (9), p.47-50

- [40] Petrović, I, Begović, D, Vrhovski, Z. Tehnički glasnik; Projektiranje fotonaponskih sustava za potrošače u otočnom radu, 2016, (10), str. 16-21

- [41] Moustafa, M.M., El-bokl, Essam E., Shipbuilding; Solar energy for river Nile cruisers, 2014 (65/2)

- [42] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/average-solar-radiation>
[Datum pristupa: 25.08.2017.]

12. Popis kratica i pojmova

FN	fotonaponski
PV	fotonaponski (eng. <i>photovoltaic</i>)
NN	nisko naponski vod
SN	srednja naponska mreža- sastavljena od više NN voda
DOD	dubina pražnjenja (eng. <i>depth of discharge</i>), označen i kao C
C	dubina pražnjenja
DC	istosmjerna struja (eng. <i>direct current</i>)
AC	neizmjenična struja (eng. <i>alternate current</i>)
PSH	broj sunčanih sati (eng. <i>daily Peak Sun Hours</i>)
SF	sigurnosni faktor
NPC	trošak životnog ciklusa sustava (eng. <i>net present cost</i>)
LLP	gubitak opterećenja (eng. <i>loss of load probability</i>)
SOC	stanje punjenja baterije (eng. <i>state of charge</i>)
CO ₂	ugljikov dioksid
EPR	produžena odgovornost proizvođača (eng. <i>Extended Producer Responsibility</i>)
WEEE	otpadna električna i elektronička oprema (eng. <i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>)
RoHS	ograničenje opasnih tvari (eng. <i>Restriction of Hazardous Substances</i>)
EFTA	Europsko udruženje slobodne trgovine (eng. <i>The European free trade association</i>)
HOMER	model hibridnog optimiziranja električnih obnovljivih izvora (eng. <i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewables</i>)

13. Popis oznaka i mjernih jedinica

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
P	W	snaga
U	V	napon
PSH	kWp ili kWh/m ²	broj sunčanih sati
h_{ij}	h	ukupno vrijeme funkcioniranja
d_{ij}	h	radni ciklus / neprekidno vrijeme rada uređaja kada je uključen
i	-	vrsta električnih uređaja
J	-	korisnička klasa
N_j	1	broj korisnika unutar pojedine korisničke klase
n_{ij}	1	broj uređaja unutar svake klase
P_{ij}	W	snaga uređaja
η_{ij}	1	koeficijent od maksimalne do srednje snage
E_V	Wh	energija potrebna u jednom danu
U_S	V	napon baterije
$tz (DOD)$	1	koeficijent dubine pražnjenja akumulatora
η_{AH}	1	stupanj korisnog djelovanja punjenja
n_A	d	trajanje autonomije
h_B	1	koeficijent korištenja sustava
n_E	d	potpuni oporavak sustava

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
E_D	Wh	dnevna potrošnja (ili godišnja, ovisno o načinu izračuna)
Q_D	Ah	dnevna potrošnja
K_N	Ah	kapacitet idealnog akumulatora
K	Ah	maksimalni kapacitet realnog akumulatora
Q_L	Ah	dnevno punjenje akumulatora
C_n	Ah	kapacitet akumulatora
C_s	d	broj dana autonomije
$L, L_{prim,sr}$	kWh/dan	srednje dnevno opterećenje
DOD_{max}	%	maksimalna dopuštena vrijednost dubine pražnjenja akumulatora
N_{bat}	1	broj potrebnih povezanih baterijskih jedinica
A_{bat}	h	predviđena autonomija baterije
V_n	V	nazivni napon baterijskog sloga
Q_n	Ah	nazivni kapacitet baterijske jedinice
P_0	1	omjer broja sunčanih sati i srednjeg dnevnog opterećenja
N	1	broj potrebnih modula

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
P_{mod}, P_M	W	snaga proizvedena pomoću jednog modula unutar standarnih uvjeta
N_s	1	broj serijski spojenih modula
N_p	1	broj paralelno spojenih modula
V_{DC}	V	nazivni napon modula
V_{bat}	V	napon baterije
SF	1	sigurnosni faktor
I_{DC}	A	jakost istosmjernje struje
I_{SC}	A	struja kratkog spoja jednog modula
E_{DC-S}	Wh	energija iz sustava FN modula
Y_F	Wh/Wp	energija iz 1Wp
Q_s	Ah	energija iz sustava FN modula
U_s	V	napon baterije
U_D	Wh	dnevna potrošnja
E_H	Wh	energija iz pomoćnog izvora (agregata)
Q_H	Ah	energija iz pomoćnog izvora (agregata)
n_F	1	faktor veličine sustava
Q_{FN}	Ah	energija potrebna iz FN modula
E_d	kWh	očekivana dnevna proizvodnja za sustav
E_m	kWh	očekivana mjesečna proizvodnja za sustav

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
H_d	kWh/m ²	prosječno dnevno osunčanje sustava primljeno po kvadratnom metru modula
H_m	kWh/m ²	prosječno mjesečno osunčanje sustava primljeno po kvadratnom metru modula
$LL(t)$	kWh/dan	gubitak opterećenja u određenom vremenu
NPC	€	trošak životnog ciklusa sustava
y	god	broj godina
$Inv(y)$	€	ulog i troškovi zamjene komponente sustava (za određen broj godina)
$O\&M(y)$	€	troškovi rada i održavanja (za određen broj godina)
$(1+r)^y$	%	kamatna stopa

14. Popis slika

Slika 1. P-U krivulja FN panela u ovisnosti o ozračenosti i temperaturi

Slika 2. a) Solarni potencijal za proizvodnju električne energije na području Republike Hrvatske; b) srednja godišnja ozračenost horizontalne ravnine i solarni potencijal

Slika 3. Samostalni FN sustav za istosmjerna i izmjenična trošila

Slika 4. Hibridni FN sustav za istosmjerna i izmjenična trošila

Slika 5. Konfiguracija sustava bez bidirekcijskog pretvarača

Slika 6. Konfiguracija sustava s bidirekcijskim pretvaračem

Slika 7. Konfiguracija sustava s mrežnim izmjenjivačem

Slika 8. Preporučeni napon sustava u ovisnosti o dnevnom opterećenju

Slika 9. Ovisnost kapaciteta o struji pražnjenja i temperaturi

Slika 10. Shematski prikaz FN sustava

Slika 11. Ozračenost na horizontalnu plohu

Slika 12. Prosječna mjesečna proizvodnja električne energije pomoću FN panela i generatora

Slika 13. Prosječna mjesečna proizvodnja električne energije pomoću FN panela i elektroenergetske mreže

Slika 14. Primjer postavljenog FN sustava

15. Popis tablica

Tablica 1. Popis parametara koji omogućuju dimenzioniranje električnih potreba korisnika

Tablica 2. Primjer definiranja potrebne energije tijekom dana

Tablica 3. Osnovni parametri sustava

Tablica 4. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja za veći, srednji i manji sustav

Tablica 5. Trajanje autonomije za različite FN sustave

Tablica 6. Karakteristični naponi GEL VRLA olovnih solarnih baterija

Tablica 7. Proračun kapaciteta akumulatora i dnevnog punjenja

Tablica 8. Proračun broja potrebnih modula

Tablica 9. Očekivana dnevna proizvodnja energije iz 1 kWp FN modula za lokaciju Žunići, Vinjerac (44°14'55" N, 15°28'8" E, 124nmv) prikazano po mjesecima, prema podacima iz

Tablica 10. Orijentacijska cijena komponenata autonomnog FN sustava

Tablica 11. Cijena komponenata autonomnog FN sustava korištenih primjera

Tablica 12. Rezultati simulacije optimizacije FN sustava na kućanstvo